

令和4年度防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

成果報告書

海中移動体へ大電力を送る革新的
ワイヤレス給電に関する研究

令和5年5月
パナソニック株式会社

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、パナソニック（株）が実施した令和4年度「海中移動体へ大電力を送る革新的ワイヤレス給電に関する研究」の成果を取りまとめたものです。

<目次>

内容

1. 委託業務の目的	21
1.1. 研究課題の最終目標	21
1.2. 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題	22
1.3. 要素課題に対する実施項目及び体制	23
2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度	27
3. 委託業務における研究の方法及び成果	28
3.1. 強電磁界に対する海水物性の解明	28
3.1.1. 運動方程式と粒子シミュレーション	28
3.1.2. 古典的緩和時間近似におけるイオンの集団的挙動	31
3.1.3. 評価指標	35
3.1.4. 磁場印加時の海水物性における電場応答の寄与	36
3.1.5. シミュレーションにおける密度の温度依存性	39
3.1.6. 温度の電磁場周波数依存性と誘電損失	41
3.1.7. 電磁場印加によるエネルギー移動率の変化	44
3.1.8. 電磁場印加によるエネルギー吸収過程の検証	47
3.1.9. 複素誘電率計測による海水の状態の把握手法	52
3.1.9.1. 複素誘電率計測原理	52
3.1.9.2. 外部から電磁界を印加した場合の複素誘電率の変化	53
3.1.9.3. 並列等価回路の許容範囲	54
3.1.9.4. フリンジング効果	55
3.1.10. 複素誘電率計測ならびにポテンシャル計測	56
3.1.10.1. 複素誘電率計測装置	56
3.1.10.2. 海中磁界ならびにポテンシャル計測装置	58
3.1.10.3. 電気化学計測装置	59
3.1.10.4. 電気二重層が複素誘電率に与える影響	61
3.1.10.4.1. デスクトップ試験	62
3.1.10.4.2. 外場の無い場合の複素誘電率	63
3.1.10.4.3. 外場を印加した海水	64
3.1.10.4.4. 電気二重層の効果の補正	66
3.1.10.5. ハーフサイズモデルを用いた大強度磁界の印加試験	68
3.1.10.5.1. 複素誘電率の観測による海水の状態の変化の検討	68
3.1.10.5.2. 海水に印加されている磁場と誘起された海水ポテンシャルの観測	71
3.1.10.6. 強電磁界に対する海水物性の解明のまとめ	72
3.2. ワイヤレス給電システムを構成する各要素部の損失メカニズムの解明	75
3.2.1. 電磁界シミュレーションにおける解析条件の最適パラメータの検討	75

3.2.1.1. 解析空間サイズの検討	75
3.2.1.1.1. 電磁界シミュレーションモデル	75
3.2.1.1.2. 解析空間サイズの評価結果	77
3.2.1.2. メッシュサイズの検討	77
3.2.1.3. 海中での 1/10 縮小コイルモデルでの電磁界強度と損失	79
3.2.1.3.1. 電磁界シミュレーションモデル	79
3.2.1.3.2. 電磁界の強度分布	80
3.2.1.3.3. 1/10 モデルを海中に設置した場合の損失の計算	82
3.2.2. 損失媒質中での複素ポインティングベクトル理論と計算結果の比較	84
3.2.2.1. 損失媒質が充満した閉空間の複素ポインティングベクトル	84
3.2.2.2. 海水の導電率と複素誘電率の取り扱いについて	86
3.2.2.3. 電磁界シミュレーションで解析モデルに入射する電流	87
3.2.2.4. 複素ポインティングベクトルと回路インピーダンスの関係	89
3.2.2.5. 海水中での直径 1.0m コイルを用いた複素ポインティングベクトル検討	91
3.2.2.5.1. モデリング	91
3.2.2.5.2. エネルギーの計算	94
3.2.2.5.3. コイル近傍に集中する電磁界による損失	98
3.2.2.5.4. 解析空間による複素ポインティングベクトルの変化	99
3.2.2.6. 海水中の存在する電力送受コイルの損失計算	100
3.2.2.6.1. 解析モデル	101
3.2.2.6.2. 整合回路	102
3.2.2.6.3. 伝送特性	102
3.2.2.6.4. 複素ポインティングベクトルによる解析空間の各要素の損失の計算	103
3.2.3. 電磁界シミュレーションの精度向上の検討	105
3.2.3.1. 解析領域とメッシュサイズの最適化による解析精度向上	105
3.2.3.1.1. 電磁界シミュレーションの最適なメッシュサイズの検討	105
3.2.3.2. コイルサイズが 1/2 モデルを用いた各要素の損失と損失改善の指針	108
3.2.3.2.1. モデリングについて	108
3.2.3.2.2. 整合回路の検討	110
3.2.3.2.3. 電磁界分布の計算	112
3.2.3.2.4. 損失計算	113
A 1/10 モデルを用いた周波数を変えた場合の損失と損失改善の指針	115
B 解析モデル	116
C 解析結果	118
D まとめ：コイル近傍領域における損失メカニズム	129
3.2.3.2.5. 損失の軽減	129
A 空気層追加のモデリング	130
B 空気層を追加した計算結果	130

C フェライト追加のモデリング	134
D フェライト追加の計算結果	135
3.2.4. 損失計算の導出	140
3.2.4.1. 閉空間内の電力とエネルギー	140
3.2.4.2. Time-harmonic におけるポインティングベクトル	143
3.2.4.3. 各損失について	145
3.2.4.4. 各要素部における電磁波の伝搬エネルギーの損失計算	146
3.2.4.4.1. 簡易モデルと詳細モデル	146
3.2.5. 解析領域の拡大に伴う解析手法の調査・選定	150
3.2.5.1. 解析モデル	151
3.2.5.1.1. インダクタンス値、抵抗値の比較	152
3.2.5.1.2. メッシュサイズ、計算時間、メモリの比較	153
3.2.5.2. 他の解析手法の調査	154
3.2.5.2.1. 既存シミュレータの課題	154
3.2.5.2.2. 近似解法について	154
A 自己電流損抵抗	154
B 複素透磁率	158
C 2m コイル特性	160
3.2.6. 実機同等サイズのコイルモデルにおける電磁界シミュレーションの設定諸条件	168
3.2.6.1. 送電受電コイルのサイズ可変範囲	170
3.2.7. 電磁界シミュレーションでの最大有能電力効率の導出	173
3.2.8. 最大有能電力効率の広帯域特性	175
3.2.9. 海中給電における電力損失の把握	177
3.2.10. 損失電力発生箇所の確認	180
3.2.11. 海中給電装置近傍物体の充電効率への影響	182
3.2.11.1. 海中給電装置近傍の 1 面に物体を配置した場合	182
3.2.11.2. 海中給電装置近傍の 5 面に物体を配置した場合	185
3.2.12. AUV の配置位置（回転）条件による電力伝送効率	190
3.2.13. AUV の直径条件による電力伝送効率	192
3.3. kW 級ポジションフリーワイヤレス給電システムの確立	197
3.3.1. 10 分の 1 モデルを用いた実験	197
3.3.1.1. 10 分の 1 モデルの作製	197
3.3.1.1.1. 磁性材料の選定	197
3.3.1.1.2. 送電コイルと受電コイル	198
3.3.1.2. 実験システム	201
3.3.1.3. 10 分の 1 モデルの測定結果	201
3.3.1.3.1. コイル特性の測定方法	201

3.3.1.3.2. 送電コイルと受電コイルのコイル特性	202
3.3.1.3.3. kQ 積を用いた伝送効率の計算	204
3.3.1.3.4. 整合回路の設計	205
3.3.1.3.5. 伝送効率の確認とシミュレーション比較	206
3.3.1.3.6. 伝送効率への媒質の影響確認	207
3.3.1.3.7. 伝送効率に対するフェライトの効果	208
3.3.1.3.8. 電力を印加した場合の伝送効率	208
3.3.2. 新 10 分の 1 モデルを用いた実験	209
3.3.2.1. 耐圧容器仕様変更の影響について	210
3.3.2.2. フェライトの選定	210
3.3.2.3. コイル巻き数の検討	212
3.3.3. 電線材の選定	214
3.3.4. コンデンサ仕様の検討	215
3.3.5. 2 分の 1 モデルを用いた実験	217
3.3.5.1. 2 分の 1 モデルの作製	218
3.3.5.1.1. 送電コイル	218
3.3.5.1.2. 受電コイル	220
3.3.5.2. 実験システム	222
3.3.5.3. 2 分の 1 モデルの測定結果	224
3.3.5.3.1. 最大有能電力効率	224
3.3.5.3.2. 整合回路	224
3.3.5.3.3. 電力を印加するための実験システム構成	226
3.3.5.3.4. 電力伝送効率	227
3.3.5.3.5. 磁気飽和実験	228
3.3.6. 実寸モデルを用いた実験	230
3.3.6.1. 磁気飽和対策検討	230
3.3.6.2. 実寸モデルの作製	232
3.3.6.2.1. 送電コイル (充電スタンド)	232
3.3.6.2.2. 受電コイル (模擬 AUV)	233
3.3.6.3. 磁気飽和の確認	235
3.3.6.4. 実験システム	239
3.3.6.5. 実寸モデルの測定結果	240
3.3.6.5.1. コイル特性と最大有能電力効率	240
3.3.6.5.2. 整合状態の確認	244
3.3.6.5.3. 電力伝送効率	245
3.3.6.5.4. 部品組込の影響確認	247
3.3.6.6. 伝搬エネルギー損失に対する考察	249
3.3.7. AUV を用いた実験	249

3.3.7.1. AUV の金属部材の影響確認.....	249
3.3.7.2. 1 kW 用給電システム	252
3.3.7.2.1. 1 kW 給電用の周波数検討.....	253
3.3.7.2.2. 1 kW 給電用のコンデンサ作製.....	253
3.3.7.2.3. 800 Hz の整合確認結果.....	255
3.3.7.3. 3 kW 用給電システム	256
3.3.7.3.1. 3 kW 給電用のコンデンサ作製.....	257
3.3.7.3.2. 1.5 kHz の整合確認結果.....	258
3.3.7.4. 給電中の振動とその対策.....	259
3.4. 海中で運用可能な AUV とポジションフリーワイヤレス給電システムの実証実験... 260	
3.4.1. kW 級電力伝送のための送電側装置及び受電側装置の確立	260
3.4.1.1. 実験用電源装置（当構成検討）	260
3.4.1.1.1. 全体構成.....	261
3.4.1.1.2. SiC 高周波インバータ装置仕様.....	261
3.4.1.1.3. SiC 高周波インバータ装置の内部構成.....	263
3.4.1.1.4. SiC 高周波インバータ動作説明.....	264
3.4.1.1.5. SiC モジュール仕様.....	264
3.4.1.1.6. 制御回路.....	265
3.4.1.1.7. 受電側整流装置.....	265
3.4.1.1.8. 送電ユニット、受電ユニット間の通信仕様	266
3.4.1.2. SiC インバータ送電装置による電力送信の検討	268
3.4.1.2.1. SiC インバータ送電装置について	268
3.4.1.2.2. インバータによる電力送信試験.....	268
A 測定系	268
B 実験結果.....	269
C インバータによる電力送信課題の対応.....	270
D インバータ送電装置のフィルタ設計についての論理的考察.....	275
3.4.1.3. 環境影響試験での送受電装置.....	277
3.4.1.3.1. 環境影響試験での送電装置.....	277
3.4.1.3.2. オシレータ+AC パワーアンプ	277
3.4.1.3.3. プログラマブル AC 電源.....	278
3.4.1.3.4. 環境影響試験での受電装置.....	279
A 整流器試作 No.1.....	279
B 整流器試作 No.2.....	281
3.4.1.4. 受電装置(1 次試作・評価)	282
3.4.1.4.1. 充電装置構成.....	283
A DC/DC 電源の多段接続.....	283
B 充電制御部構成	285

C 回路図およびボード接続図.....	285
D 動作フローチャート.....	287
3.4.1.4.2. 充電特性試験.....	288
A 充電電流の振動.....	288
B 充電電流の振動の改善.....	289
C CC-CV 充電の実測.....	290
D 1次試作の課題と2次試作への対応.....	291
3.4.1.5. 送受電装置（2次試作・評価）.....	292
3.4.1.5.1. 送電装置.....	292
3.4.1.5.2. 整流器.....	292
A 温度上昇抑制効果確認.....	292
B ヒートシンク用電源の追加.....	293
3.4.1.5.3. 充電装置.....	294
A 仕様.....	295
B 構成.....	296
C 充電アルゴリズム.....	297
D ADC および DAC 特性.....	298
E シリアル制御の改善.....	299
3.4.1.5.4. 充電実験.....	300
A 空気中実寸モデル実験(1kHz 整合).....	300
B 海水実寸モデル実験(1.5kHz 整合).....	304
3.4.1.5.5. 充電時の発熱影響予測.....	308
A 損失および発熱条件.....	308
B 温度上昇シミュレーション結果.....	310
3.4.1.6. 送受電装置全体のシステム設計（3次試作・評価）.....	312
3.4.1.6.1. 全体構成.....	312
A 有線（光ケーブル）系接続.....	312
B 海中通信接続系.....	312
3.4.1.6.2. 受電装置.....	313
A 全体構成および写真.....	313
B メイン基板および拡張 I/F 基板の製作とプリント基板化.....	314
C マイコン(CPU)高性能化対応と I/F 拡張.....	318
3.4.1.6.3. 急速充電対応電池.....	330
3.4.1.6.4. 送電制御システム.....	337
A 送電制御システム.....	337
3.4.1.6.5. 空間での予備実験.....	343
A 受電 1KW ターゲット予備実験.....	344
B 受電 3kW ターゲット予備実験.....	349

3.4.1.7. 送受電装置(最終形)	353
3.4.1.7.1. システム構成	353
3.4.1.7.2. 空間での予備実験	353
3.4.1.7.3. 3次試作からの変更点	356
A パワーアナライザとの同期処理	356
B 受電電力レベルキャリブレーション機能	357
C リアルタイムモニタ表示機能	359
3.4.1.8. AUV 送受電等価回路シミュレーションおよび考察	361
3.4.1.8.1. 海中での AUV 送受電等価回路の考察	361
3.4.1.8.2. シミュレーション	362
3.4.1.8.3. 実測値との比較考察	363
3.4.1.8.4. 伝送効率と DC/DC 電源条件	364
A DC/DC 電源を含めた等価回路とアイドル条件	364
B 充電電流増加時の DC/DC 電源動作	365
C 考察まとめ	366
3.4.2. UV や海中充電スタンドの構造設計・製作	368
3.4.2.1. 受電用 AUV の基本計画	368
3.4.2.1.1. 受電用 AUV のミッション	368
3.4.2.1.2. 環境条件	369
3.4.2.1.3. r-AUV の形式	369
3.4.2.1.4. r-AUV の性能仕様	371
3.4.2.1.5. r-AUV の航行制御・機能	371
A 自律航行制御・機能	371
B 遠隔操縦機能 (ROV モード)	372
C 安全機能 (緊急浮上)	372
3.4.2.1.6. r-AUV 搭載機器の設計・製作	372
3.4.2.1.7. 受電・充電装置	373
3.4.2.1.8. エネルギー源 (電池)	373
A リチウムイオン電池パック仕様	373
3.4.2.1.9. 航行装置・センサ	375
A 制御コンピュータ	375
B 航法装置	376
C TV カメラおよびライト	386
D アクチュエータ	389
E 通信装置	392
F 電装系	397
3.4.2.2. r-AUV 構造の設計・製作	405
3.4.2.2.1. 耐圧容器	405

A 耐圧容器材料の選定	405
B 主耐圧容器の設計	405
C 主耐圧容器の製作	413
3.4.2.2. 機体構造	415
A 機体フレームの設計・製作	415
B 搭載機器の最適配置・収納の検討	417
C 機器配置	422
3.4.2.3. r-AUV の組立	423
3.4.2.3.1. 主耐圧容器内機器の組み込み・搭載	423
A ドップラー速度計 (DVL)	424
B 深度計	425
C 前方探査ソナー	425
D TV カメラ用耐圧容器・TV カメラ	426
E TV カメラ用照明装置 (LED ライト)	426
3.4.2.3.2. アクチュエータ	427
A スラスト	427
B バラスト投下装置	428
3.4.2.3.3. 通信装置	428
A 近距離通信装置(無線 LAN 水中部)	428
B GPS 装置	429
3.4.2.3.4. AUV 組立完了	429
3.4.2.3.5. 付属品	430
A 運搬用台車	430
B 窒素置換装置	431
C 投棄用バラスト	432
3.4.2.4. 船上装置の設計・製作	434
3.4.2.4.1. 船上オペレーションシステム	434
A AUV モード船上オペレーションシステム	434
B ROV モード船上オペレーションシステム	435
3.4.2.5. 制御ソフトウェアの設計・製作	439
3.4.2.5.1. 信号割付	439
A デジタル入出力ポート信号割付	439
B アナログ・デジタル変換ポート信号割付	440
C シリアルインターフェース (SIF) 信号割付	441
3.4.2.5.2. 制御ソフトウェア	441
A ネットワーク通信の開始	442
B AUV モード航行	442
C ROV モード航行	443

3.4.2.6. AUV の作動確認（陸上試験、水槽水中試験）	444
3.4.2.6.1. 耐圧試験	444
3.4.2.6.2. 陸上作動試験：	445
3.4.2.6.3. 水槽水中作動試験：	446
3.4.2.7. 充電時の r-AUV 主耐圧容器の振動	448
3.4.2.7.1. r-AUV 筐体組み込み予備試験での主耐圧容器の振動調査	449
A 簡易計測による振動状況調査	450
3.4.2.7.2. 慣性航法装置の振動調査と対策	456
A Phins のダミー製作	456
B Phins ダミーによる振動調査	457
C 振動対策の検討	460
D 制振効果の評価	461
E Phins カバーの干渉対策	465
3.4.2.8. 海中充電スタンド	468
3.4.2.8.1. 海中充電スタンドの設計・製作	468
A 給電コイル	468
B AUV ガイドフレーム	471
3.4.2.8.2. 海中充電スタンドの海中への懸吊、固定	472
A 水中実験での AUV ガイドフレーム使用状況の確認	474
3.4.2.9. 強電磁界が AUV 模擬筐体内に組み込んだ電子回路等に与える影響の調査	475
3.4.2.9.1. 搭載機器	475
3.4.2.9.2. 想定磁界	476
A シミュレーションモデル	476
B 単体モデルでのシミュレーション	477
C 共振モデルでのシミュレーション	478
3.4.2.9.3. 試験方法	479
3.4.2.10. 送電コイルから AUV へのノイズ影響検討	479
3.4.2.10.1. 測定系および測定条件	480
3.4.2.10.2. 試験結果	482
3.4.3. 大型水槽又は実海洋での長期運用実験	483
3.4.3.1. 実験場の調査	483
3.4.3.2. 長期運用実験	485
3.4.3.2.1. 実験場所	485
3.4.3.2.2. 実験方法	486
3.4.3.2.3. 実験結果	489
3.4.3.2.4. 課題と考察	490
A 充電効率について	490
B 電池温度について	492

C 熱解析による電池温度の推測	493
3.4.3.3.3 kW 給電実験（海水プール）	495
3.4.3.3.1. 実験場所	495
3.4.3.3.2. 実験方法	496
3.4.3.3.3. 実験結果	498
A 静特性の実験結果	498
B 動特性の実験結果	503
3.4.3.3.4. 課題と考察	507
A ポジションフリーに対する考察	507
B 最大電力について	508
C 効率について	508
D 電池温度について	508
3.4.3.4. 3 kW 給電実験（岸壁）	509
3.4.3.4.1. 実験場所	509
3.4.3.4.2. 実験方法	509
3.4.3.4.3. 実験結果	511
3.4.3.4.4. 課題と考察	515
A 効率について	515
B 運用面について	515
C 送電制御について	516
3.4.3.5. 実海域実験	523
3.4.3.5.1. 実験場所	523
3.4.3.5.2. 実験方法	525
3.4.3.5.3. 実験結果	527
A 進入～充電～退出の一連動作について	527
B 位置保持中に充電しているときの電力および効率	528
C 静特性測定結果	529
D 海水特性測定結果	533
3.4.3.5.4. 課題と考察	534
A 運用面について	534
B 送電制御について	534
3.4.3.6. AUV 実海域充電実験	539
3.4.3.6.1. 実験場所	539
3.4.3.6.2. 実験方法	540
3.4.3.6.3. 実験結果	545
A 自律航行への影響について	545
B 1 kW 電力伝送	547
C 3 kW 電力伝送	548

3.4.3.6.4. 課題と考察.....	549
A 効率と送電制御について	549
B 充電スタンドと AUV の連携について.....	550
C 実海域実験のまとめ	551
3.5. 充電制御およびデータ伝送のための海中通信方式の確立	552
3.5.1. 概要.....	552
3.5.2. Wavelet OFDM 方式.....	552
3.5.2.1. Wavelet OFDM の概要.....	552
3.5.2.2. Wavelet OFDM の主な仕様.....	553
3.5.2.2.1. 通信モード.....	553
3.5.2.3. 基本通信特性.....	555
3.5.2.3.1. 送信信号スペクトル (Power Spectral Density : PSD)	555
3.5.2.3.2. 通信速度測定 (静的環境)	555
3.5.3. 実施内容.....	557
3.5.3.1. 事前検証フェーズ.....	557
3.5.3.1.1. 海中通信用送受電アンテナ (結合器)	557
A 海中通信の送受信アンテナ (結合器) の目標仕様.....	557
B 結合器の基礎検討.....	557
3.5.3.1.2. Wavelet OFDM について.....	559
A Wavelet OFDM 概要.....	559
B Wavelet OFDM の主な仕様.....	560
C FPGA を用いた基本通信特性.....	564
3.5.3.2. 基礎検証フェーズIの内容.....	570
3.5.3.2.1. 海中通信用送受電アンテナ (結合器)	570
A 損失媒質中の固有伝搬定数.....	570
B 海水中の電磁波の伝搬.....	571
C 海中通信の結合器の目標仕様.....	572
D コイルの近傍界でのベクトルポテンシャルと磁界強度.....	573
E 損失媒質中での2つのコイル間の結合係数の計算式.....	574
F コイル間の相互インダクタンスの低下	576
G 損失媒質中のコイル間の伝送特性.....	576
H 2つのコイルの相互インダクタンス、結合係数、Q、挿入損失の検討.....	578
I 結合器の結合係数と減衰量の計算値と実験値の比較.....	580
J コイル間の伝送特性の評価	582
K 結合器の検討のまとめと課題.....	585
3.5.3.2.2. AFE ボード	586
3.5.3.2.3. 周辺機器.....	588
A 光ファイバーイーサ変換器.....	588

B バッテリ	588
3.5.3.2.4. 光-イーサ変換器、バッテリー使用による ATT 通信特性確認	589
3.5.3.2.5. 防水収納容器	589
3.5.3.2.6. 塩水中の伝送路特性	592
3.5.3.2.7. 通信速度測定（塩水中）	593
3.5.3.3. 基礎検証フェーズIIの内容	596
3.5.3.3.1. ハードウェア開発	596
A 海中通信用送受信コイル(結合器)	596
B 結合器の解析計算と電磁界シミュレーション	597
C 実験システム	599
D インダクタンス、Q、結合係数、減衰特性の計算値と実験値の比較	603
3.5.3.3.2. FPGA ボード + AFE ボード	606
3.5.3.3.3. 海水中の伝送路特性	609
3.5.3.3.4. 通信速度測定（海水中）	612
3.5.3.4. 実機検証フェーズIの内容	616
3.5.3.4.1. 通信システム構成	616
A 通信システムの概要	616
B ベースステーションアンテナとAUVアンテナの構造と特性	617
3.5.3.4.2. 充電スタンドと AUV への通信システムの実装	618
A ベースステーション通信システムの耐圧容器への組込	618
B 充電スタンドへのベースステーションアンテナの取付	618
C AUV 通信システムの AUV 耐圧容器への組み込み	619
D AUV へのアンテナの取付	619
3.5.3.4.3. 通信実験結果	620
A 大型水槽での実験	620
B 実海域での通信実験	624
3.5.3.5. 実機検証フェーズIIの内容	626
3.5.3.5.1. AUV ノイズ対策	626
3.5.3.5.2. OKI コムエコーズでの実海域通信実験	627
A 実海域での実験システム	627
B 実験結果	628
3.5.3.5.3. スラスタノイズ原因調査と対策	631
A 原因調査と対策	631
B AUV スラスタにノイズ対策を行った場合の通信速度	633
3.5.3.5.4. 実海域での通信実験 2	634
A 通信システム	634
B 実験結果	635
3.5.4. まとめ	637

3.6. 強電磁界での魚類等の生態系への影響調査	639
3.6.1. 電力 100 W 印加実験	639
3.6.1.1. 実験の概要	639
3.6.1.2. 実験場所	639
3.6.1.3. 実験用ワイヤレス給電システム	640
3.6.1.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要	640
3.6.1.3.2. シミュレーションによる磁界強度確認	641
3.6.1.3.3. 電力伝送と磁界強度の実測結果	644
3.6.1.4. 実験方法	646
3.6.1.4.1. 行動観察	647
3.6.1.4.2. 血中乳酸濃度の分析	648
3.6.1.4.3. 血中コルチゾル濃度の分析	648
3.6.1.4.4. ATP 関連物質の分析	649
3.6.1.5. 実験結果と考察	649
3.6.1.5.1. 行動観察	649
3.6.1.5.2. 血中乳酸濃度の測定	650
3.6.1.5.3. 血中コルチゾル濃度の測定	652
3.6.1.5.4. ATP 関連物質の測定	653
3.6.1.6. まとめ	655
3.6.2. 1 kW 電力印加実験（暖水系魚類）	656
3.6.2.1. 実験の概要	656
3.6.2.2. 実験場所	657
3.6.2.3. 実験用ワイヤレス給電システム	657
3.6.2.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要	657
3.6.2.3.2. コイル特性の測定と伝送電力の確認	660
3.6.2.3.3. 磁界強度のシミュレーション	662
3.6.2.3.4. 磁界強度の測定	664
3.6.2.4. 実験方法	665
3.6.2.4.1. サンプルング方法	667
3.6.2.4.2. 血中乳酸濃度	667
3.6.2.4.3. 血中コルチゾル濃度、ATP 含量	667
3.6.2.4.4. 背側普通筋の弾力	668
3.6.2.4.5. 官能評価（官能試験）	669
3.6.2.5. 実験結果	670
3.6.2.5.1. 通電が対象魚種の行動に及ぼす影響	670
3.6.2.5.2. 血中乳酸濃度	673
A 養殖マダイ	673
B 養殖シマアジ	674

3.6.2.5.3. 血中コルチゾル濃度の分析	675
A 養殖マダイ	675
B 養殖シマアジ	676
3.6.2.5.4. 背側可食部の ATP 含量の分析	677
A 養殖マダイ	677
B 養殖シマアジ	678
3.6.2.5.5. 背側普通筋の弾力（圧縮強度）	679
3.6.2.5.6. 官能試験	679
3.6.2.6. 考察	683
3.6.3. 1 kW 電力印加実験（冷水系魚類）	684
3.6.3.1. 実験の概要	684
3.6.3.2. 実験場所	684
3.6.3.3. 実験用ワイヤレス給電システム	685
3.6.3.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要	685
3.6.3.3.2. コイル特性の測定と伝送電力の確認	687
3.6.3.3.3. 磁界強度のシミュレーションと実測	688
3.6.3.4. 実験方法	690
3.6.3.5. 実験結果	692
3.6.3.5.1. 通電が対象魚種の行動に及ぼす影響	692
3.6.3.5.2. 血中乳酸濃度の計測	694
A シロザケ	694
B ハタハタ	695
C ヌマガレイ	696
D アメマス	696
E ニジマス	697
F ウグイ	698
3.6.3.5.3. 血中コルチゾル濃度の分析	698
A シロザケ	698
B ハタハタ	699
C ヌマガレイ	699
D アメマス	700
E ニジマス	701
F ウグイ	702
3.6.3.5.4. 背側可食部の ATP 含量の分析	702
A シロザケ	702
B ハタハタ	703
C ヌマガレイ	703
D アメマス	704

E ニジマス	705
F ウグイ	705
3.6.3.6. 考察	706
3.6.4. 1~3 kW 電力印加実験（ブリ・マアジ、24 時間）	707
3.6.4.1. 実験の概要	707
3.6.4.2. 実験場所	708
3.6.4.3. 実験用ワイヤレス給電システム	709
3.6.4.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要	709
3.6.4.3.2. コイル特性の測定と伝送電力の確認	711
3.6.4.3.3. 磁界強度の実測	712
3.6.4.4. 実験方法	713
3.6.4.4.1. ブリに対する比較実験の方法	713
A 行動観察	714
B 血中酸素濃度	715
C 背側可食部の ATP 含量	715
3.6.4.4.2. マアジに対する比較実験と追加実験の方法	716
A 血中コルチゾル濃度	717
3.6.4.5. 実験結果	717
3.6.4.5.1. ブリに対する比較実験の結果	717
A 通電が行動に及ぼす影響	717
B 血中乳酸濃度	718
C 背側可食部の ATP 含量	719
D 背側可食部の遊離アミノ酸	720
3.6.4.5.2. マアジに対する比較実験と追加実験の結果	722
A 通電が行動に及ぼす影響	722
B 血中乳酸濃度	722
C 血中コルチゾル濃度	724
D 背側可食部の ATP 含量	725
E 背側可食部の遊離アミノ酸	727
3.6.4.6. 考察	730
3.6.5. 3 kW 電力印加実験（マダイ、15 日間）	733
3.6.5.1. 実験の概要	733
3.6.5.2. 実験場所	733
3.6.5.3. 実験用ワイヤレス給電システム	733
3.6.5.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要	733
3.6.5.3.2. 伝送電力の確認	735
3.6.5.3.3. 磁界強度の測定	736
3.6.5.4. 実験方法	737

3.6.5.5. 実験結果.....	738
3.6.5.6. 考察.....	740
3.6.6. 3 kW 電力印加実験（シロザケ、ギンザケ、カジカ）.....	741
3.6.6.1. 実験の概要.....	741
3.6.6.2. 実験場所.....	741
3.6.6.3. 実験用ワイヤレス給電システム.....	741
3.6.6.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要.....	741
3.6.6.3.2. 伝送電力の確認.....	743
3.6.6.3.3. 磁界強度の測定.....	743
3.6.6.4. 実験方法.....	744
3.6.6.5. 実験結果.....	747
3.6.6.5.1. シロザケのストレス指標と呈味指標の分析結果.....	747
A 血中乳酸濃度.....	747
B 血中コルチゾル濃度.....	747
C ATP 含量.....	748
D 遊離アミノ酸.....	749
3.6.6.5.2. ギンザケのストレス指標と呈味指標の分析結果.....	749
A 血中乳酸濃度.....	749
B 血中コルチゾル濃度.....	750
C ATP 含量.....	751
D 遊離アミノ酸.....	751
3.6.6.5.3. カジカのストレス指標と呈味指標の分析結果.....	752
A 血中乳酸濃度.....	752
B 血中コルチゾル濃度.....	753
C ATP 含量.....	754
D 遊離アミノ酸.....	754
3.6.6.6. 考察.....	755
3.6.7. 3 kW 電力印加実験（マアジ、マサバ、カタクチイワシ）.....	756
3.6.7.1. 実験の概要.....	756
3.6.7.2. 実験場所.....	756
3.6.7.3. 実験用ワイヤレス給電システム.....	756
3.6.7.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要.....	756
3.6.7.3.2. 伝送電力の確認.....	758
3.6.7.3.3. 磁界強度の測定.....	760
3.6.7.4. 実験方法.....	762
3.6.7.4.1. マアジ、マサバの行動観察（周波数 1 kHz）.....	763
3.6.7.4.2. マアジ、マサバのストレス指標、呈味指標の調査（周波数 1 kHz） ..	764
3.6.7.4.3. カタクチイワシの行動観察（周波数 1 kHz）.....	764

3.6.7.4.4. マアジ、マサバの行動観察（周波数 1.5 kHz）	765
3.6.7.4.5. マアジ、マサバのストレス、呈味指標の調査（周波数 1.5 kHz）	765
3.6.7.5. 実験結果.....	766
3.6.7.5.1. マアジ、マサバの行動観察（周波数 1 kHz）	766
3.6.7.5.2. マアジ、マサバのストレス指標、呈味指標の調査（周波数 1 kHz） ..	766
A マアジのストレス指標（ATP 含量）の分析結果	766
B マアジの呈味指標（遊離アミノ酸）の分析結果.....	767
C マサバのストレス指標（ATP 含量）の分析結果.....	768
D マサバの呈味指標（遊離アミノ酸）の分析結果.....	768
3.6.7.5.3. カタクチイワシの行動観察（周波数 1 kHz）	769
3.6.7.5.4. マアジ、マサバの行動観察（周波数 1.5 kHz）	770
3.6.7.5.5. マアジ、マサバのストレス、呈味指標の調査（周波数 1.5 kHz）	771
A マアジのストレス指標（ATP 含量）の分析結果	771
B マアジの呈味指標（遊離アミノ酸）の分析結果.....	772
C マサバのストレス指標（ATP 含量）の分析結果.....	772
D マサバの呈味指標（遊離アミノ酸）の分析結果.....	773
3.6.7.6. 考察.....	774
3.6.8. 海藻類の成長度の調査（小型コイル）	774
3.6.8.1. 実験の概要	774
3.6.8.2. 実験場所.....	774
3.6.8.3. 実験用ワイヤレス給電システム	775
3.6.8.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要	775
3.6.8.3.2. 磁界強度の確認.....	777
3.6.8.4. 実験方法.....	779
3.6.8.4.1. 海藻類の成育度の調査.....	779
3.6.8.4.2. 海藻類のストレス指標の調査	781
3.6.8.5. 実験結果.....	783
3.6.8.5.1. 海藻類の成育度の調査結果.....	783
3.6.8.5.2. 海藻類のストレス指標の調査結果	784
3.6.8.6. 考察.....	785
3.6.9. まとめ	786
4. 委託業務全体の成果	787
4.1. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や目標を超える成果	787
4.2. 研究課題の発展性（間接的成果を含む）	788
4.3. 研究成果の発信・発表に関する活動	789
5. プロジェクトの総合的推進	790
5.1. 研究実施体制とマネジメント	790
5.2. 経費の効率的執行.....	790

6. まとめ・今後の予定	791
7. 研究発表・知的財産権の状況	792

1. 委託業務の目的

1.1. 研究課題の最終目標

本委託業務では、海中にポジションフリーワイヤレス給電システム及び海中充電スタンドを設置し、kW 級の電力を伝送効率 80 %以上で海中移動体(AUV)へ給電することを最終目標とする。

また、中間評価までに、ポジションフリーワイヤレス給電システムの小型モデルを製作し、この小型モデルを用い、塩水中で 0.5 kW 以上の電力を伝送効率 60 %以上で伝送することを目標とする。

このため、以下の項目について研究を実施する。

(1) 強電磁界に対する海水物性の解明

kW 級の電力を 10 kHz 以下の周波数で伝送することにより発生する強電磁界が、水分子やイオン等に与える影響を分子動力学 (MD) 法による粒子シミュレーション及び海水の複素誘電率により明らかにすることを旨とする。

(2) ワイヤレス給電システムを構成する各要素部の損失メカニズムの解明

(1)の結果を反映した電磁界シミュレーションを用い、ポジションフリーワイヤレス給電システムを構成する各要素部であるコイル、コンデンサ、AUV に用いる磁性体材料や海水等について、ポインティングベクトル (電界 E と磁界 H の積であり、電磁波の伝搬エネルギーを示す) の解析を行うことで、各要素部の電磁波の伝搬エネルギーの損失を明らかにする。

(3) kW 級のポジションフリーワイヤレス給電システムの確立

(2)の結果を基に、電磁波の伝搬エネルギーの損失を低減するコイルの材料、コンデンサの構造や AUV に用いる磁性体材料等を選定する。これを基に、電磁界シミュレーションにより、電力 3 kW 程度、かつ、伝送効率 80 %以上となるポジションフリーワイヤレス給電システムの設計及び製作方法を確立することを旨とする。

(4) 海中で運用可能な AUV とポジションフリーワイヤレス給電システムの実証実験

海中充電スタンド、AUV 及びポジションフリーワイヤレス給電システムを海中に設置し、電力 3 kW 程度、かつ、伝送効率 80 %以上で AUV に給電することを旨とする。

(5) 充電制御及びデータ伝送のための海中通信方式の確立

海中での AUV への充電状況を確認するために、最適な海中通信方式を明らかにするこ

とを目指す。

(6) 強電磁界での魚類等の生態系への影響調査

魚類の行動特性、育成状況やストレス指標（ATP 関連物質や血液検査等）等について、強電磁界の有り無しで比較することで、強電磁界を海中で発生させた場合の魚類に対する影響を調査する。

1.2. 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

(1) 強電磁界が複素誘電率に与える影響

kW 級の電力を 10 kHz 以下の周波数で伝送することにより発生する強電磁界が、海中の水分子やイオン等の双極子モーメントやイオン伝導度等に影響することで、複素誘電率が変化し、それに伴い海中での伝送効率が変化するおそれがある。しかしながら、強電磁界が海中の水分子やイオン等へ与える影響については、ほとんど研究がなされていない。このため、本委託業務では、強電磁界が海中の水分子やイオン等へ与える影響について、MD 法を用いた粒子シミュレーションにより明らかにし、さらに、強電磁界での海中の複素誘電率を測定することで、粒子シミュレーションの妥当性を評価する。

(2) 伝送効率改善のためのポジションフリーワイヤレス給電システムを構成する各要素部の損失メカニズムの解明

ポジションフリーワイヤレス給電システムを構成する各要素部の電磁波の伝搬エネルギーの損失メカニズムを明らかにすることは、伝送効率の向上には必要であるが、そのような研究例は無い。そこで、電磁界シミュレーションを用い、コイル、コンデンサや AUV に用いる磁性体材料等に加えて、海水を含めた、ワイヤレス給電システムの各要素部の電磁波の伝搬エネルギーの損失を明らかにし、損失を低減する設計及び製作方法を確立する必要がある。

特に、本委託業務では、ポジションフリーワイヤレス給電システムの送電コイル内に AUV を入れて充電する方式であるため、強電磁界の影響により AUV 筐体に渦電流が発生し、伝送効率の低下を招くおそれがある。AUV 筐体の表面を磁性体材料で覆うことで渦電流を抑制するため、AUV 筐体の形状に合わせた曲面加工が可能な磁性体材料の探索等が必要となる。

(3) 海中通信方式の確立

AUV の充電状況の確認や安全性の担保等から海中通信が必要となる。現状、海中では音波を使った通信が主流であるが、音波では通信速度が遅く、充電状況などのデータを瞬時

に送ることができない。また、可視光通信を用いる方法もあるが、海水の濁りなどに対する海中での光の減衰や光の送受光部の海洋生物の付着等の問題がある。さらに、電磁波を用いたデータ通信は高速で信頼性が高いが、海中での電磁波の減衰は極めて大きく、通常の無線通信方式ではデータを送ることができず、電磁波の伝送路としての通過特性は定量的に評価されていない。

しかしながら、最新の高速度電力線通信（PLC）方式では、極めて減衰の大きな伝送路でも通信ができるよう帯域適用通信方式を採用しており、海中でも高速なデータ伝送実現の可能性はある。これより、PLC方式を中心に、最適な海中通信方式を確立する。

(4) 強電磁界での魚類等の生態系への影響

ポジションフリーワイヤレス給電システムの実験では、強電磁界が海中に発生するが、強電磁界が魚類の育成に、どのような影響が出るかについて研究した例はないため、魚類へ与える影響を評価する。また、強電磁界がプランクトン等の発生に与える影響を調査し、赤潮等の発生を抑制する可能性について検討する。

1.3. 要素課題に対する実施項目及び体制

これらの要素課題に取り組むため、パナソニック株式会社では、(2)、(3)、(4)の①、(4)の③、(5)及び(7)を実施する。海洋研究開発機構では(1)を、海洋工学研究所（2019年度まで）及びディープ・リッジ・テク（2020年度より）では(4)の②を、ニチモウ株式会社では(6)を実施する。

なお、中間評価までに、ポジションフリーワイヤレス給電システムの小型モデルを製作し、この小型モデルを用いて、塩水中で0.5kW以上の電力を伝送効率60%以上で伝送することを目標とする。また、最終目標として、kW級の電力を伝送効率80%以上でAUVへ給電することを目指す。

(1) 強電磁界に対する海水物性の解明(担当：海洋研究開発機構)

既存研究で海水を水分子及びイオン（Na⁺、Cl⁻）として分子レベルで扱った、マイクロ波領域の粒子シミュレーションはすでに構築されているため、これを基に、本委託業務で用いる強電磁界及び10kHz以下の低周波領域に適した粒子シミュレーションを新たに構築する。強磁場シミュレーションの結果、磁場によって粒子の運動の線形性を計測したほうがより正確なモデル化への反映ができると考え、複素誘電率等の計測結果及び粒子シミュレーションの結果を比較し、必要に応じて粒子シミュレーションを構築している計算式を修正し、それに伴うモデルの調整等を実施することで、粒子シミュレーションの精度向上を図る。

複素誘電率の計測については、マイクロ波領域の複素誘電率が測定可能な既存の測定装置を基に、10kHz以下の低周波領域の測定に適するよう、測定装置の改良等を行う。また、

測定装置の測定プローブを強電磁界でも測定可能な構造とするため、測定プローブの改良等を行う。この測定装置を用い、塩水中又は海中で強電磁界の複素誘電率の測定を実施する。この結果を基に、複素誘電率の測定方法について課題の抽出を行い、測定装置の改良を行うことで、測定装置の精度向上を図る。また、前述の理由から、強電磁界の印加された海水の電位計測を行い、歪の発生等の調査を行う。

(2) ワイヤレス給電システムを構成する各要素部の損失メカニズムの解明 (担当: パナソニック株式会社)

まず、大型水槽及び実海洋で用いるポジションフリーワイヤレス給電システムの 1/10 程度の小型モデル① (伝送コイルの直径: 20 cm 程度) について、コイル、コンデンサ、AUV に用いる磁性体材料や海水等を含めた電磁界強度分布を電磁界シミュレーションにより解析し、各要素部での電磁波の伝搬エネルギーの損失を明らかにし、小型モデル①の設計指針とする。また、(3)の電力伝送実験の結果を電磁界シミュレーションと比較し、必要に応じて電力伝送実験の結果を電磁界シミュレーションに反映することで、電磁界シミュレーションの精度向上を図る。

次に、大型水槽及び実海洋で用いるポジションフリーワイヤレス給電システムの 1/2 程度の小型モデル② (伝送コイルの直径: 1 m 程度) について、コイル、コンデンサ、AUV に用いる磁性体材料や海水等を含めた電磁界強度分布を電磁界シミュレーションにより解析し、各要素部での電磁波の伝搬エネルギーの損失を明らかにし、小型モデル②の設計指針とする。また、(3)の電力伝送実験の結果を電磁界シミュレーションと比較し、必要に応じて電磁界シミュレーションに電力伝送実験の結果を反映することで、電磁界シミュレーションの精度向上を図る。

また、大型水槽及び実海洋で用いるポジションフリーワイヤレス給電システム (伝送コイルの直径: 2 m 程度) について電磁界シミュレーションを実施し、コイル、コンデンサ、磁性体材料や海水等を含めた電磁界強度分布を解析し、各要素部での電磁波の伝搬エネルギーの損失を明らかにし、ポジションフリーワイヤレス給電システムの設計指針とする。また、(3)の電力伝送実験及び(4)の長期運用実験の結果を電磁界シミュレーションと比較し、必要に応じ、電磁界シミュレーションに電力伝送実験及び長期運用実験の結果を反映することで、電磁界シミュレーションの精度向上を図る。

(3) kW 級ポジションフリーワイヤレス給電システムの確立 (担当: パナソニック株式会社)

まず、(2)で得られた設計指針を基に、小型モデル①の設計及び製作を実施する。製作した小型モデル①を用い、小型水槽において塩水中で 10 W から 100 W 程度の電力伝送実験を実施する。電力伝送実験の結果を基に、大型水槽又は実海洋で用いるコイルの材料、コンデンサや AUV に用いる磁性体材料等の要求仕様を明らかにする。

次に、(2)で得られた設計指針及び小型モデル①の電力伝送実験の結果を基に、小型モデル②の設計及び製作を実施する。製作した小型モデル②を用い、小型水槽において塩水中で 100 W から 3 kW 程度で電力伝送実験を実施する。必要に応じ、小型モデル②の改良を

実施し、0.5kW 程度の電力を伝送効率 60%以上で伝送することを目指す。電力伝送実験の結果を基に、大型水槽及び実海洋において用いるコイルの構造、コンデンサの構造や AUV に用いる磁性体材料の探索及び加工方法等について最適なものを選定する。

また、(2)で得られた設計指針及び小型モデル②の電力伝送実験の結果を基に、大型水槽及び実海洋において用いるポジションフリーワイヤレス給電システムについて、電磁界シミュレーションを実施し、設計及び製作を実施する。製作したポジションフリーワイヤレス給電システムを用い、実海洋において 3 kW 程度で電力伝送実験を実施する。必要に応じ、ポジションフリーワイヤレス給電システムを改良し、伝送効率 80%以上を目指す。

(4) 海中で運用可能な AUV とポジションフリーワイヤレス給電システムの実証実験

① kW 級電力伝送のための送電側装置及び受電側装置の確立（担当：パナソニック株式会社）

(3)で実施した小型水槽の電力伝送実験の結果を基に、kW 級の電力を伝送するための送電側装置及び AUV に搭載する受電側装置に必要な電気容量等の要求仕様を明らかにする。これを基に、送電側装置に用いる高周波電源や整合回路等について最適なものを選定する。また、受電側装置に用いる整流回路等を AUV に搭載できるよう小型化する。

② AUV や海中充電スタンドの構造設計（担当：海洋工学研究所（2019 年度まで）及びディープ・リッジ・テク（2020 年度より））

AUV については、AUV の模擬筐体内に電子回路や電池等を格納する耐压容器、受電コイル、(3)で選定した磁性体材料、(4)の①で小型化した整流回路や(5)で小型化したアンテナ等を組み込み、海中で安定したバランスとなる最適な配置を選定する。また、強電磁界が AUV 模擬筐体内に組み込んだ電子回路等に与える影響を調査し、この結果を基に、強電磁界が電子回路等に影響を与えない構造となるよう、AUV の設計及び製作を実施する。

AUV の設計、(3)のポジションフリーワイヤレス給電システムの設計及び(4)の①で選定した送電側装置を基に、海中充電スタンドの設計及び製作を実施する。大型水槽又は実海洋で、製作した海中充電スタンド及び AUV の接続動作確認を実施する。この結果を基に、必要に応じて AUV 及び充電スタンドの改良を実施し、改良した AUV 及び充電スタンドを③の長期運用実験に用いる。

③ 大型水槽又は実海洋での長期運用実験（担当：パナソニック株式会社）

(4)の②で改良した AUV 及び充電スタンドを大型水槽又は実海洋に設置し、(3)で製作したポジションフリーワイヤレス給電システムを用いて、AUV へ数週間程度の充電を行う長期運用実験を実施し、その結果を基に、海中充電システムの課題の抽出とその対策を行う。

なお、長期運用実験を実施する実験場については、長期運用実験が可能な大型水槽がある施設、又は海表面や海底面の影響が少なく十分な深度を有し、長期運用実験が可能な海域を選定する。長期運用実験の期間については、実験場の環境状況を基に決定する。

(5) 充電制御及びデータ伝送のための海中通信方式の確立（担当：パナソニック株式会社）

AUV の充電状況に合わせて、送電側装置が作動又は停止することで、AUV に効率的に充電する充電制御システムを構築する。(4)の②で製作した AUV 及び充電スタンドを用い、陸上で給電実験を実施して、バッテリーへの充電制御システムを評価し、その結果を基に、充電制御システムの調整や改良等を実施する。大型水槽又は実海洋で給電実験を実施し、課題を抽出して、必要に応じ、充電制御システムの改良等を実施し、(4)の③の長期運用試験に用いる。

AUV 及び充電スタンド間の充電制御やデータ転送等が可能な海中通信は、ワイヤレス電力伝送と同様に数 m をポジションフリーで通信可能な方式を選定する。パナソニック株式会社の PLC 方式を基に、直交周波数分割多重 (OFDM 変調) 方式及び広帯域二重ループアンテナを用いる通信方式で数 M bps の伝送速度を目指す。既存研究では、直径 20 cm のコイルを用い、海中で 20 cm の距離において数 M bps の通信ができることを確認している。まず、海中を想定した通信アルゴリズムの構築及び海中で使用可能なアンテナの選定又は製作を行う。アンテナは、小型水槽や大型水槽等を用いて、通信特性の評価を行う。この結果を基に、通信アルゴリズムを修正することで、精度向上を図る。また、アンテナを AUV に搭載できるように小型化する。小型化したアンテナを AUV に搭載し、充電スタンド及び AUV の間で通信実験を行い、その結果を基に、アルゴリズムの修正及びアンテナの改良を実施するとともに、改良したアンテナを(4)の②の AUV に搭載し、長期運用実験において通信実験を実施する。

必要に応じ、可視光通信についても検討する。

(6) 強電磁界での魚類等の生態系への影響調査 (担当：ニチモウ株式会社)

強電磁界の有り及び無しの条件の 2 つの実験用生け簀を用意し、養殖量の多いアジ、タイやハマチ等のなかから実験に用いる魚類を選定し、育成する。選定した魚類の育成期間にあわせて、行動特性、育成状況やストレス指標 (ATP 関連物質や血液検査等) 等の実験データを取得し、ワイヤレス給電システムによる強電磁界が魚類に与える影響を評価する。この結果より、強電磁界が魚類に影響を与えることが明らかになった場合は、ワイヤレス給電システムへ魚類が接近しないような対策を検討する。

また、強電磁界がアジ、タイやハマチ等に影響を与えない場合、サケやウナギ等の磁気コンパスを体内に有する回遊性の魚類に対しても、強電磁界の影響を調査する。

さらに、赤潮の発生原因のプランクトン等を中心に、海洋微生物に対する強電磁界の影響についても調査する。

(7) プロジェクトの総合的推進 (担当：パナソニック株式会社)

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、各分担研究機関と定期的な会合を行うとともに、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必要に応じて調査或いは外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの推進に努める。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

	研究項目	研究目標	達成度	補足
(1)	強電磁界に対する海水物性の解明	kW 級の電力を 10 kHz 以下の周波数で伝送することにより発生する強電磁界が、水分子やイオン等に与える影響を明らかにする。	100%	kW 級の電磁界であれば物性変化はしないことが明らかとなった
(2)	ワイヤレス給電システムを構成する各要素部の損失メカニズムの解明	ポジションフリーワイヤレス給電システムを構成する各要素部の電磁波の伝搬エネルギーの損失を明らかにする。	100%	損失の主因を明らかにし、効率改善対策を実施
(3)	kW 級ポジションフリーワイヤレス給電システムの確立	ポジションフリーワイヤレス給電システムの設計及び製作方法を確立する。	100%	AUV の場所を変えても充電できることを確認
(4)	海中で運用可能な AUV とポジションフリーワイヤレス給電システムの実証実験	海中で電力 3 kW 程度、かつ伝送効率 80%以上で AUV に給電する。	80%	電力 3 kW 超は達成したが、伝送効率は最大 75%であった
(5)	充電制御及びデータ伝送のための海中通信方式の確立	海中での AUV への充電状況を確認するために、最適な海中通信方式を明らかにする。	100%	海中通信での充電制御を実施
(6)	強電磁界での魚類等の生態系への影響調査	強電磁界を海中で発生させた場合の魚類に対する影響を調査する。	100%	影響なしを確認

3. 委託業務における研究の方法及び成果

3.1. 強電磁界に対する海水物性の解明

kW 級の電力を 10 kHz 以下の周波数で伝送することにより発生する強電磁界が、海中の水分子やイオン等の双極子モーメントやイオン伝導度等に影響することで、複素誘電率が変化し、それに伴い海中での伝送効率が変化するというおそれがある。しかしながら、強電磁界が海中の水分子やイオン等へ与える影響については、研究報告例が非常に少なく、例えば温度上昇のメカニズムなど、基礎的な物理描像に関する詳細な調査がされてこなかった。本委託業務では、分子動力学法を用いた粒子シミュレーションにより強電磁界が海中の水分子やイオン等へ与える影響とそのメカニズムを明らかにするとともに、強電磁界での海中の複素誘電率を測定することで、粒子シミュレーションの妥当性を評価することとした。

本研究で、粒子シミュレーションにおける外場モデルを検証し、磁場のみでなく、誘起される電場も外力として検討に不可欠である事を実証した。また、海水中のイオンが水分子と衝突しながら変動電場の外力に従って運動する状況を、緩和時間を用いた簡易モデルによって理論的に考察した。さらに、分子動力学シミュレーションでは、水分子モデルに依存して状態方程式の結果に変化が生じる事が知られているため、事前シミュレーションで密度-温度プロットの関係性を調査し、設定温度について検討した。これらの検討の上で、電磁場印加時における粒子間のエネルギー移動率や温度上昇といった、外部電磁場を印加した事で生じる物性への影響を評価した。

また、エネルギー輸送メカニズムの物理描像の知見を得るため、シミュレーションにて水分子やイオンなどの粒子種ごとに外場を印加することで、外部電磁場からエネルギーが吸収される主要因を特定した。これにより、古典力学の枠組みで、外部電磁場のエネルギー吸収過程の概要を把握することができた。本稿では、シミュレーションの前提となる運動方程式と電磁場の関係、簡易モデルによるイオンの運動の理論的解析、および評価指標について簡潔に示した後、シミュレーションの結果を提示する。

3.1.1. 運動方程式と粒子シミュレーション

強電磁界環境において、海水に含まれる各分子、イオンなどの粒子の挙動を詳細に評価する目的で、本研究では分子動力学法に基づいた粒子シミュレーションを実施した。

分子動力学法は、古典力学における運動方程式を用いて、系に含まれる各粒子の運動状態の時間発展を求める手法であり、温度一定、あるいは圧力一定など、現実的な条件設定が可能なシミュレーション手法である。ここで、外部電磁場が印加されている環境での荷

電粒子のラグランジュ方程式から、運動方程式は次式の通りに書くことが出来る [1]

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{p}_i + q_i \mathbf{A}) = -\frac{\partial V}{\partial \mathbf{r}_i} \quad (3.1-1)$$

ここで、粒子を特定するインデックスを*i*とし、 m_i 、 q_i 、 \mathbf{p}_i 、 \mathbf{r}_i はそれぞれ粒子*i*の質量、電荷、運動量ベクトルおよび位置ベクトルである。くわえて、時間、ベクトルポテンシャル、およびポテンシャルエネルギーをそれぞれ*t*、 \mathbf{A} 、 V とした。

ポテンシャルエネルギー*V*は、粒子間相互作用 V_{p-p} と荷電粒子-電磁場間の相互作用 V_{p-f} で構成される。はじめに、本研究では、粒子間相互作用 V_{p-p} について、分子動力学法で広く用いられる Lenard-Jones ポテンシャルと、荷電粒子間のクーロン相互作用で構成されるものとみなした。上記の仮定により、 V_{p-p} は

$$V_{p-p} = \sum_{i < j} (V_{i,j}^{LJ} + V_{i,j}^q) \quad (3.1-2)$$

$$V_{i,j}^{LJ} = 4\epsilon_{ij} \left(\frac{\kappa_{ij}^{12}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^{12}} - \frac{\kappa_{ij}^6}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^6} \right) \quad (3.1-3)$$

$$V_{i,j}^q = k_1 \frac{q_i q_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \quad (3.1-4)$$

と書き表す事ができる。ただし、式(3.1-2)では、一般の Lenard-Jones ポテンシャルのうち、本研究に用いた (6,12)ポテンシャルを記載した。また、 ϵ_{ij} 、 κ_{ij} は分子種、イオン種ごとのモデルに依存する設定パラメータである。また、式(3.1-4)における k_1 は定数であり、332.1Åkcal/molとした。Lenard-Jones ポテンシャルは2個の分子、イオン間で引力として働く双極子-双極子相互作用と、Pauli の排他率にしたがって互いの電子が反発しあう斥力を表現しており、分子シミュレーションにおいて広く用いられている [2] [3]。

つづいて、電磁場-荷電粒子間の相互作用によるポテンシャルエネルギー V_{p-f} は、場のスカラーポテンシャル ϕ とベクトルポテンシャル \mathbf{A} を用いて次式のように書き表す事ができる。

$$V_{p-f} = \sum_i (-q_i \mathbf{A} \cdot \mathbf{v}_i + q_i \phi) \quad (3.1-5)$$

ここで、 \mathbf{v}_i は粒子*i*の速度ベクトルを表し、 $\mathbf{v}_i \equiv \frac{d\mathbf{r}_i}{dt}$ である。

したがって、粒子*i*、*j*間の相互作用の力 $\mathbf{F}_{i,j}^{p-p}$ は式(3.1-3)、(3.1-4)より

$$\mathbf{F}_{i,j}^{p-p} = \left[24\epsilon_{ij} \left(\frac{2\kappa_{ij}^{12} \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^{14}} - \frac{\kappa_{ij}^6 \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^8} \right) + \frac{k_1 q_i q_j \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} \right] \quad (3.1-6)$$

となり、電磁場により粒子*i*に誘起される力 $\mathbf{F}_i^{\text{p-f}} \equiv -\frac{\partial V_{\text{p-f}}}{\partial \mathbf{r}_i}$ は

$$\mathbf{F}_i^{\text{p-f}} = \left[q_i \left(\mathbf{v}_i \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_i} \right) \mathbf{A} + q_i \mathbf{v}_i \times \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_i} \times \mathbf{A} - q_i \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}_i} \right] \quad (3.1-7)$$

となる。さらに、 $\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \left(\mathbf{v}_i \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_i} \right) \mathbf{A}$ を用いることで、式(3.1-1)は

$$\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = \sum_j \mathbf{F}_{i,j}^{\text{p-p}} - q_i \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - q_i \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}_i} + q_i \mathbf{v}_i \times \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_i} \times \mathbf{A} \quad (3.1-8)$$

と書き換えられる事から、電場 $\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{r}_i}$ 、磁束密度 $\mathbf{B} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_i} \times \mathbf{A}$ を用いて、運動量ベクトル \mathbf{p}_i は

$$\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = \sum_j \mathbf{F}_{i,j}^{\text{p-p}} + q_i \mathbf{E} + q_i \mathbf{v}_i \times \mathbf{B} \quad (3.1-9)$$

にしたがって時間発展することがわかる。さらに、光速に比べて十分に速度が遅い時、 $\mathbf{p}_i \sim m_i \mathbf{v}_i$ とみなす事ができることから、本研究では

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_j \mathbf{F}_{i,j}^{\text{p-p}} + q_i \mathbf{E} + q_i \mathbf{v}_i \times \mathbf{B} \quad (3.1-10)$$

として、各粒子の位置ベクトル \mathbf{r}_i 、および速度ベクトル \mathbf{v}_i を計算した。なお、ここで外部電磁場を発生させる機構は対象としている系内部には無いため、Maxwell方程式に基づいて、スカラーポテンシャル ϕ は0である事がわかる。また、ベクトルポテンシャル \mathbf{A} は波動方程式を満たす事から、伝搬ベクトル \mathbf{k} および周波数 f として、単色平面波 $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}_0 \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - 2\pi f t)$ について考えると、電場 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 、磁束密度は $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ は

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = 2\pi f \mathbf{A}_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - 2\pi f t) \quad (3.1-11)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k} \times \mathbf{A}_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - 2\pi f t) \quad (3.1-12)$$

と書くことが出来る。したがって、 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - 2\pi f t)$ 、 $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - 2\pi f t)$ とすると、 $\mathbf{E}_0 \perp \mathbf{B}_0$ 、かつ $\mathbf{B}_0 = \mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 / (2\pi f)$ となる。さらに、誘電率、導電率、透磁率をそれぞれ ε 、 σ 、 μ とすると、Maxwell方程式から $|\mathbf{k}|^2 = \mu(2\pi f)^2 [\varepsilon - i\sigma / (2\pi f)]$ である [4]。したがって、仮に $\mathbf{E}_0 = |\mathbf{E}_0| \mathbf{e}_z$ 、 $\mathbf{k} = |\mathbf{k}| \mathbf{e}_y$ とするならば

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \sqrt{\mu[\varepsilon - i\sigma / (2\pi f)]} |\mathbf{E}_0| \mathbf{e}_x \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - 2\pi f t) \quad (3.1-13)$$

と書くことができる。特に導電性が支配的である場合、 $\varepsilon \ll \sigma/(2\pi f)$ である事から、

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \approx \sqrt{\frac{(-i\mu\sigma)}{2\pi f}} |\mathbf{E}_0| \mathbf{e}_x \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - 2\pi ft) \quad (3.1-14)$$

となる。

本研究では、実験的に知られる海水の高い導電性にに基づき、特に断らない場合においては式(3.1-11)、(3.1-14)に基づいて電場、磁束密度の振幅、および偏向方向を設定した。また、本研究で想定される計算領域のサイズが、計算の時間ステップの間に電磁場が伝搬する距離に比べて充分小さいため、計算領域内の全ての粒子が同時に電磁場を印加されるものとして計算した。

シミュレーションを実装するにあたって、GNU General Public License の下で公開されているオープンソースソフトウェア「LAMMPS」を使用した。また、実装において、式(3.1-10)から各粒子の位置、および速度の時間発展を計算するにあたり、速度ベルレ法を利用している。当該手法は位相空間内の体積が保存するシンプレクティック性を持つ事から、長時間のシミュレーションでもエネルギーの保存性能が良いことで知られている [5]。また、クーロン相互作用に起因する力に関しては、particle-particle particle-mesh 法に基づいて計算している。クーロン相互作用などの長距離力は作用範囲が広く、遠方からの寄与を無視することができない。そこで、particle-particle particle-mesh 法では、各粒子のクーロン相互作用を近距離相互作用と長距離相互作用とに分けて計算する。近距離相互作用に関しては、近傍の電荷からの寄与を実空間で計算する。長距離相互作用に関しては、設定したメッシュ上の電荷分布から影響を受けるものとみなし、適切なグリーン関数を用いて波数空間でのポテンシャルエネルギーの寄与を計算する [6]。なお、Lenard-Johns ポテンシャルに起因する力の計算にあたっては、長距離力とはみなさず、カットオフ距離を定めることで、十分遠方の粒子の寄与を制限している [5]。

3.1.2. 古典的緩和時間近似におけるイオンの集団的挙動

外部電磁場を印加している環境でイオンは電磁場による外力の影響を受けて運動するが、海水中では自由空間での運動とは異なり水分子とのポテンシャルエネルギーを介した結合の影響を強く受ける。分子動力学シミュレーションでは、このような水分子との衝突の影響を含めたイオンの挙動を評価することとなる。本節では、衝突の影響を緩和時間近似によって表現し、イオンの挙動に関して古典的運動方程式から議論する。

はじめに、磁場が保存力として振る舞うことを考慮して、簡易モデルとして電場 $\mathbf{E}_0 \sin(\omega t)$ のみを印加したイオンの運動を考える。ここで、イオンが緩和時間 τ の間に衝突を介してイオンの速度に比例した運動量を失う緩和時間近似を適用すると、イオンの速度ベクトル $\mathbf{v}(t)$ に関する運動方程式は

$$m \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = q\mathbf{E}_0 \sin(\omega t) - \frac{m}{\tau} \mathbf{v}(t) \quad (3.1-15)$$

となる。この運動方程式を解くと、速度ベクトル $\mathbf{v}(t)$ 、位置ベクトル $\mathbf{x}(t)$ は

$$\mathbf{v}(t) = -\frac{\tau q \mathbf{E}_0 \sin(\delta)}{m} \left[\cos(\omega t + \delta) - \cos(\delta) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] + \mathbf{v}_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.1-16)$$

$$\mathbf{x}(t) = -\frac{\tau q \mathbf{E}_0}{m\omega} \left\{ \sin(\delta) [\sin(\omega t + \delta) - \sin(\delta)] - \cos^2(\delta) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \right\} + \mathbf{v}_0 \tau (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \mathbf{x}_0 \quad (3.1-17)$$

と書き表す事ができる。ただし、 δ は $\cos(\delta) = \omega\tau / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2}$ 、 $\sin(\delta) = 1 / \sqrt{1 + (\omega\tau)^2}$ となるパラメータとして定義しており、 \mathbf{v}_0 、 \mathbf{x}_0 はそれぞれ速度ベクトル、位置ベクトルの初期値である。くわえて、ここでの速度ベクトル $\mathbf{v}(t)$ 、位置ベクトル $\mathbf{x}(t)$ は個々のランダムな熱運動は反映しておらず、統計平均に対応する集団モードとしての速度、位置であることには注意が必要である。なお、緩和時間 τ は水分子との衝突の間隔時間に相当することから、速度 $|\mathbf{v}(t)|$ が上昇すると衝突の頻度が高まるため、温度の上昇に伴って τ は減少すると考えられる。また、集団モードとしての変位 $\mathbf{x}(t)$ は分極を引き起こすと考えられる。さらに、

イオン振動の位相差を示すパラメータ δ は、 $\omega \gg 1/\tau$ のような高周波極限では $\delta \sim 0$ であり、 $\omega \ll 1/\tau$ の低周波極限では $\delta \sim \pi/2$ となる。したがって、高周波極限では、

$$\mathbf{v}(t) \rightarrow -\frac{q\mathbf{E}_0}{m\omega} \left[\cos(\omega t) - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] + \mathbf{v}_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.1-18)$$

$$\mathbf{x}(t) \rightarrow -\frac{q\mathbf{E}_0}{m\omega^2} \left\{ \sin(\omega t) - (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \right\} + \mathbf{v}_0 \tau (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + \mathbf{x}_0 \quad (3.1-19)$$

となる。式(3.1-19)は、イオンが他粒子との衝突する間に電磁場の位相が大きく変化する高周波において、イオンの変位は電磁場の位相と一致するとともに、その振動振幅は ω^2 に反比例して小さくなることを意味している。また、高周波では水分子との衝突の前に振動するため、その変位の振動振幅は、水分子と衝突しない場合、つまり $\tau \rightarrow \infty$ の場合の振幅にあたる $-q\mathbf{E}_0/(m\omega^2)$ と一致している。さらに、式(3.1-18)における $\mathbf{v}(t)$ の振動項の振幅 $q\mathbf{E}_0/(m\omega)$ が ω に反比例していることから、運動エネルギー $|\mathbf{v}(t)|^2/(2m)$ もまた周波数に依存し、より高周波になると振動による運動エネルギーが減少することがわかる。

一方、低周波極限では

$$\mathbf{v}(t) \rightarrow \frac{\tau q \mathbf{E}_0}{m} \sin(\omega t) + \mathbf{v}_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.1-20)$$

$$\mathbf{x}(t) \rightarrow \frac{\tau q \mathbf{E}_0}{m\omega} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right] + \mathbf{v}_0 \tau \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \mathbf{x}_0 \quad (3.1-21)$$

となる。ここで、式(3.1-21)は、電磁波の1周期の間に数多く衝突する低周波領域において、イオン振動の位相が電磁場の位相から $(-\pi/2)$ ずれるとともに、その振動振幅は緩和時間 τ に比例することを意味している。このことから、温度上昇に伴って τ が小さくなると、水分子との衝突により振動振幅が減少することがわかる。また、式(3.1-20)の速度の振動振幅 $\tau q \mathbf{E}_0/m$ が周波数に依存しないことから、運動エネルギー $|\mathbf{v}(t)|^2/(2m)$ の振動振幅 $|\tau q \mathbf{E}_0|^2/(2m^3)$ が周波数に依存しないと言える。なお、水分子の密度や物性値から計算すると水分子間の距離は概ね 3 \AA 程度であり、イオンの熱運動等による速度が概ね 100 m/s 程度のオーダーであると見積もるならば、緩和時間 τ はおおよそ 3 ps 程度となる。本研究では周波数を実験的には 10 kHz 程度、シミュレーションでは 50 MHz から 5 GHz 程度まで想定していることから、 $\omega \ll 1/\tau$ が成り立つため、少なくともオーダーエスティメーションの結果からは、低周波極限に近い条件となるものと考えられる。また、イオンの変位に比例して双極子モーメント \mathbf{p}_{dp} が生じる事から、

$$\mathbf{p}_{\text{dp}}(t) \propto \frac{\tau q \mathbf{E}_0}{m\omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.1-22)$$

と書ける。さらに、振動する双極子が放出する電磁場について、 \mathbf{E}_0 を z 軸方向とみなし、 z 軸からの角度を θ 、 z 軸周りの方位角を φ 、原点からの動径距離を r とした球面座標系で考えると、電場は θ 成分のみ、磁場は φ 成分のみ値をもつことが知られている。それぞれ電場成分を $E_{\text{dp},\theta}$ 、磁場成分を $B_{\text{dp},\theta}$ とすれば双極子モーメントの z 成分 $p_{\text{dp},z}(t)$ を用いて

$$E_{\text{dp},\theta}(r, \theta, t) = \frac{\sin\theta}{4\pi c^2 \epsilon_0 r} \frac{\partial^2 p_{\text{dp},z}(t)}{\partial t^2} \quad (3.1-23)$$

$$B_{\text{dp},\varphi}(r, \theta, t) = \frac{\mu_0 \sin\theta}{4\pi c r} \frac{\partial^2 p_{\text{dp},z}(t)}{\partial t^2} \quad (3.1-24)$$

となることが知られている。さらに、この電磁場のポインティングベクトルは動径方向のみに値を持ち、その動径方向成分 $S_{\text{dp},r}(r, \theta, t) = E_{\text{dp},\theta}(r, \theta, t)B_{\text{dp},\varphi}(r, \theta, t)/\mu_0$ は、 $\frac{\partial^2 p_{\text{dp},z}(t)}{\partial t^2} = -\omega^2 p_{\text{dp},z}(t)$ を用いて

$$S_{\text{dp},r}(r, \theta, t) = \frac{\omega^4 \sin^2\theta}{16\pi^2 c^3 \epsilon_0 r^2} |p_{\text{dp},z}(t)|^2 \quad (3.1-25)$$

となる。したがって、ポインティングベクトルから計算したエネルギー量 $W_{\text{dp}}(t) = \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi r^2 \sin\theta S_{\text{dp},r}(r, \theta, t)$ は

$$W_{dp}(t) = \frac{\omega^4}{6\pi c^3 \epsilon_0} |p_{dp,z}(t)|^2 \quad (3.1-26)$$

さらに、この時間平均 $\langle W_{dp}(t) \rangle = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} W_{dp}(t) dt$ は

$$\langle W_{dp}(t) \rangle = \frac{\omega^4}{6\pi c^3 \epsilon_0} |p_{dp,z}(t)|^2 \propto \omega^2 |E_0|^2 \quad (3.1-27)$$

となる。双極子モーメントによる電磁場放射のエネルギーが外部電磁場の散乱によるエネルギー散逸量にあたるため、式(3.1-27)は $\omega^2 |E_0|^2$ に比例するエネルギー散逸が生じることを意味している。

式(3.1-15)-(3.1-27)の結果は非常に簡易的なモデルから導出された結果であるが、電磁場によるイオンの振動エネルギーの変化と、水分子との衝突によるイオンの減速を反映していることから、近似の範囲内で定性的な議論は可能である。実際には、イオンは電磁場から得た振動のエネルギーのみでなく、熱エネルギーを有しているとともに、水分子との衝突を介して熱平衡状態に向かう事から、イオンの熱運動も増大していくことが考えられる。これらの関係を図 3.1-1 にまとめる。本節で得られた挙動は、水分子の熱エネルギーの増大と、熱平衡による系の温度の上昇が含まれていない。さらに、10 kHz 程度の周波数領域では寄与が小さいが、シミュレーションにおける周波数では、500 MHz 程度のとき、水分子の配向分極に起因するマイクロ波吸収などの影響も考えられる。これらの影響については分子動力学シミュレーションに含まれることから、本研究では、本節で示した粗いモデルによる結論とシミュレーション結果を比較する事で、より正確なイオンおよび分子の運動を考察する。

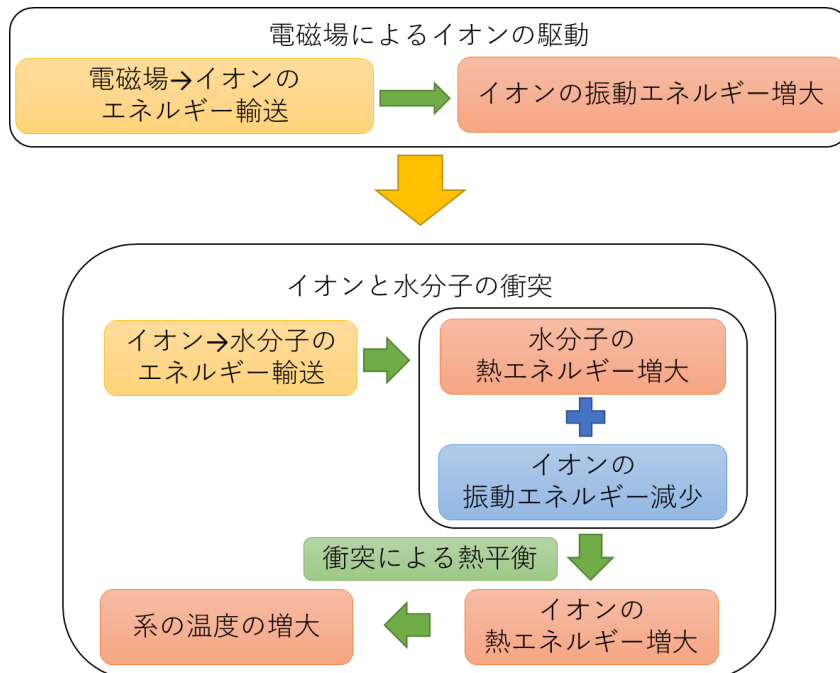


図 3.1-1 電磁場印加によるエネルギー輸送

3.1.3. 評価指標

本研究では、水分子 H_2O 、ナトリウムイオン Na^+ 、塩化物イオン Cl^- のみを対象としてシミュレーションを実施した。これは、海水における質量の96.6%が H_2O であり、残る3.4%のうち Na^+ と Cl^- で占める割合が概ね2.95%を示すことから、これら3種の分子、イオンで海水の99.55%が記述できるためである。

変動する強電磁場が海水に印加されると電磁場のエネルギーが海水に吸収されるが、全体の運動エネルギーが上昇し、温度が上がる過程での各粒子間のエネルギー輸送に関しては正確に解明されていない。そこで、強電磁場印加時のエネルギー輸送を詳細に調査する目的で、本研究では、分子間エネルギー伝搬の先行研究で提案された、分子間力を介した粒子間のエネルギー移動率を評価指標に用いる [7]。

ここで、分子間力を介して粒子 i から粒子 j に移動する並進運動エネルギー、および回転運動エネルギーの移動率について考える。分子間力によって粒子 j から粒子 i にエネルギーが移動して、結果として粒子 i の並進運動のエネルギーの増加に寄与した単位時間あたりのエネルギー $\frac{\partial E_{ij}^{TRANS}}{\partial t}$ は

$$\frac{\partial E_{ij}^{TRANS}}{\partial t} = \mathbf{F}_{ij}^{p-p} \cdot \mathbf{v}_i \quad (3.1-28)$$

と書くことが出来る。同様に、分子間力によって粒子 j から粒子 i にエネルギーが移動して、結果として粒子 i の回転運動のエネルギーの増加に寄与した単位時間あたりのエネルギー $\frac{\partial E_{ij}^{rot}}{\partial t}$ は

$$\frac{\partial E_{ij}^{rot}}{\partial t} = \mathbf{N}_{ij}^{p-p} \cdot \boldsymbol{\omega}_i \quad (3.1-29)$$

と表現できる。ここで、式(3.1-29)にける \mathbf{N}_{ij}^{p-p} 、 $\boldsymbol{\omega}_i$ はそれぞれ粒子 i 、 j 間の分子間力で生じたトルク、ならびに粒子 i の角速度ベクトルである。なお、式(3.1-28)、(3.1-29)は、粒子間でのエネルギー輸送は保存力のみを介しており、外部電磁場は陽に寄与しないことを反映している。したがって、粒子間のエネルギーの移動に限定すれば、外部電磁場によるエネルギー流入が無い事から、エネルギー保存則が成り立つ。よって、分子間力のポテンシャルエネルギー $(V_{ij}^{LJ} + V_{ij}^q)$ を用いて次式が成り立つ。

$$\frac{\partial}{\partial t} (V_{ij}^{LJ} + V_{ij}^q + E_{ij}^{trans} + E_{ji}^{trans} + E_{ij}^{rot} + E_{ji}^{rot}) = 0 \quad (3.1-30)$$

さらに、ポテンシャルエネルギー $(V_{ij}^{LJ} + V_{ij}^q)$ について、並進運動に寄与する成分 $E_{p,ij}^{TRANS}$ と並進運動に寄与する成分 $E_{p,ij}^{ROT}$ の時間微分項を次のように定義する。

$$\frac{\partial E_{p,ij}^{\text{trans}}}{\partial t} = - \left(\frac{\partial E_{i,j}^{\text{trans}}}{\partial t} + \frac{\partial E_{j,i}^{\text{trans}}}{\partial t} \right) \quad (3.1-31)$$

$$\frac{\partial E_{p,ij}^{\text{rot}}}{\partial t} = - \left(\frac{\partial E_{i,j}^{\text{rot}}}{\partial t} + \frac{\partial E_{j,i}^{\text{rot}}}{\partial t} \right) \quad (3.1-32)$$

くわえて、ポテンシャルエネルギーは粒子*i*、*j*で等分されたとみなすと、粒子*j*から粒子*i*に伝搬された単位時間当たりの並進エネルギー $\dot{q}_{i,j}^{\text{trans}}$ 、および回転エネルギー $\dot{q}_{i,j}^{\text{rot}}$ は

$$\dot{q}_{i,j}^{\text{TRANS}} = \frac{\partial E_{i,j}^{\text{TRANS}}}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial E_{p,ij}^{\text{TRANS}}}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\mathbf{F}_{i,j}^{\text{p-p}} \cdot \mathbf{v}_i - \mathbf{F}_{j,i}^{\text{p-p}} \cdot \mathbf{v}_j \right) \quad (3.1-33)$$

$$\dot{q}_{i,j}^{\text{rot}} = \frac{\partial E_{i,j}^{\text{rot}}}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial E_{p,ij}^{\text{rot}}}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\mathbf{N}_{ij}^{\text{p-p}} \cdot \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{N}_{ji}^{\text{p-p}} \cdot \boldsymbol{\omega}_j \right) \quad (3.1-34)$$

となる [7]。式(3.1-33)、(3.1-34)で定義された $\dot{q}_{i,j}^{\text{TRANS}}$ 、 $\dot{q}_{i,j}^{\text{ROT}}$ は、分子間力を介して粒子*j*から粒子*i*に移動した各エネルギーの移動率に意味しており、海水中におけるエネルギー輸送に着目するにあたって、これらの評価指標に使用する。なお、複数原子で構成されるH₂Oは並進運動と回転運動の自由度を持つが、単イオンであるNa⁺とCl⁻は回転の自由度持たないため、並進運動のみとなる。したがって、粒子*i*がNa⁺またはCl⁻である時、 $\mathbf{N}_{ij}^{\text{p-p}} \cdot \boldsymbol{\omega}_i = 0$ である。

また、水分子は OH 間で電荷分布に偏りがあり、永久双極子モーメントを有している。そのため、外部から電場が印加されると、水分子の永久双極子モーメントはトルクを受け、電場に平行となるよう回転するため、配向分極が生じる。したがって、電場による水分子の配向を評価するために、水分子の平均ダイポールモーメントを用いた。一方、イオンに関しては永久双極子モーメントは無いため、単純に外部電磁場に起因する変位を評価した。この変位によって引き起こされる分極は空間電荷分極などと呼ばれる [8]。

3.1.4. 磁場印加時の海水物性における電場応答の寄与

3.1.1 節でベクトルポテンシャル、スカラーポテンシャルから導出したように、変動磁場を発生させると、式(3.1-13)で磁場と関係づけられたような振幅の電場が発生し、式(3.1-10)にしたがって各粒子の運動状態に影響を与える。また、式(3.1-10)からわかるように、磁場は保存力であることから、電磁場エネルギーの吸収による運動エネルギーの増大、ひいては温度上昇には基本的に寄与しないと考えられる。

したがって、本研究では磁場を用いた海水中の給電を目的としているが、その際の物性を調べるにあたっては、式(3.1-10)で示されたように電場の影響の寄与を考慮しなければならない。本節では、想定される変動磁場を印加された環境において、磁場と同時に引き起こされる電場の影響が顕著であり、電場による応答も加える必要がある事を示す。

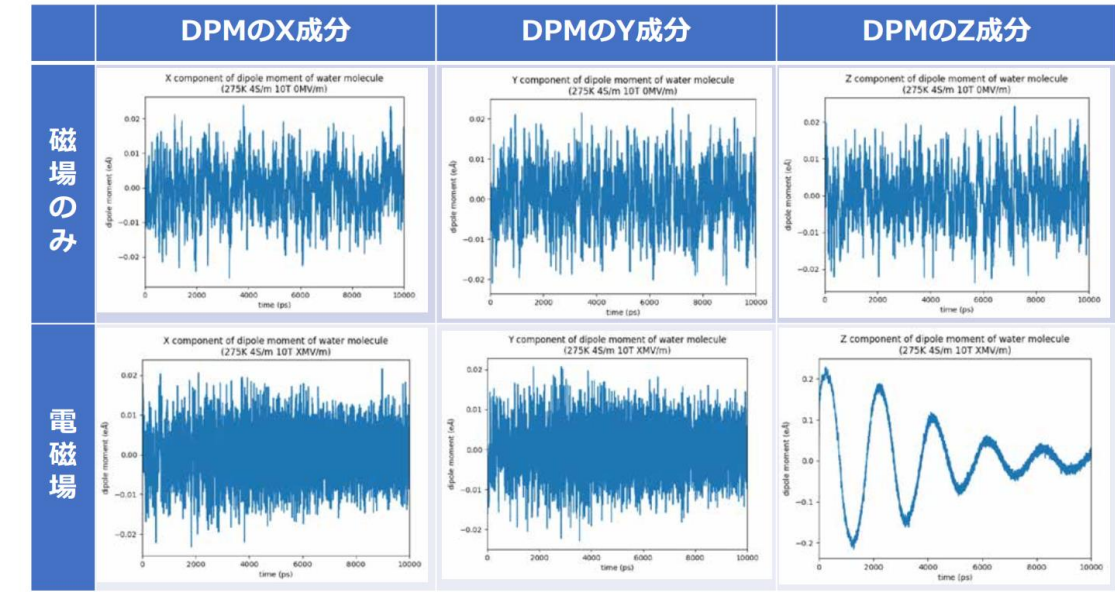


図 3.1-2 磁場または電磁場を海水中に印加した際の水分子のダイポールモーメント

図 3.1-2 は、周波数 $f = 500 \text{ MHz}$ 、導電率 $\sigma = 4 \text{ S/m}$ 、温度 $T = 276 \text{ K}$ 、 $|\mathbf{E}_0| = 0 \text{ MV/m}$ または 250 MV/m での水分子のダイポールモーメントの各成分を表したものである。ただし、印加方向は $\mathbf{E}_0 = |\mathbf{E}_0| \mathbf{e}_z$ とし、 $|\mathbf{B}_0| = 10 \text{ T}$ とした。また、水分子のモデルには SPC/E モデルを用いた。このモデルは、OH 間距離、および HOH 間角度が固定されるため、水分子は 3 粒子からなる剛体として扱う。また、水分子-水分子間の相互作用では、全ての原子間においてクーロンポテンシャル V_{ij}^q のみが計算される、酸素原子間では Lenard-Jones ポテンシャル V_{ij}^{LJ} が計算される。また、イオン-水素分子間では、水素分子間と同様に、全てのイオン-原子間で V_{ij}^q が計算される一方、 V_{ij}^{LJ} はイオン-酸素原子間のみ計算される。

図 3.1-2 からわかるように、磁場のみ、すなわち $|\mathbf{E}_0| = 0 \text{ MV/m}$ の時は各成分でダイポールモーメントに差異は見られないが、 $|\mathbf{E}_0| = 250 \text{ MV/m}$ の結果では、明らかに電場方向（z 軸方向）に対して振動しているおり、その周期も印加した電磁場の周期と一致している。理論的にもダイポールモーメントが電場方向と並行の時にポテンシャルエネルギーが最小になることから、このダイポールモーメントの振動は電場による影響である。また、このダイポールモーメントの振動は、電磁場によって誘起された水分子の回転運動を意味していることから、電磁場のエネルギーが水分子の回転エネルギーに変換されたことを示している。

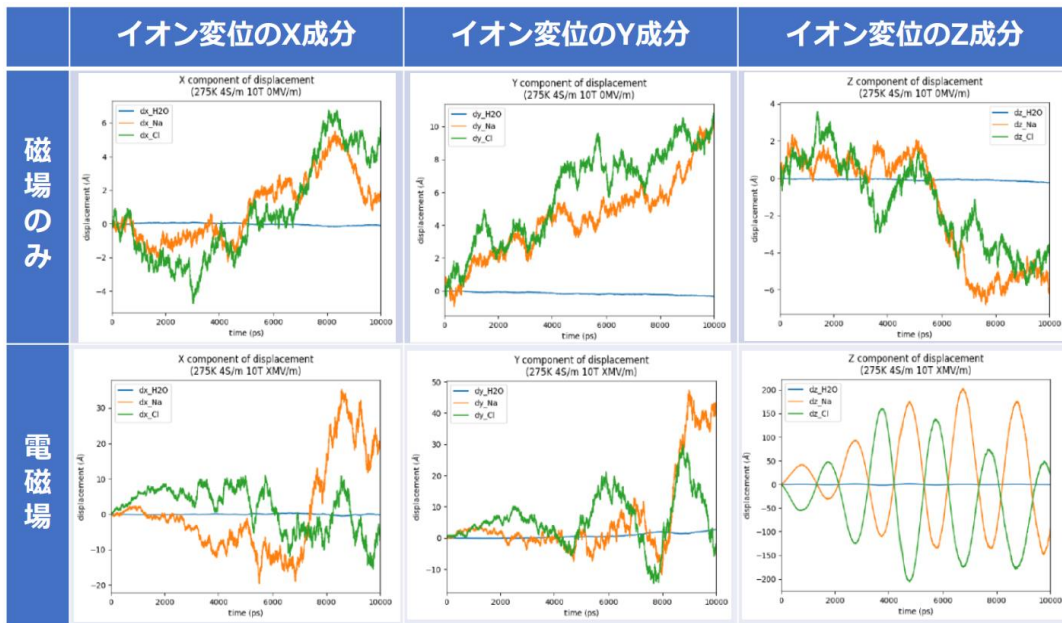


図 3.1-3 磁場または電磁場を海水中に印加した際のイオンの変位

さらに、磁場、あるいは電磁場を印加した際のイオンの変位を図 3.1-3 に示す。図 3.1-3 の結果は、明らかに電磁場を印加した場合のイオンの z 方向への変位が、磁場のみ印加した場合の変位に比べて大きくなっている。くわえて、 Na^+ と Cl^- とでは逆方向に変位しており、電気的中性である H_2O の変位は非常に小さいことから、各イオンの変位はクーロン力に起因していることがわかる。したがって、物理的環境を再現するにあたって、電場が必要であるといえる。また、図 3.1-3 で誘起されたイオンの変位は並進運動エネルギーの増加を意味していることから、図 3.1-3 の結果は電磁場のエネルギーが各イオンの並進運動エネルギーに変換されていることを示している。

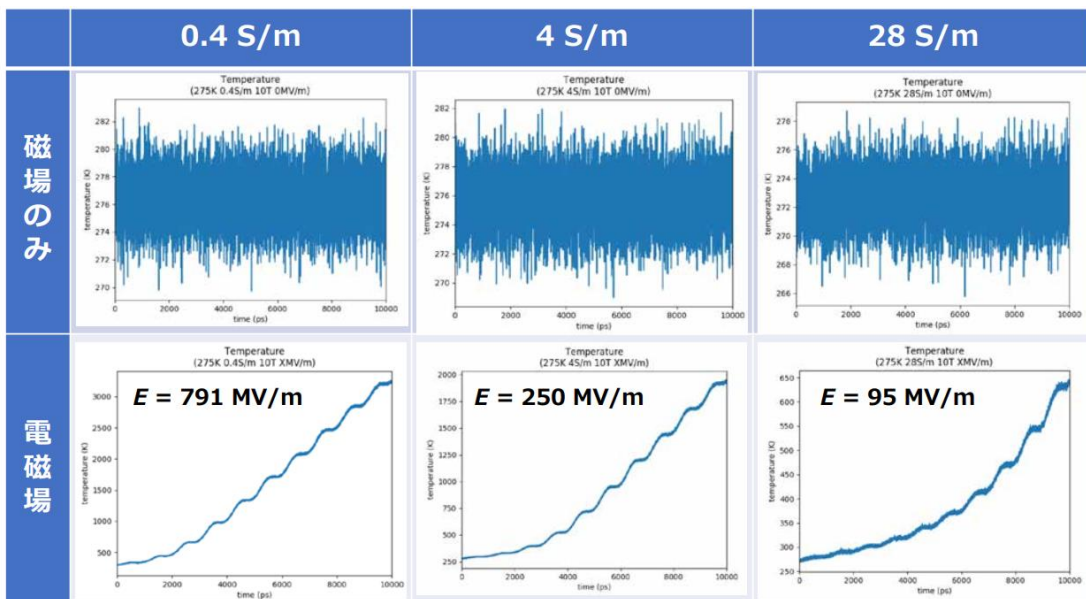


図 3.1-4 磁場または電磁場を海水中に印加した際のイオンの温度上昇

さらに、印加した電磁場から海水の各粒子へのエネルギー輸送における電場の影響を調べるため、導電率を 0.4 S/m、4 S/m、28 S/m とした場合のそれぞれの温度上昇を図 3.1-4 に示す。ただし、ここでは磁場を 10T で一定としたため、式(3.1-14)に基づいて電場振幅を設定すると、導電率が增大すると電場の振幅が減少することに注意しなければならない。

図 3.1-4 のうち、磁場のみを印加したシミュレーションでは温度上昇がみられないが、これは各粒子に対して磁場が保存力として作用することに起因している。一方、電場も含めて印加されたシミュレーションでは、あきらかな温度上昇がみられる。これは図 3.1-2、図 3.1-4 で示された通り、電場がイオンや水分子の運動を誘起することで、電磁場のエネルギーを各粒子の運動エネルギーに変換したことに対応している。

以上の結果に基づき、本研究では、磁場のみではなく、電場の影響も含め、シミュレーションを実施することとした。

3.1.5. シミュレーションにおける密度の温度依存性

マクロな物性を表現するにあたって、密度の温度依存性は非常に重要である。特に水においては、約 277K で密度が最大となり、より温度を低くしていくと、融点周りで氷に相変化する。これらの性質を反映して、例えば深海域などの高圧力下では水深を増大させていったときに、温度は密度最大となる約 277K 付近で一定となるなど、物性と、温度および密度との間で関係のあることが知られている。

一方、分子動力学シミュレーションでは、融点や密度最大を示す温度が用いる水分子のモデルに依存することが報告されている [9, 10]。したがって、現実的な物性の状態で温度および密度の設定を行うには、あらかじめ温度と密度を関係づける状態方程式について、調べる必要がある。また、分子動力学シミュレーションを実行した際に、事前に設定された温度、密度の状態を把握しておくことは、結果を解釈する上でも重要である。そこで、本節では、水、および海水について評価温度を設定し、その時の密度を評価することで、本研究のシミュレーション条件において密度が最大となる温度 (the temperature of maximum density, TMD) を調査した。

評価に際しては、水分子数を 2000 個とした。また、海水のケースでは、4S/m となるように各イオンを加えた。

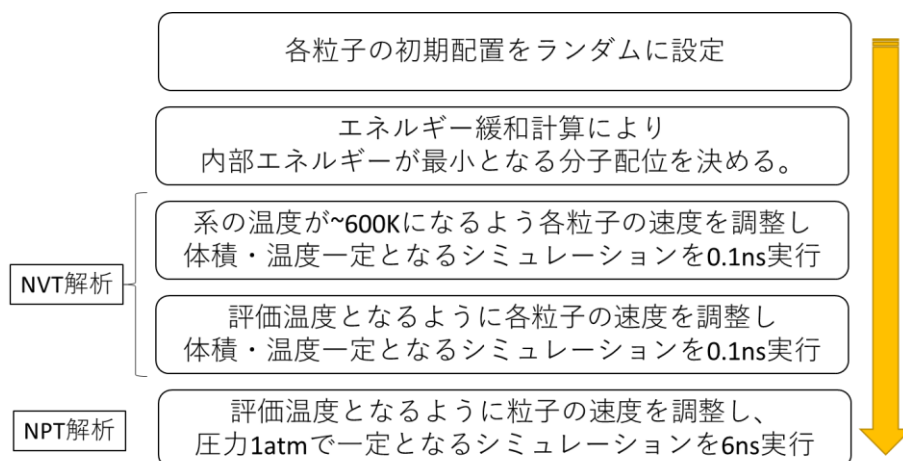


図 3.1-5 温度-密度評価の解析ステップ

評価にあたっては、系全体として平衡状態とするために、図 3.1-5 に示すような解析ステップを実行した。各粒子をランダムに配置し、内部エネルギーが最小となるように分子配位を決定した。その後、系の温度を上げ、0.1ns の時間で分子動力学シミュレーションを実行した。つづいて、評価温度に設定し、再度 0.1ns の時間で分子動力学シミュレーションを実行した。このステップでは、体積および温度を一定とする NVT 解析を行っており、圧力と内部エネルギーは変化している。なお、このステップでは、仮想摩擦を導入し、分子の速度を調節する事で温度を制御している。

最後に、圧力および温度を一定とする NPT 解析を 6ns 実行した。ここでは、前述の通り速度調節によって温度を制御し、仮想ピストンによるスケール変換を行う事で圧力を制御している。したがって、このステップでは、体積および内部エネルギーは変化する。この長時間解析の結果を平衡状態であるとみなし、密度の時間平均を算出することで、温度と平衡状態での密度の関係性を求め、それらのデータから極値周りで 2 次関数での回帰分析を行う事で TMD を計算した。

各温度における密度の計算結果を表 3.1-1 および図 3.1-6 に示す。図 3.1-6 では、水および海水のシミュレーション結果を赤、および青のマーカーで表現しており、一般的に知られている水の物性については黒の実線で示した。結果からわかるように、水、海水ともに 250K 付近で密度が極大値を持つ。また、海水ではイオンの重量があるため、同等の圧力下では密度が高くなる傾向を示している。くわえて、海水の TMD は水と比べて低いことがわかる。さらに、今回の結果では海水のケースについては 190K にて密度が増大しており、凝固点を下回ったことが考えられる。一方水のケースでは、TMD 以下の温度で密度は単調減少していることから氷への相変化は見られなかった。ただし、水、海水ともに、本節のシミュレーションでは、TMD 以下の温度では、たとえ密度のプロットが凝固点を示していない状態であっても、過冷却状態も含まれうる事には注意が必要である。

特に、水、海水双方のケースについて、TMD と思われる温度付近の 5 点を抽出し、2 次関数で近似して最小二乗法を用いて評価すると、水における最大密度および TMD はそれ

それぞれ1.0061kg/m³、248.8Kであり、海水では1.0280kg/m³、243.1Kとなる。これらの結果から、本研究のシミュレーション条件において、本節で得られたこれらの TMD を基準として、低い温度設定時には過冷却状態の可能性があり、高い温度設定では安定した液相であることがわかる。

表 3.1-1 密度および温度上昇結果表

設定温度 [K]	水 (0 S/m)		海水 (4 S/m)	
	温度[K]	密度 [g/cm ³]	温度[K]	密度 [g/cm ³]
190	--	--	190.04(2)	1.0166(3)
200	199.96(2)	0.9865(6)	200.04(2)	1.0184(5)
215	214.98(2)	0.9960(5)	214.97(2)	1.0247(8)
225	224.97(2)	1.0022(4)	225.02(3)	1.0257(6)
240	240.01(2)	1.0056(3)	240.01(2)	1.0280(3)
250	250.01(2)	1.0060(2)	249.93(3)	1.0280(3)
260	260.02(2)	1.0054(2)	260.01(3)	1.0257(3)
275	275.04(2)	1.0013(2)	275.02(4)	1.0210(1)
300	300.03(2)	0.9905(1)	300.01(3)	1.0092(1)
315	315.00(2)	0.9818(1)	314.95(3)	1.0005(2)

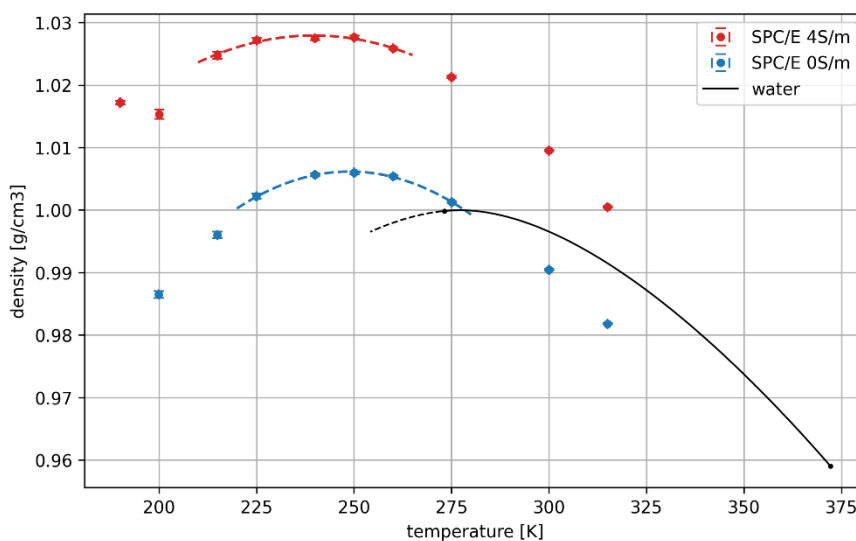


図 3.1-6 温度-密度シミュレーション結果

3.1.6. 温度の電磁場周波数依存性と誘電損失

3.1.2 節では、古典的緩和時間近似モデルに基づいて変動電磁場を印加した場合のイオンの振動を導出した。本節では、水の場合、および海水の場合について分子動力学シミュレーションを行い、その結果を通じてそれぞれの温度依存性を検討する。ここで、海水は 4 S/m とし、初期温度は 300 K とした。3.1.5 節の結果から、この設定温度は液相であり、TMD

よりは十分高温といえる。

シミュレーションから得られた純水における温度上昇を図 3.1-7 に示す。ここで、印加した電磁場の周波数は 50 MHz および 500 MHz であり、電場の振幅は 50 MV/m および 500 MV/m である。この時、イオンが含まれないため、系の温度変化は水分子の挙動を反映することとなる。図 3.1-7 のうち、特に振幅 500 MV/m の結果を見ると、明らかに 50 MHz の時には温度が電場の周期を反映した傾向にあるが、これは水分子の双極子モーメントの回転を反映したエネルギーであると考えられる。一方、500 MHz では明らかに 100 ns の間に温度上昇がみられる。これは、水分子の配向分極の異常分散による、マイクロ波吸収を反映したものと考えられる。マイクロ波吸収は、水分子の双極子モーメントが電場の変化に十分に追従できなくなり、位相差を伴って回転する事で生じる熱運動であり、分子動力学シミュレーションで再現可能な現象である。50 MV/m では 500MV/m 比べると顕著な周波数差による温度上昇の差は見られないが、それは 100 ns という短時間でのシミュレーションであるためだと考えられる。

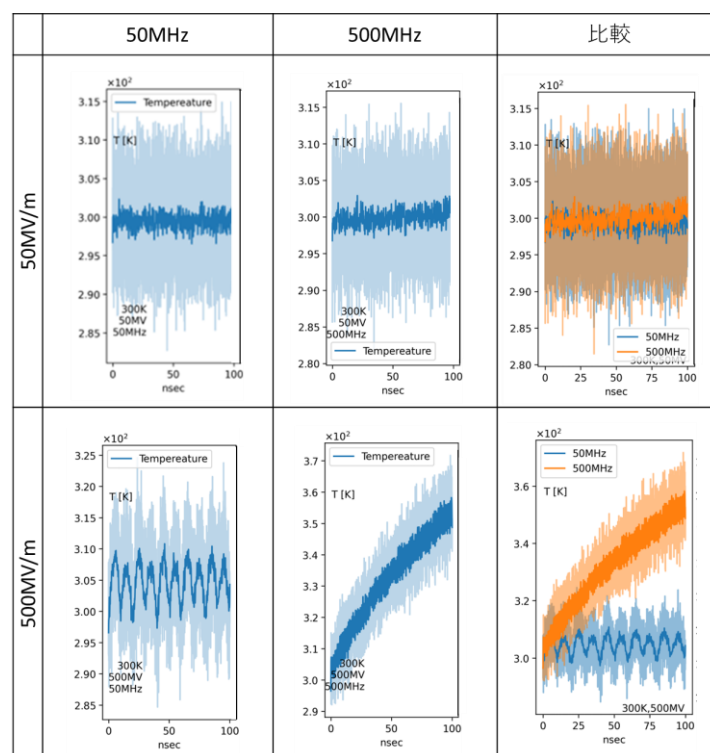


図 3.1-7 純水の電磁場印加による温度上昇

さらに、この温度上昇の差がマイクロ波吸収であることを確かめる目的で、500 MV/m の高強度で周波数を 5 MHz から 500 MHz まで変化させたときの温度上昇を図 3.1-8 にまとめる。この時、明らかに 100 MHz 以上の周波数では顕著な温度上昇がみられる。一般にマイクロ波吸収のピークは数 GHz にあると考えられており、500 MHz が最も温度上昇の大きい結果と矛盾しない。また、5 MHz のみ 1 周期にわたった評価のために 200 ns まで評価したところ、上昇した温度が戻る現象が確認された。これは、図 3.1-7 の 50 MHz の結果で見ら

れたように、電場の位相に追従した水分子の回転が行われた結果であると考えられる。このことから、イオンの存在しない純水では、より低い周波数では、5 MHz の結果と同様に温度上昇は見られないものと考えられる。

つづいて、振幅 50 MV/m の電磁場を印加した場合の 4 S/m の海水について、シミュレーションを実施した。ここで、周波数は周波数 50 MHz および 500 MHz の場合について評価した。これらの設定では、500 MHz はマイクロ波吸収の影響が懸念される周波数ではあるが、図 3.1-7 から、電場振幅が低いために、その影響は小さいといえる。シミュレーションから得られた海水についての温度、および各粒子の運動エネルギーの結果を図 3.1-9 に示す。図 3.1-9 からわかるように、海水の結果は水分子の結果とは大きく異なり、顕著な温度上昇がみられる。

第一に、水分子の運動エネルギーの急峻な増加は、イオンと水分子との衝突モデルで捉えるならば、非常に頻繁に衝突が起きているために生じると考えられる。図 3.1-9 (b)、(c) の 50MHz の結果では、50MHz に同期した温度上昇の振動が見て取れるが、その間にも温度が上昇していることからわかる。したがって、3.1.2 節で導入した緩和時間 τ で解釈するならば、電磁場の周波数の逆数 $2\pi/\omega$ と比べて非常に短い、低周波極限の環境であると考えられる。

つづいて、図 3.1-9 のいずれのグラフにおいても周波数による差が見られなかった点を考えると、これは 3.1.2 節で述べたように、低周波極限においてイオンの運動エネルギーが周波数に依存しない事を反映しているものと思われる。なお、自由空間の荷電粒子に周期的な電場を印加しても、式(3.1-18)において $\tau \rightarrow \infty$ とすればわかるように、電場の周期より長い期間で時間平均を取れば運動エネルギーは周波数に依存しない。この事は、少なくとも自由空間では、電磁場の外力によってイオンに生じる運動エネルギーの時間平均は、周波数に依存しない事を意味している。

ただし、3.1.2 節でも述べたように、電磁場散乱は周波数に依存することが知られている。そのため、散乱波として散逸されるエネルギーは周波数に依存する事から、電磁場伝搬としては強い周波数依存性を示すと考えられる事は、注意が必要である。

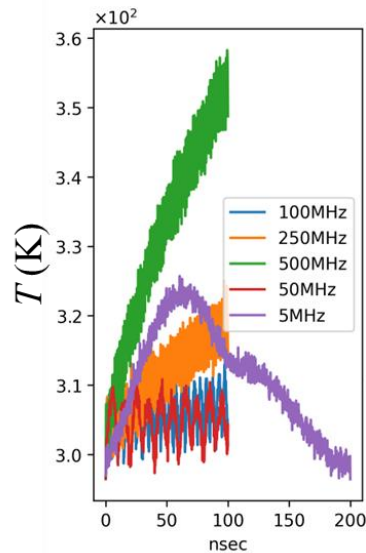


図 3.1-8 500MV/m における純水の温度上昇

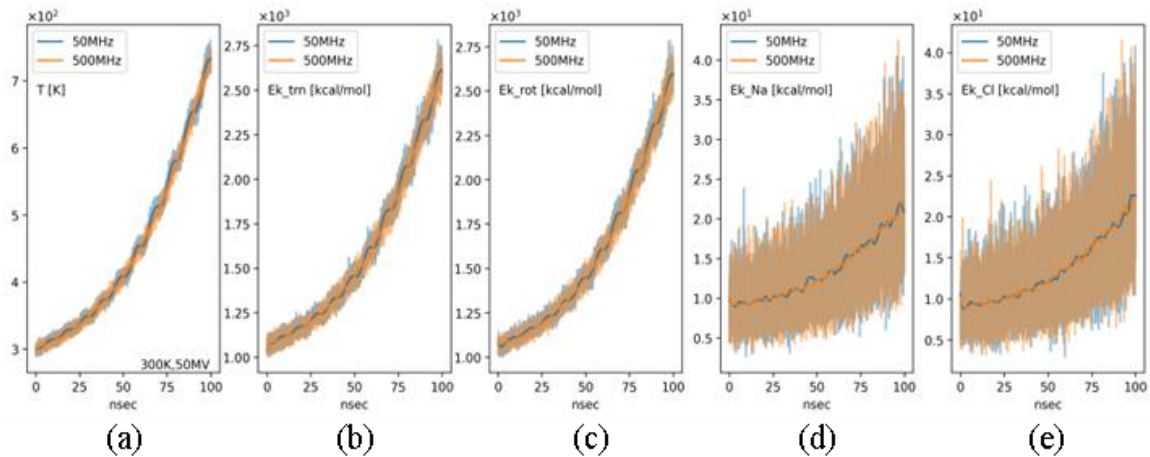


図 3.1-9 電磁場印加による海水の(a)温度、水分子の(b)並進運動エネルギー、(c)回転運動エネルギーならびに(d) Na^+ 、(e) Cl^- の運動エネルギー。

3.1.7. 電磁場印加によるエネルギー移動率の変化

3.1.2 節で理論的に取り扱ったのは電磁場によって駆動されるイオンの運動と、水分子との衝突による減速のみであったが、実際には各粒子間でのエネルギー輸送があり、3.1.3 節で示した各運動エネルギー間のエネルギー輸送率がマクロな熱流束に対応する [7]。そこで、衝突によって各粒子の運動エネルギーに電磁場のエネルギーが輸送される詳細を調べる目的で、分子動力学シミュレーションを実施し、式(3.1-33)、(3.1-34)で定義されたエネルギー移動率 $\dot{q}_{i,j}^{\text{TRANS}}$ 、 $\dot{q}_{i,j}^{\text{ROT}}$ を評価した。

はじめに、シミュレーション条件として、温度は 300K とし、電場の強度および周波数は

それぞれ 50MV/m、500MHz となるよう、電磁場を設定した。また、海水は 4S/m とし、10ns にわたってシミュレーションを行った。

図 3.1-10 は、イオンと水分子間ならびにイオンイオン間のエネルギー移動率 $\dot{q}_{i,j}^{\text{TRANS}}$ 、 $\dot{q}_{i,j}^{\text{ROT}}$ について、分子間距離を横軸にプロットしたものである。当然ながら、近接した分子間のエネルギー移動率が高く、距離が離れるに応じてエネルギー移動率が低下することがわかる。さらに、分子間距離を十分稠密なビン区間に分け、各ビン区間のエネルギー輸送率の平均値をプロットしたものを図 3.1-11 に示す。ただし、イオン数は系全体で 10 個に過ぎないため、イオン水分子間のエネルギー移動率のみプロットした。図 3.1-11 からわかるように、全体として並進運動のエネルギー移動率が回転運動のエネルギー移動率より低い傾向にある。また、並進運動、回転運動ともに、イオン水分子間でのエネルギー移動率の方が水分子同士のエネルギー移動率よりも高い傾向にある事がわかる。したがって、水分子間でのエネルギー輸送よりも早く、イオン水分子間でのエネルギー輸送が行われていることがわかる。

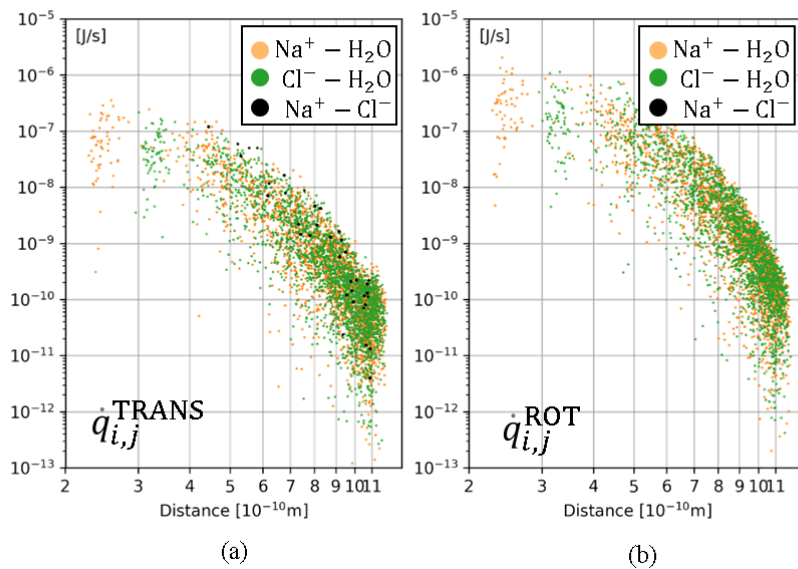


図 3.1-10 海水におけるイオン-水分子間での(a)並進および(b)回転の運動エネルギー移動率分布図

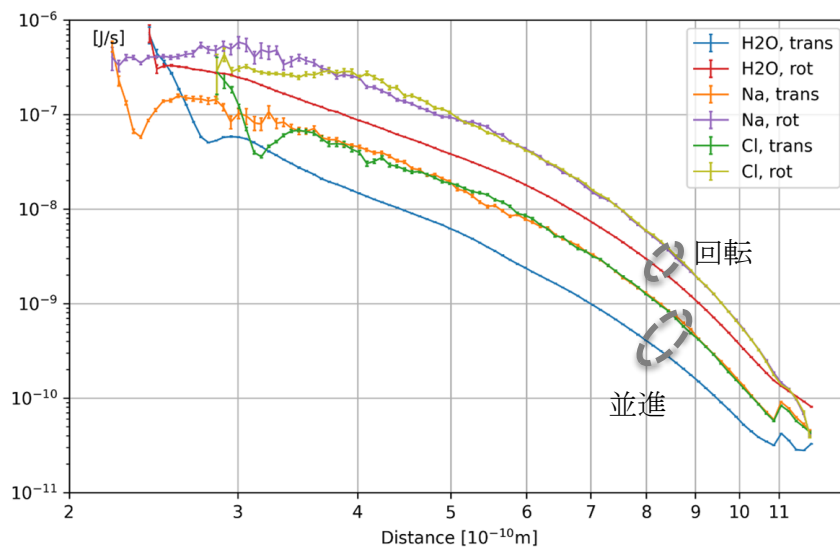


図 3.1-11 海水のエネルギー移動率平均値プロット

さらに、距離が近づくにつれて、特に並進運動については3Å前後にキック構造が見られる。これらのキック構造は、各粒子のペアについて、ポテンシャルエネルギー的に安定な距離があり、その距離にある粒子間ではエネルギーが安定している事からエネルギー移動が生じづらいためだと考えられる。

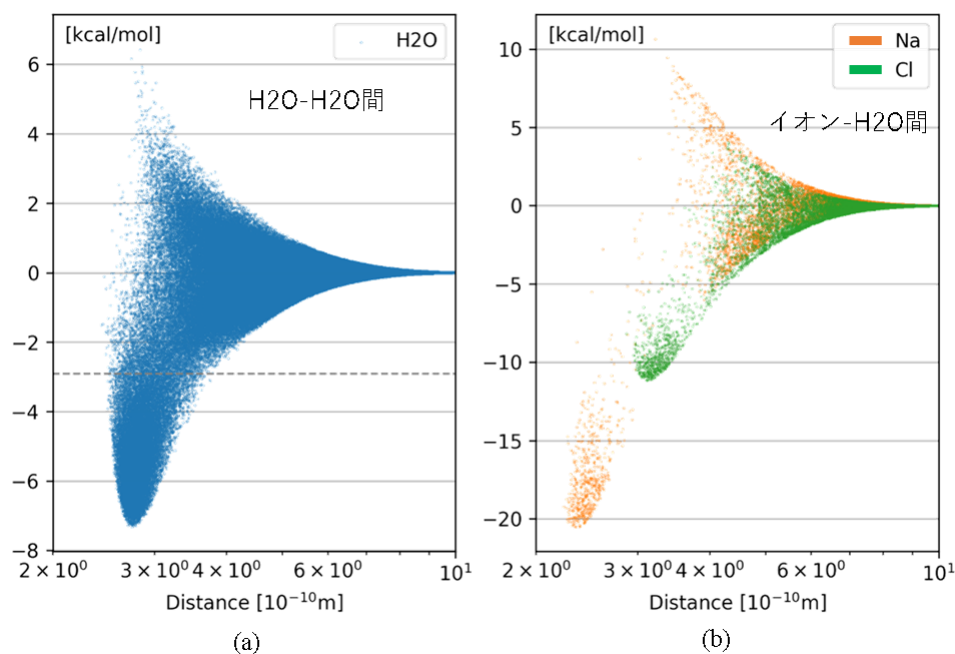


図 3.1-12 (a)水分子間および(b)イオン-水分子間のポテンシャルエネルギー分布

図 3.1-12 は、各粒子間のポテンシャルエネルギーを分子間距離に応じてプロットしたものである。図 3.1-12 (a)から、水分子間のポテンシャルエネルギーは2.8Å前後に極小値を示すポイントがあることがわかる。これは、2つの水分子に着目した時に、一方の酸素原子

ともう一方の水分子にある 2 つの水素原子との引力、ならびに酸素原子間の斥力とのバランスによって生じる。同様に、図 3.1-12 (b)からは、 Na^+ -水分子間ではおおよそ 2.3 \AA 前後に、 Cl^- -水分子間では 3.2 \AA 前後にポテンシャルエネルギー極小値を持つことがわかる。これらの極小値もまた、イオンと水分子を構成する酸素原子および水素原子のポテンシャルエネルギーの和から生じており、特にイオンと水分子が安定な距離にあるペアに関しては水和していると言える。さらに、ここで注目すべき点は、 Na^+ -水分子間のポテンシャルエネルギーの極小値が Cl^- -水分子間と比べて低い値を示し、安定である事である。これは、酸素原子のほうが電荷の絶対値が大きいために生じると考えられる。また、水分子間のポテンシャルエネルギーより、イオン-水分子間のポテンシャルエネルギーの方が極小値が低く、安定である。これは、水和の結合エネルギーが水素結合よりも大きな値であることを意味している。したがって、水分子は、水分子の運動よりイオンの運動から影響を受けやすいことを意味しており、図 3.1-11 で示されたように水分子-イオンペアのエネルギー移動率が水分子間のエネルギー移動率よりも高い事と一致している。また、水分子間の距離、ならびにイオン-水分子間の距離は概ね 3 \AA 程度であり、3.1.2 節において緩和時間の見積りに用いた概算値と概ね一致している。したがって、電磁場の位相が大きく変化する前に、イオン-水分子間で衝突するというモデルは、概ね正しいことがわかる。

3.1.8. 電磁場印加によるエネルギー吸収過程の検証

3.1.2 節の理論検討から、温度上昇のメカニズムは、図 3.1-1 に示されているように、電磁場によってイオンの振動が励起され、電磁場の位相が大きく変化するよりも早く、ポテンシャルエネルギーを介して水分子の運動エネルギーにされると考えられる。その後、同じくポテンシャルエネルギーを介してイオンと他の水分子へとエネルギーは輸送され、熱平衡状態へと向かうことで、電磁場のエネルギーが温度上昇をもたらすことが予想される。

本節では、上記の温度上昇メカニズムを分子動力学シミュレーションによって確かめる。シミュレーションでは、外部電磁場によって生じる外力を特定の粒子のみに作用させることが可能である。そこで、系の温度上昇を引き起こす主要因がイオン振動であることを確かめるために、(1) 全ての粒子に外部電磁場による外力を作用させた場合、(2) イオンのみに外部電磁場の外力を作用させた場合、(3) 水分子のみに外部電磁場の外力を作用させた場合の 3 ケースについて分子動力学シミュレーションを実施し、評価した。

シミュレーションにあたり、導電率 $\sigma = 4 \text{ S/m}$ 、温度 $T = 300 \text{ K}$ 、電場振幅 $|\mathbf{E}_0| = 50 \text{ MV/m}$ とした。また、周波数を設定するにあたって、数 GHz 程度の周波数では水分子の誘導損失によるエネルギー吸収が顕著になる事から、誘導損失の周波数から十分に離すため、本節での周波数は $f = 50 \text{ MHz}$ に固定した。

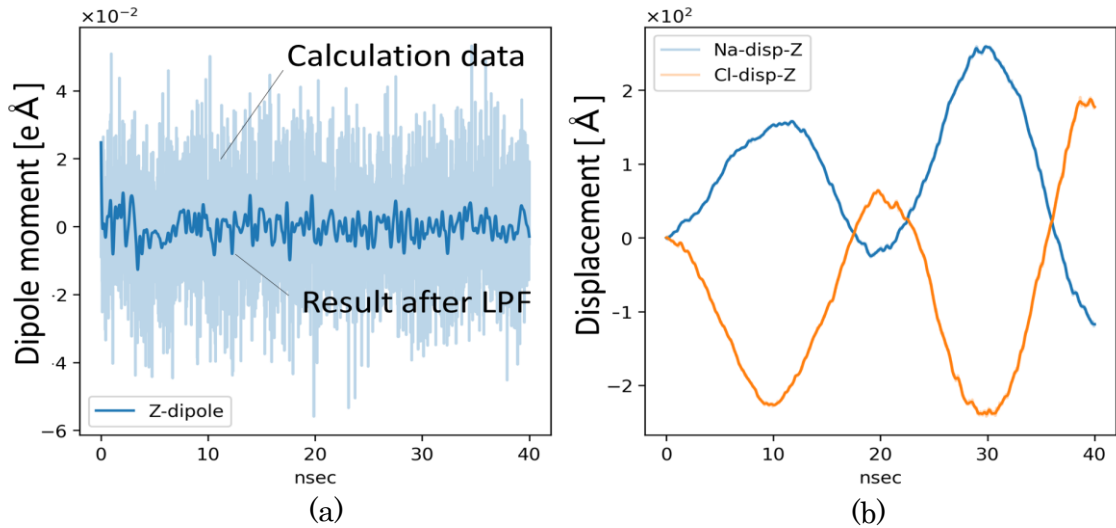


図 3.1-13 イオンのみに電磁場を印加した際の

(a) 電場方向のダイポールモーメントと(b)イオンの変位

はじめに、イオンのみに電磁場による外力を与えるシミュレーションを実施した。図 3.1-13 は電磁場による外力をイオンのみに与えた際の電場方向の水分子のダイポールモーメントと、イオンの変位を示したものである。図 3.1-2、図 3.1-3 のように、全粒子に電磁場を印加した場合にはどちらも電磁場の周波数を反映した周期性を示すが、図 3.1-13 では、外力を与えたイオンの変位のみが周期性を示しており、外力を与えなかったダイポールモーメントは特に周期性を示していない事がわかる。したがって、適切に電磁場の外力をイオンのみに与えられていることにくわえ、イオンの運動はダイポールモーメントの回転を引き起こす要因とはならない事も見て取れる。

さらに、イオンのみに外力を与えた場合の系の温度、水分子の並進運動エネルギー $\sum_{i \in \text{H}_2\text{O}} \sum_j E_{i,j}^{\text{TRANS}}$ 、水分子の回転運動エネルギー $\sum_{i \in \text{H}_2\text{O}} \sum_j E_{i,j}^{\text{ROT}}$ 、 Na^+ の並進運動エネルギー $\sum_{i \in \text{Na}^+} \sum_j E_{i,j}^{\text{TRANS}}$ 、 Cl^- の並進運動エネルギー $\sum_{i \in \text{Cl}^-} \sum_j E_{i,j}^{\text{TRANS}}$ を図 3.1-14 に示す。図 3.1-14 をみると、系の温度、ならびに各粒子の運動エネルギーの増加について、全粒子に電磁場を印加した場合とイオンのみに電磁場を印加した場合とで明らかな差は見られない。この事から、水分子の誘導損失による温度上昇の見られない周波数 $f = 50 \text{ MHz}$ の電磁波を印加した時に生じるエネルギー吸収は、イオンが主要因である事がわかる。また、イオンの変位が振動していること、ならびに水分子の並進運動エネルギー、回転運動エネルギーがともに増加している事から、イオンが外部電磁場によって振動し、そのイオンの並進運動エネルギーが、水分子との水素結合を介して水分子の並進運動エネルギー、回転運動エネルギーを増加させていると考えられる。

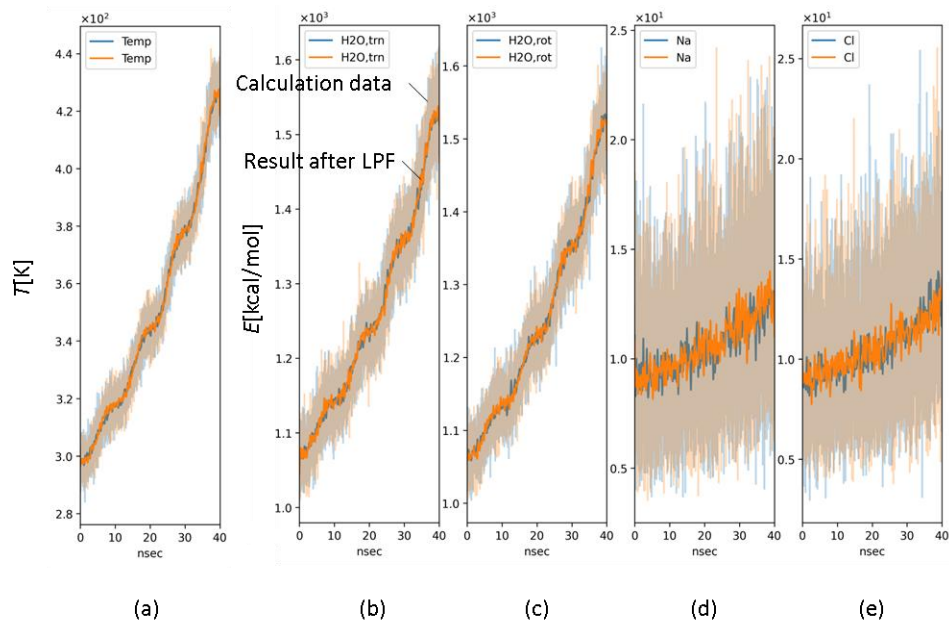


図 3.1-14 電磁場を全粒子に印加したケース（青）とイオンのみに印加したケース（橙）における(a)温度、(b)水分子の並進運動エネルギー、(c)水分子の回転運動エネルギー、(d)Na⁺の並進運動エネルギー、(e)Cl⁻の並進運動エネルギー

つづいて、水分子の電磁場応答がイオンの変位、系の温度、各粒子の運動エネルギーに与える影響を評価するため、水分子のみに電磁場の外力を与えたシミュレーションを実施した。図 3.1-15 は水分子のみに電磁場を印加したシミュレーションにおける水分子のダイポールモーメントと各イオンの変位を表している。ここでは、水分子のダイポールモーメントは明らかに外部電磁場の周期性を反映した挙動を示している一方で、イオンの変位にはその周期性がみられないことがわかる。図 3.1-13、図 3.1-15 から、水分子のダイポールモーメントおよびイオンの変位は、それぞれ水分子の電磁場応答、イオンの電磁場応答に起因していることがわかる。したがって、少なくとも電磁場の周期性を反映した挙動に関しては、水分子の電磁場応答はイオンの変位を引き起こさず、イオンの変位は水分子のダイポールモーメントを引き起こさないとと言える。

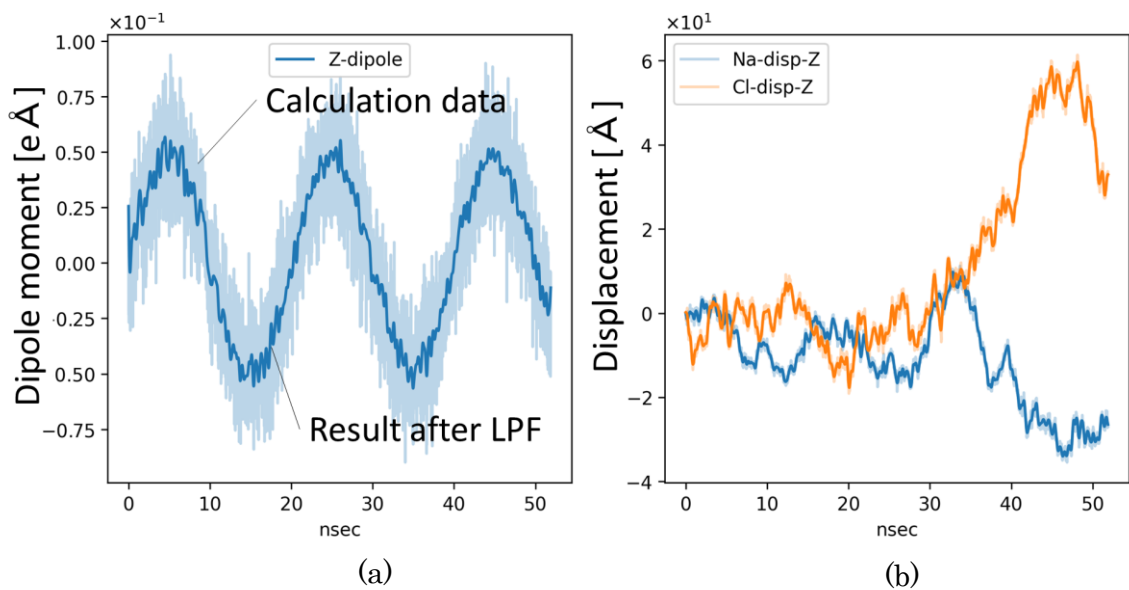


図 3.1-15 水分子のみに電磁場を印加した際の

(a)電場方向の水分子のダイポールモーメントと(b)各イオンの変位

さらに、図 3.1-14 と同様に、系の温度、および各粒子の運動エネルギーを図 3.1-16 に示す。ただし、図 3.1-16 では電磁場を海水の全粒子に印加したケース、および海水のイオンのみに印加したケースにくわえ、純水に印加したケースも記載した。図 3.1-16 の結果は、水分子のみに電磁場を印加した場合の系の温度、ならびに各粒子の運動エネルギーの変化が、海水の全粒子に電磁場を印加した場合とは異なり、純水に電磁場を印加した場合の結果とよく一致していることがわかる。このことから、海水中の水分子の電磁場応答は、系の温度上昇、ならびに各粒子の運動エネルギーに関しては純水の電磁場応答とほぼ等しい事がわかる。

さらに各粒子の運動エネルギーの変化に着目すると、純水と同様に水分子の並進運動エネルギー、回転運動エネルギーがともに上昇している。これは、図 3.1-15 に示されるように、電場方向にダイポールモーメントが振動することで回転運動を引き起こすと共に、各水分子がポテンシャルエネルギーを介して結合していることから、並進運動エネルギーにも寄与したものと考えられる。一方、イオンの運動エネルギーもわずかながら増加しているが、これは、水分子の運動エネルギーと同様に、ダイポールモーメントの振動に起因している。しかしながら、明らかに海水全体に電磁場を印加した場合と比べて僅かな量のエネルギー増加にとどまっている。

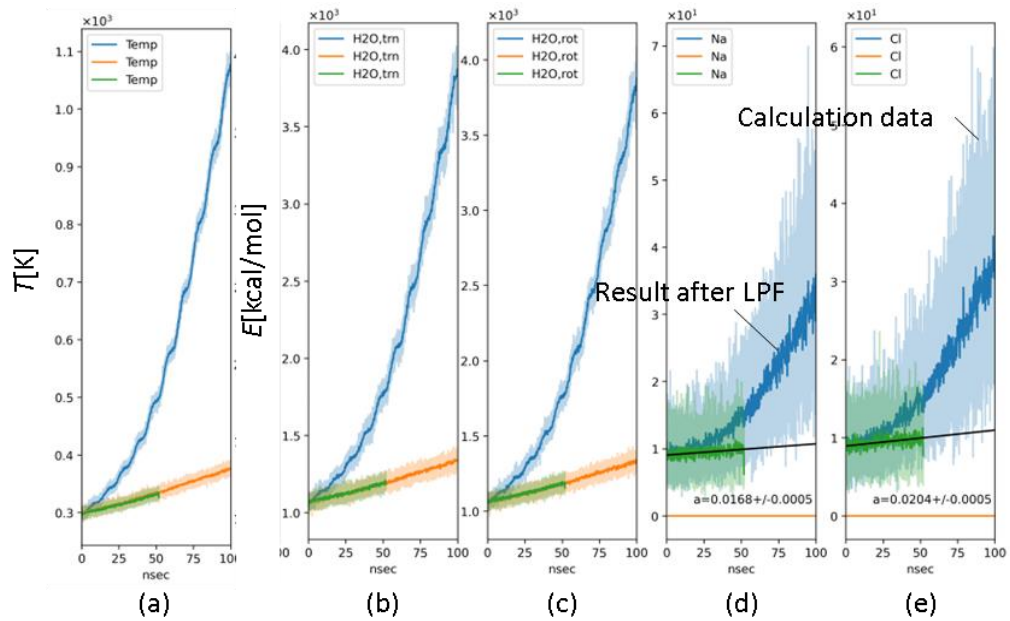


図 3.1-16 海水に電磁場を全粒子に印加したケース（青）、海水のうち水分子のみに印加したケース（緑）、および純水に印加したケース（橙）における(a)温度、(b)水分子の並進運動エネルギー、(c)水分子の回転運動エネルギー、(d)Na⁺の並進運動エネルギー、(e)Cl⁻の並進運動エネルギー

以上の結果から、誘電損失の無視できる低周波の電磁場を海水に印加した時、純水と比較して大きい海水の温度上昇は主にイオンの電磁場応答によって引き起こされており、水分子の電磁場応答は純水の温度上昇と同程度の寄与しか果たしていない事がわかった。また、各粒子の運動エネルギーに関しても、イオンの電磁場応答が主なエネルギー源である。

この結果により、当初想定していた温度上昇メカニズムが概ね正しい事が明らかとなった。分子動力学シミュレーションの適用範囲において、外部電磁場の周波数には依存せずに温度上昇が生じる結果が得られたが、3.1.2節で述べた通り、実際には外部電磁場によって誘起されたイオンの変位によって、新たな電磁場が放出される。これは、マクロな描像における散乱現象であり、周波数に依存する事から、イオンの変位を分子動力学シミュレーションで再現することで、間接的に海水中の電磁場伝搬の周波数依存性が散乱によるものだという事の傍証を提示する事ができる。今後の課題として、本研究で得られたシミュレーション結果を用いて、想定される散乱波によるエネルギー散逸量を見積もるとともに、それらの実験系との整合を検証する事が残されている。

3.1.9. 複素誘電率計測による海水の状態の把握手法

ここでは、大強度磁界を印加されている海水の状態を、複素誘電率を計測することによって把握する方法について説明する。

3.1.9.1. 複素誘電率計測原理

複素誘電率の計測方法のうち、低周波でもっともよく用いられる手法に平行平板電極を用いる方法がある。この方法では、被測定媒質中に平行平板電極を配置して、両端に交流電圧を印加した時の複素電圧と複素電流を計測するものである。複素電圧と複素電流から複素インピーダンス（複素アドミッタンス）が求められることから、平行平板電極のキャパシタならびに抵抗の値を求めることができる。それらの値と平行平板電極のジオメトリから複素誘電率が求められる。

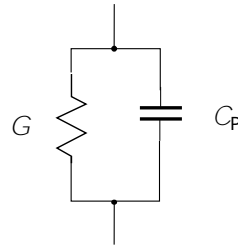


図 3.1-17 平行平板等価回路

平行平板の面積を A 、間隔を t とすると、空気中のキャパシタス C_0 は、

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{t} \quad (3.1-35)$$

で定義される。ここで、 ϵ_0 は真空中の誘電率である。最もシンプルな平行平板の等価回路を図 3.1-17 に示す。この等価回路のアドミッタンス Y は、

$$Y = G + j\omega C_p \quad (3.1-36)$$

ここで、 $Y = j\omega C = j\omega \epsilon_r C_0$ の関係を使うため、(2)式を C_0 で規格化すると、

$$Y = j\omega C_0 \left[\frac{G}{j\omega C_0} + \frac{j\omega C_p}{j\omega C_0} \right] = j\omega C_0 \left[-j \frac{G}{\omega C_0} + \frac{C_p}{C_0} \right] = j\omega C_0 \epsilon_r^* \quad (3.1-37)$$

$$\epsilon_r^* = \frac{C_p}{C_0} - j \frac{G}{\omega C_0} = \frac{C_p}{C_0} - j \frac{1}{\omega C_0 R_p} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.1-38)$$

$$\epsilon_r' = \frac{C_p t}{\epsilon_0 A} \quad (3.1-39)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{t}{\varepsilon_0 A} \frac{1}{\omega R_P} \quad (3.1-40)$$

等価回路の両端の電圧 $v(\omega)$ とキャパシタに流れる電流 $i_C(\omega)$ 、コンダクタンスに流れる電流 $i_G(\omega)$ から、アドミッタンスは、

$$Y(\omega) = \frac{i(\omega)}{v(\omega)} = G + j\omega C_P = j\omega C_0 \left[-j \frac{G}{\omega C_0} + \frac{C_P}{C_0} \right] \quad (3.1-41)$$

これを電圧についてまとめると、

$$\begin{aligned} v(\omega) &= i_C(\omega) \frac{1}{j\omega C_P} = i_G(\omega) G \\ &= (i(\omega) - i_G(\omega)) \frac{1}{j\omega C_P} \end{aligned} \quad (3.1-42)$$

ここで、 $i(\omega) = i_C(\omega) + i_G(\omega)$ である。 $i_G(\omega)$ についてまとめると、

$$\begin{aligned} Y i_G(\omega) \left(G + \frac{1}{j\omega C_P} \right) &= i(\omega) \frac{1}{j\omega C_P} \\ i_G(\omega) &= \frac{1}{1 + j\omega C_P G} i(\omega) \end{aligned} \quad (3.1-43)$$

また、 $i_C(\omega)$ は、

$$i_C(\omega) = \left[1 - \frac{1}{1 + j\omega C_P G} \right] i(\omega) \quad (3.1-44)$$

以上が簡単化した平行平板電極の等価回路を用いた場合の複素誘電率と複素電圧、複素電流の関係である。

3.1.9.2. 外部から電磁界を印加した場合の複素誘電率の変化

周波数 ω の外部電磁界 $E(\omega)$ 、 $B(\omega)$ により海水の導電電流が増幅され、それがすべて熱に変わったとすると、海水中の荷電粒子の平均速度 $\langle v \rangle = 0$ となり電流は流れない。ただし、周波数 ω の電磁界が平行平板電極にかかるため、 ω の周波数において大きな変化が観測されるが、これは無視する。熱運動により海水の温度が T °C上昇すると海水の誘電率は若干低下する。海水についてはイオンの種類と量により状態が変わるため、温度による誘電率変化は定式化されていないが、純水の場合は経験式

$$\varepsilon_r(T) = 88.15 - 0.414T + 0.13 \times 10^{-2}T^2 - 0.046 \times 10^{-4}T^3 \quad (3.1-45)$$

が使えることから、変化量のおおよその見積もりは可能である。たとえば、 $0^\circ\text{C} \rightarrow 1^\circ\text{C}$ の温度変化では比誘電率は0.4程度低下する。

さて、大強度の外部電磁界の海水への印加によって、

1) 電極付近の海水電位の増加による化学反応によるイオンの増加（導電率の増加、高周波側の誘電率の増加）

2) 水分子の併進運動により構造の乱れが生じて誘電率が低下

3) 水分子構造の変化によるダイポールモーメントの変化（誘電率の変化）

4) プラズマ化による全く異なる状態への変化（複素誘電率の大幅な変化）

などが起こることが考えられ、これらの変化を観測することで、水の状態変化を知ることができる。ただし2)に関しては先に述べた温度上昇と同じことを意味している。純水においてはこれらの変化はある程度推測できるが、複雑にイオンが含まれた海水においては、変化の絶対値を求めることは難しいため、外部電磁界の印加の有無の比較によって、海水の状態を推定する。

3.1.9.3. 並列等価回路の許容範囲

抵抗とキャパシタンスの並列等価回路で比誘電率を正確に求めるためには C_p に流れる電流が大きい必要がある（並列等価回路は $R_p = 1/G$ が無限大のときに理想的となる）。つまりリアクタンス $1/\omega C_p$ に比較して抵抗が小さく（コンダクタンスが大きく）なると誤差が増加する。よって、並列等価回路を使ってよいのは、

$$\frac{1}{\omega C_p} \ll R_p \quad (3.1-46)$$

の範囲内ということになる。では、この条件が満たせないときは、直列等価回路を考えればよい。並列等価回路と直列等価回路を簡単に結びつけられるものに損失 $\tan \delta$ がある。

先の並列回路の $\tan \delta$ は、

$$\tan \delta = \frac{G}{\omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3.1-47)$$

となり、直列回路の $\tan \delta$ と同じ値になる。さて、並列回路と直列回路を $\tan \delta$ を使って変換するために、改めて両回路のインピーダンスを考える。直列回路のインピーダンス Z_S は、

$$Z_S = R_S - j \frac{1}{\omega C_S} \quad (3.1-48)$$

一方、並列回路を改めて Z_p で記述すると、

$$Z_p = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C_p} = \frac{R_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} - j \frac{\omega R_p^2 C_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} \quad (3.1-49)$$

$Z_s = Z_p$ なので、実部から抵抗の変換式は、

$$R_s = \frac{R_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} = \frac{R_p}{1 + \frac{1}{\tan^2 \delta^2}} = \left(\frac{\tan^2 \delta^2}{1 + \tan^2 \delta^2} \right) R_p \quad (3.1-50)$$

$$R_p = \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \delta^2} \right) R_s \quad (3.1-51)$$

となり、同様に虚部を用いてキャパシタンスの変換式は、

$$\omega C_s = \frac{1 + (\omega R_p C_p)^2}{\omega R_p^2 C_p} = \omega C_p \left(1 + \frac{1}{\omega^2 R_p^2 C_p^2} \right)$$

$$C_s = C_p (1 + \tan^2 \delta^2) \quad (3.1-52)$$

$$C_p = C_s \left(\frac{1}{1 + \tan^2 \delta^2} \right) \quad (3.1-53)$$

となる。よって直列等価回路を用いて求める複素誘電率は、 $\tan \delta$ を用いて、

$$\varepsilon_r' = \frac{C_p t}{\varepsilon_0 A} = \frac{C_s t}{\varepsilon_0 A} \left(\frac{1}{1 + \tan^2 \delta^2} \right) \quad (3.1-54)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{t}{\varepsilon_0 A} \frac{1}{\omega R_p} = \frac{t}{\varepsilon_0 A} \frac{1}{\omega R_s} \frac{\tan^2 \delta^2}{1 + \tan^2 \delta^2} \quad (3.1-55)$$

となる。

3.1.9.4. フリンジング効果

並行平板の端面では電界が広がり、実際の面積よりもキャパシタンスが大きくなる。この効果をフリンジングといい、半径 r の円盤を間隔 t で配置した平行平板のキャパシタンス C は下記の補正式で表現できる。

$$C \rightarrow C + \varepsilon_0 \varepsilon_r r \left(\ln \frac{16\pi r}{t} - 1 \right) \quad (3.1-56)$$

3.1.10. 複素誘電率計測ならびにポテンシャル計測

複素誘電率を計測するために用いた機材ならびに計測系のセットアップについて解説する。また、前節で説明した複素誘電率の計測は等価回路を基準としているため非線形が強く無い範囲での評価となる。もし、大強度の磁界の印加により、海水の物理状態が強い非線形性（30%程度以上の歪み）を有していた場合に、複素誘電率評価の正当性が損なわれる。そこで、海中での磁界ならびに海中のポテンシャル（交流磁界を印加するため、電界により生じた導電電流による2点間の電位差）を計測してその歪率を計測するシステムについても解説する。

さらに、平行平板電極による海水の複素誘電率計測においては、周波数が約1MHzを下回ると、電気二重層によるキャパシタの影響、イオンの挙動による影響などが含まれて、計測した複素誘電率が急速に大きい値となる。これらの電気化学的な効果を計測するために、サイクリックボルタメントリを行なった。この計測の簡単な原理と、利用した計測系についても説明する。

3.1.10.1. 複素誘電率計測装置

平行平板による複素誘電率ではLCRメータ（インピーダンスメータ）により平行平板電極間のキャパシタンスと抵抗を計測する。平行平板電極はキーサイトテクノロジーなどから机上計測用の高精度のフィクスチャーが販売されているが、本実験の目的は、強磁界が印加されている海水の誘電率をリアルタイムに計測する必要があることから、電極全体が海水中に設置できる構造でなくてはならない。そこで図3.1-18の構成を考え、海中並行平板電極（以下海中プローブと呼ぶ。図3.1-19）を開発した。

表 3.1-2 海中複素誘電率計測系

名称	型名	メーカー	仕様
LCRメータ	IM3536	日置	測定周波数：4 Hz～8 MHz インピーダンス計測範囲：1 mΩ～100 MΩ 12 bit DAC, 16 bit ADC
給電線	開発品	JAMSTEC	長さ2m 電圧ライン：RG-223/U（二重シールド同軸線） 電流ライン：RG-58/U（一般同軸線） 図3.1-18 参照
海中プローブ	開発品	JAMSTEC	図3.1-18、図3.1-19 参照

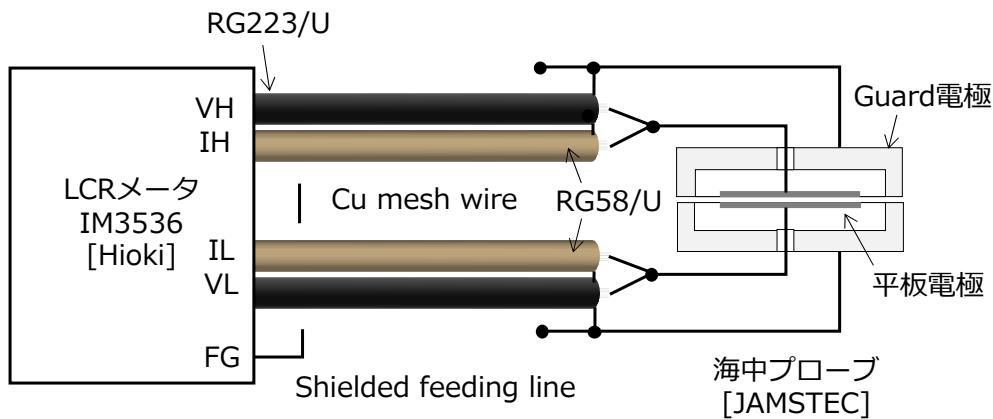


図 3.1-18 複素誘電率計測系の構成

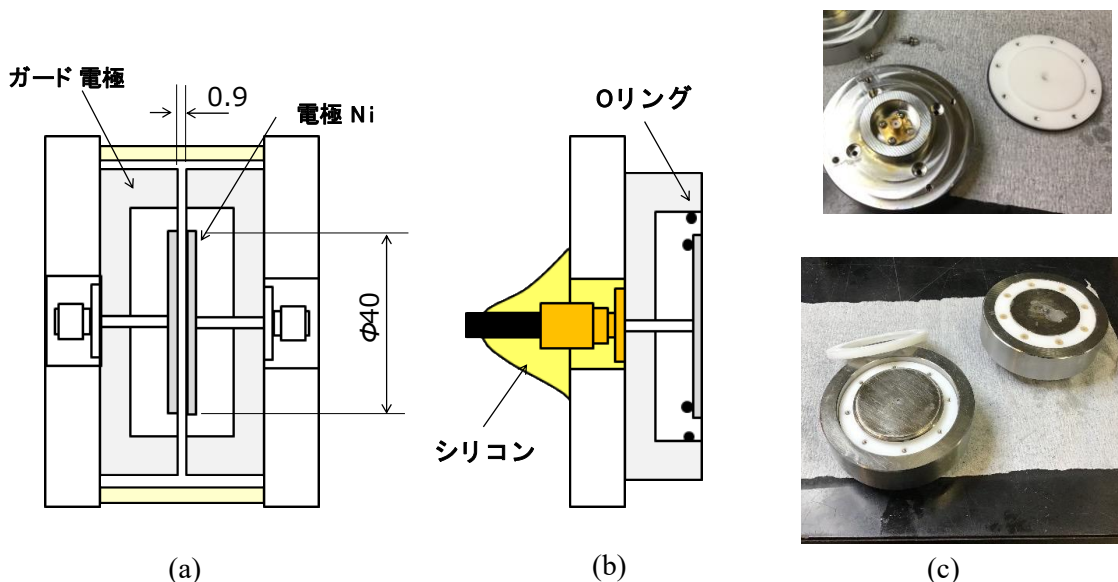


図 3.1-19 海中プローブの構造 (a)全体図、(b)防水構造、(c)写真

海中プローブは $\Phi 40$ mm の真鍮円盤をニッケルメッキした物を平行平板電極として用いている。外部から大強度の電磁界が印加されるため、ノイズ除去のために周囲にステンレス(SUS316)で製作したガード電極を配置している。両ガード電極は共通アースがとられているため、ガード電極間のポテンシャル差はゼロになっている。平行平板電極は、ガード電極にテフロン製のインシュレータで取り付けられている。電極の裏側への海水の侵入を阻止するため、Oリングを並行平板電極-インシュレータ-ガード電極間に挿入している。並行平板電極は SMA コネクタの心線側に、ガード電極は SMA のグラウンド側に接続されている。給電線は SMA の T 字分岐で 2 線に分離してから、電流・電圧給電線にそれぞれ接続する。T 字分岐を介して給電線を海中プローブコに接続したあとは、シリコンシーラント（またはエポキシ系接着剤）で密閉して防水してしまうので、容易に着脱はできない。

3.1.10.2. 海中磁界ならびにポテンシャル計測装置

大強度交流磁界が海水に印加された時の複素誘電率計測では線形計測を仮定している。複素誘電率計測で実際に計測しているのは電極間の交流電圧に対する（導電と変移）電流である。そこで、この計測では海水中の印加磁界と、海水中の導電電流と海水の抵抗によって生ずる 2 点間の電位（ポテンシャル）を計測することで電流の歪みを評価する。印加磁界と被計測電流が双方ともに歪率がない、もしくは双方ともに 10%程度までの歪みであれば問題はない（線形理論で解くことができる）。もし、磁界に歪みがなく、電流のみに歪みがあった場合は、大強度磁界の印加により、なんらかの非線形作用で電流波形が歪んでいることになり、新たな考察が必要になる。

表 3.1-2、表 3.1-3 に計測系をリストする。磁界プローブ図 3.1-20(a)はシールド型ループ構造で整合はとらない。ループ給電点からオシロスコープまでの間は銅のメッシュ線によるシールドがなされている。メッシュ線を含め、すべては海水からアイソレーションされている。電界プローブ図 3.1-20(b)は、波長に対して十分小さい円筒電極（長さ 5mm）を間隔 5mm で平行に並べたもので、2つの電極間の差動電圧を読むことでポテンシャルを計測する。2本の給電線は、給電点からオシロスコープまで 2本束ねた状態で銅のメッシュ線によるシールドがなされている。電極部分と基準グランド（FR-4 プリント基板）が海中に暴露し、メッシュ線を含めた部分は海水からアイソレーションされている。それぞれのプローブの信号はオシロスコープで受信され、時間軸波形とフーリエ変換した周波数波形を観測する。周波数波形の高調波から歪み率を計算して求めることができる。

表 3.1-3 海中磁界・ポテンシャル計測系

名称	型名	メーカー	仕様
オシロスコープ	U2701A	キーサイト	測定周波数： DC ~ 100 MHz 2Ch 8bit
磁界プローブ	開発品	JAMSTEC	シールドドロープ型、 図 3.1-20(a)参照
電界プローブ	開発品	JAMSTEC	電極間差動計測型、 図 3.1-20(b)参照

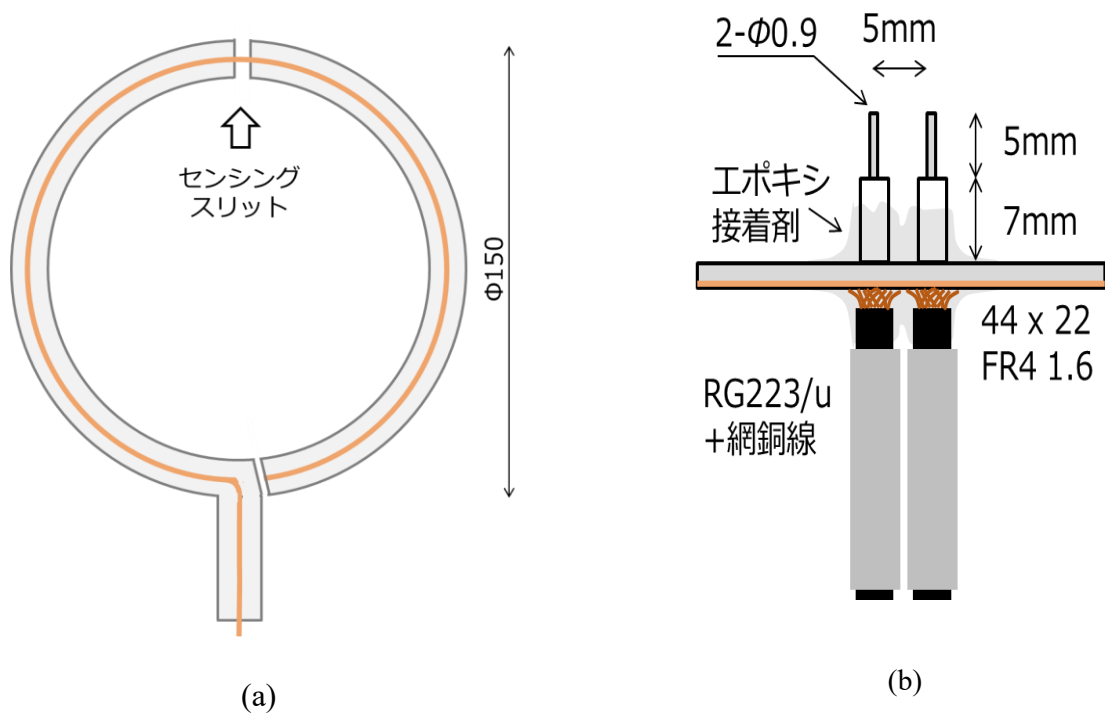


図 3.1-20 (a)磁界プローブおよび(b)電界プローブ

歪率は総合ひずみ率 (Total Harmonic Distortion plus Noise: THD) で定義され、入力信号電圧 V_{in} を基準に

$$HD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2 + V_{Noise}^2}}{V_{in}} \quad (3.1-57)$$

で表される。ここで、 V_n は n 次の高調波、 V_{Noise} は雑音レベルである。今回の評価では 5 次の高調波までを用いて計算を行った。高速フーリエ変換の読み値はデシベルになるため、基準波のレベルを 0 dB とした、 n 次高調波成分の相対値を V_{dBn} dB とし、次の式で歪み率を求めた。

$$HTHD[\%] = \sqrt{\left[10^{\frac{V_{dB2}}{10}} + 10^{\frac{V_{dB3}}{10}} + \dots + 10^{\frac{V_{dB5}}{10}} \right]} \times 100 \quad (3.1-58)$$

3.1.10.3. 電気化学計測装置

電気二重層の抵抗と容量を求めるためにはサイクリックボルタメントリーや交流インピーダンス法といった電気化学計測が必要である。今回はサイクリックボルタメントリーの

結果で得られた電流-電位特性から溶液（海水）の抵抗値と容量値を読み取る方法を用いる。電気化学計測では、物理計測とことなり、化学反応をベースとした計測を行う。今回は海水中が電解液であり、ここに図 3.1-19 で説明した平行平板電極を挿入した場合の化学反応を計測することになる。化学反応は電解液と電極の関係で酸化反応や還元反応が決定されることから電極材料が重要になる。この被計測対象となる電極を作用電極と呼ぶ。作用電極の材料決定も重要であるが、すでに Ni メッキ電極で製作済みなので、本評価の中では Ni 電極のままとする。また、化学反応をみるために基準の電極が別に必要になるが、これには一般的によく用いられる、銀-塩化銀電極を用いる。作用電極と基準電極だけでは電流を流した際に、基準電極でも反応が起こってしまう可能性がある。そこで、電流を流した時に既知の反応が起こる電極として補助電極を用いる。したがって、平行平板の両電極を利用するのではなく、片側だけを作用電極として用いて、電気二重層などの計測を行うことになる（図 3.1-21）。

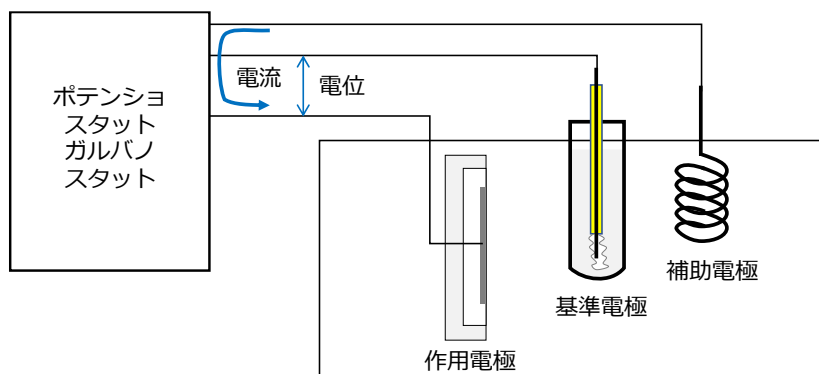


図 3.1-21 電気化学計測における電極配置

サイクリックボルタメントリーは、電気化学系に、時間と共に変化する電位を繰り返し与え、その時の電流値を読み取るもので、初期電位、正負の折り返し電位、終了電位、走査速度を設定することで、系の初期診断、電極の特性判断、反応の観測ができる。今回使用した計測系を表 3.1-4 に示す。

表 3.1-4 サイクリックボルタメントリー計測系

名称	型名	メーカー	仕様
電気化学測定システム	HZ-7000 + HZA-FRA1	北斗電工工業	測定周波数： 10 uHz ~ 500 kHz 制御電圧範囲： ±10 V 最大出力電流： ±300 mA
Ag/AgCl 参照電極	RE-1A	EC フロンティア	飽和 KCl で +0.199 V vs.SHE 25 °C Φ6 x 90 mm
補助電極	CE-1	EC フロンティア	直径 0.5mm x 80mm スパイラル 黄銅/金メッキ

3.1.10.4. 電気二重層が複素誘電率に与える影響

海水は純水に多種のイオンが溶解している電解液である。複素誘電率計測のために挿入した一対の平行平板電極間には図 3.1-22(a)の電位がかかる。ただし、この構成が成り立つのは周波数が低い側だけと考えている。さて、図 3.1-22(a)の構成においては、電極間に直流電位を加えた瞬間に、電極周辺でイオンの移動が起こり、正極側には Cl⁻などの負イオンが、負極側には Na⁺などの正イオンがほんのわずかに増加し、電位を打ち消して安定する。この状態で両電極付近の厚み 10 Å 以下の範囲に電気二重層が形成される。負極側を拡大図 3.1-22 (b) してみると、この電気二重層の電極近傍は水分子がほとんどを占める。

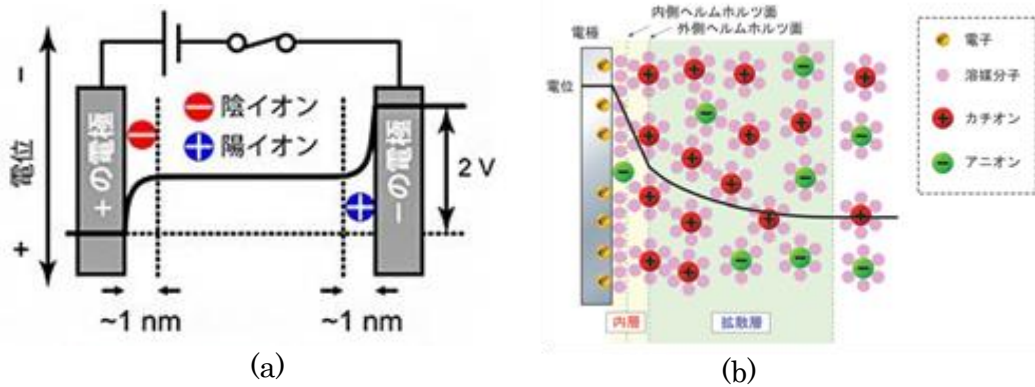


図 3.1-22 (a)平行平板電極間の海中電位 (b)電極表面の電位と分子の状態

電気二重層はヘルムホルツによって最初に発見された。ヘルムホルツの仮定した電気二重層のモデルは、図 3.1-22(b)に示した拡散層を想定していないかったため、電気二重層容量 C_H は単純な式(3.1-59)で記述できるが誤差が大きい。現在はグーチャップマン-シュルテンによるモデルから導かれた式が使われており、容量 C_{GCS} は式(3.1-60)で記述できる。

$$C_H = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} \quad (3.1-59)$$

$$C_{GCS} = \sqrt{\frac{2z^2 e^2 \epsilon_0 \epsilon_r n}{kT}} \cosh \left[ze \frac{\phi^{Hext} - \phi^{ele}}{2kT} \right] \quad (3.1-60)$$

ここで、 z は電荷、 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ は elementary charge、 n は単位体積あたりのイオン数、 k は Boltzmann constant、 T は温度である。また、 ϕ^{Hext} 、 ϕ^{ele} はそれぞれ外部ヘルムホルツ面の電位と電解液の電位である。

さて、このように定義される電気二重層キャパシタの容量をあらためて C_{dl} と記述しよう。平行平板により海水の複素誘電率を計測している系で、計測周波数を下げ、イオンが瞬時移動できる速度（ミリ秒オーダー）程度までになると、電気二重層の形成ができるようにな

る。すると、平行平板の間のほんのわずかに薄い領域に大きな容量が入ることになる。単純に平行平板の両端の 1 nm の領域の領域にそれぞれキャパシタが入ると考えると、これまでの物理構造で考えていたキャパシタに直列に容量が接続されることになる。直列回路ではいくら電気二重層キャパシタンスが大きくても、電極両端以外の領域のキャパシタンスが小さければ合成容量は大きくならない。

3.1.10.4.1. デスクトップ試験

複素誘電率の計測の最初の実験は、実験室に小さな水槽（490 x 370 x 29 mm）を、任意の導電率の擬似海水で満たした系で実施した。計測装置は表 3.1-2 に示した装置に加え、バックグラウンドのパラメータを計測するために、水温計、導電率計、塩分濃度計、pH 計を用いた。実験系の構成を図 3.1-23 に示す。水槽の底には電位を一定にするためにアルミ板を敷き、その上に MC ナイロン製の台座を固定して海中プローブを設置した。このコンフィグレーションにおいて、

1) 純水ならびに複数の導電率の擬似海水の複素誘電率計測（計測系の較正）

2) 外場を印加した場合の複素誘電率の計測

3) 擬似海水のサイクリックボルタメントリーによる電気化学計測

を実施した。なお、外場を印加する方法としては、

1) 導電電流の印加：海中プローブを挟み込むように電極を配置

2) 電界の印加：水槽の外側に微小ループアンテナを配置

3) 磁界の印加：海中プローブを挟みこむようにトロイダルコイルを配置

の 3 種類について実施した。図 3.1-24 は海水中で海水プローブに導電電流を印加している様子である。これら 1) ~3) のケースでそれぞれ海水に外場を加えて計測したところ、いずれの方法でも複素誘電率計測で外場の信号が確認できた。そこで、もっとも実際に近い 3) のコイルによる手法を評価に用いた。

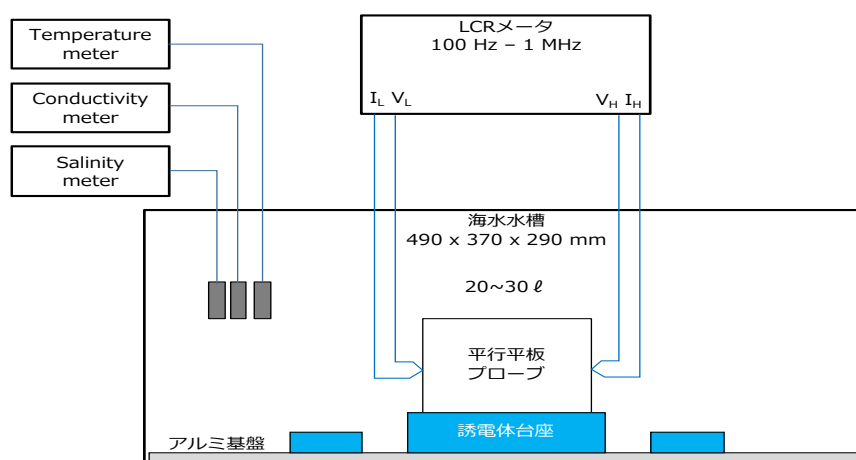


図 3.1-23 デスクトップ試験における機器の構成

3.1.10.4.2. 外場の無い場合の複素誘電率

まず、海中プローブが正常に動作しているか確認するために、空気中で複素誘電率を計測して比誘電率 $\epsilon_r = 1$ であることを確認した。次に水槽に工業用純水（イオン交換はほどこしていない純水）を入れて複素誘電率を計測した。最後に、導電率計で確認と取りながら、導電率 0.4 ならびに 2 の擬似海水を作成して、それぞれの複素誘電率を計測した。



図 3.1-24 デスクトップ試験の様相

得られた複素誘電率の実部（比誘電率）と虚部（導電率）の周波数特性を図 3.1-26 に示した。比誘電率については、純水の場合は 1MHz で $\epsilon_r \sim 80$ であり、それ以下の周波数では値が上昇している。導電率が高くなり、イオンが増加するにつれて誘電率は大きな値を取るが、今回の計測では 5 kHz 以下では $\epsilon_r \sim 4 \times 10^5$ で一定になっている。導電率は低周波側では非常に小さな値を示し（絶縁状態）、1MHz においては、導電率計で計測した導電率が $\sigma = 0.4, 2 \text{ S/m}$ のとき、プローブで計測した導電率はそれぞれ $\sigma_{probe} = 0.3, 2 \text{ S/m}$ を得ている。これらの結果から、平行平板法を使って海水の複素誘電率を計測する場合、周波数が MHz オーダよりも低下すると、

- ・比誘電率は非常に大きな値を示す
- ・導電率は非常に小さな値を示す
- ・比誘電率は周波数が kHz オーダ以下では一定に近くなる
- ・導電率は周波数が kHz オーダ以上では一定に近くなる
- ・変曲点は $\sigma = 0.4$ では 10 kHz 前後、 $\sigma = 2$ では 100 kHz 前後となる

以上のことから、

- 1) 周波数が低下すると、比誘電率はある一定の大きな値になる
- 2) 周波数が低下すると、導電率はゼロに近づく
- 3) イオンの量により変曲点の周波数は変動する

ということがわかる。複素誘電率の計測では外場の印加により

- ・電極付近の海水電位の変化による化学反応によるイオンの増減
- ・水分子の併進運動により構造の乱れが生じて誘電率が低下
- ・水分子構造の変化によるダイポールモーメントの変化（誘電率の変化）

が起こることを想定しているが、上記1)～3)が低周波側で生じたとしても、いずれも計測値の変化として表出するため、問題ないと考えられる。よって、外場の無い試験の結果、この計測系によって、外場を海水に加えたことにより、海水の状態が変わった場合に、その変化を検出できる。

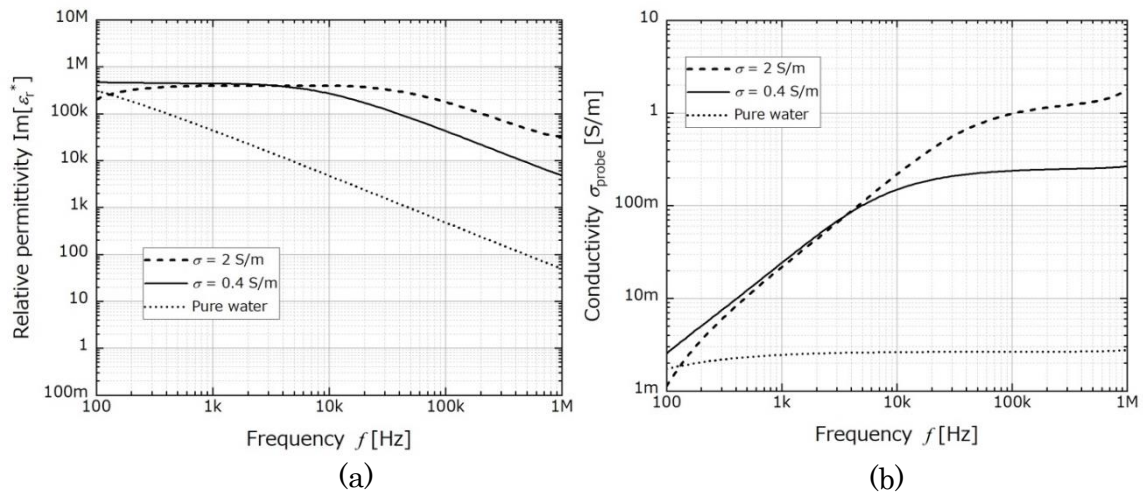


図 3.1-25 外場の無い場合の海水の複素誘電率。(a)誘電率(b)導電率

3.1.10.4.3. 外場を印加した海水

図 3.1-23 の構成において、海水プローブを挟むようにして設置した磁界印加用コイルに交流電流 ($I = 0.5\text{A}$ or 5A , $f = 1\text{kHz}$) を流した場合の複素誘電率を計測した。電流 5A の場合、海水プローブ中心における磁場は約 40 Gauss となる。周波数の掃引範囲は $100\text{ Hz} \sim 1\text{ MHz}$ 、擬似海水の導電率は $\sigma \sim 0$, $\sigma = 0.4\text{ S/m}$, $\sigma = 2\text{ S/m}$ の 3 点で計測した。図 3.1-26 は計測した複素誘電率の実部と虚部である。黒ラインは外場なし、赤ラインは電流 0.5A 、青ラインは電流 5A の時の計測値である。なお、先の外場なしの試験から、海水プローブには①ショート校正装置による校正、②ガード電極の共通アース、という 2 つの改善を施した。その結果①により複素誘電率の周波数特性において、比誘電率が高くなる周波数が低下している。

1 kHz の外場を加えた時には、当然ながら 1 kHz にノイズが現れる。電流 5A のときは、アンプの出力が飽和してしまい、3 倍と 7 倍の高調波も乗っている。これらは海水の応答ではなく入力である外場がノイズとして見えているだけである。

さて、外場を加えた時の影響であるが、上記のノイズを除けばすべての条件において、

ほとんどの周波数で外場が無い場合と同じ複素誘電率になっている。しかし、複素誘電率の実部（比誘電率）について注目すると、電流値が5 Aの場合に、200 kHz よりも高い周波数で比誘電率が低下する傾向が見られる。この低下現象は外場によりイオンクラスターがプッシュされ、水分子と衝突することによって、水分子の併進運動を誘起した結果、外場に応答する水分子の偏向が低下認めとも考えられるが、少し変化が大きすぎるように思われる。特に導電率が2 S/mの場合では700 kHz以上で符号が反転して計測不能になっているように見える部分がある。

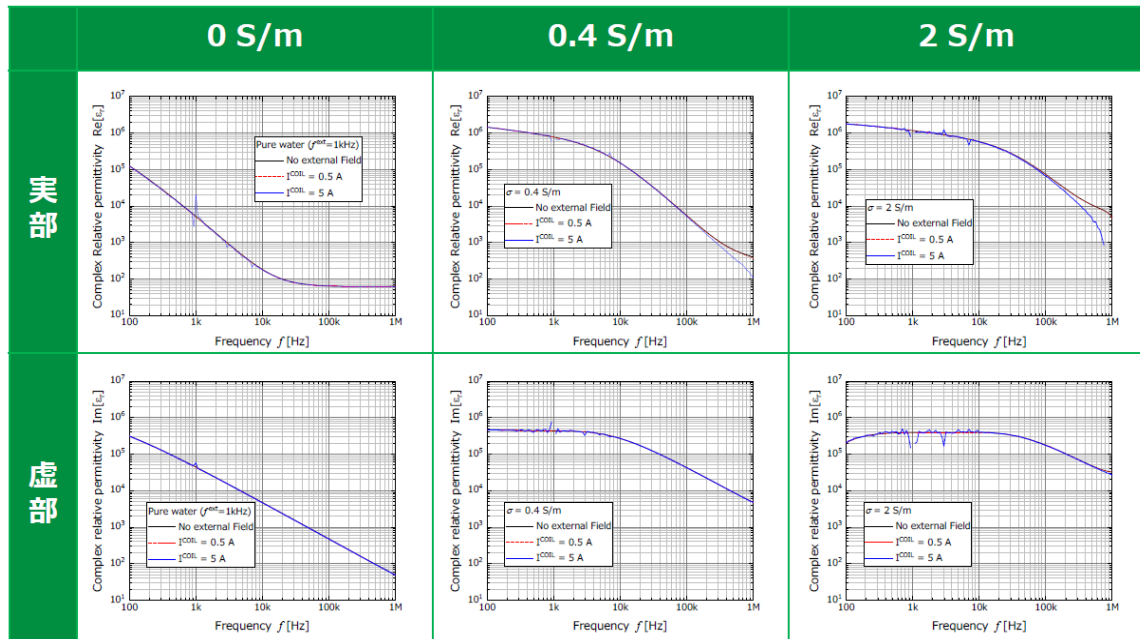


図 3.1-26 海水の複素誘電率計測結果

つまり、外場による海水の物理科学的变化ではなく、計測系が共振点をもっていることによると推定できる。

そこで、系のメンテナンス（電極の新規交換、コネクタ部の洗浄）を行い、より高周波での変化が顕著に現れるように、高い導電率（ $\sigma=3.7$ S/m）での計測を行なった。その結果を図 3.1-27 に示した。前回とは異なりすべての周波数で外部磁界の有無に関係なく同じ複素誘電率となった。さらに、前回問題のあった周波数帯域である 500 kHz で詳細な時間観測を行なった。その結果が図 3.1-28 である。複素誘電率の軸を大きく拡大しても外場の効果はあらわれていない。少なくとも外場が 40 Gauss では海水には物理化学的な影響はでていないようだ。

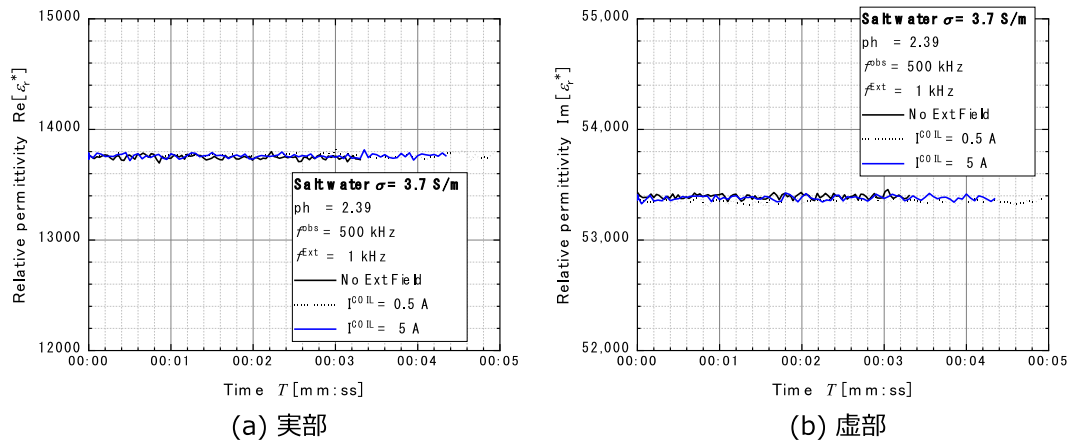


図 3.1-27 海水プローブをメンテナンスして再計測した複素誘電率

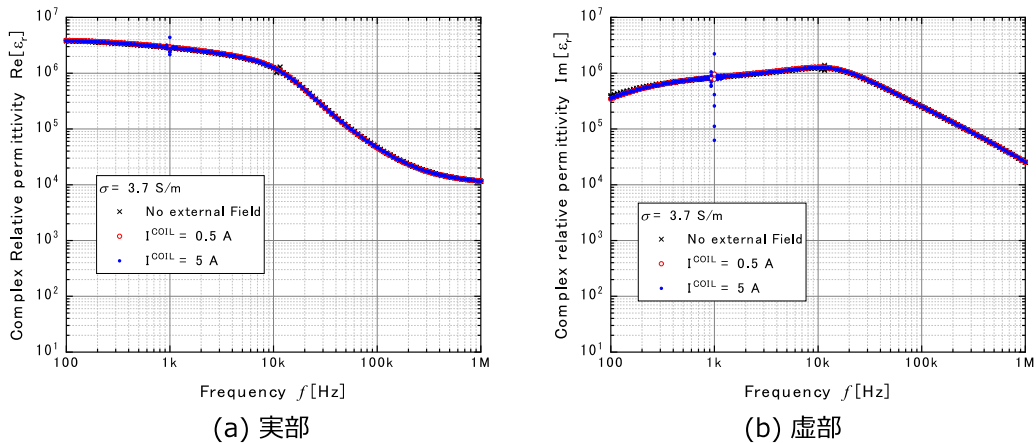


図 3.1-28 観測周波数 500 kHz の複素誘電率の時間変化

3.1.10.4.4. 電気二重層の効果の補正

外場が海水に印加された時の海水の応答調べるために、複素誘電率を指標として利用する際に、電気二重層の効果は特に影響がないと考え評価を行ってきた。しかし、電気二重層の影響がどのように複素誘電率の計測に影響しているかは非常に興味深いため、ここでは具体的に電気二重層の影響はどのように計測値に重畳しているかを検討する。

この影響を取り除くために、図 3.1-21 の構成で表 3.1-4 の計測器を用いて、サイクリックボルタメントリ (CV) による計測を実施し、その計測値から、計測系に寄生している電気二重層キャパシタの容量をもとめ、その容量を用いた物理計測データの補正を試みる。図 3.1-29 は、CV 法により計測した I-V 特性である。図の I-V の傾きから、並列抵抗は 53 kΩ (図の V=0~1V の範囲でフィッティング) と求まる。また、電気二重層キャパシタの

容量 C_{dl} は、 $V = 0.5 \text{ V}$ の点の電流 ($I_{upper} = -0.097 \text{ mA}$, $I_{lower} = -0.0024 \text{ mA}$) から、

$$C_{dl} = \frac{I_{upper} - I_{lower}}{2} \left(\frac{dV}{dt} \right)^{-1} \quad (3.1-61)$$

で求められる。ここで、 dV/dt は電圧の変化レートで、 500 mV/s である。この式から電気二重層キャパシタの容量は約 $120 \mu\text{F}$ と求めることができる。

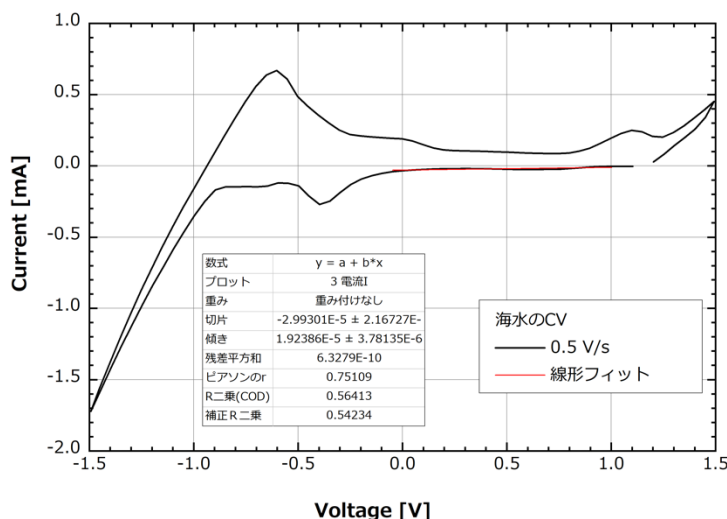


図 3.1-29 サイクリックボルタメントリーの結果

さて、海水プローブの平板電極の片側のキャパシタンスが求まったので、系の合成キャパシタンスを求めてみる。まず、等価回路を考える。図 3.1-30 の等価回路を見てすぐにわかることは、高周波領域で顕著に現れるキャパシタンス項である C_S に対して、 C_{dl} がいかに大きくても、 $C_{dl} \gg C_S$ ならば合成容量はほぼ C_S と同等になるはずである。つまり、電気二重層キャパシタンスはほとんど効果が無いことになる。

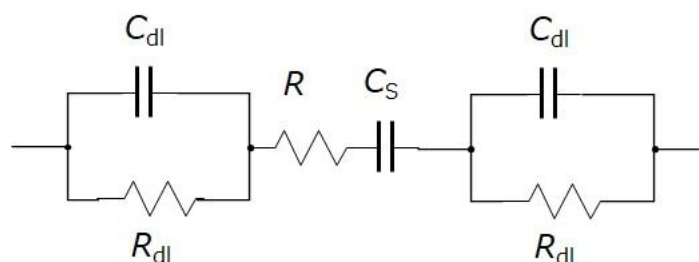


図 3.1-30 平行平板両極の電気二重層を考慮した等価回路

しかし、実際の計測値は、 $C_S = 800 \text{ pF}$ に対して、 $C_{total} = 20 \mu\text{F}$ となる。単純に C_{dl} の直列接続であれば合成容量は $C_{total} = 60 \mu\text{F}$ であり、こちらのほうがオーダとしては一致する。すなわち、低周波側では図 3.1-30 の等価回路はもはや無効であるということになる。

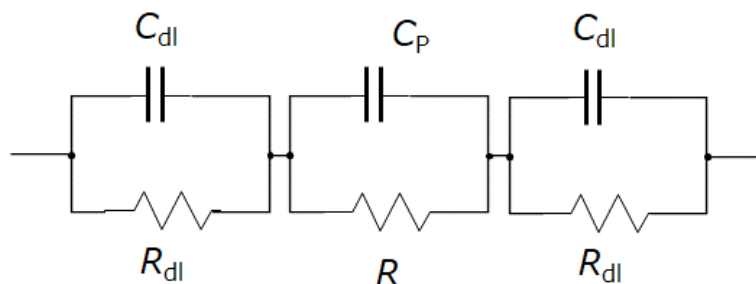


図 3.1-31 並列等価回路

そこで、図 3.1-31 のように、高周波側のキャパシタを並列と考えてみる。次に、 C_p に並列に入る損失抵抗をイオンの伝導度が大きいと考える。高周波領域では、イオンクラスターは外部電磁場によってプッシュはされるが水分子に衝突してあまり動くことができない。つまり抵抗値 R が大きい。周波数が下がってくると、イオンクラスターは電磁場の動きに追従して電流を流す。これによって、抵抗 R が減少し、 X_{CP} よりも十分小さくなる。すると合成容量は電気二重層のキャパシタンスが優勢になる。なお、界面抵抗を含む R_{dl} は直流では無限大で、周波数増加とともに減少する。

電気二重層が複素誘電率の計測に与える影響としては、現時点ではここまでである。定性的には、周波数が MHz オーダ以上では、イオンクラスターは移動するが大きな動きはできないため、水分子の併進運動を誘起し熱損失を生む。このため海水は大きな損失を有する誘電体のように振る舞う。周波数が kHz オーダに落ちてくると、イオンクラスターは大きく移動することができるようになり、直接の電荷キャリアとなり損失抵抗は減少する。

3.1.10.5. ハーフサイズモデルを用いた大強度磁界の印加試験

この節では、パナソニックコネクタ美野島拠点に設置されている、海水水槽とハーフサイズコイルを用いた、実際の系で複素誘電率を計測し、海水に異常な物理・化学的变化がおきていないことを確認する。

3.1.10.5.1. 複素誘電率の観測による海水の状態の変化の検討

図 3.1-32 に試験コンフィグレーションを示す。直径 1m の送信コイルを 3 個直列に接続してコンデンサで共振させてコイルにエネルギーを供給する。このときの電源周波数は 2 kHz である。送信コイルのセンターには、ダミーの受電装置 (AUV を模擬) を置き、送信コイルのインピーダンスが適正になるようにしている。水槽の深さ方向を z 軸とし、プローブの吊り下げ治具の表面を $z=0$ に設定して、深くなる方向を正の方向にとった。半径方向の長さをコイル中心を $r=0$ とし、外側が正になるようにしている。複素誘電率を計測す

るための海中プローブに加え、印加している磁界の波形を観測するための磁界プローブ(図 3.1-20(a)) と、電界によって励起された海中に流れる電流をモニタする電界プローブ(電極プローブ、図 3.1-20(b)) を同時に設置する。このうち、磁界プローブについては、磁界の空間プロファイルを把握するために、 z 方向と r 方向に変化して測定した。計測器の構成を図 3.1-33 に示す。バックグラウンドの海水データを計測するために、水温計つき導電率計、海水密度計、pH 計を用いた。

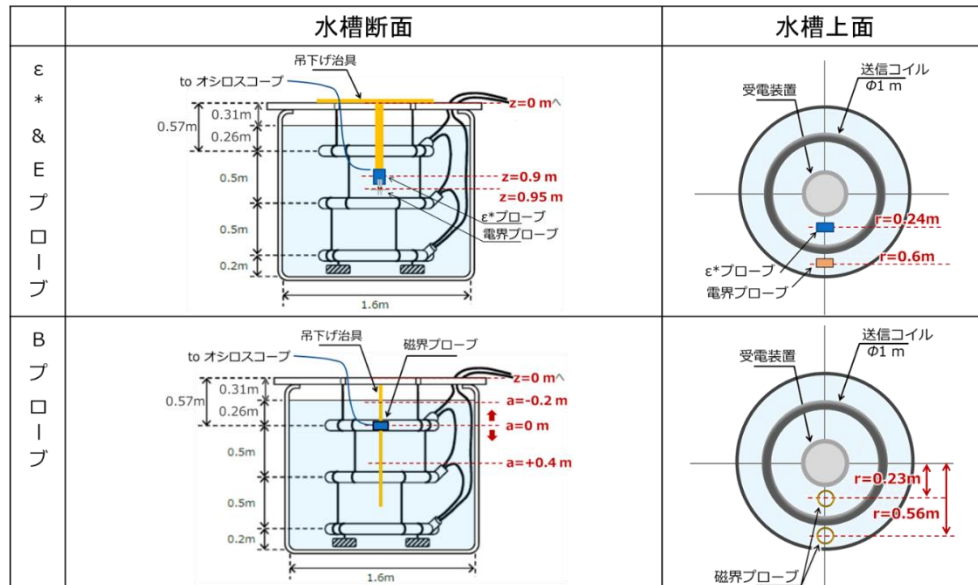


図 3.1-32 ハーフサイズコイルによる強磁界の影響試験のセットアップ

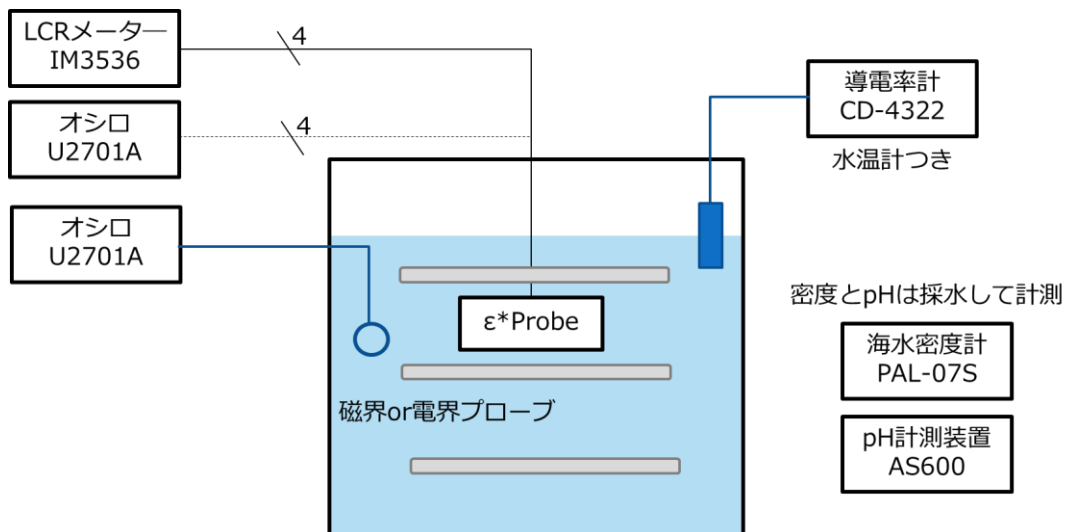


図 3.1-33 プローブ類と計測機器の構成

磁界プローブならびに電界プローブのデータはオシロスコープで記録し、海水プローブ

のデータは LCR メータで記録した。コイルに印加する電力は 0~3,000 W の範囲として、対数的に電力を変化させて計測を行った。このうち、コイルの印加電力が 500W のときと、3 kW のときに計測した、複素誘電率の周波数特性を図 3.1-34 に示す。図中、黒丸は外部磁界が無い場合、赤丸は外部磁界がある場合である。電源の周波数の奇数倍の高調波が観測されているが、後の節で述べるように、印加磁界の波形が歪んでいるために、このように高調波が大きく出ていると思われる。グラフ全体を定性的に理解すると、(高調波を含む)外場によって計測データはばらつくものの、海水の物性が変化したことによる複素誘電率の変化は起こっていないように思える。

そこで、より外場の影響を詳細に見るために、励振周波数 (2 kHz) よりも低い周波数 (1 kHz) と十分高い周波数 (100 kHz) の 2 点で 30 秒間の変動を観察した。とくに比誘電率の変化があるかを確認するため、キャパシタンスの変化を観測した結果を図 3.1-35 に示す。磁界コイルへの供給電力が 500 W の場合、外場がない場合に比較して、最大で 0.3% 程度のランダムな容量変動が生じている。3 kW の場合は 7% 程度と増加している。しかし、500 W と 3 kW を比較した場合、キャパシタンスの変化方向は正負にバラバラになっており、電力に比例した変化が表れていない。図 3.1-34 の左下 (比誘電率、3 kW) を改めて見ると、バラツキは上下に分散しているものの、励振周波数の高調波が効いている周波数では、下側に大きく振れる傾向があることから、観測されたキャパシタンスの変動は、「外場により海水の物理状態が変化したのでは無く」もっぱら、高調波を含む励振波が直接プローブに影響しているために発生したと考えられる。つまり、AUV の充電で利用する強度の磁界を海水に印加しても、海水の物理状態は損失による温度上昇以外には特に変化していないと結論できる。

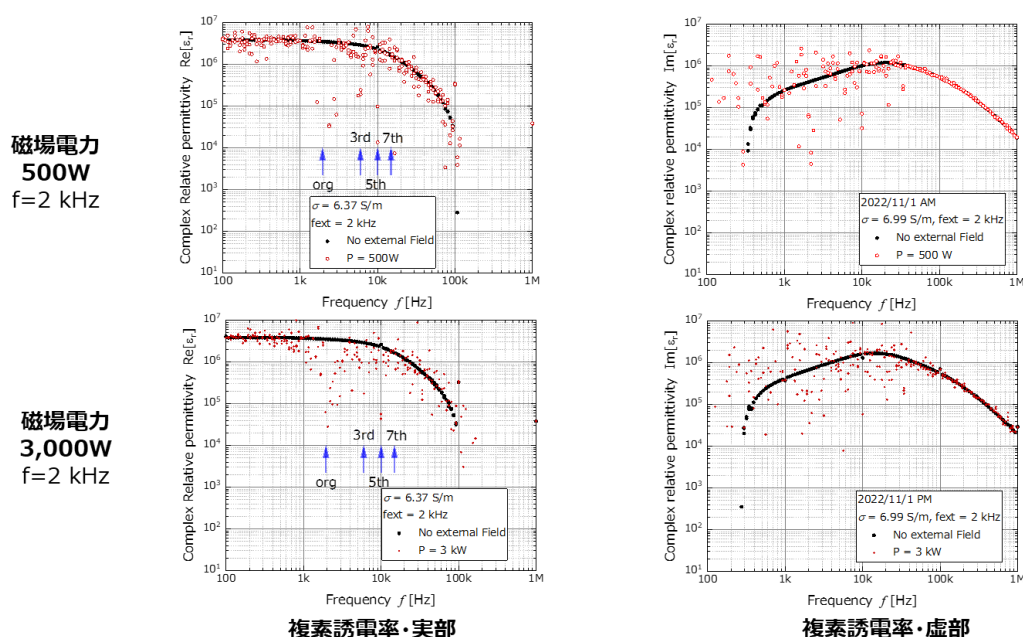


図 3.1-34 ハーフサイズコイルにおける磁界印加時の複素誘電率の周波数特性

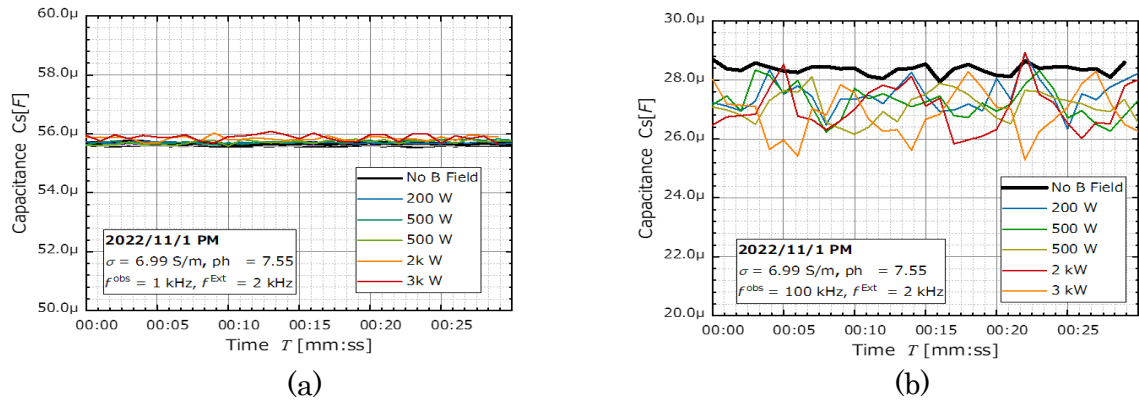


図 3.1-35 外場を印加した場合のキャパシタンスの時間変動

(a)観測周波数 1 kHz、(b)観測周波数 100 kHz

3.1.10.5.2. 海水に印加されている磁場と誘起された海水ポテンシャルの観測

複素誘電率計測では測定対象が線形であることを仮定しており、歪は測定対象外である。海水に大強度磁界を印加することによって、大きな非線形が生じて海水の状態が変化した場合複素誘電率計測では観測できない。そこで、非線形評価では、海水の粒子に移送されたエネルギーである海中電流を評価する。変動電流は磁界プローブで観測できるが、外場が大強度磁界であるため、磁界プローブの観測値は信号源の磁界を観察することになる。そこで、外場によって海中に励起された電流を観測するために、電界（ポテンシャル）プローブを用いる。電解液内の電界によるポテンシャルは、導電電流によって相殺されてしまうが、海水には抵抗があるため、導電電流が流れると2点間に電位差（ポテンシャル）が生じる。このポテンシャルを計測して歪率を求めることで、海水が非線形になっているかどうかを判断できる。ただし、磁界プローブも利用して、印加磁界の波形を観測し、励振波がもともと歪んでいるかどうかとも評価する。

観測のセットアップは図 3.1-32 の通りである。印加磁界と海中のポテンシャルの計測結果を図 3.1-36 に示す。ポテンシャル波形に歪が生じているが、印加磁界の波形も同様の歪が生じている。図 3.1-37 に印加磁界の歪率（電力 500W の場合）を示す。歪率は磁界が大きくなる部分で大きくなり、最大で7%の歪率が観測された。この変化は、印加磁界自体が歪んでおり、実験系が有する特性である。評価結果として、磁界と海水による相互作用により非線形現象は起きていないと言える。このことは、複素誘電率計測からもわかり、奇数倍の高調波で顕著に計測ノイズが載っていた。より精密な計測を行うためには、送信コイルの電流を観測しながら、送信コイルと受信コイルのインピーダンスと信号源の調整を実

施し、非線形成分を取り除くことが望まれる。

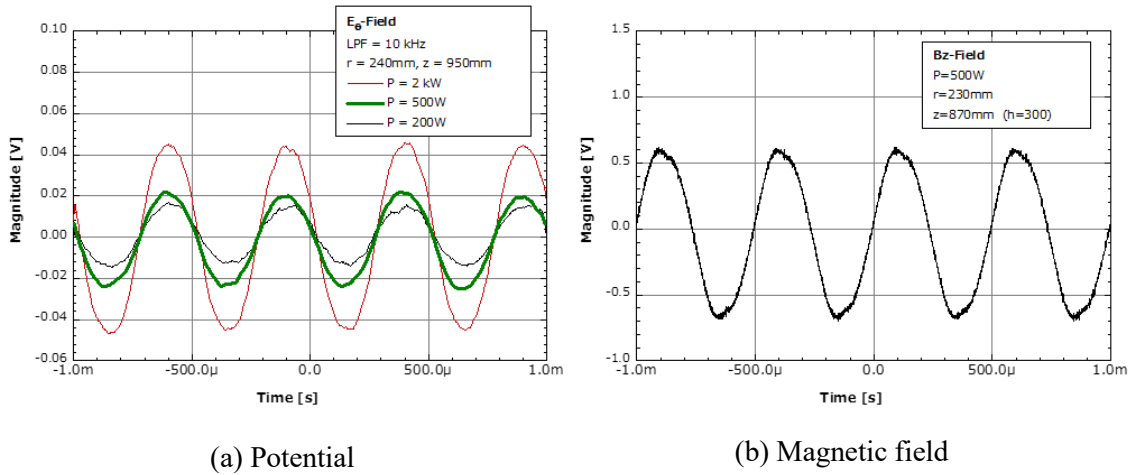


図 3.1-36 外場を印加した場合の海水の磁界と電界

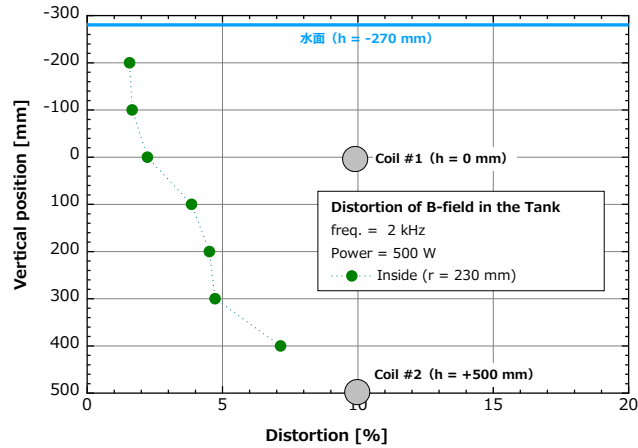


図 3.1-37 外場を印加した場合の海水の磁界の歪

3.1.10.6. 強電磁界に対する海水物性の解明のまとめ

強磁界（正確には強電磁界）が海水物性に与える影響についてシミュレーションと実験両面から検討を行ってきた。その結果、

今回利用する磁界の強度では、海水の物性に影響を与えるような変化は起きない

と結論した。当初、シミュレーションと実験の分担は、「分子動力学法を用いた粒子シミュレーションにより強電磁界が海中の水分子やイオン等へ与える影響とそのメカニズムを明らかにするとともに、強電磁界での海中の複素誘電率を測定することで、粒子シミュレーションの妥当性を評価すること」として取り組んだ。しかし、実際に研究をおこなっていくと、粒子シミュレーションのサイズと実験のサイズがあまりに異なり、直接的な関連

付けをシミュレーションと実験の間に行う事が難しいことがわかった。直接的なデータの連携はできなかったが、実験の結果の説明のために、シミュレーション結果を利用し、シミュレーションの妥当性を評価するために実験結果を利用するといったことができ、やはり並行して両者を行うことは有益であった。

冒頭に述べたように強電磁界と海中の相互作用は研究報告例が非常に少なく、例えば温度上昇のメカニズムなど、基礎的な物理描像に関する詳細な調査がされてこなかった。とくに、海水に電磁界が印加された結果、どのようにエネルギーが海水の分子やイオンに移っていくかといった過程は明確にされてきていない。また、今回実験で評価に利用した複素誘電率については、海水のような導電性をもつ媒質において1MHz以下で複素誘電率計測をしたときに現れる効果(電気化学的効果)を加味した検討の報告が見当たらなかった。今回の研究において、副次的な大きな成果としては、上記2項目の、

- 1) 電磁界の海水へのエネルギー移送メカニズム
- 2) 低周波領域における電気化学を考慮した複素誘電率の計測

について、ある程度の考察ができたことである。電磁界の海水へのエネルギー移送メカニズムについての概念図を図 3.1-38 に示す。一般的に海水に電磁波が入射すると、イオンが加速され導電電流になり、損失があるため海水の温度が上昇すると思われている。しかし、実際には、導電性を示す領域(海水の導電率を考慮すると概ね1GHz以下)では、イオンが動いて導電電流性を示すというよりは、海水に入射した電磁波のうち電界成分がH₂O分子の回転運動に寄与する。(回転運動は損失を生まないことから、H₂Oだけの純水では損失は非常に小さくなる。)同時に電界はイオンクラスターをプッシュする。イオンはH₂O分子と衝突してローカルな損失を生む。衝突によって併進運動を与えられたH₂O分子は周りとの衝突を繰り返し、損失していく。このためイオン数が少なくても僅かにあれば損失が発生する。以上がこれまでのシミュレーションと実験結果から推定した電磁波の海水中の損失メカニズムである。

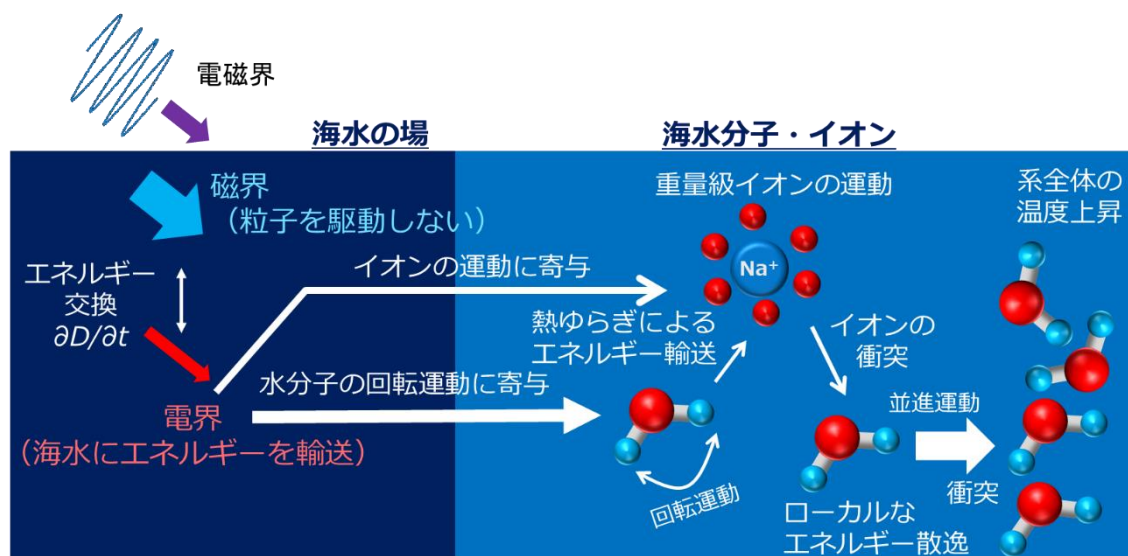


図 3.1-38 海水に入射した電磁界のエネルギー移動の概念図

一方、複素誘電率の計測においては、海水程度の導電率においては、1 MHz より低い周波数領域で比誘電率の計測値が 70 程度から 1M くらいまで急激に増加する結果がえられている。これまで、この上昇は電気二重層が計測系に現れるからと考えられていたが、定量的な計測と考察の報告がなされていない。本研究では、上記仮定にもとづき、電気化学計測法を用いて複素誘電率計測のための電極に発生する電気二重層のキャパシタンスを計測した。この計測値と 1MHz 以上の周波数で計測される電気二重層の効果が無い物理的なキャパシタンスとを直列結合しても、当然であるが合成容量は大きくなる。つまり比誘電率は増大しない。よって、従来の等価回路を見直し、その等価回路となる理由の仮説を作った。我々の立てた仮説は、1 MHz 以下の周波数になると、図 3.1-38 で説明した、イオンは余り動かず H₂O と衝突して損失を生むというモデルから、イオンが十分動ける程度の変動速度になり、H₂O がエネルギーを運ぶのではなく、イオン自体が移動してエネルギーを運ぶようになるというモデルに替わると仮定した。すると、これまで電極間の誘電率を決定していた H₂O の振舞いは重要でなくなり、イオン移動が系の特性を決定することになる。電極間の H₂O 分極によるキャパシタンスよりもイオン移動が優勢になれば、系の容量を決定するのは、両電極近傍の電気二重層キャパシタのみとなり、電極間の大部分は損失のある導電体（抵抗）と表現できる。このようなモデルを考えると、

1MHz より低い周波数において、海水中の電極間の電気二重層を除いた物理的な比誘電率は 70 程度であると推測できるが、電極間の導電電流を媒介するのはイオンになるため、物理的な誘電率の効果は殆ど無くなる。一方で、イオンが動ける周波数では電気二重層が形成されるため、電極表面に電気二重層キャパシタができて、計測値としては非常に大きな誘電率を示す。

と仮説できる。この仮説は既存の報告では見当たらない。今後残された課題としては、これらの副次的な成果であるモデルの正当性を証明していくことである。

3.2. ワイヤレス給電システムを構成する各要素部の損失メカニズムの解明

3.2.1. 電磁界シミュレーションにおける解析条件の最適パラメータの検討

3.2.1.1. 解析空間サイズの検討

3.2.1.1.1. 電磁界シミュレーションモデル

電磁界シミュレーションでは、解析する空間のサイズがシミュレーションの精度に影響を与える。特に空間媒質を海水モデルとした場合は、海水の導電率や誘電率も含む計算が必要となる。そこで 1/10 の Tx コイルを用いて解析空間のサイズを変えてインダクタンスと抵抗の計算結果を使い評価する。図 3.2-1 (a)に解析モデルを図 3.2-1(b)にコイルの構造を示す。解析空間は 1 辺が S の立方体として $S=0.3, 0.4, 0.6, 0.8\text{m}$ に変化させた。表 3.2-1 にシミュレーションで用いた各要素の物理定数を示す。コイルの周囲の媒質は海水モデルとした。

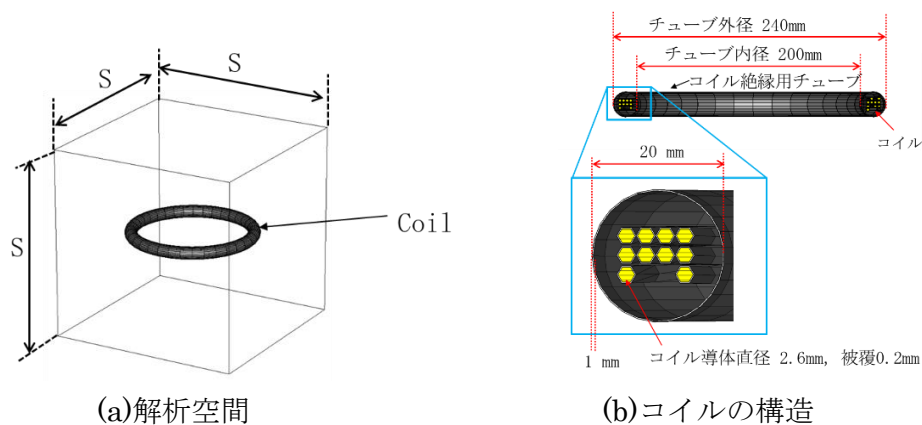


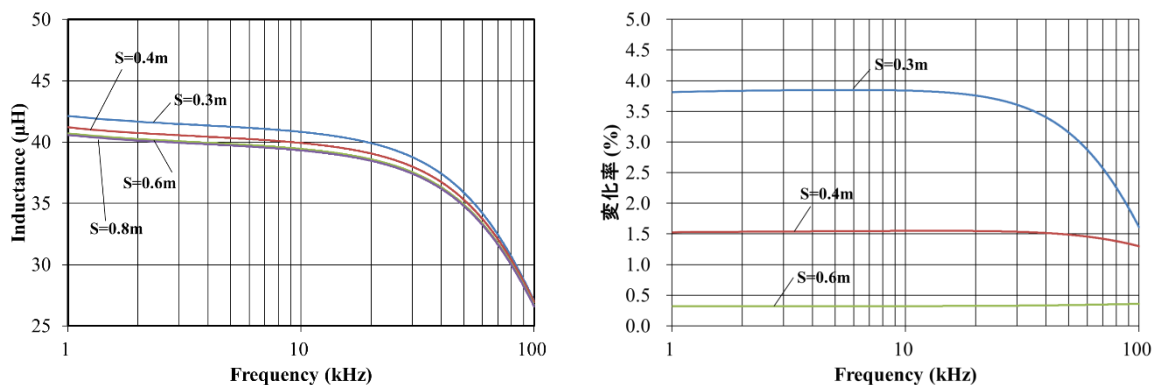
図 3.2-1 解析空間を検討の電磁界シミュレーションモデル

表 3.2-1 電磁界シミュレーションで用いた各要素の物理定数

	ϵ_r	μ_r	$\tan \delta$	σ (S/m)
Conductor of the coil	1.0	1.0	—	5.8×10^7
Aluminum	1.0	1.0	—	3.56×10^7
Rubber	3.0	1.0	0.0003	—
Acrylic	3.0	1.0	0.008	—
Vacuum	1.0	1.0	—	—
Seawater	78	1.0	—	5.0

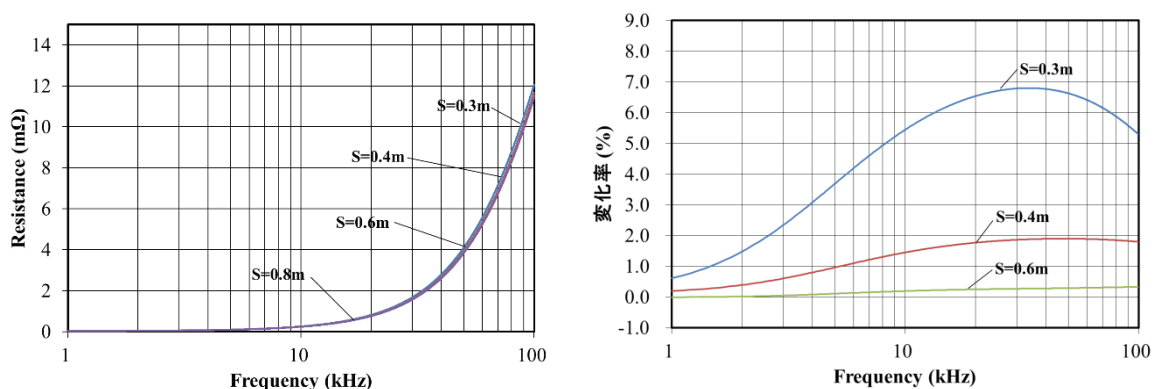
3.2.1.1.2. 解析空間サイズの評価結果

図 3.2-2 に解析空間サイズ S を変えた場合のインダクタンスの計算結果を図 3.2-3 に抵抗の計算結果を示す。抵抗は S が 0.3~0.8m でも変化は 0.1%程度と小さいが、図 3.2-2(b) のインダクタンスの変化は空間サイズ 0.8m に対して 0.3m では最大 3.9%程度の変化がある。解析空間のサイズを大きくすると変化は小さくなり 0.6m から 0.8m では 0.4%の変化となる。この結果、計算機のメモリー等のリソースを考慮すれば 0.6m (コイルサイズの 3 倍) 以上の解析領域があれば高精度なシミュレーションが行えると考えられる。



(a)インダクタンスの計算値 (b)解析空間 $S=0.8m$ に対するインダクタンスの変化率

図 3.2-2 解析空間サイズを変えた場合のインダクタンスの計算結果



(a)抵抗の計算値

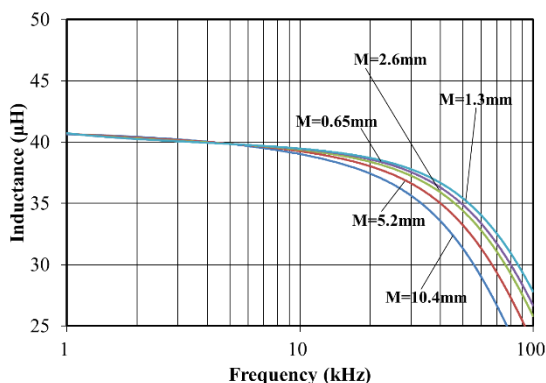
(b)解析空間 $S=0.8m$ に対する抵抗の変化率

図 3.2-3 解析空間サイズを変えた場合の抵抗の計算結果

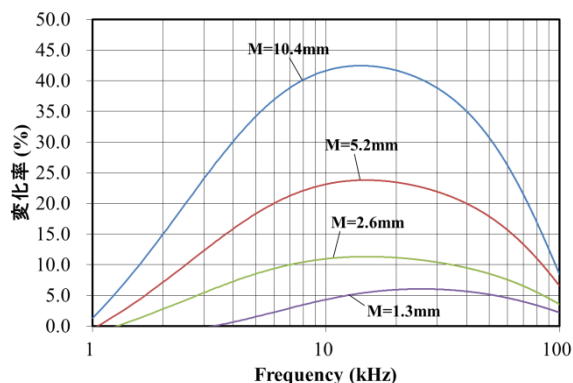
3.2.1.2. メッシュサイズの検討

図 3.2-1 の電磁界シミュレーションモデルを用いて最適なメッシュサイズの大きさの検討を行った。解析空間のサイズ $S=0.6m$ として、メッシュの形状は正四面体形状である。コイル電線部は表皮効果や近接効果の影響を受けるためメッシュサイズが大きいと計算誤差

が大きくなる。このため電線のメッシュ1辺のサイズを手動変化させた。電線部のメッシュサイズを決めるとコイル電線から連続する被覆や海水部も自動で細かなメッシュとして作成され計算誤差が小さくなると考えられる。メッシュのサイズ M は $M=0.65$ 、 1.3 、 2.6 、 5.2 、 10.4mm の5つで計算した。図 3.2-4 にインダクタンスの計算結果を、図 3.2-5 に抵抗の計算結果を示す。インダクタンスのメッシュサイズによる変化は 1.3mm から 2.6mm で 30kHz で 1% 程度であるが、抵抗は 4% 程度ある。メッシュサイズが 1.3mm ではこのシミュレーションモデルでも計算が 48 時間程度かかる。来期以降にメッシュサイズを小さく計算時間を短縮する方法を検討する。

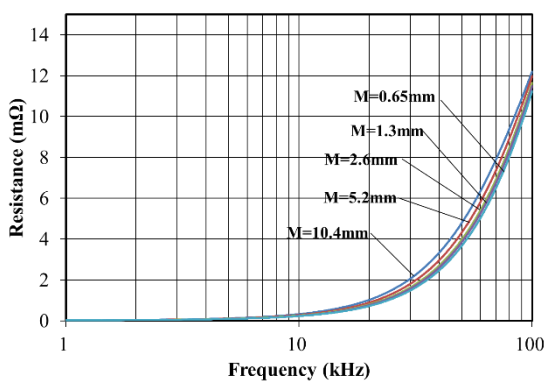


(a)インダクタンスの計算値

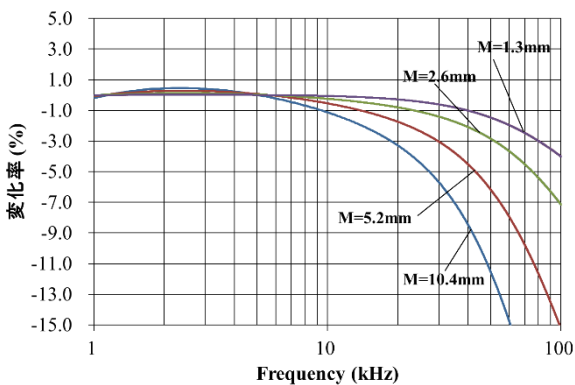


(b)メッシュサイズ 0.65mm に対する変化率

図 3.2-4 メッシュサイズを変えた場合のインダクタンスの計算結果



(a)抵抗の計算値



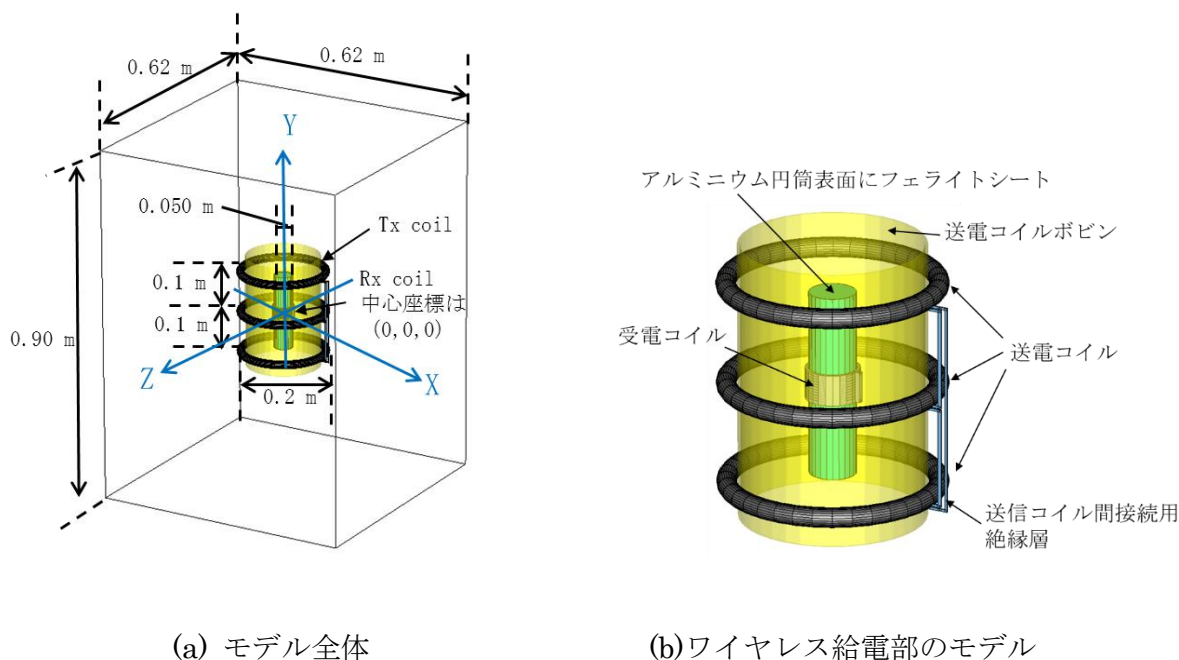
(b)メッシュサイズ 0.65mm に対する変化率

図 3.2-5 メッシュサイズを変えた場合の抵抗の計算結果

3.2.1.3. 海中での 1/10 縮小コイルモデルでの電磁界強度と損失

3.2.1.3.1. 電磁界シミュレーションモデル

図 3.2-6(a)に電磁界シミュレーションの全体モデルを、図 3.2-6(b)にワイヤレス給電部の構造を示す。電磁界シミュレーションは MW-Studio の有限積分法を用いた。ワイヤレス給電部は 3 段の Tx コイル中に磁性体で覆ったアルミパイプに電線を巻いた Rx コイルを Tx コイル中に入れた構成である。3 段の Tx コイル 3 つのコイルを直列に接続し、Rx コイルの中心座標は Tx コイルの中央で $X=0$ 、 $Y=0$ 、 $Z=0$ の位置に設定した。表 3.2-1 に本シミュレーションで用いた各要素の物理定数を示す。解析領域は $0.62 \times 0.62 \times 0.90\text{m}$ でワイヤレス給電部に対して 3 倍程度とし境界面は吸収境界条件を用いた。ワイヤレス給電部の周囲の媒質は海水モデルとした。

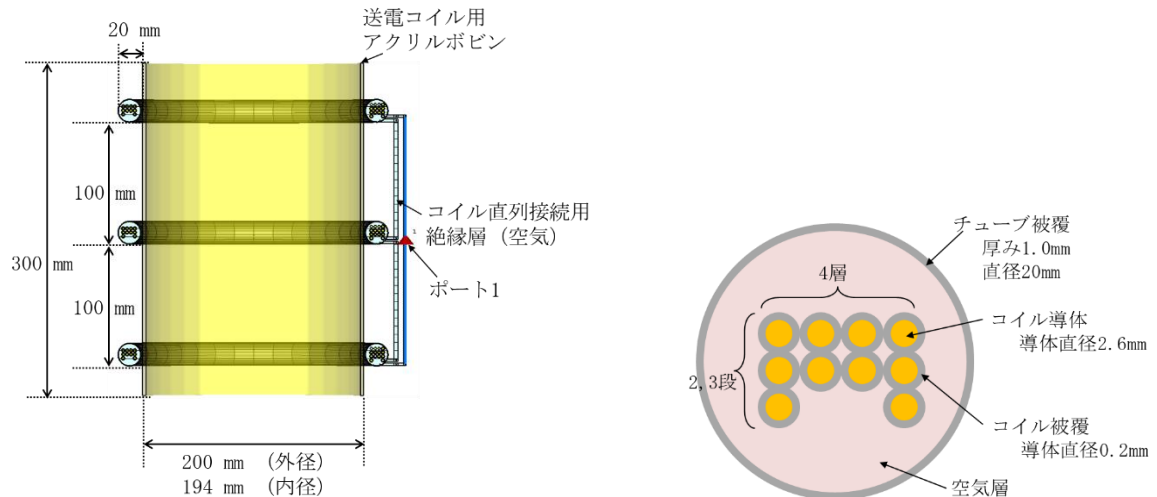


(a) モデル全体

(b) ワイヤレス給電部のモデル

図 3.2-6 電磁界シミュレーションモデル

図 3.2-7(a)に Tx コイルの構成を示す。Tx コイルは 10 ターン巻いたコイルを 3 段 0.1m 間隔で 3 段アクリルボビンに配置している。コイルの接続は #2、#1、#3 コイルの順に直列に接続し #2、#3 コイルの両端をポート 1 としている。図 3.2-7(b)にコイルの断面を示す。コイルは直径 20mm、厚み 1mm のチューブに図 3.2-7(a)のように電線を配置した。またチューブの中は真空モデルとした。

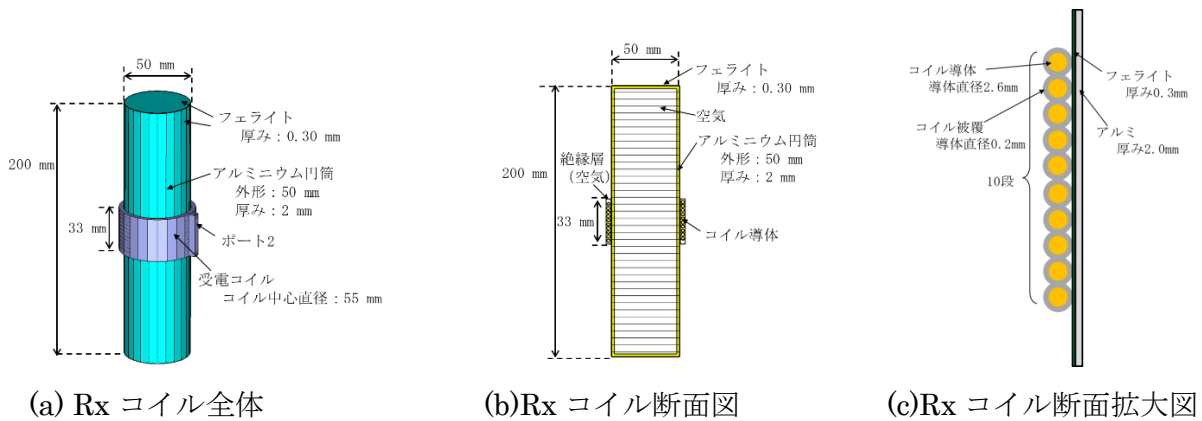


(a) Tx コイルの構成

(b)Tx コイル断面図

図 3.2-7 Tx コイル構成と断面図

図 3.2-8(a)に Rx コイルの構造を示す。Rx コイルは AUV の筐体を模した 50mm のアルミパイプの表面に厚さ 0.3mm のフェライトで全面を覆った構造に電線を 10 ターン巻いた構造となっている。図 3.2-8(b)、(c)に Rx コイルの断面構造を示す。Rx コイルはヘリカル状に 10 ターン巻きケーブルは Tx と同じ、導体直径 2.6mm, 被覆厚み 0.2mm とした。



(a) Rx コイル全体

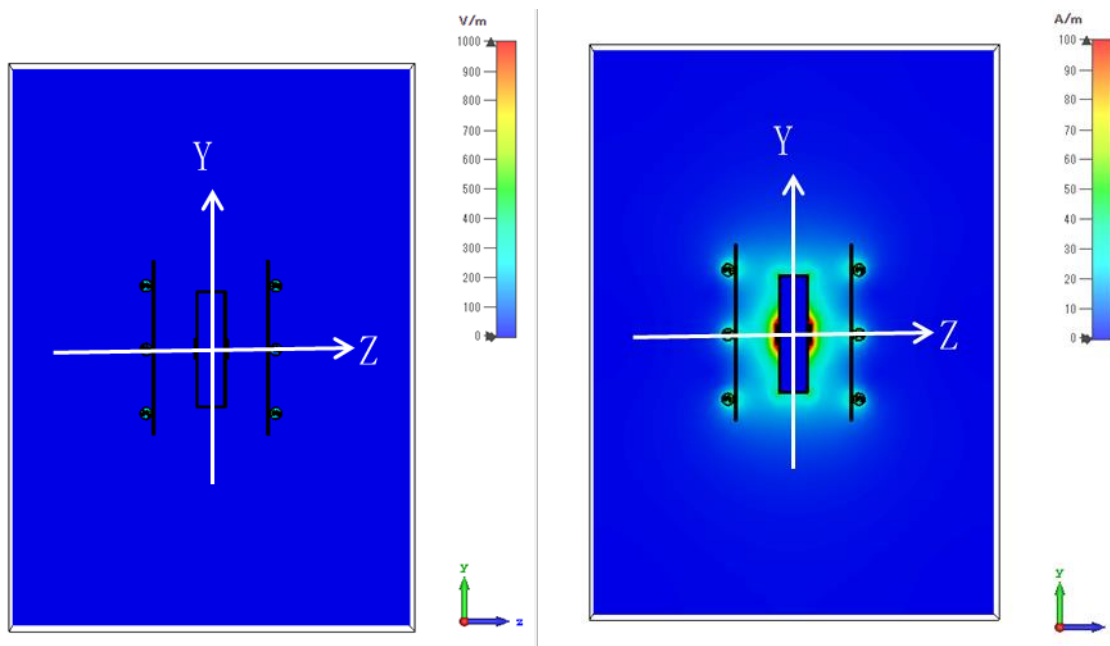
(b)Rx コイル断面図

(c)Rx コイル断面拡大図

図 3.2-8Rx コイルの構成と断面図

3.2.1.3.2. 電磁界の強度分布

電界 E、磁界 H、電力 P の強度分布の実効値を図 3.2-9 に示す。電界は送電コイルの絶縁層周辺部のみ見えるが海中および受電コイル周辺では非常に小さい。磁界強度は送電コイルの周囲や送受電コイル間が大きい。特に受電コイル近傍が非常に大きいことがわかる。



(a)電界成分の強度

(b)磁界成分の強度

図 3.2-9 電磁界成分の強度分布(30kHz)

図 3.2-10 に送受電コイル間で(X,Y,Z)=(0,0,0)から Z 方向の電磁界強度を示す。電界強度は送電コイル近傍が大きく受電コイル付近は小さい。また磁界成分は送受電コイル近傍が大きいことがわかる。このことから電力伝送は磁界成分が寄与していることがわかる。また電界成分は送電コイル近傍にあるが海水やコイル被覆などの誘電体損により電力が損失する可能性があるため今後さらに検討が必要である。

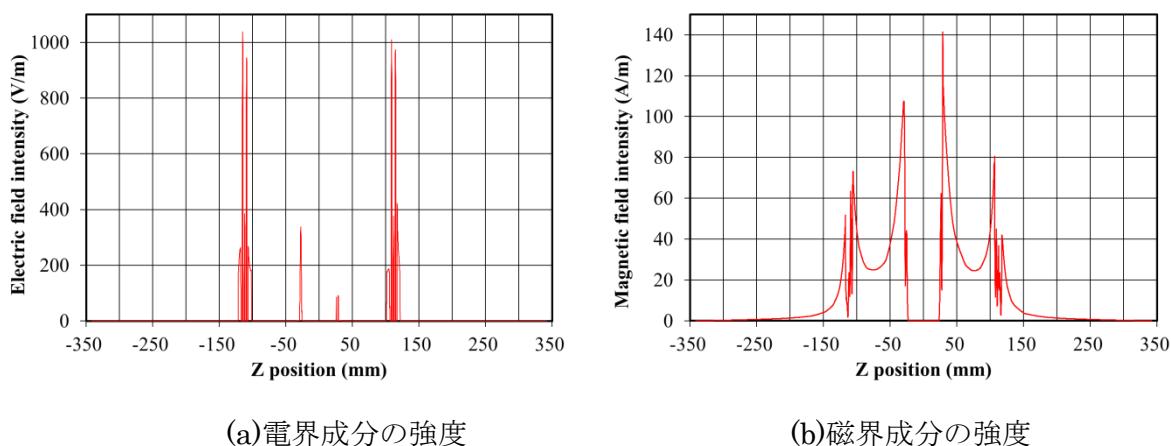
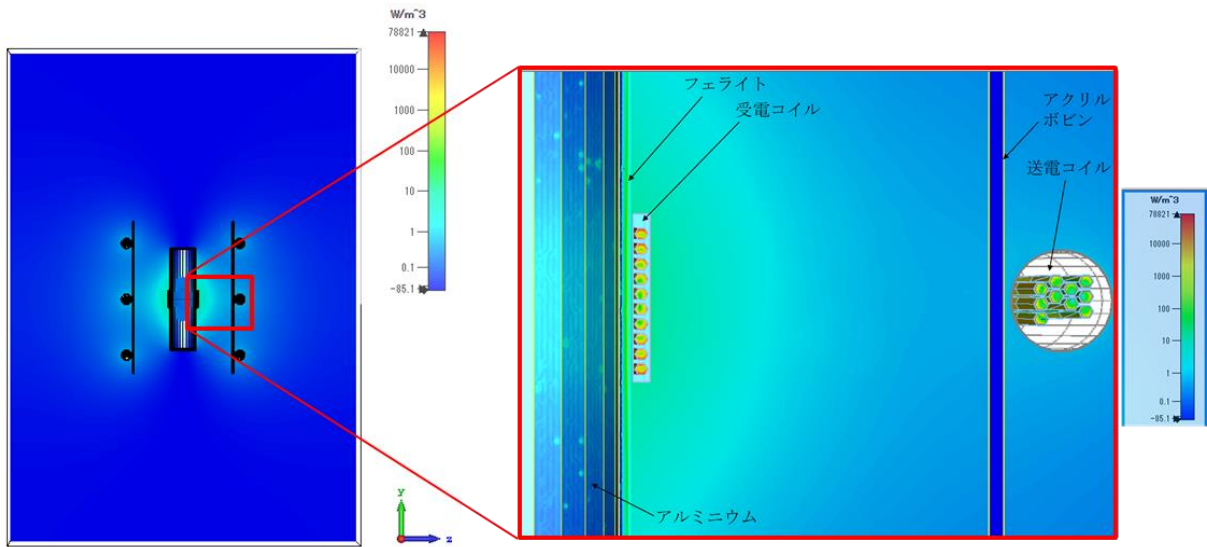


図 3.2-10 コイル中央部 Z 方向の電磁界成分強度分布(30kHz)

3.2.1.3.3. 1/10 モデルを海中に設置した場合の損失の計算

1/10 モデルの電力損失分布を図 3.2-11 に示す。図 3.2-11(a)から送電コイルの周囲の海水の損失が大きいことがわかる。この部分に磁性体を配置するなどの工夫で損失を低減できる可能性も考えられる。図 3.2-11(b)から海水では受電コイル部周辺での損失が大きい。海水、コイル導体、アルミパイプ、フェライト、アクリルパイプに分解した場合の大きさを図 3.2-12 に示す。30kHz では、コイル導体、フェライト、海水の順で損失が大きい。コイル導体の損失は、全体の 60%を超えるため、コイル導体部の損失を減少させることが効果的である。コイル導体同士の近接効果の影響が大きいと考えられるため、コイル導体の配置方法や導体部の最適形状を検討することにより効率の改善が期待できる。



(a)電力損失分布

(b)拡大図

図 3.2-11 1/10 モデルの電力損失 (30kHz) の磁界強度分布

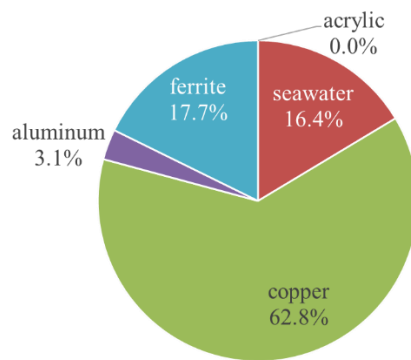


図 3.2-12 1/10 モデルの電力損失 (30kHz) の各材質の損失割合

3.2.2. 損失媒質中での複素ポインティングベクトル理論 と計算結果の比較

海中でワイヤレス給電を行う場合、ワイヤレス給電を行うコイル、コンデンサ、磁性体などで発生する損失に加えて、海水中に発生する電磁界により損失が発生する。海中を閉空間に区切り、この閉空間内の単位時間当たり出入りする電気・磁気エネルギーのバランスを表現するのがポインティング理論である。ポインティング理論により電源から供給されるエネルギー、閉空間から放射されるエネルギー、閉空間内に蓄積されるエネルギー、閉空間内で損失するエネルギーを求めシステム要素ごとに分解すれば損失メカニズムを解析することができる。海中のワイヤレス給電システムでも複素ポインティングベクトルを解析することによりシステムの要素ごとの損失を計算することができる。

3.2.2.1. 損失媒質が充満した閉空間の複素ポインティングベクトル

図 3.2-13 の閉じた空間を考える。この空間は海水など損失のある媒質で満たされている。

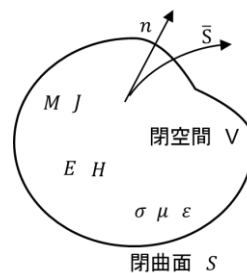


図 3.2-13 体積 V 、表面積 S の閉じた空間

複素ポインティングベクトルを Maxwell の方程式から定式化する。

$$\nabla \times H = J + j\omega\epsilon E \quad (3.2-1)$$

$$\nabla \times E = -M - j\omega\mu H \quad (3.2-2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.2-3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.2-4)$$

$$D = \epsilon E \quad B = \mu H \quad J = \sigma E \quad (3.2-5)$$

ここで H : 磁界強度 μ : 透磁率 B : 磁束密度 J : 電流密度 M : 磁流密度
 E : 電界強度 ϵ : 誘電率 D : 電束密度 σ : 導電率 ρ : 電荷密度

式(3.2-1),(3.2-2)と E 、 H^* の内積をとる。

$$E \cdot (\nabla \times H^*) = E \cdot J^* - j\omega \varepsilon^* |E|^2 = E \cdot J_s^* + \sigma |E|^2 - j\omega \varepsilon^* |E|^2 \quad (3.2-6)$$

$$H^* \cdot (\nabla \times E) = -H^* \cdot M_s - j\omega \mu |H|^2 \quad (3.2-7)$$

ここで H^* 、 J^* 、 ε^* は共役複素数であり、 $J = J_s + \sigma E$ である。また J_s は電流源、 M_s は磁流源である。

ベクトル公式と式(3.2-6)、(3.2-7)から

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (E \times H^*) &= H^* \cdot (\nabla \times E) - E \cdot (\nabla \times H^*) \\ &= -\sigma |E|^2 + j\omega (\varepsilon^* |E|^2 - \mu |H|^2) - (E \cdot J_s^* + H^* \cdot M_s) \end{aligned} \quad (3.2-8)$$

図 3.2-13 の閉じた空間 V の表面から出ていく複素ポインティングベクトルの総量を空間 V の表面で面積積分する。さらにガウスの定理より面積積分を体積積分に変換すると

$$\begin{aligned} \int_V \nabla \cdot (E \times H^*) dv &= \int_S E \times H^* ds \\ &= -\sigma \int_V |E|^2 dv + j\omega \int_V (\varepsilon^* |E|^2 - \mu |H|^2) dv - \int_V (E \cdot J_s^* + H^* \cdot M_s) dv \end{aligned} \quad (3.2-9)$$

ここで S は閉空間の表面であり V は閉空間内の体積である。ここで $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ 、 $\mu = \mu' - j\mu''$ として式(3.2-9)を時間平均のエネルギーとして $1/2$ の係数を掛けて整理する。なお共役複素誘電率は $\varepsilon^* = \varepsilon' + j\varepsilon''$ 、共役複素透磁率は $\mu^* = \mu' + j\mu''$ である。

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} \int_V (E \cdot J_s^* + H^* \cdot M_s) dv &= \frac{1}{2} \int_S E \times H^* ds + \frac{\sigma}{2} \int_V |E|^2 dv \\ &+ \frac{\omega}{2} \int_V (\varepsilon'' |E|^2 + \mu'' |H|^2) dv + j \frac{\omega}{2} \int_V (\mu' |H|^2 - \varepsilon' |E|^2) dv \end{aligned} \quad (3.2-10)$$

式(3.2-10)は、閉空間におけるエネルギーのバランスを示す式である。複素入力電力 P_s は式(3.2-10)の左辺で示され、電流源 J_s 、磁流源 M_s により与えられる。

$$P_s = -\frac{1}{2} \int_V (E \cdot J_s^* + H^* \cdot M_s) dv \quad (3.2-11)$$

式(3.2-10)の右辺の最初の積分は複素電力が閉空間の表面から外に出ていくものである。これを \bar{S} としてポインティングベクトルと定義すると

$$\bar{S} = E \times H^* \quad (3.2-12)$$

ここで放射されるポインティングベクトルの平均値は

$$P_o = \frac{1}{2} \int_S E \times H^* ds = \frac{1}{2} \int_S \bar{S} ds \quad (3.2-13)$$

式(3.2-11)の P_s がマイナス符号なのは、閉空間から放射される複素ポインティングベクトルをプラス符号として定義しているためであり、閉空間内に流入する電流・磁流は供給エネルギーとしてマイナスとなる。また式(3.2-10)の右辺の2番目と3番目の積分は、閉空間内 V での導体損、誘電体損、磁性体損としてジュール熱の損失となるため実数である。

$$P_l = \frac{\sigma}{2} \int_V |E|^2 dv + \frac{\omega}{2} \int_V (\varepsilon'' |E|^2 + \mu'' |H|^2) dv \quad (3.2-14)$$

式(3.2-10)の右辺の4番目の積分は閉空間内に蓄積される電界、磁界のエネルギーを示す。このエネルギーは損失がないため虚数となる。閉空間内Vに電界Eや磁界Hがあるとそこに蓄積されているエネルギーの時間平均は

$$W_e = \frac{\varepsilon'}{4} \int_V |E|^2 dv \quad (3.2-15)$$

$$W_m = \frac{\mu'}{4} \int_V |H|^2 dv \quad (3.2-16)$$

式(3.2-11)～(3.2-16)を用いて式(3.2-10)を整理すると以下になる。

$$P_s = P_0 + P_l + 2j\omega(W_m - W_e) \quad (3.2-17)$$

ここで P_s は供給される電流源・磁流源の電力、 P_0 は複素ポインティングベクトル、 P_l は閉空間内でジュール熱になる電力、 W_m は磁気エネルギー、 W_e は電気エネルギーである。ここで磁気エネルギーと電気エネルギーは 2ω の係数がかかっているため、供給される電力の2倍の周期で変化していることがわかる。

電磁界シミュレーションで計算した海中の電磁界について式(3.2-17)を用いて分解すれば、海中ワイヤレス給電システムのAUV本体、コイル、コンデンサ、磁性体、海水による損失の影響を解析することができる。

3.2.2.2. 海水の導電率と複素誘電率の取り扱いについて

海水は導電体と誘電体の両方の性質を持っている。そのため海中での電界による導電電流損と複素誘電率による誘電体損の両方が発生する。この2つの損失について波動方程式から検討する。

損失媒質中の波動方程式は以下である。

$$\nabla^2 H - \gamma^2 H = 0 \quad (3.2-18)$$

$$\nabla^2 E - \gamma^2 E = 0 \quad (3.2-19)$$

ここで γ は伝搬定数であり

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \quad (3.2-20)$$

海水中では $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ $\mu = \mu'$ $\mu'' \approx 0$ とすると

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) = -\omega^2\mu' \left\{ \varepsilon' - j \left(\frac{\sigma}{\omega} + \varepsilon'' \right) \right\} \quad (3.2-21)$$

式(3.2-21)で σ/ω と ε'' は、同じ次元の損失項となるため実際の海水を測定して分離することは難しい。電磁界シミュレータでも、導電率と複素誘電率を足して ε'' を以下としたり

$$\hat{\varepsilon}'' = \frac{\sigma}{\omega} + \varepsilon'' \quad (3.2-22)$$

$\tan \delta$ として以下を用いている場合もある。

$$\tan \delta = \frac{\hat{\varepsilon}''}{\varepsilon'} = \frac{\frac{\sigma}{\omega} + \varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.2-23)$$

水の場合式(3.2-21)の σ/ω は塩の Na⁺、Cl⁻イオンによる導電率によるもの、 ε'' は水分子の分極による損失と考えられる。しかし実測してこの2つの損失を分離することは難しいが、純水の導電率や $\tan \delta$ の測定値を水分子の分極による損失 ε'' 、塩水での Na⁺、Cl⁻イオンによる導電率を σ と仮定して電磁界シミュレーションすることは可能である。ここで、本研究では 10kHz 以下で給電することを目標としており、本年度は 1/2 モデルでの 2kHz を用いて給電する。そこで超純水の導電率 $0.05479 \times 10^6 \text{ S/m}$ [11] 周波数 2kHz で $\varepsilon' = 78 \times 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ [12]とすると

$$\varepsilon_1'' = \frac{\sigma}{\omega} = 4.36 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad \tan \delta = \frac{\varepsilon_1''}{\varepsilon'} = 0.00631 \quad (3.2-24)$$

また海水の塩分濃度が約 3.5%であり、ばらつきを考慮した上で実環境よりも劣悪な環境を構築するために塩分濃度を 5%とする。その場合の導電率 7.74 S/m [12]で周波数を 2kHz とすると

$$\varepsilon_2'' = \frac{\sigma}{\omega} = 6.16 \times 10^{-4} \text{ F/m} \quad \tan \delta = \frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon'} = 891861 \quad (3.2-25)$$

となる。

3.2.2.3. 電磁界シミュレーションで解析モデルに入射する電流

電磁界シミュレーションで電磁界を計算する場合は、解析したワイヤレス給電のコイルにポートを接続して電力を供給する必要がある。しかしポートを接続しただけでは整合が取れていないため供給した電力の一部が反射される。そのため解析モデルに実際に供給された電力を正しく計算することは重要である。入射する電力はポート近傍の磁界を周回積分して入力電流を求めることで計算できるが、メッシュサイズなどにより必ずしも正確な値とはならない。そこで S パラメータを用いて比較的簡単に正確な入射電力、電圧、電流を計算できる式を示す。図 3.2-14 は電磁界解析したモデルにポートを接続した図と等価回路モデルである。

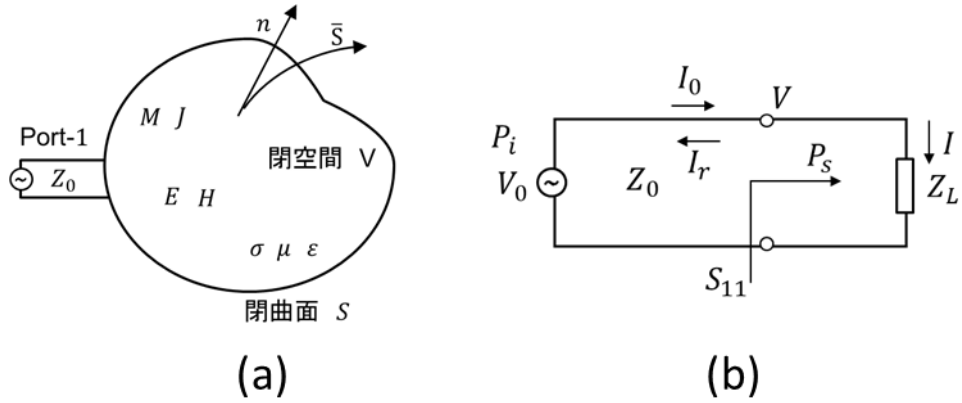


図 3.2-14 ポート電流計算のモデル (a) 電磁界とポート接続 (b)等価回路図。

P_0 、 V_0 、 I_0 、電源の電力、電圧、電流であり P_s 、 V 、 I は、負荷に入射する電力、電圧、電流である。 S_{11} はポートから見た反射係数である。これらの電圧、電流、 S_{11} の関係は以下の式となる。ここで P_0 、 P_s は平均値、 V_0 、 I_0 、 V 、 I は、実効値である。

$$V = V_0(1 + S_{11}) \quad (3.2-26)$$

$$I = I_0(1 - S_{11}) \quad (3.2-27)$$

$$P_i = I_0 V_0 = \frac{V_0^2}{Z_0} = I_0^2 Z_0 \quad (3.2-28)$$

ここで S_{11} を複素数で表現する。

$$S_{11} = a + bj \quad (3.2-29)$$

入射電力 P_s は、電圧 V 、と電流 I の共役複素数 I^* の積で計算できる。

$$\begin{aligned} P_s &= VI^* = P_i(1 + S_{11})(1 - S_{11})^* \\ &= P_i(1 - |S_{11}|^2 + S_{11} - S_{11}^*) \\ &= P_i(1 - (a^2 + b^2 - 2jb)) \end{aligned} \quad (3.2-30)$$

ここで入射電力 P_s を複素数で表現すると以下の式となる。

$$P_s = P'_s + jP''_s \quad (3.2-31)$$

式(3.2-30)(3.2-31)を比較すれば

$$b = \frac{P''_s}{2P_0} \quad (3.2-32)$$

$$a = \pm \sqrt{1 - \frac{P'_s}{P_0} - \left(\frac{P''_s}{2P_0}\right)^2} \quad (3.2-33)$$

(3.2-33)式で示す入射電力 P_s の実数部は、電磁界シミュレーションで閉空間から放射する

電力をプラスと決めているので入射電力はマイナスとなる。

$$S_{11} = -\sqrt{1 - \frac{P'_s}{P_0} - \left(\frac{P''_s}{2P_0}\right)^2} + j\frac{P''_s}{2P_0} \quad (3.2-34)$$

入射電力 P_s は、電磁界シミュレーションで計算した閉空間複素ポインティングベクトルの式(3.2-11)から計算できるので式(3.2-34)から S_{11} が計算できる。この S_{11} を用いて式(3.2-27)から入射電流を求めることができる。

3.2.2.4. 複素ポインティングベクトルと回路インピーダンスの関係

式(3.2-17)において供給される電流源・磁流源の電力 $P_s = 0$ とし複素ポインティングベクトルの電力の流れを閉空間の内向きとすると

$$P_0 = P_l + 2j\omega(W_m - W_e) \quad (3.2-35)$$

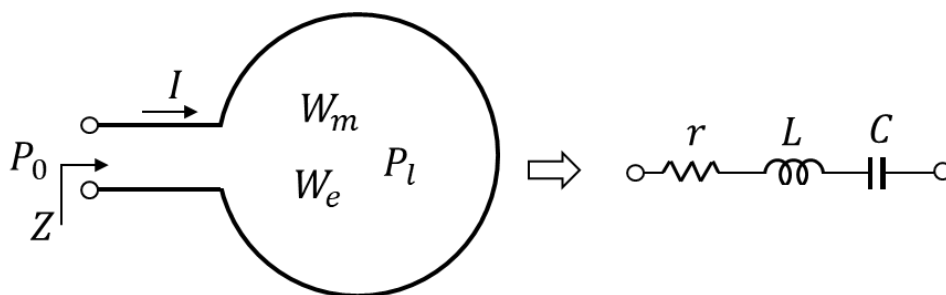


図 3.2-15 閉空間エネルギーから電気回路モデルへの変換

P_0 は複素ポインティングベクトル、 P_l は体積空間内でジュール熱になる電力、 W_m は磁気エネルギー、 W_e は電気エネルギー、 Z は入力ポートから閉空間を見た場合の入力インピーダンスである。ここでポートを接続した閉空間を図 3.2-15 のような抵抗 r 、インダクタンス L 、コンデンサ C の直列回路と考える。式(3.2-35)において P_0 は Z で蓄積、消費される電力がポートから供給される電力である。また P_l は r で消費される電力、 $2\omega W_m$ 、 $2\omega W_e$ は L 、 C に蓄積される電力である。式(3.2-27)で計算される電流 I を用いて $P_0 = Z \cdot |I|^2$ とする。

$$Z = \frac{P_l + 2j\omega(W_m - W_e)}{|I|^2} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (3.2-36)$$

$$r = \frac{P_l}{|I|^2} \quad L = \frac{2W_m}{|I|^2} \quad C = \frac{2W_e}{|V|^2} \quad (3.2-37)$$

コイルの Q はエネルギーの定義から

$$Q = \frac{\text{蓄積エネルギー}}{\text{消費エネルギー}} = \frac{2\omega W_m}{P_l} \quad (3.2-38)$$

また回路理論での定義から

$$Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{2\omega W_m}{|I|^2} \bigg/ \frac{P_l}{|I|^2} = \frac{2\omega W_m}{P_l} \quad (3.2-39)$$

式(3.2-38)(3.2-39)は一致することがわかる。

3.2.2.5. 海水中での直径 1.0m コイルを用いた複素ポインティング ベクトル検討

3.2.2.5.1. モデリング

直径 1.0m コイルを海中においた場合の電磁界シミュレーションで計算した電界・磁界の計算結果を用いて、複素ポインティングベクトルの式やポートから入力される電流の計算式の妥当性を確認する。解析では電磁界シミュレータ HFSS を用いた。解析モデルを図 3.2-16 に示す。

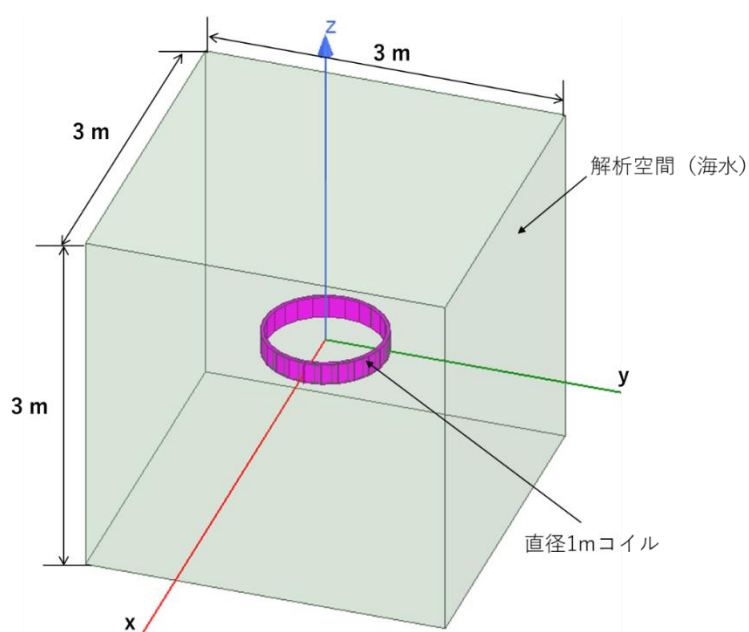


図 3.2-16 直径 1.0 m コイルの解析モデル

解析空間の大きさは $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 3\text{ m}$ とし、解析空間中央に巻数 10、直径 1m コイルを配置した。コイルの線材は、導体径 8.4mm、被覆の厚みは 1.3mm であり、線材外形は 11mm である (図 3.2-17)。コイル導体、被覆の材質はそれぞれ銅、ゴムである。

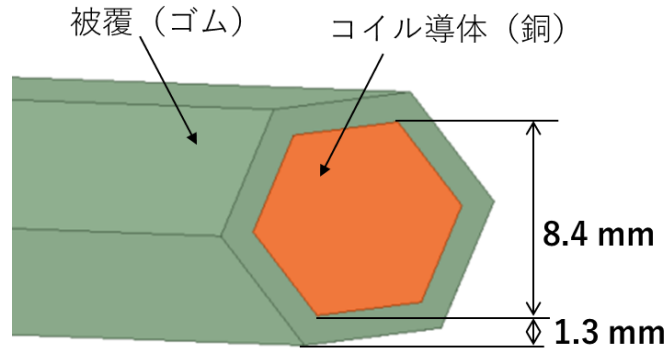


図 3.2-17 コイル線材の断面図

コイル引出線部分を拡大したものが図 3.2-18 である。コイル線間のピッチは4mmとし、ヘリカル状に10巻している。コイルの上下端に引き出し線を伸ばしてあり、ポート励振用のシートを設けている。ポートは1Wの強制給電で特性インピーダンス50Ωと設定した。

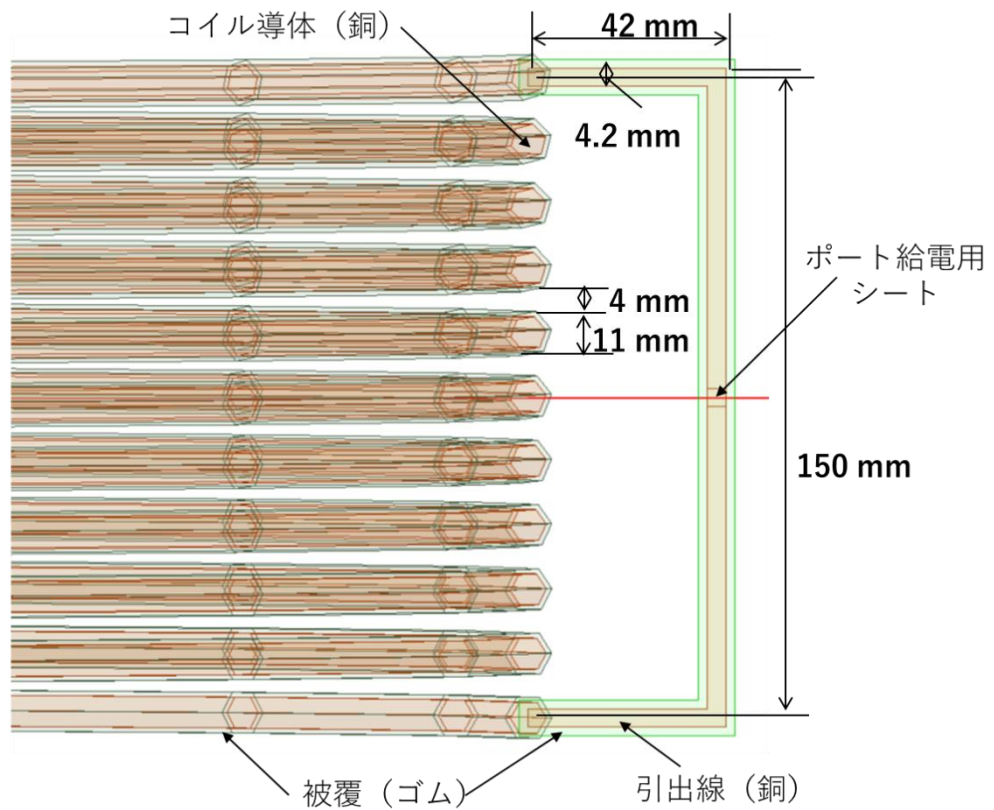


図 3.2-18 コイルの引出線部拡大図

材料定数は表 3.2-2 で示す。海水の複素誘電率虚部は超純水の値を用いて、周波数 1kHz で計算した値を使用した。

表 3.2-2 材料定数

	導電率	比誘電率	ϵ''	比透磁率	μ''
銅	5.8×10^7	1.0	0	1.0	0
ゴム	1.0×10^{-10}	3.0	0	1.0	0
海水	5.0	78	8.72×10^{-10}	1.0	0

3.2.2.5.2. エネルギーの計算

式(3.2-17)で求めた閉空間のエネルギー収支の式は

$$P_s = P_o + P_l + 2j\omega(W_m - W_e) \quad (3.2-40)$$

P_s は供給される電流源・磁流源の電力、 P_o は複素ポインティングベクトル、 P_l は閉空間内でジュール熱になる電力、 W_m は磁気エネルギー、 W_e は電気エネルギーである

式(3.2-13)の複素ポインティングベクトル P_o は

$$P_o = \frac{1}{2} \int_S E \times H^* ds \quad (3.2-41)$$

解析空間の6面の境界の複素ポインティングベクトル P_o の実部と虚部を計算した。表3.2-3に計算結果を示す。計算結果は実部、虚部とも550Hzに比べて30kHzが大きくなった。

表 3.2-3 複素ポインティングベクトル P_o の実部と虚部

(a) 550Hz の計算結果

	実部	虚部
面1	0.00001352266	0.00001364237
面2	0.00001353614	0.00001360793
面3	0.00001355095	0.00001366698
面4	0.00001353412	0.00001354842
面5	0.00000807747	0.00000815097
面6	0.00000807046	0.00000808223
計	0.00007029179	0.00007069890

(b) 30kHz の計算結果

	実部	虚部
面1	0.000667738	0.000673422
面2	0.00066973	0.000673474
面3	0.000671135	0.000674689
面4	0.000669319	0.000673451
面5	0.000237458	0.000240628
面6	0.000236655	0.000240062
計	0.00315203424	0.00317572554

式(3.2-14)の P_l は閉空間内でジュール熱になる電力の式は

$$P_l = \frac{\sigma}{2} \int_V |E|^2 dv + \frac{\omega}{2} \int_V (\epsilon'' |E|^2 + \mu'' |H|^2) dv \quad (3.2-42)$$

表 3.2-4 では σ 、 ϵ'' 、 μ'' によるジュール損を海水中、コイル、コイルの被覆に分解して計算した結果を示す。550Hzと比較して30kHzのジュール損は356倍に誘電体損は60593倍に大きくなっている。特にジュール損はコイル導体が2.8倍に対して、海水が1111倍に増加している。

表 3.2-4 海水、コイル導体、コイル被覆の損失

(a)550Hz の計算結果

	ジュール損	誘電損失	磁気損失
コイル導体	0.0011456	—	—
被覆	0.0000000	—	—
海水空間	0.0005369	3.2357E-10	0
合計	0.0016825	3.2357E-10	0

(b)30kHz の計算結果

	ジュール損	誘電損失	磁気損失
コイル導体	0.0031793	—	—
被覆	0.0000000	—	—
海水空間	0.5964211	1.9606E-05	0
合計	0.5996004	1.9606E-05	0

式(3.2-15)(3.2-16)閉空間内Vの電界Eや磁界Hで蓄積されているエネルギーの時間平均は以下の式で示される。

$$W_e = \frac{\varepsilon'}{4} \int_V |E|^2 dv \quad (3.2-43)$$

$$W_m = \frac{\mu'}{4} \int_V |H|^2 dv \quad (3.2-44)$$

表 3.2-5 に解析空間の電界Eや磁界Hを用いて計算したエネルギーと蓄積電力の計算結果を示す。

550Hz から 30kHz で電界エネルギーは 61608 倍に増加し、磁界エネルギーは 21 倍増加している。

表 3.2-5 電界Eや磁界Hの蓄積エネルギー

(a)550Hz の計算結果

	We (J)	2ωWe (W)	Wm (J)	2ωWm (W)
全空間	2.717E-11	1.878E-07	6.935E-06	4.793E-02

(b)30kHz の計算結果

	We (J)	2ωWe (W)	Wm (J)	2ωWm (W)
全空間	3.07E-08	0.011569928	2.72E-06	1.026212173

式(3.2-17)で求めた閉空間のエネルギー収支の式は

$$P_s = P_0 + P_l + 2j\omega(W_m - W_e) \quad (3.2-45)$$

P_s は供給される電流源・磁流源の電力、 P_0 は複素ポインティングベクトル、 P_l は閉空間内でジュール熱になる電力、 W_m は磁気エネルギー、 W_e は電気エネルギーである。

表 3.2-3～表 3.2-5 の実数部、虚数部を用いて式(3.2-45)のエネルギーバランスをまとめたものを表 3.2-6 に示す。

表 3.2-6 エネルギーバランスのまとめ

(a)550Hz の計算結果

	供給電力 P_i	反射電力 P_r	入力電力 P_s	ポインティング ベクトル P_0	ジュール損失 P_l	誘電体損 P_d	磁気損失 P_h	電界エネルギー $2j\omega W_e$	磁界エネルギー $2j\omega W_m$
実部	1	0.998247	0.001753	0.000070	0.001683	3.236.E-10	0	-	-
虚部	0	0	0.047944	0.000071	-	-	-	1.878.E-07	0.047929

(b)30kHz の計算結果

	供給電力 P_i	反射電力 P_r	入力電力 P_s	ポインティング ベクトル P_0	ジュール損失 P_l	誘電体損 P_d	磁気損失 P_h	電界エネルギー $2j\omega W_e$	磁界エネルギー $2j\omega W_m$
実部	1	0.397230	0.602770	0.003152	0.599600	1.961.E-05	0	-	-
虚部	0	0	1.017788	0.003176	-	-	-	1.157.E-02	1.026212

表 3.2-6 に示す。

表 3.2-6 の結果を用いて式(3.2-34)から S_{11} を計算し式(3.2-27)から電流 I を求め、式(3.2-37)(3.2-39)より抵抗、インダクタンス、 Q を計算する。計算結果を表 3.2-7 に示す。この結果は、S パラメータから計算した結果と良く一致しており、解析空間内の複素ポインティングベクトルによる損失計算の妥当性を確認できた。

表 3.2-7 S パラメータ、抵抗、インダクタンス、 Q の計算

(a) 550Hz の計算結果

S11		I (A)		Sパラメータより算出			電磁界Sim.の既定値		
実部	虚部	実部	虚部	r (Ω)	L (uH)	Q	r (Ω)	L (uH)	Q
-0.998835	0.023972	0.282678	-0.003390	0.02193	173.5	27.3	0.02193	173.8	27.4

(b) 30kHz の計算結果

S11		I (A)		Sパラメータより算出			電磁界Sim.の既定値		
実部	虚部	実部	虚部	r (Ω)	L (uH)	Q	r (Ω)	L (uH)	Q
-0.371829	0.508894	0.194006	-0.071968	14.07757	127.1	1.7	14.07700	126.0	1.7

3.2.2.5.3. コイル近傍に集中する電磁界による損失

図 3.2-16 の解析でコイル近傍には強い電磁界が発生するため、コイル近傍の海水の解析空間を細かく分割し損失の割合を検討する。図 3.2-19 はコイルの断面図であり、海水空間 A、B、C はコイルを包み込むように 1 周を円筒形状で切り取った。

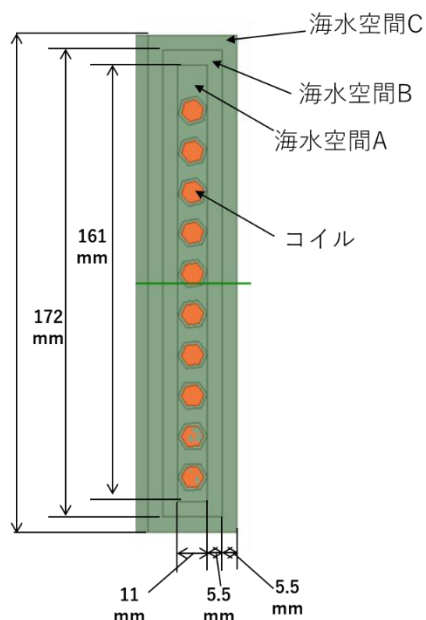


図 3.2-19 コイル近傍の海水空間モデル

図 3.2-20 は表 4 の実部である各損失部分の割合を示したものである。550Hz ではジュール損が 96%でポイティングベクトルでの損失が 4%であるが、30kHz ではジュール損が 99.5%となる。損失は海水の導電率に由来するジュール損が大半を占めることがわかる。

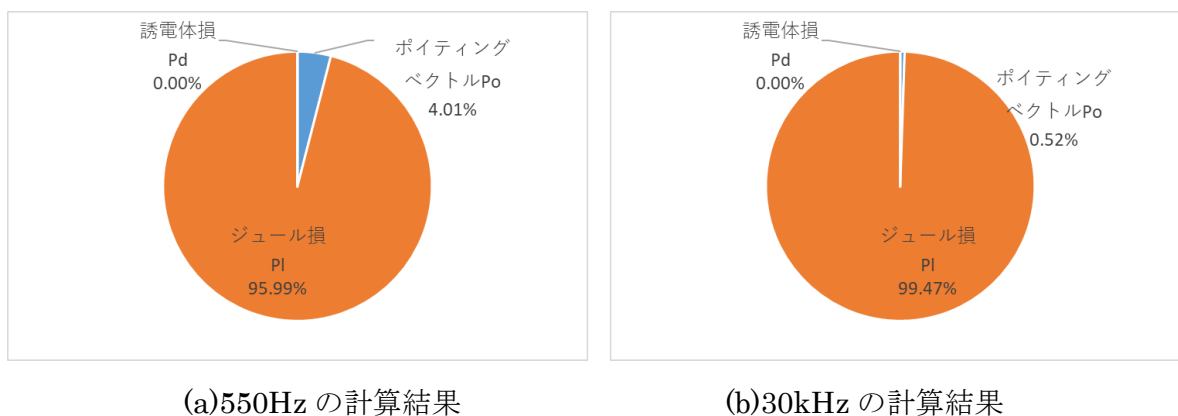


図 3.2-20 ポイティングベクトル、ジュール損、誘電体損の割合

表 3.2-8 はモデルの要素ごとのジュール損である。図 3.2-21 はその割合を示したものである。周波 550Hz のときに比べて 30kHz のときは 356 倍に増えるがその内訳が変わる。

550Hz のときはコイル導体部の損失が 62%であるが、30kHz のときは 0.19%と極端に小さくなる。海水の損失は空間 A、B、C で 550Hz に比べ 30kHz はそれぞれ約 1130 倍大きくなり、領域による違いは小さい。またその他の海水空間では 944 倍大きくなる。この結果、周波数が高くなるとコイルの導体損に比べて海水中の導電電流による損失が大きくなる。式(3.2-42)の導電率 σ に由来する損失で σ は周波数特性を持たないため、損失増加は周波数が高くなるとコイル近傍の海水中での電界 E の密度が高くなるためである。

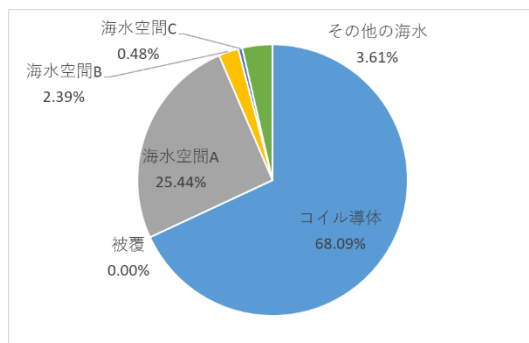
表 3.2-8 モデルの各要素のジュール損

(a)550Hz の計算結果

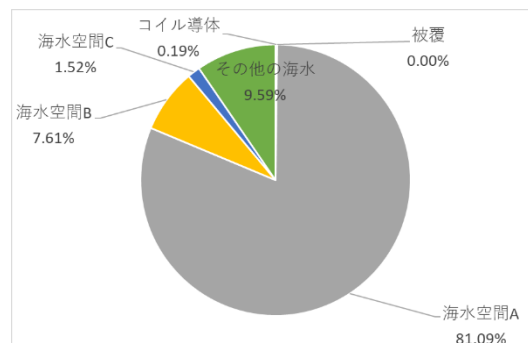
	ジュール損(W)
コイル導体	0.0011456
被覆	0.0000000
海水空間A	0.0004280
海水空間B	0.0000402
海水空間C	0.0000080
その他の海水	0.0000607
合計	0.0016825

(b)30kHz の計算結果

	ジュール損(W)
コイル導体	0.0031793
被覆	0.0000000
海水空間A	0.4845395
海水空間B	0.0454892
海水空間C	0.0090905
その他の海水	0.0573019
合計	0.5996004



(a)550Hz の計算結果



(b)30kHz の計算結果

図 3.2-21 各モデルのジュール損の割合

3.2.2.5.4. 解析空間による複素ポインティングベクトルの変化

図 3.2-13 のように複素ポインティングベクトルは解析空間から放射される電力である。この電力はアンテナのように遠方へ放射されるエネルギーや解析領域の外でジュール損として損失するエネルギーが考えられる。そこで解析空間を大きくすれば遠方への放射電力と領域外で消費される電力に切り分けることができる。そこで図 3.2-16 の $3 \times 3 \times 3\text{m}$ のモデルと図 3.2-22 の $6 \times 6 \times 6\text{m}$ でのポインティングベクトルとジュール損を計算し比較する。

解析周波数は 550Hz を用いた。

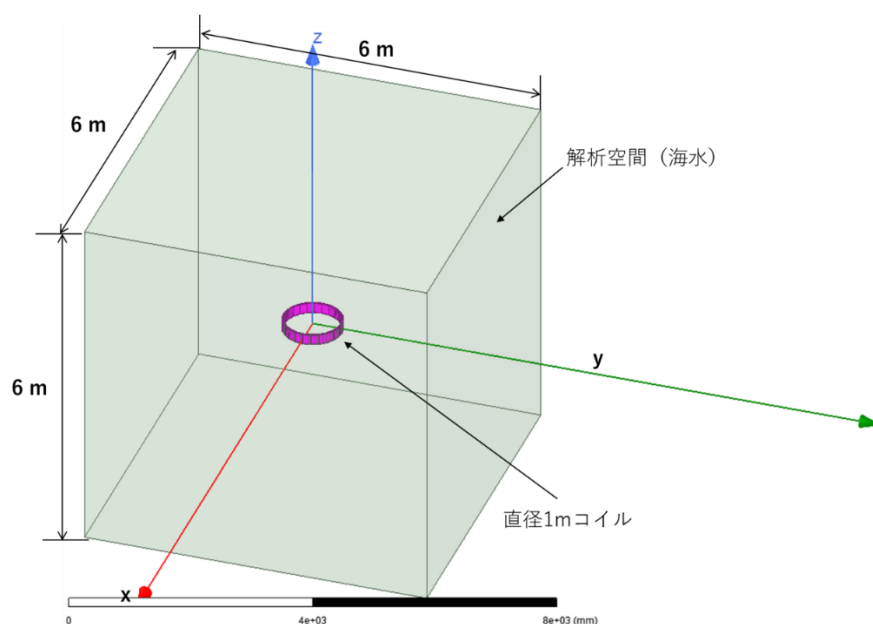


図 3.2-22 解析空間を大きくしたモデル

図 3.2-23 は同様にポインティングベクトル、ジュール損を計算した結果である。図 3.2-20 と比べると複素ポインティングベクトルの割合が、4.0%から 0.9%へ減少している。この結果、550Hz では遠方に放射する電力は小さいことがシミュレーションでも確認できた。また複素ポインティングベクトルが小さい領域では、解析空間内で電磁界シミュレーションが完結しているため解析空間領域の妥当性を決める指標になることもわかった。

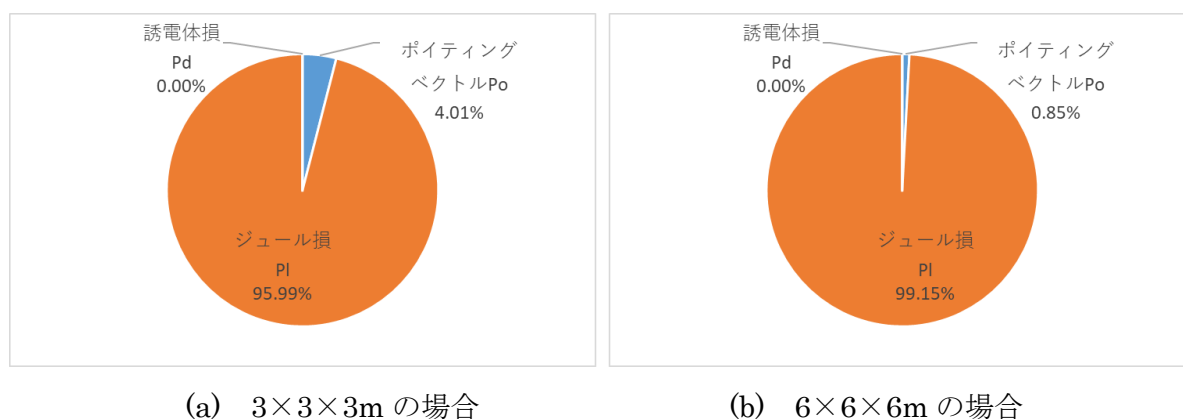


図 3.2-23 解析空間を大きくしたときの損失割合

3.2.2.6. 海水中の存在する電力送受コイルの損失計算

送受電コイルの 2 つのコイルを用いた場合の、複素ポインティングベクトルを計算し解析空間の各要素の損失や伝送効率を計算する。

3.2.2.6.1. 解析モデル

図 3.2-24 に解析モデルを示す。送受電コイルは図 3.2-16 と同じように直径 1m、ターン数 10 である。コイル間距離は、0.5m とした。

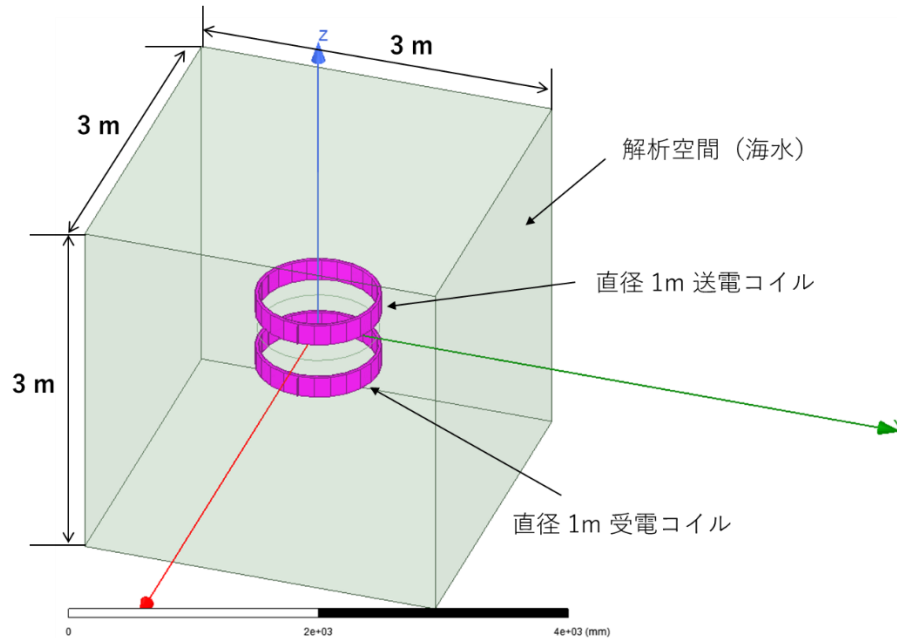


図 3.2-24 コイル 2 素子のモデリング

図 3.2-25 は送受電コイルの近傍の海水を切り出した解析空間の断面図である。この解析空間はコイルを包み込むように 1 周を円筒形状で切り取った。それぞれの解析空間は、送電コイル側は ATx、BTx、CTx、受電コイル側は ARx、BRx、CRx と呼ぶ。

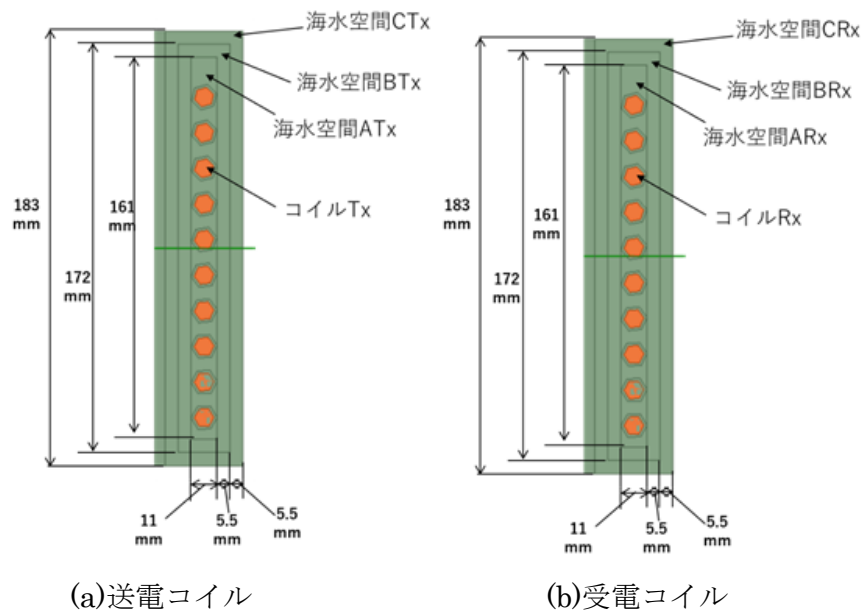


図 3.2-25 送電コイル、受電コイル周辺部の海水空間 (断面図)

3.2.2.6.2. 整合回路

電磁界シミュレーションを行ったモデルに整合を取るためにシミュレーションモデルのポート 1、2 に直並列コンデンサを付けた。各ポートの入出力インピーダンスは 4.2Ω とした。周波数は 550Hz とし、直並列に、 $304.2\mu\text{F}$ 、 $396.2\mu\text{F}$ のキャパシタを挿入した。図 3.2-26 に整合回路と回路定数を示す。

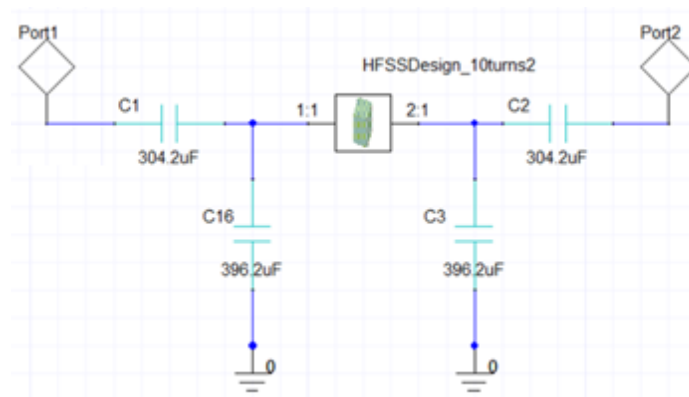


図 3.2-26 整合回路を付けたモデル

3.2.2.6.3. 伝送特性

図 3.2-26 の回路の S パラメータの計算を行った。図 3.2-27 に通過特性 S_{21} 、反射特性 S_{11} を示す。 550Hz では $S_{21}=0.787$ となり、伝送効率は $\eta = |S_{21}|^2 \times 100 = 62\%$ なる。

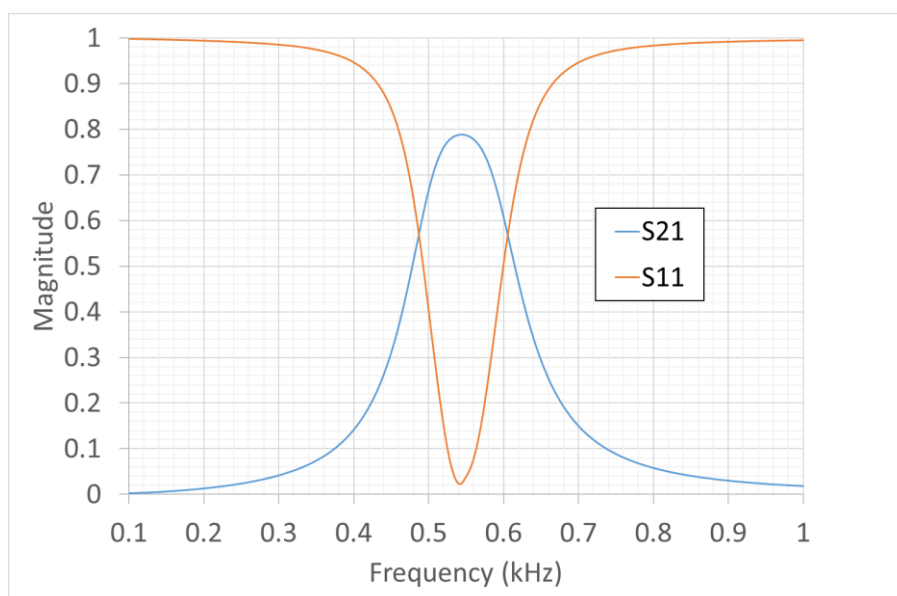


図 3.2-27 通過特性と反射特性

3.2.2.6.4. 複素ポインティングベクトルによる解析空間の各要素の損失の計算

図 3.2-28 に図 3.2-26 の回路および電磁界解析結果から求めた誘電体損、複素ポインティングベクトル、およびジュール損の割合を示す。ジュール損が、99.85%、複素ポインティングベクトルが 0.15%であり、ジュール損が損失の大半を占めていることがわかる。

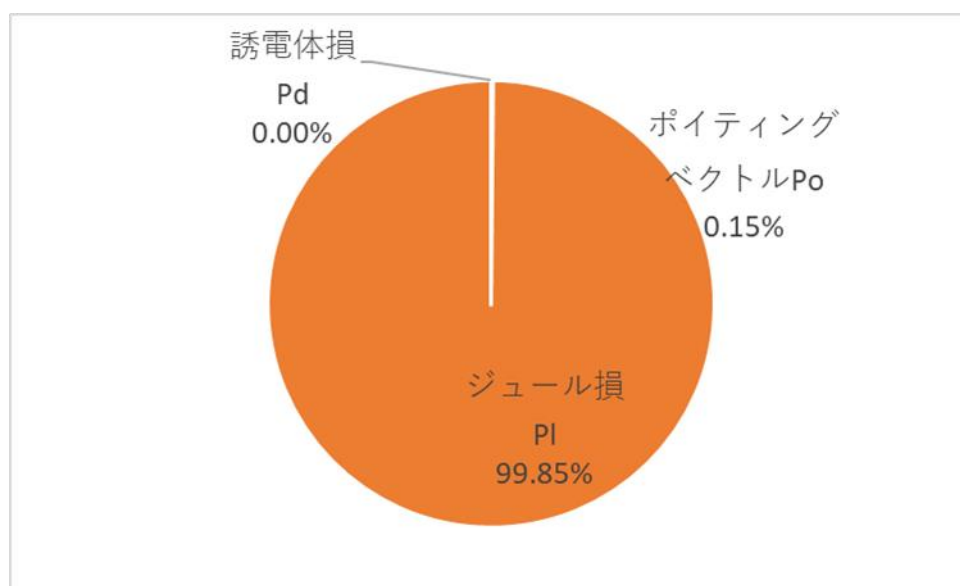


図 3.2-28 各損失の割合 (整合後)

表 3.2-9 表 3.2-9 は各要素の損失を示す。図 3.2-29 は、各材質のジュール損の割合を示している。図 3.2-21 の 1 素子での解析と同じように 550Hz ではコイル導体、海水空間のジュール損が大きいことがわかる。

表 3.2-9 各材質の損失

	ジュール損	誘電損失	磁気損失
コイル導体	0.0094570	—	—
被覆	0.0000000	—	—
海水空間	0.0035976	2.1682E-09	0
合計	0.0130547	2.1682E-09	0

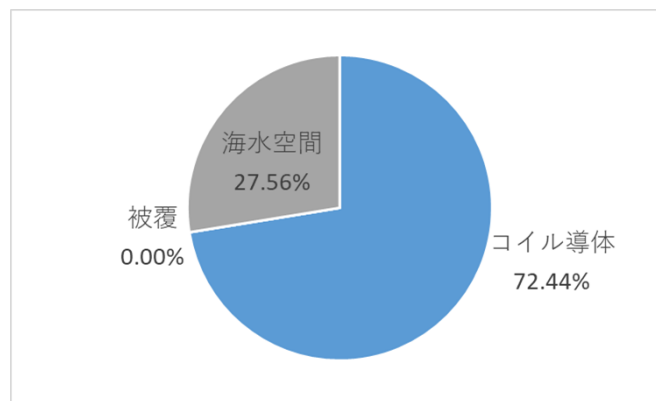


図 3.2-29 各材質のジュール損の割合

表 3.2-10 は、各モデルの解析領域の各要素のジュール損を示す。送電コイル各要素のジュール損は受電コイルの約 1.5 倍である。これは送電コイルに受電コイルの $\sqrt{1.5} \approx 1.2$ 倍の電流が流れているためと考えられる。図 3.2-30 はモデルごとの各要素の損失割合を示す。送電コイル導体損失は全体の 43.6%、受電コイルの導体損失は 28.9%とコイル導体部の損失割合が大きい。海水部分を見ると、海水空間 ATx が 13.5%、海水空間 ARx が 8.7%でその他の海水の 3.09%に比べてけた違いに大きいため、海水での損失はコイル導体近傍の海水空間 ATx、ARx でほとんどが損失していることがわかった。

表 3.2-10 解析領域の各要素の損失

送電コイルのジュール損		受電コイルのジュール損	
コイル導体	0.0056911	コイル導体	0.0037659
被覆	0.0000000	被覆	0.0000000
海水空間ATx	0.0017646	海水空間ARx	0.0011410
海水空間BTx	0.0001461	海水空間BRx	0.0000946
海水空間CTx	0.0000292	海水空間CRx	0.0000189
送電側合計	0.0076310	受電側合計	0.0050204
その他海水	0.0004034	合計	0.0130548

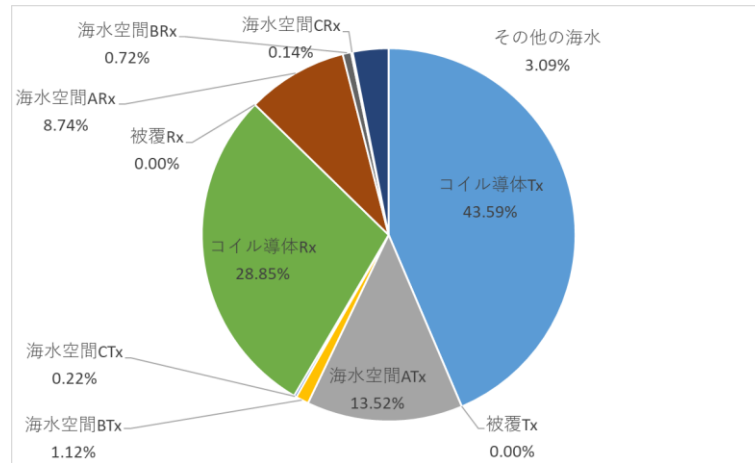


図 3.2-30 各モデルのジュール損の割合

3.2.3. 電磁界シミュレーションの精度向上の検討

3.2.3.1. 解析領域とメッシュサイズの最適化による解析精度向上

電磁界シミュレーションにおいて、コイルの小型モデルは解析領域が広がるため、メッシュサイズの大きさによる解析精度について調査し、最適なものを選定する。この結果をもとに電磁界シミュレーションで海水を含めたモデルの電磁界計算を行う。2018年度はコイルの全体サイズが 1/10 モデルについて検討を行ったが、1/2 モデルでは解析領域が広がるため最適のメッシュサイズを検討し解析精度の向上をはかる。2018年度の報告で、解析空間はコイル直径の 3 倍以上が望ましい結果となった。そこで解析空間をコイル直径の 3 倍に固定して計算を行う。

3.2.3.1.1. 電磁界シミュレーションの最適なメッシュサイズの検討

図 3.2-31 のように直径 1m のコイルを海水中に配置した。コイルのモデリングについては、図 3.2-16 と同様のモデリングを行っている。解析空間の大きさは、 $3 \times 3 \times 3\text{m}$ とし、解析空間の媒質は表 1 と同様に、導電率は 5.0 S/m、比誘電率 78、比透磁率 1 の海水とした。

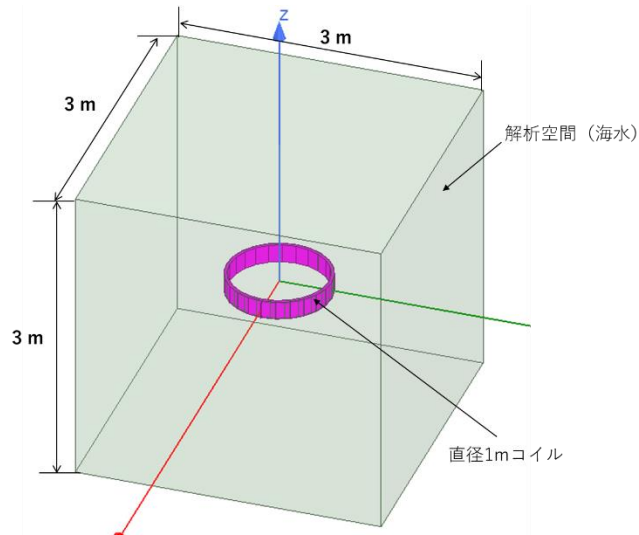


図 3.2-31 コイルのモデリングと解析空間の大きさ

コイル近傍の損失は、図 3.2-21 のようにコイル導体近傍でのジュール損が大きい。そのため損失の大きなコイル近傍のメッシュを細かく切ることによって、計算精度の向上を図る。

図 3.2-32 のようにコイル近傍部分をマニュアルで特定の寸法にメッシュを切り電磁界シミュレーションを行った。メッシュは四面体で切り、メッシュサイズの 1 辺の大きさをシミュレーションソフトウェアのデフォルト値とし、コイル導体直径の 2 倍 (16.8mm)、コイル導体直径 (8.4mm) とした。これらのメッシュサイズで計算したコイルのインダクタンス、抵抗値で解析精度を比較した。

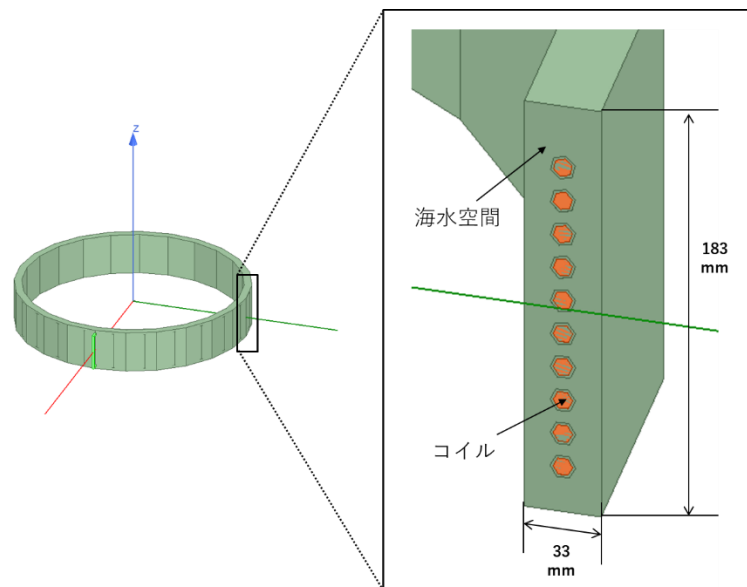


図 3.2-32 コイル近傍の海水部分空間

図 3.2-33(a)は、コイルのインダクタンス値を示し、(b)メッシュサイズ 8.4mm の計算を基準 (精度が高い計算値) に、メッシュ設定無しの場合と、メッシュサイズ 8.4mm の変化

率を見たものである。変化率は、メッシュ設定無しまたはメッシュサイズ 16.8mm からメッシュサイズ 8.4mm のものを差し引き、基準値（メッシュサイズ 8.4mm）で割ったものである。メッシュをマニュアルかつコイル近傍部分を切り取って細かくすることで、基準値からの差が少なく、解析精度が向上していることがわかる。

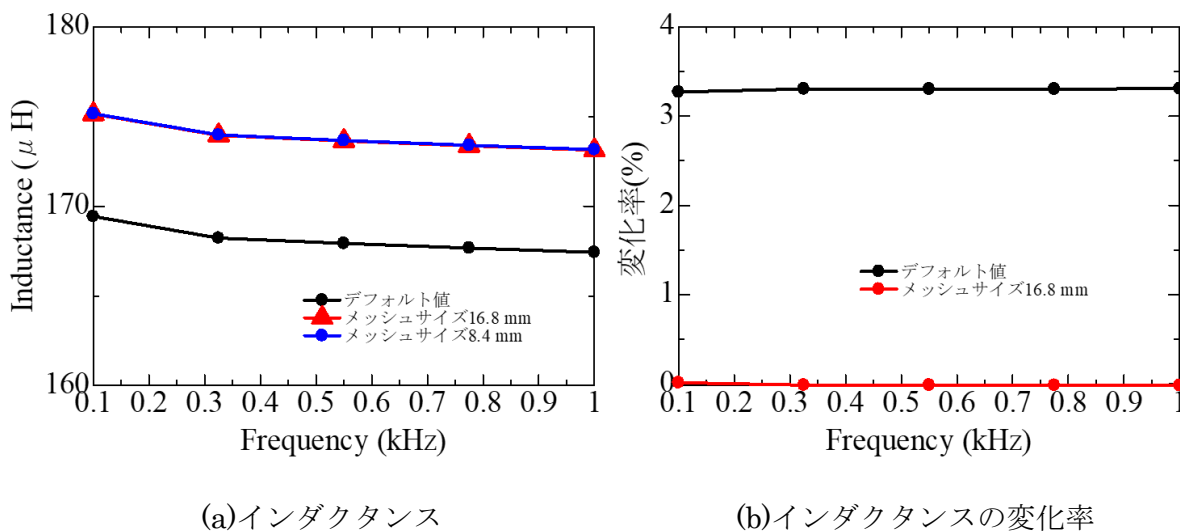


図 3.2-33 メッシュサイズに対するインダクタンスと変化率

図 3.2-34(a)はコイルの抵抗値を示し、(b)はメッシュサイズ 8.4mm を基準としたときの变化率である。インダクタンスと同様に、解析空間を切り分けメッシュサイズを小さくすると解析精度が高くなることがわかる。

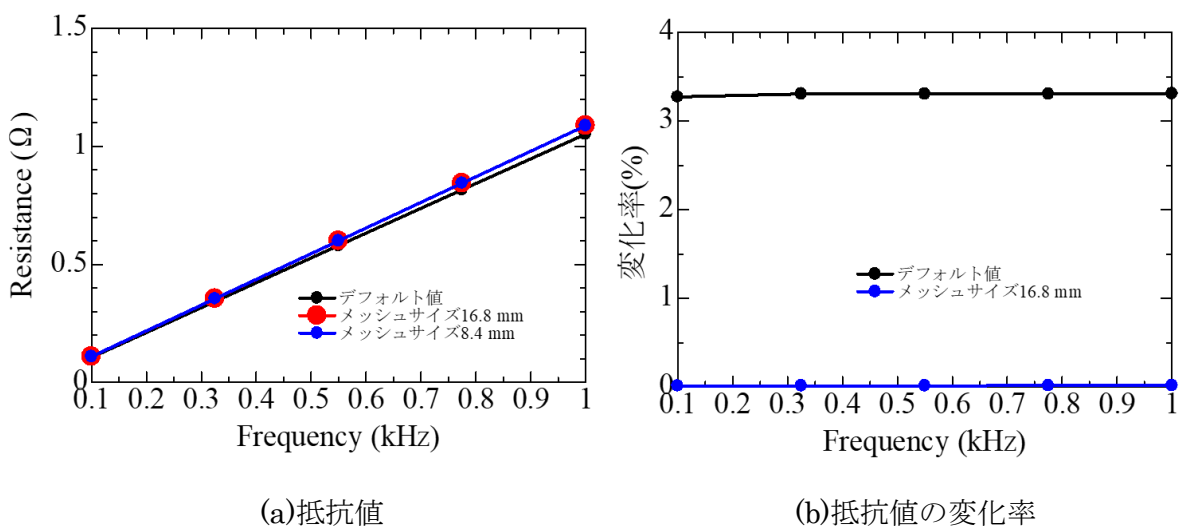


図 3.2-34 メッシュサイズに対する抵抗値と変化率

表 3.2-11 は、各メッシュサイズに応じた、モデル全体のメッシュ数、海水の部分空間の

メッシュ数、計算時間、最大メモリをまとめたものである。解析空間（海水）の一部分を切り分け、コイル導体部の周辺メッシュサイズを細かくすることで、解析空間の大きさが増大しても、コイル周辺部のメッシュを切り取りその部分のメッシュサイズを細かくすることで、全体のメッシュ数を大きくすることなく、計算精度を向上できることがわかる。

表 3.2-11 メッシュサイズとメッシュ数、計算時間、メモリ

	全体のメッシュ数	海水の部分空間のメッシュ数	計算時間	最大メモリ
デフォルト値	321061	42103	12分	63.2GB
16.8 mm	544697	180618	32分	184GB
8.4 mm	1581154	1008786	2時間57分	802GB

3.2.3.2. コイルサイズが 1/2 モデルを用いた各要素の損失と損失改善の指針

小型モデル②(1/2 モデル)を用いた電磁界シミュレーションにより、コイル、コンデンサ、AUV に用いる磁性体材料や海水等を含めた電磁界強度分布を解析し、各要素部での電磁波の伝搬エネルギーの損失を明らかにして、小型モデル②の設計指針とする。

3.2.3.2.1. モデリングについて

表 3.2-5(a)より、550Hz の低周波数において、磁界エネルギーが支配的であることがわかる。また、周波数が 1kHz のときの波長は 300m であるため、解析空間のサイズは 0.1 波長以下であり、近傍界かつ磁界が支配的であることがわかる。近傍領域かつ磁界支配である電磁界を計算するさいに、有効な電磁界解析のシミュレータ (ANSYS Maxwell) を用いて、小型モデルの損失計算を行う。なおこれまで電磁界シミュレータ HFSS で検討した解析空間の大きさやメッシュサイズの検討結果は Maxwell でも同様に有効活用できる。

図 3.2-35 は小型モデルの全体図である。解析時は、このモデルを Z 軸周りに回転したモデルを計算した。送電コイルは直径 1m でパイプ内に積層されている。受電コイルは直径 0.256m でアルミ柱にフェライトシートが貼ってあり、そのフェライトの上にコイルが巻いてある。海水の大きさは 2×2.5m である。

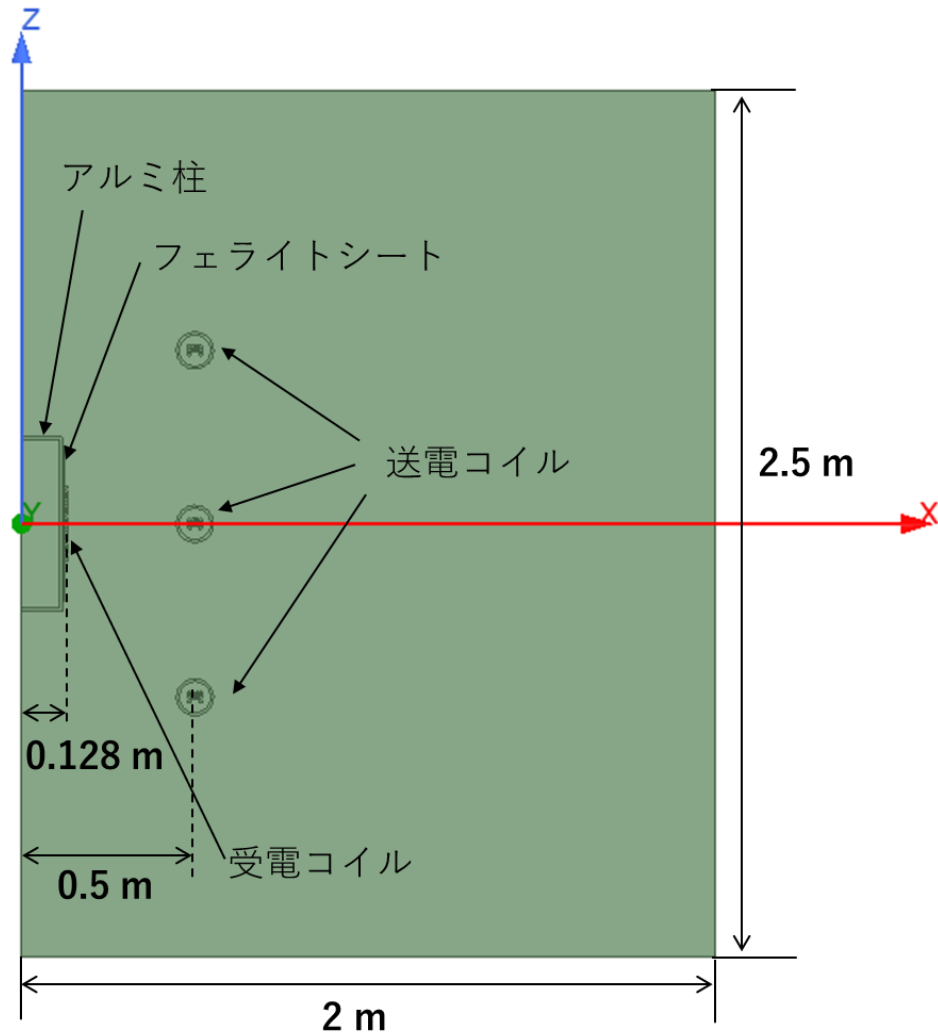


図 3.2-35 小型モデル全体図

図 3.2-36(a)は送電コイルの断面拡大図である。コイルの線材は、導体径 8.4mm、被覆厚み 1.3mm、仕上がり外径 11mm のものを使用した。(a)のように、パイプの中に積層構造で 10 巻した。図 3.2-36(b)は受電コイルの断面拡大図を示す。直径 235mm、長さ 502mm、厚み 7mm のアルミ注があり、その上にフェライトが貼り付けてある。フェライトの上から受電コイルがヘリカル上に 20 巻している。受電コイルの線材は、送電コイルと同様のものとした。フェライトは、初透磁率 3400 である JFE の MBT1 を使用した。

材質の電気特性は表 3.2-12 に示す。

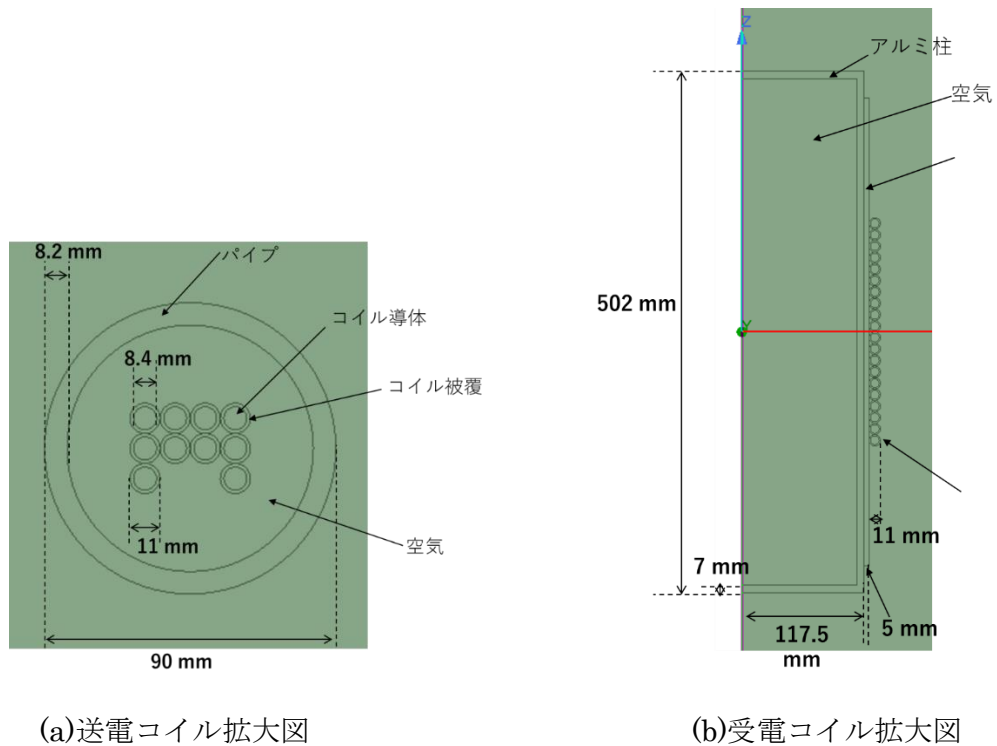


図 3.2-36 送受電コイル拡大図

表 3.2-12 材料の電気特性

	導電率	比誘電率	比透磁率	誘電損失係数	磁気損失係数
空気	0	1.0	1.0	0	0
銅	5.8×10^7	1.0	1.0	0	0
アルミ	3.8×10^7	1.0	1.0	0	0
ポリエチレン	0	2.25	1.0	0.001	0
ゴム	1.0×10^{-15}	3.0	1.0	0	0
フェライト	0.25	1.0	3400	0	0.015
海水	5.0	78	1.0	0	0

3.2.3.2.2. 整合回路の検討

図 3.2-35 のモデルの電磁界シミュレーションを行い、その結果を用いて 3kHz で 10Ω 抵抗と整合取った回路を図 3.2-37 に示す。電磁界分布を計算するために入力電源の電圧は 50V とした。

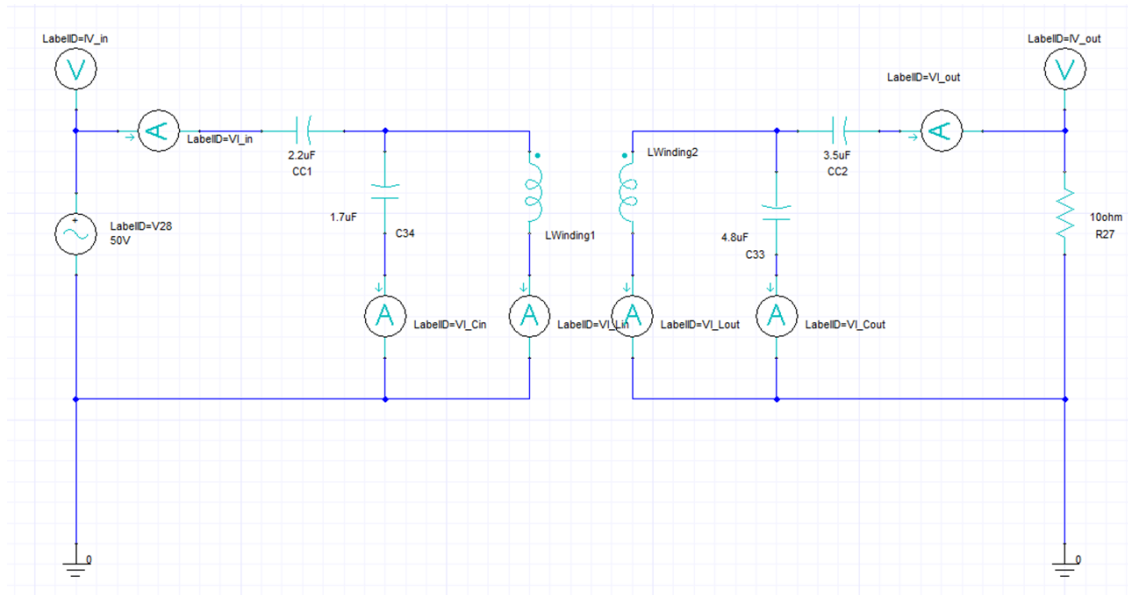


図 3.2-37 小型モデルの整合回路

3.2.3.2.3. 電磁界分布の計算

図 3.2-38 は磁界分布を位相ごとに計算したものである。コイル周辺部に磁界が集中していることがわかる。特に受電コイルの周辺部に強い磁界が生じている。

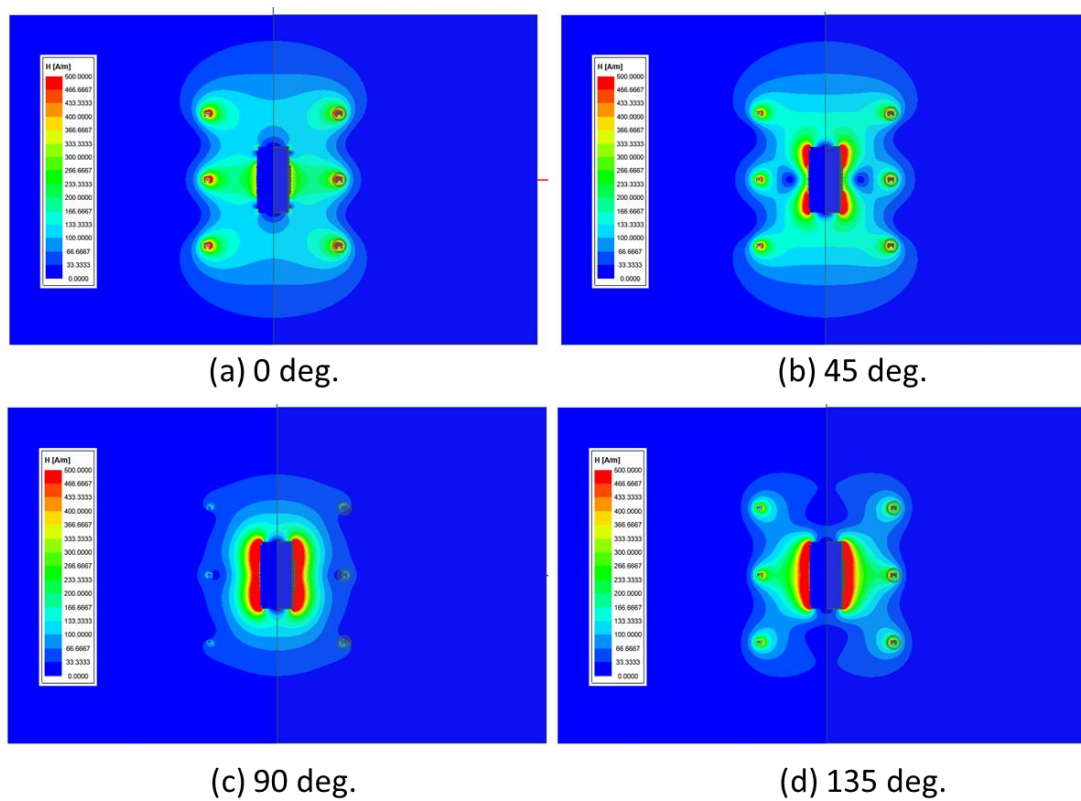


図 3.2-38 各位相の磁界分布

3.2.3.2.4. 損失計算

図 3.2-39(a)は解析空間内の、ジュール損、磁気損、誘電体損の割合である。ジュール損が99%以上締めていることがわかる図 3.2-39 (b)は各材質のジュール損の割合である。送電コイルが約34%、受電コイルが約28%、海水が31%となっており、この3つが大部分を占めている。

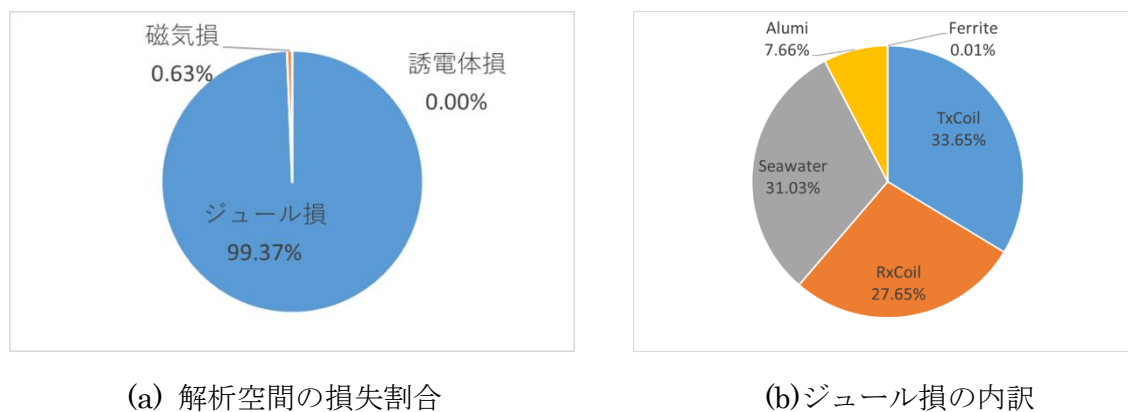


図 3.2-39 ジュール損、磁気損、誘電体損の割合とジュールの内訳

図 3.2-40 はジュール損の分布図である。フェライトが覆われていない部分であるアルミ円柱部分の端部の損失が大きい。海水の損失は受電コイル側で大きいことがわかる。

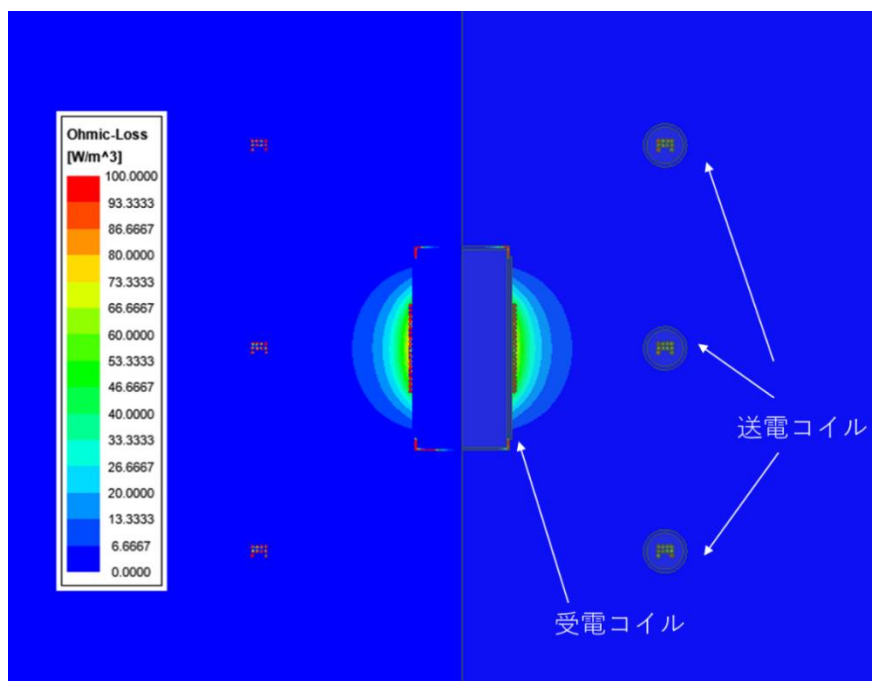


図 3.2-40 ジュール損の分布 (全体図)

図 3.2-41 はジュール損の送電コイル部分を拡大したものである。コイル導体の近接効果の影響で、銅線の内部で損失の大きいところ、小さいところがある。このことから、コイルの積層構造などコイルの導体配置を工夫することで、コイル導体のジュール損を抑制できることが期待できる。

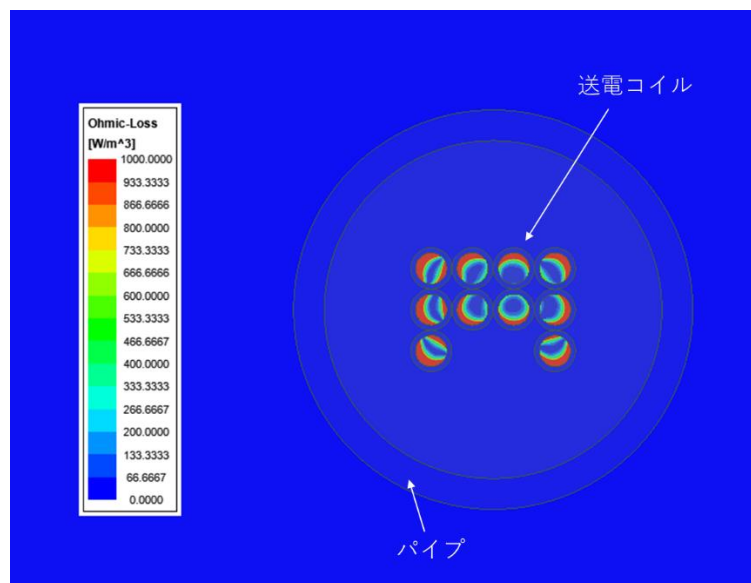


図 3.2-41 ジュール損の分布（送電コイル）

図 3.2-42 は、ジュール損の受電コイルの拡大図である。受電コイルはコイル中央部の損失が小さく、コイル端部の損失が大きいことがわかる。

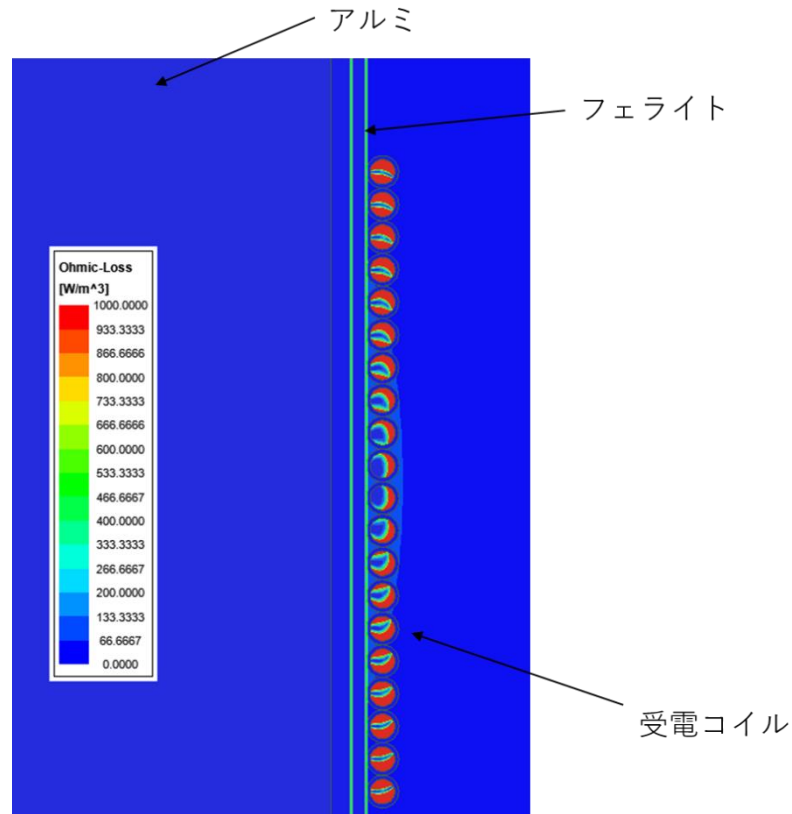


図 3.2-42 ジュール損の分布 (受電コイル拡大図)

小型モデルにおいて、電磁界解析のためモデリング、計算を行った。磁界分布から受電コイル周辺部に強い磁界が発生していることがわかった。解析空間内の損失計算では、誘電体損、磁気損、ジュール損のなかで、ジュール損が 99%の大部分を占めている。モデルごとの損失をみると、送電コイル導体、受電コイル導体、海水がそれぞれジュール損の 34%、28%、31%占める。ジュール損の分布を計算し、受電コイル周辺部の海水、コイル導体部のどの部分に損失が大きいかを明らかにできた。

A 1/10 モデルを用いた周波数数を変えた場合の損失と損失改善の指針

海水の損失としては式(3.2-14)より、「導電率由来の消費電力(ジュール損)」、「 ϵ'' 由来の消費電力(誘電体損)」、「 μ'' 由来の消費電力(磁性体損)」の 3つに分類される。海水の μ'' をゼロとすると、考慮すべき損失は前の 2つとなり、式(3.2-46)、となる。式(3.2-46) は導電率 σ の物体内を導電電流 σE が流れることによる損失と誘電正接 ϵ'' の物体内で電界が時間変動することに由来する誘電損失を表している。

$$P_l = \frac{\sigma}{2} \int_V |E|^2 dv + \frac{\omega}{2} \int_V \epsilon'' |E|^2 dv \quad (3.2-46)$$

ワイヤレス給電用の送受電コイルが作る磁場及び電場は一般的にコイル近傍で強く、距離が離れるほど減衰する。従って、コイル近傍に海水が無いエリアを設けることで海水による損失を低減し、給電効率を向上させることが可能であると考えられる。具体的には、コイルをプラスチック製のホースや樹脂製容器に入れる方法などがある。海水の周りを空気、もしくは水（ここでは水道水を想定）で満たした場合に、どの程度海水の損失が低減するか、有限要素法（FEM）によって検討した。

B 解析モデル

解析モデル及び条件について述べる。図 3.2-43 に送受電コイルの断面図を示す。送電コイルは直径 220 mm で各 10 ターンが 100 mm 間隔で配置され 30 ターンが直列に接続されている。直径 50 mm、長さ 100 mm、厚さ t_2 mm のアルミ製の中空シリンダーの周囲を厚さ t_2 mm のフェライトが覆っており、その外側に 10 ターンの受電コイルが巻かれている。送電、受電コイルの線太さは共に 3 mm であり、線間ギャップは 0.3 mm である。受電コイルは、送電コイルの中央に配置されている。図 1 の青い領域は海水であり、送受電コイルは直接海水と接している。

図 3.2-44 に、送電コイル近傍を空気及び水で満たしたモデルを示す。送電コイル中心から半径 R_{air} 及び R_{water} の範囲をそれぞれ空気、水領域とした場合の「導電率由来の消費電力」、「 ϵ'' 由来の消費電力」をそれぞれ磁場解析、電場解析により計算した。 R_{air} 及び R_{water} は、送電側で 0 ~ 40 mm、受電側で 0 ~ 30 mm とした。それぞれ図 3.2-45 に、受電コイル近傍を空気及び水で満たしたモデルを示す。両端の受電コイルから L_{air} 及び L_{water} のクリアランスを設けた範囲をそれぞれ空気、水領域とし、同様に海水による損失を求めた。 L_{air} 及び L_{water} の範囲も同じく、送電側で 0 ~ 40 mm、受電側で 0 ~ 30 mm とした。表 3.2-13 に解析に用いた物性値（導電率、比透磁率、比誘電率）を示す。海水及び水の導電率はそれぞれ 5.0 S/m、0.018 S/m とした。また、海水と水の比誘電率の虚部は共に 2.64 とした。フェライトの比透磁率の虚部はゼロとし、本計算においてはフェライトの損失は無視した。導電率由来と ϵ'' 由来の消費電力を比較するため、それぞれの値をコイル電流 1 A（実効値）での値に正規化し、海水損失の等価的な抵抗値として求めた。

表 3.2-13 解析条件 (物性値)

	導電率 [S/m]	比透磁率※ [-]	比誘電率※ [-]
海水	5.0	1 + j0	80 + j2.64
空気	0.0	1 + j0	1 + j0
水	0.018	1 + j0	80 + j2.64
フェライト	0.0	2200 + j0	270 + j0
アルミ	3.56×10^7	1 + j0	-

※透磁率及び誘電率は複素数で入力

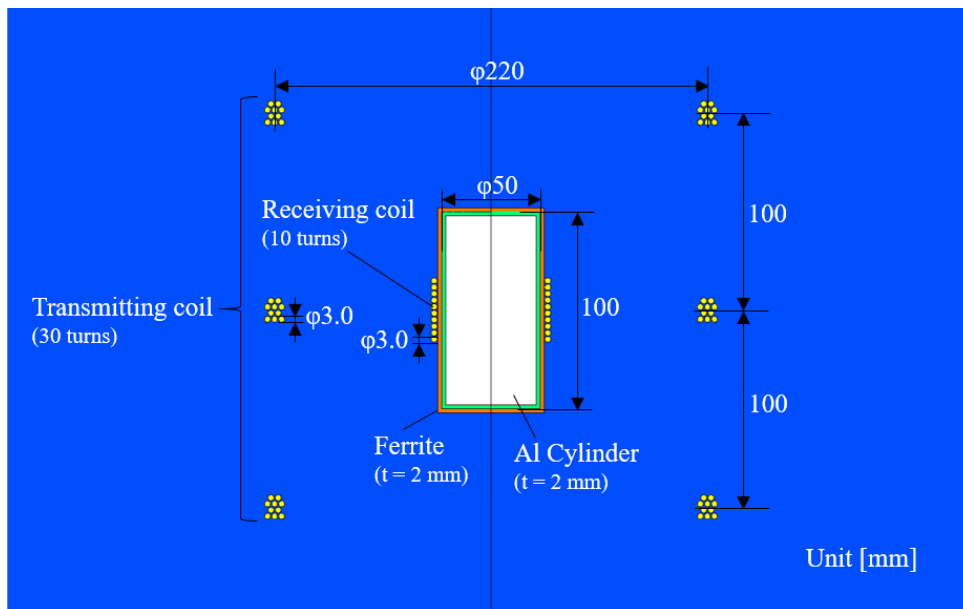


図 3.2-43 送受電コイル断面図及び寸法

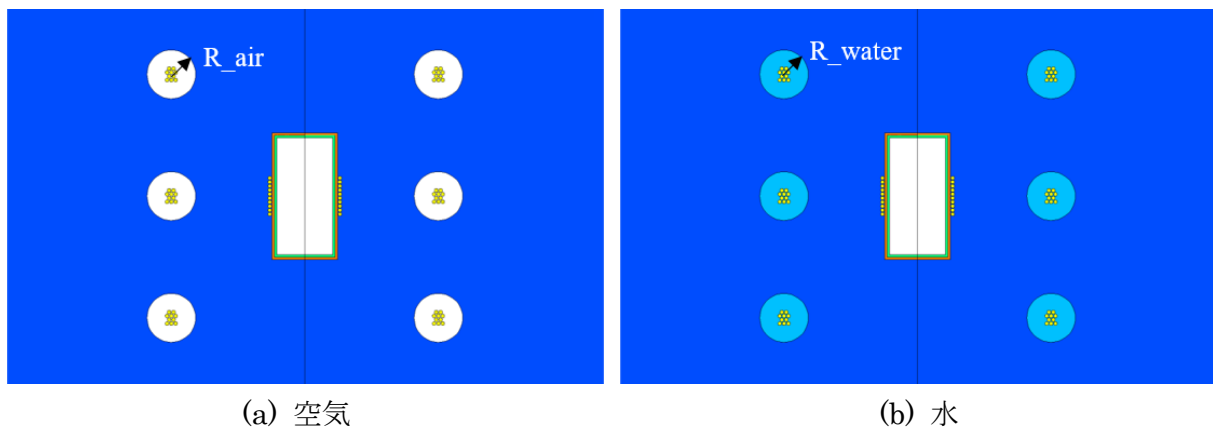


図 3.2-44 送電コイル周辺の海水損失検討モデル

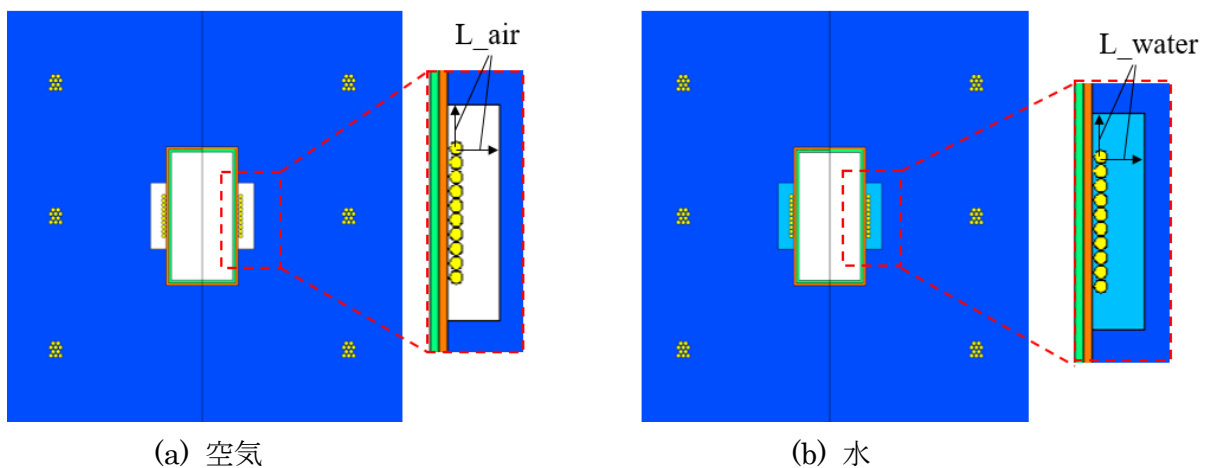


図 3.2-45 受電コイル周辺の海水損失検討モデル

C 解析結果

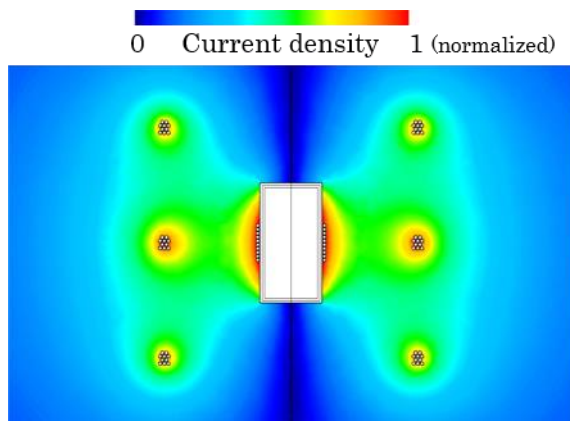
C-1 海水中及び水中の導電電流分布

周波数 10 kHz での送電コイルによる導電電流の分布を図 3.2-46 に示す。(a)は領域全てが海水の場合、(b)、(c)はそれぞれ、送電コイルから半径 20 mm の範囲を海水の代わりに空気、もしくは水とした場合の導電電流の分布である。コイル周囲を空気とした場合は、その領域には導電電流が流れない（計算されない）ためコンターとしては表示していない。但しここでは、各コンター表示の最大値は海水中での導電電流の最大値で正規化し、海水及び水以外（フェライト、アルミ、アルミ内空気など）の導電電流は表示していない。図 3.2-46(a)では、送電コイル近傍で導電電流が大きい、この領域を図 3.2-46(b)のように絶

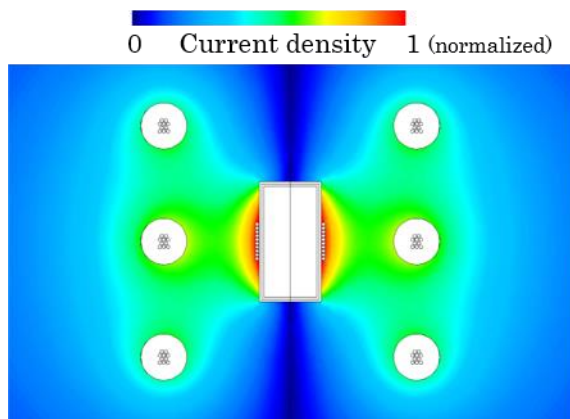
縁体の空気した場合、その領域内で導電電流が流れないため、損失を無くすことが出来る。また、図 3.2-46(c)のように水（導電率 0.018 S/m）とした場合も、物質内に誘導される導電電流は（表皮効果などを無視すれば）導電率が小さくなるとそれに比例して小さくなるため、海水の場合から小さくなる。しかし、送電コイルに電流を流す場合においても受電側フェライト内に磁界が集中するため、それにより誘導される導電電流が大きくなる。この領域の損失を低減させるためには、受電側フェライト近傍の海水領域を無くすことが必要となる。

次に、周波数 10 kHz での受電コイルによる導電電流の分布を図 3.2-47 に示す。(a)は領域全てが海水の場合、(b)、(c)はそれぞれ、受電コイルから距離 10 mm の範囲を海水の代わりに空気、もしくは水とした場合の導電電流の分布である。こちらも、各コンター表示の最大値は海水中の最大値で正規化した。受電コイルは送電コイルに比べて、フェライトの影響で導電電流がコイル近傍に集中し、周囲への漏れが小さい。従って、受電コイル近傍の狭い範囲を空気や水にすることで、損失の原因となる導電電流を大きく低減させられることが分かる。

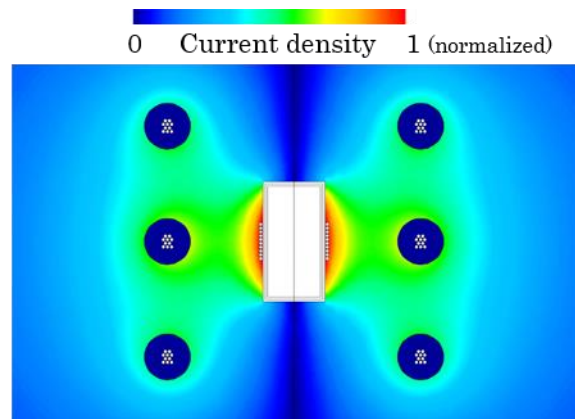
図 3.2-48 は、送電、受電コイルそれぞれの導電電流による海水損失のエリア毎の分布を示す。損失の単位は[W]であり等価的な抵抗値[Ω]と電流[A]の 2 乗の積として表される。ここではコイル電流が実効値 1 A 時の等価的な抵抗値に換算しプロットした。送電、受電側ともに、コイル近傍を空気にする事で、赤破線で囲ったコイル近傍の損失が発生しない。また、コイル近傍が水の場合でも、海水に比べて導電率が小さいので損失は小さく、黒破線で囲ったようにコイル近傍の損失は僅かとなる。



(a) 海水中

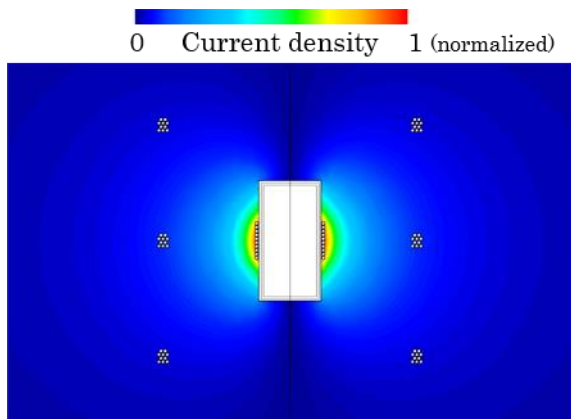


(b) $R_{\text{air}} : 20 \text{ mm}$ 領域が空気

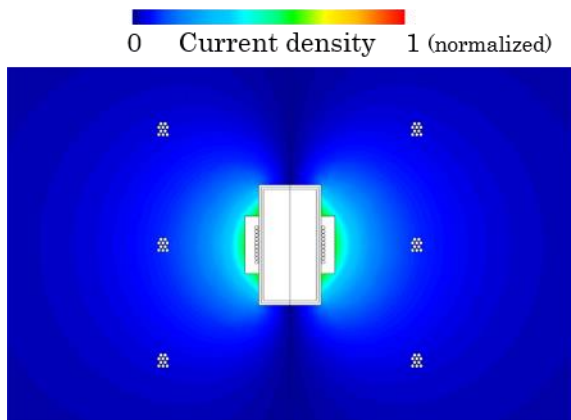


(c) $R_{\text{water}} : 20 \text{ mm}$ 領域が水

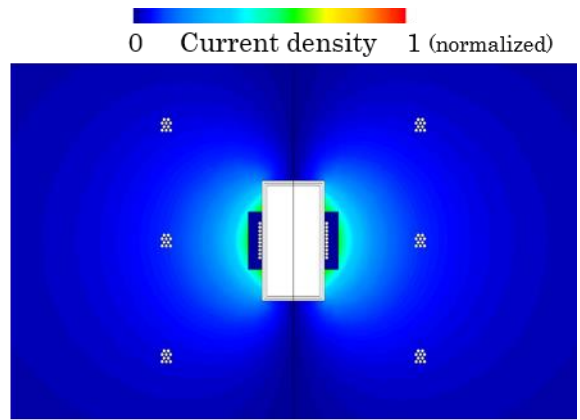
図 3.2-46 送電コイルによる導電電流の断面分布 (10 kHz 海水中の各最大値で正規化)



(a) 海水中



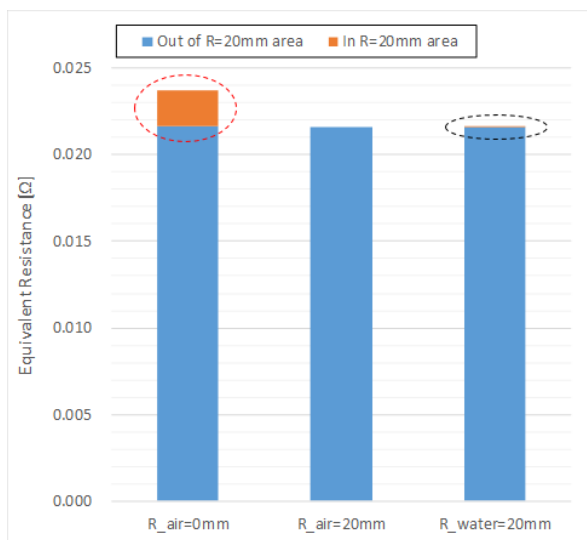
(b) $L_{air} : 10 \text{ mm}$ 領域が空気



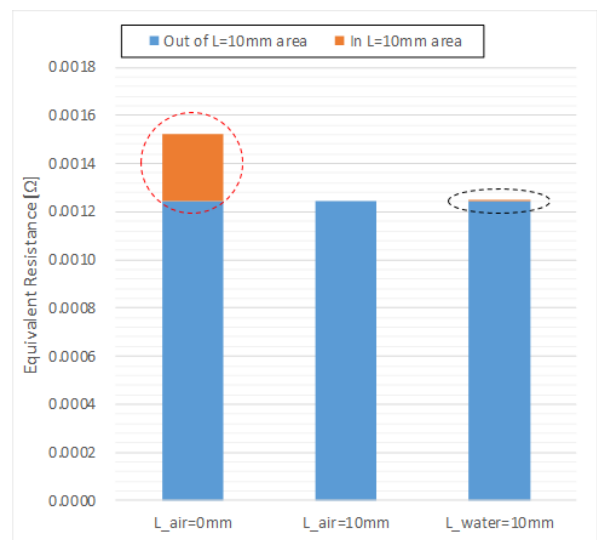
(c) $L_{water} : 10 \text{ mm}$ 領域が水

図 3.2-47 受電コイルによる導電電流の断面分布 (10kHz、海水中の各最大値で正規

化)



(a) 送電コイル



(b) 受電コイル

図 3.2-48 送電、受電コイルの導電電流による海水損失（等価抵抗）の内訳（10

kHz)

C-2 海水中、水中及び空気中の電界分布

次に、コイル周辺の材質による電界分布を示す。図 3.2-49 は、コイル周辺が(a) 海水の場合および(b)空気の場合での断面電界強度分布を示す。但し、本計算においては、海水と水の誘電率は同一としたため、コイル周囲が水の場合でも分布は(a)となる。これより、(b)のようにコイル近傍が空気領域となった場合、海水の誘電率は空気に比べて非常に大きいため、電位勾配が空気領域内で大きくなり、空気領域の外では電界強度は全体として小さくなった。従って、誘電正接による海水損失もまた、コイル近傍に空気領域を設けることによって低減させることが可能と考えられる。

図 3.2-50 に示す受電コイルにおいては、更に電界強度はコイル近傍に集中するため、その近傍を空気とすることで海水中（や水中）での電界強度は更に小さくなり、こちらも、誘電正接による損失を大きく低減されることが可能と考えられる。

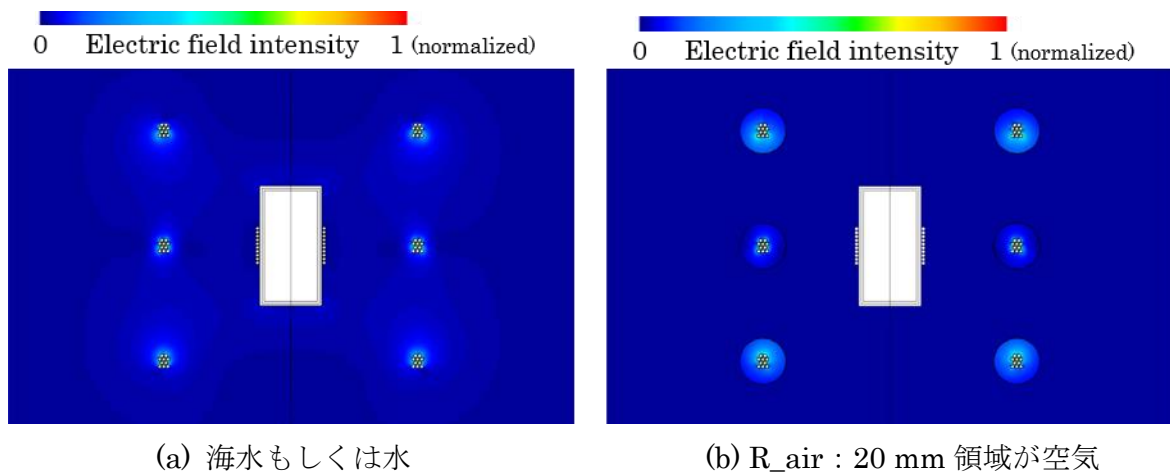


図 3.2-49 送電コイルによる電界強度の断面分布（各最大値で正規化）

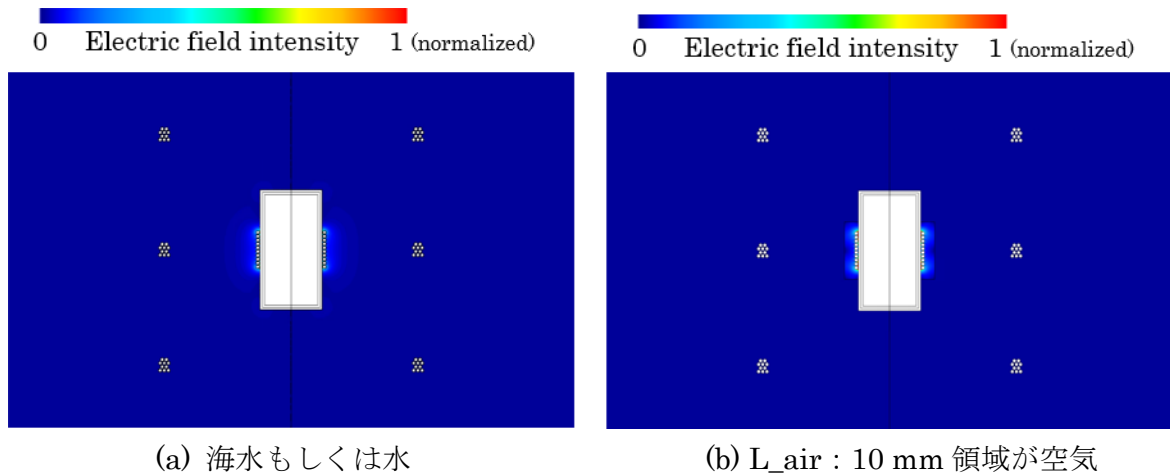
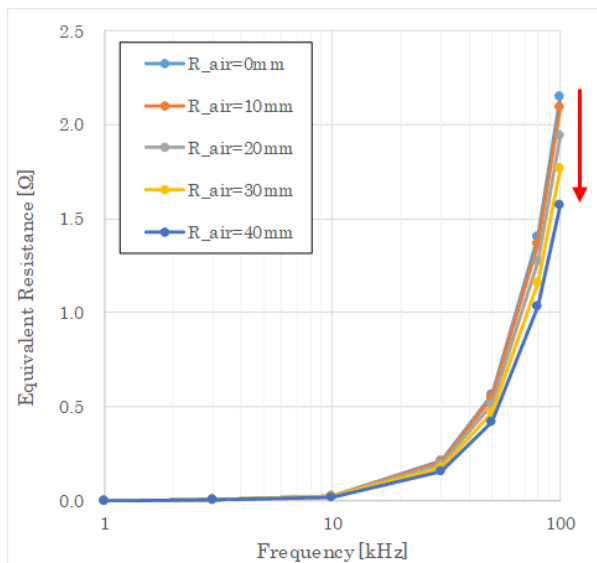


図 3.2-50 受電コイルによる電界強度の断面分布（各最大値で正規化）

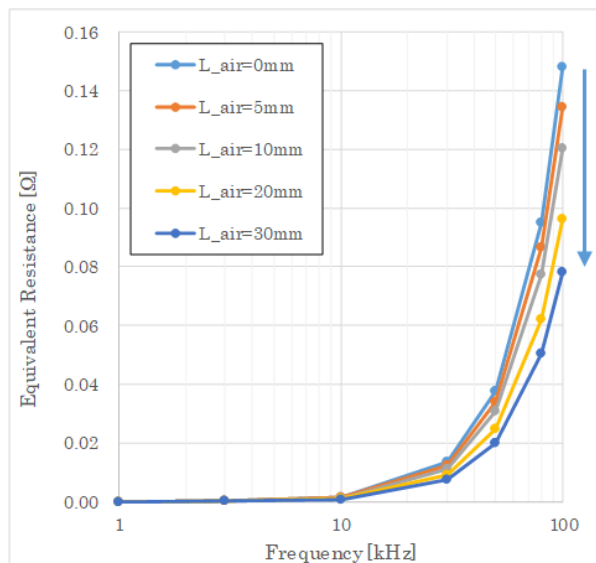
C-3 コイル近傍領域が海水損失に与える影響：「導電率由来の消費電力」

ここでは、等価抵抗を用いて導電率による海水中の損失量を議論する。まず、送受電コイルそれぞれの近傍を空気領域とした場合、海水損失の等価抵抗は図 3.2-51 となった。ここでも、コイル電流が 1A での損失から等価抵抗は計算した。これより、送電、受電コイル共に、10 kHz 以下では導電率由来の（導電電流による）損失は小さく、10 ~ 100 kHz において顕著に大きくなる。また、コイル周囲の空気領域を大きくしていくことで、送電、受電側ともに海水損失が低下していく。図 3.2-52 に、空気領域が無い場合の海水損失を 100% として、空気領域を設けた際の損失の割合を示す。これより、送電側では、赤矢印のように、コイル線近傍の半径 20 mm、30 mm の領域を空気とすることで、それぞれ約 10%、17%の海水損失が低下した。一方、受電側では、青矢印のように、コイル線近傍に幅 10 mm、20 mm の空気領域を設けることで、それぞれ約 20%、32%の損失を低減させることが出来る。送電、受電側ともに、周波数（10、50、100 kHz）による変化割合の違いは殆ど見られなかった。

次に、コイル近傍を空気ではなく水に変えた場合の損失について述べる。図 3.2-53 より、10 kHz 以上で海水損失が顕著に増加する傾向は空気に変えた場合と同じである。また、図 3.2-54 より、送電側では、半径 20 mm、30 mm の水領域によってそれぞれ約 10%、17%の海水損失が低下した。また、受電側でも、青矢印のようにコイル線近傍に幅 10 mm、20 mm の空気領域を設けることで、それぞれ約 20%、32%の損失が低減された。これらの結果より、導電電流による損失低下については、空気と水で違いは見られなかった。これは、水の導電率が 0.018 S/m と海水の 5 S/m に比べて非常に小さいため、水中での導電電流による損失が小さいためと考えられる。

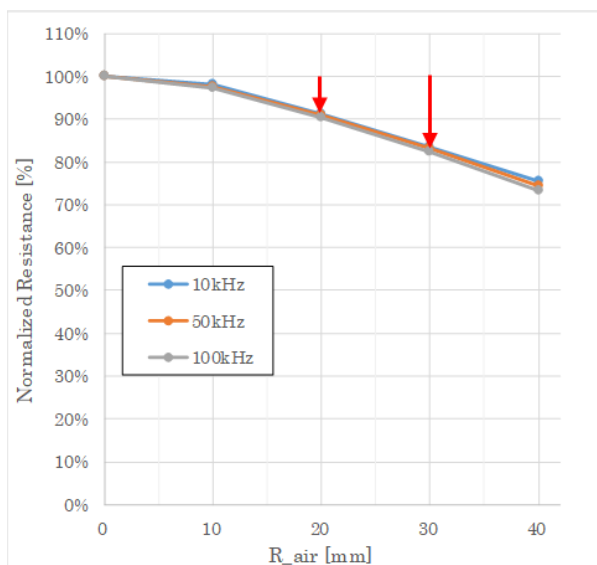


(a) 送電コイル

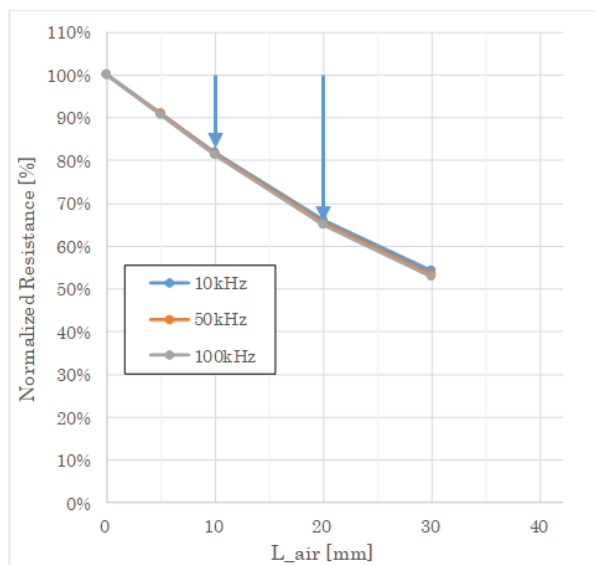


(b) 受電コイル

図 3.2-51 導電率由来の消費電力：空気領域の大きさと周波数の影響

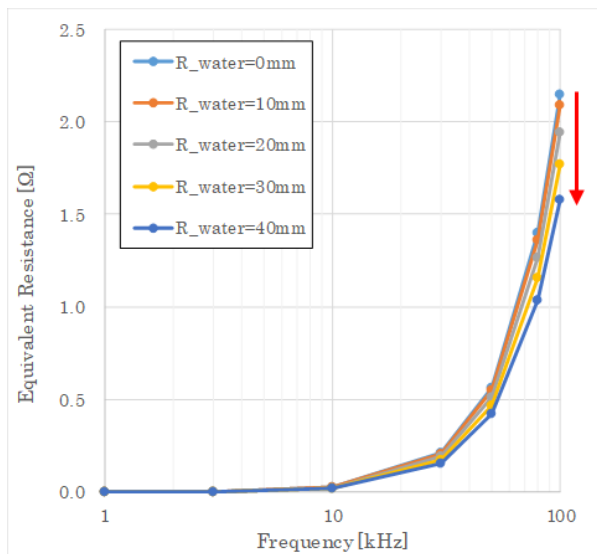


(a) 送電コイル

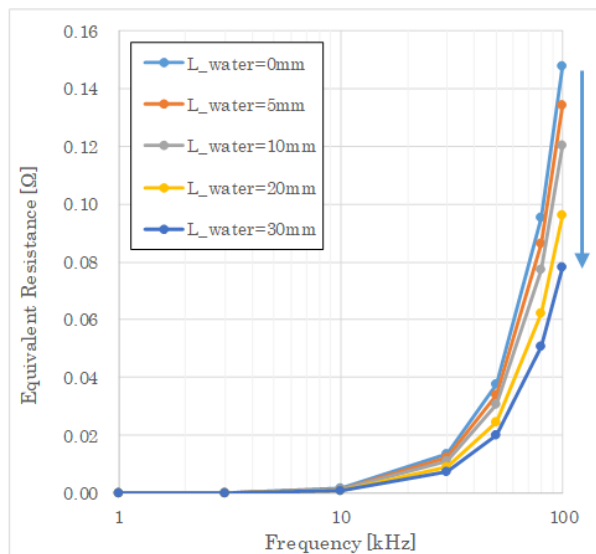


(b) 受電コイル

図 3.2-52 空気領域サイズによる等価抵抗の変化率

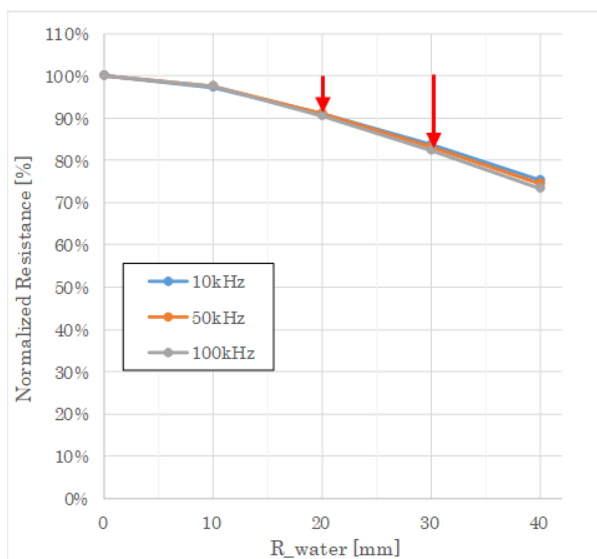


(a) 送電コイル

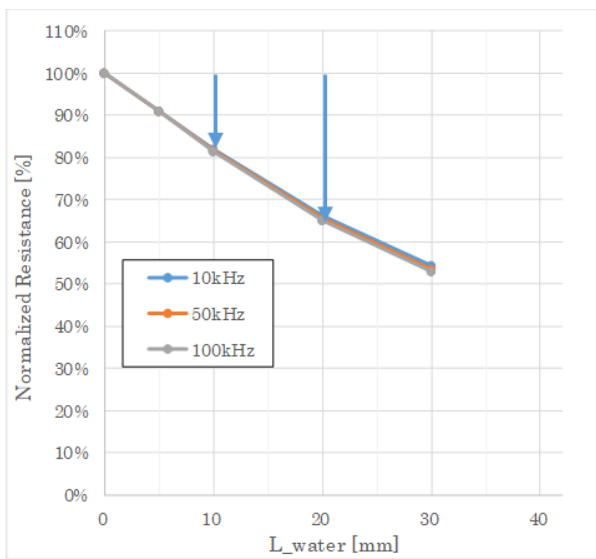


(b) 受電コイル

図 3.2-53 導電率由来の消費電力：水領域の大きさと周波数の影響



(a) 送電コイル



(b) 受電コイル

図 3.2-54 導電率由来の消費電力：水領域サイズによる等価抵抗の変化率

C-4 コイル近傍領域が海水損失に与える影響：「 ϵ 」由来の消費電力

ここでは、コイル近傍を海水から空気、もしくは水に変化させた場合の誘電正接による損失について述べる。但し、本計算では海水と水の誘電率は同じとしたため、その差分は議論しない。図 3.2-55 に、コイル近傍の空気領域を変えた場合の誘電正接による損失（等

価抵抗)の周波数特性を示す。送電、受電コイル共に、30 kHz 以上で急激に損失が増加し、また、今回検討した最も小さい空気領域 ($R_{\text{air}}=10\text{ mm}$ 、 $L_{\text{air}}=5\text{ mm}$) とすると、図 3.2-56 より全領域を海水 (もしくは水) とした場合と比べて、誘電損失による損失はほぼゼロ (厳密には送電側で 0.16 % 以下、受電側で 0.02 % 以下) となった。つまり、誘電正接による損失は、ほぼ全てがコイルの極近傍で生じており、コイル周辺に空気領域を設けることで、劇的にその損失を低減されることが出来る。

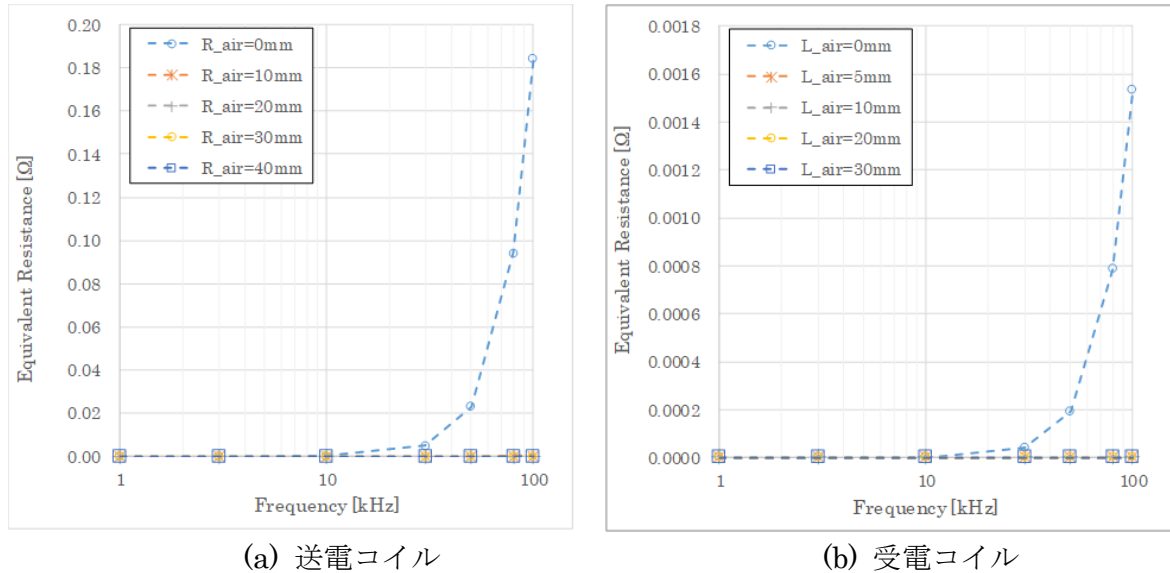


図 3.2-55 ϵ'' 由来の消費電力：空気領域の大きさと周波数の影響

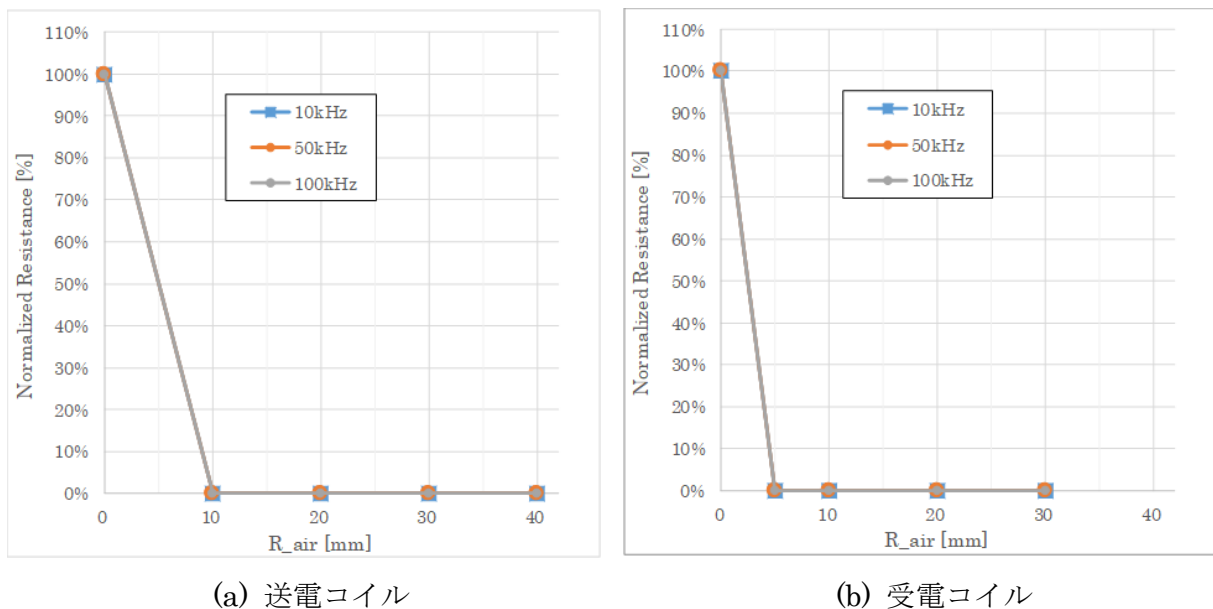


図 3.2-56 ϵ'' 由来の消費電力：空気領域サイズによる等価抵抗の変化率

C-5 「導電率由来の消費電力」、「 ϵ 」由来の消費電力」の寄与と周波数特性

以上より、「導電率由来の消費電力」と「 ϵ 」由来の消費電力」の2つの損失について、周波数やコイル近傍領域の影響を別々に検討した。ここでは、両者の寄与（割合）について議論する。そのため、領域が全て海水の条件において、「導電率由来」と「 ϵ 」由来の消費電力による等価抵抗を図 3.2-57 にプロットした。このグラフでは、縦・横軸ともに対数とした。100 kHz 以下の計算結果から外挿すると、送電側で約 1,500 kHz (1.5 MHz)、導電率由来の損失は約 10,000kHz (10 MHz) 付近で導電率由来と ϵ 」由来の損失の大小が逆転する周波数が見られた。従って、MHz 帯域では、導電率由来と ϵ 」由来の損失が共に重要となり、コイル近傍を空気や水とすることで、損失が低減される可能性がある。一方、今回計算した 100 kHz 以下では、導電率由来の損失が支配的となり、コイル近傍を水や空気領域とすることが損失低減に有効であると考えられる。

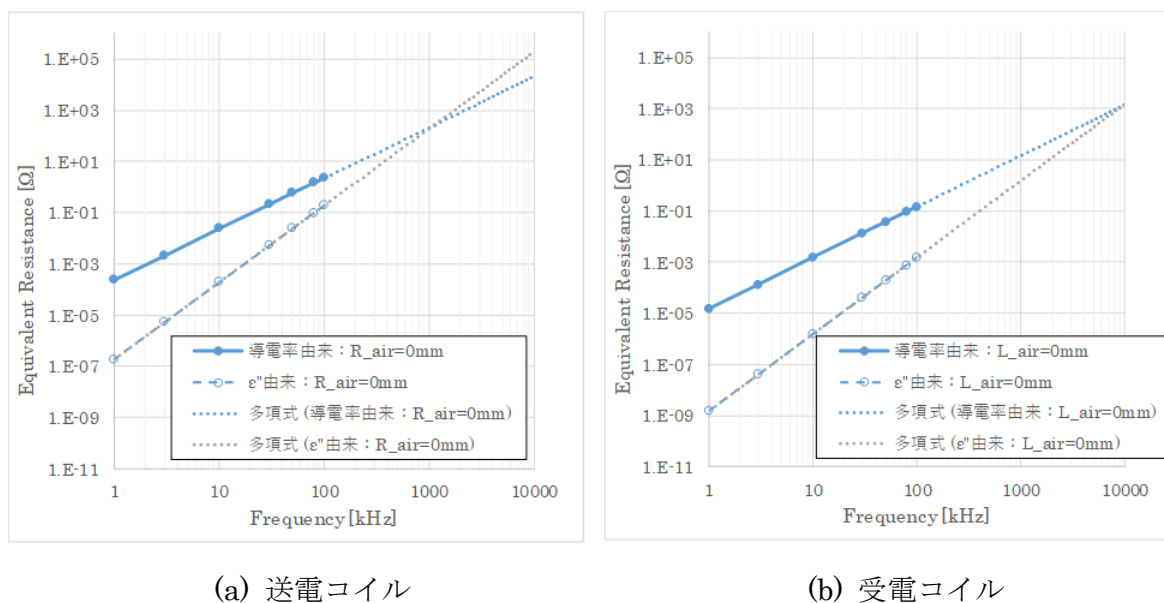


図 3.2-57 「導電率由来の消費電力」（実線）、「 ϵ 」由来の消費電力」（破線）の周波数特性と外挿による予想特性

C-6 海水損失が伝送効率に与える影響

ここまで、コイル近傍の領域を空気や水に変えることによる”海水損失”への影響を議論した。ここでは、コイル抵抗も含んだコイル Q 値を計算し、海水損失の低減が伝送効率に与える影響を検討する。実際の高周波でのコイル抵抗は表皮効果と線同士の近接効果によって直流でのコイル抵抗より周波数の上昇と共に増加し、その割合は、素線径やリッツ線、単線などによって異なる。ここでは議論を単純化するため、近接効果および表皮効果のない理想的なコイル線を仮定して議論を進める。ここでは、送電コイル、受電コイルの抵抗値を、実際のコイルの DC 抵抗の実測値から、それぞれ 200 mΩ、35 mΩ とする。コイル近傍を海水から空気に変えた場合の Q 値（送電側：Q1、受電側：Q2）を図 3.2-58 に示す。これより、送電コイルは約 20 kHz、受電コイルは約 25 kHz でそれぞれ Q 値のピークとなり、Q 値は空気領域によって送電、受電側でそれぞれ最大 14%、38% 大きくなった。次に、伝送効率を式(3.2-47)により求めた結果を図 3.2-59 に示す。 η_{max} はコイル間の最大有能電力効率であり以下の式で計算した。今回の計算範囲では、送受電コイル間の結合係数 k は $k = 0.2644 \sim 0.2650$ の範囲であった。これより、kQ 積から理論最大効率を求める際の結合係数は $k = 0.265$ とした。

$$kQ = \tan 2\theta \quad \eta_{max} = \tan^2 2\theta \quad (3.2-47)$$

これにより、理論最大効率において、海水損失を低減することにより、伝送効率が最大となる約 50 kHz で、約 2% 伝送効率向上が向上する（損失が約 8% から 6% へ約 33% 低下する）。尚、今回検討した 1/10 サイズモデルでは 50 kHz 付近で理論最大効率が極大となったため、ここは 50 kHz で議論した。

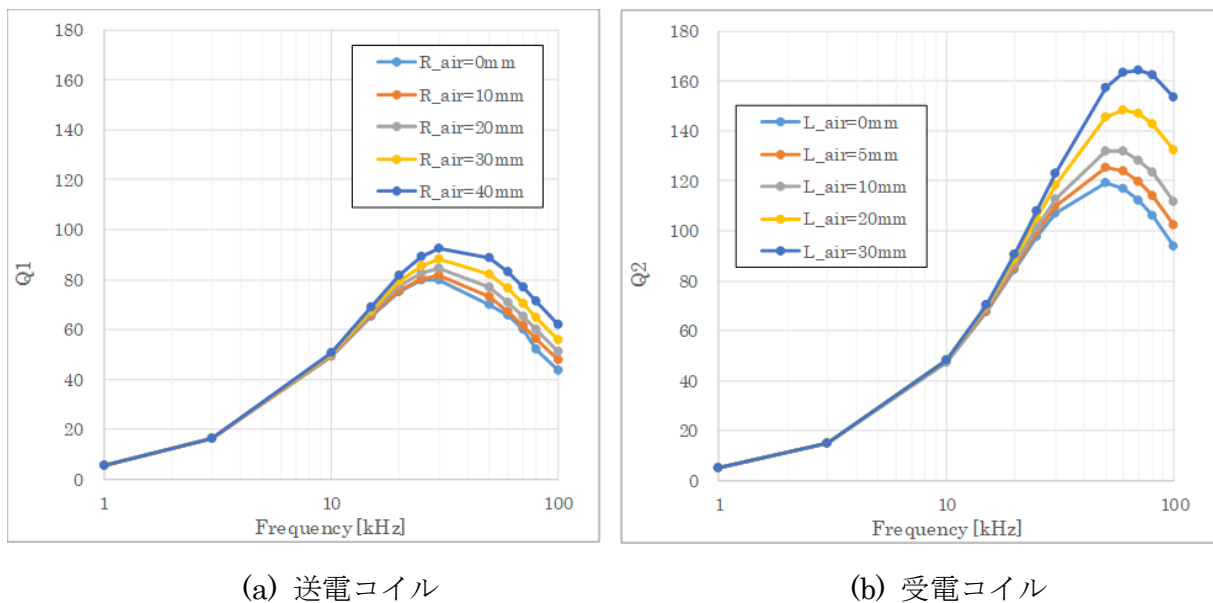


図 3.2-58 コイル Q 値

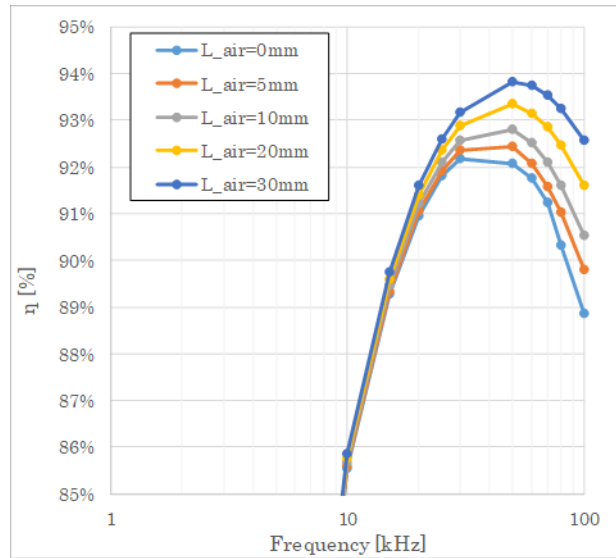


図 3.2-59 理論最大効率

D まとめ：コイル近傍領域における損失メカニズム

以上より、下記の知見を得た。

海水における「導電率由来の損失」は、100 kHz 以下の周波数では支配的となり、コイル近傍を空気もしくは水とすることで損失低減が可能。受電側は導電電流がコイル近傍に集中するため、コイル近傍 20 mm 程度の海水を無くすることで海水損失全体の約 32 %が低減可能。一方、送電側は導電電流が空間中に広がるため、同じく 20 mm の海水を無くしても、10 %程度の損失低減になる。

「ε"由来の損失」は、今回計算した 100 kHz 以下の周波数では支配的ではないが、MHz 以上では導電率由来の損失を超え、支配的になると予想される。その場合は、コイル線の超近傍（今回ではコイルから距離 10 mm 以下）のエリアを空気とすることで、損失を低減可能と考えられる。

最後に、コイル自身の抵抗値を仮定して、Q 値及び理論最大効率を検討した。その結果、コイル Q 値は空気領域を入れることで、送電、受電側でそれぞれ最大約 12%、38%大きくなり、kQ 積から計算される理論最大効率も約 2 %向上した。

3.2.3.2.5. 損失の軽減

前項の 1/10 スケールモデルでは、送電コイル、受電コイル周辺部に空気層または、水層を設けることで、損失低減ができることがわかった。小型モデルにおいても、これらのアプローチを用いて、損失低減ができることを確認する。小型モデルの損失は図 3.2-39 から

もジュール損が大部分を占めるため、ジュール損に着目して計算する。ジュール損を減少させるため、受電コイル周りの海水損失の減少、アルミ部の損失減少を行う。具体的には、受電コイル周辺部の空気層追加と、フェライト追加の検討を行った。

A 空気層追加のモデリング

小型モデルにおいて、送電コイルは周辺部に空気層があるため、受電コイル周辺部に図 3.2-60 のような空気層を作成した。L の大きさを 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm、100 mm と変更したときと、空気層なしのときと比較する。送電コイルと受電コイルの励振条件はともに導体に 1A を流したものとして計算した。

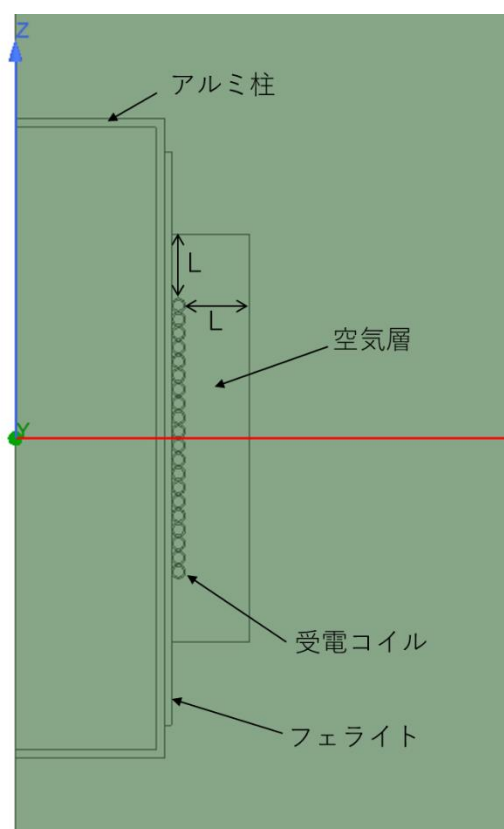


図 3.2-60 受電コイル周辺部の空気層モデリング

B 空気層を追加した計算結果

図 3.2-61 は、送電コイルの抵抗値と抵抗値の変化率である。変化率は、空気層なしモデルを基準値として、それぞれ空気層を追加した差分を計算した。送電コイルは新しく設けた空気層と距離も離れているため、空気層の大きさを変えてもほとんど変化しない。

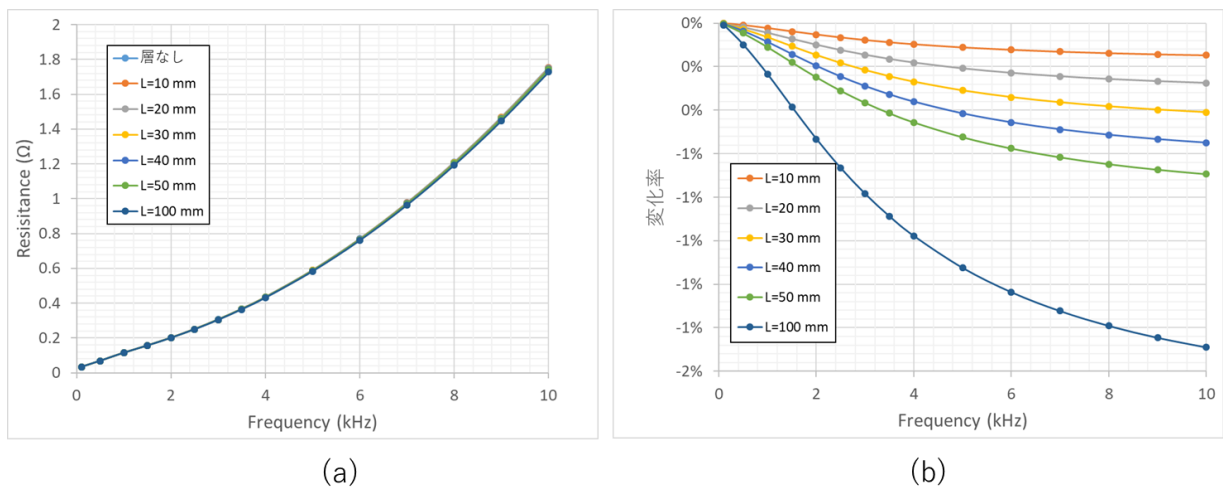


図 3.2-61 (a)送電コイルの抵抗値 (b)送電コイルの抵抗値の変化率

図 3.2-62 は受電コイルの抵抗値、抵抗値の変化率である。受電コイルは空気層を大きくしていくと、抵抗値が下がり、抵抗値で見ると 10kHz では、25%以上削減できることが期待される。

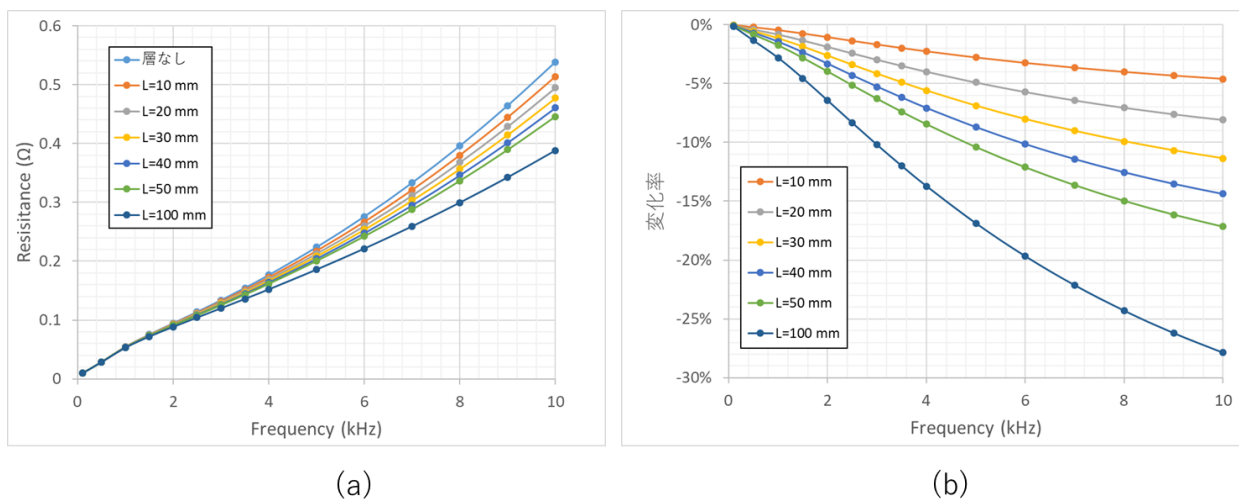


図 3.2-62 (a)受電コイルの抵抗値 (b)受電コイルの抵抗値の変化率

コイルの抵抗値の減少部分がどの材料でのジュール損なのかを計算する。表 3.2-14 は空気層を大きくしたときの、各材質のジュール損の変化量である。受電コイル周りの海水が空気層に変わっているため、送電コイル導体、受電コイル導体、アルミ、フェライトではほとんど変化がないが、海水の損失が、L=100mm のときは、11%程度減っていることがわかる。受電コイルの抵抗値の減少分は、海水損失の減少部であることがわかる。

表 3.2-14 各材質の損失変化率

	TxCoil	RxCoil	Seawater	Alumi	Ferrite
L=10 mm	0.00%	0.00%	-1.60%	0.01%	0.00%
L=20 mm	0.00%	0.00%	-2.85%	0.00%	0.00%
L=30 mm	0.00%	0.00%	-4.06%	0.01%	0.00%
L=40 mm	0.00%	0.00%	-5.21%	0.00%	0.00%
L=50 mm	0.00%	0.00%	-6.31%	0.01%	0.00%
L=100 mm	0.00%	0.00%	-11.02%	0.01%	0.00%

無線給電の伝送特性を見るため、送電コイル、受電コイル間の結合係数 k 、 Q 値の変化を計算する。図 3.2-63 は、結合係数 k とその変化率である。空気層を増やしても結合係数はほとんどかわらず、変化率も 0.1% 未満であることがわかった。

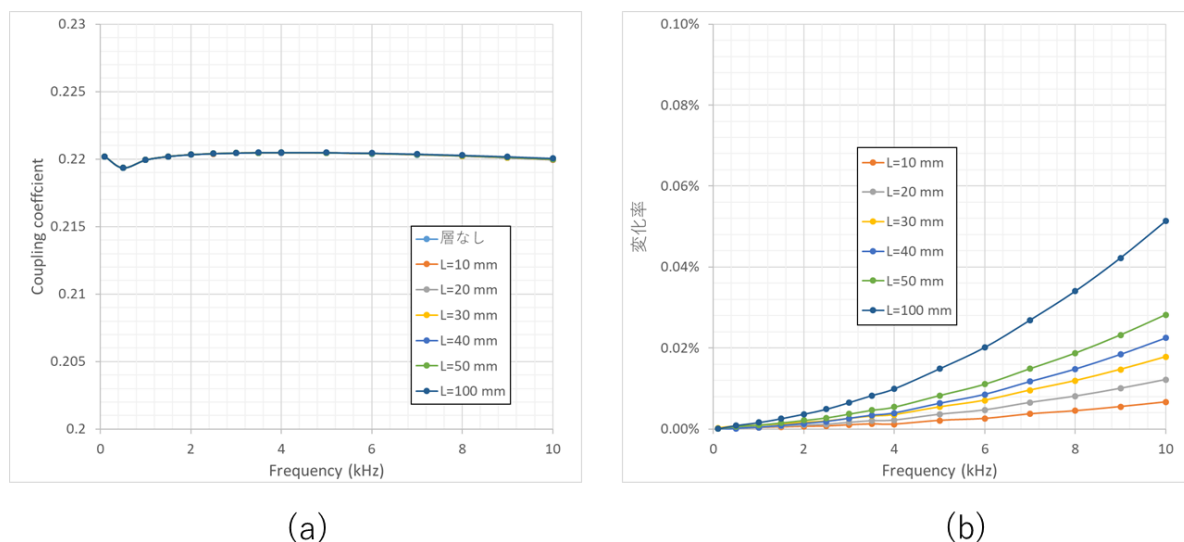
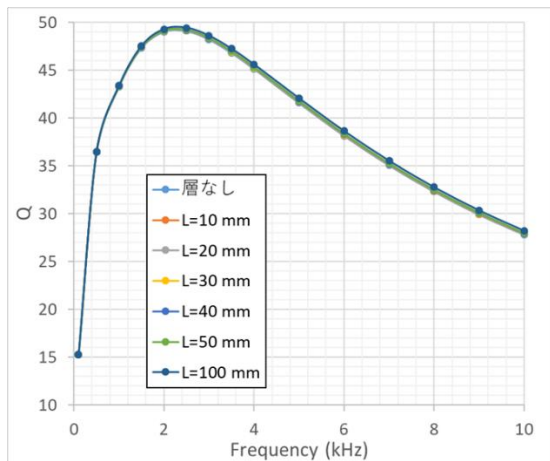
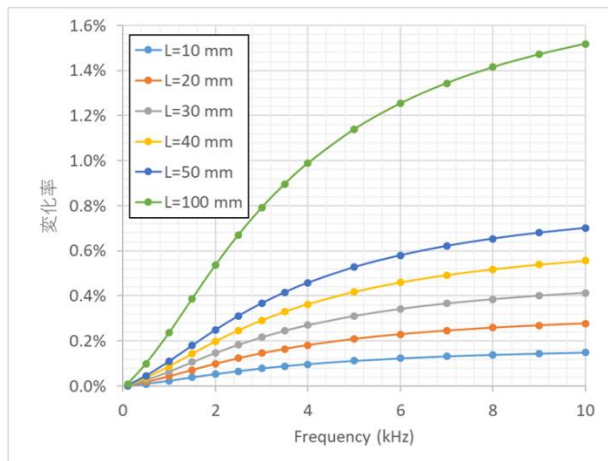


図 3.2-63 (a)コイル間の結合係数 (b)コイル間の結合係数の変化率

図 3.2-64 は送電コイルの Q 値とその変化率である。送電コイルは、抵抗値がほとんど変わっていないため、 Q 値も同様に大きく上昇しない。



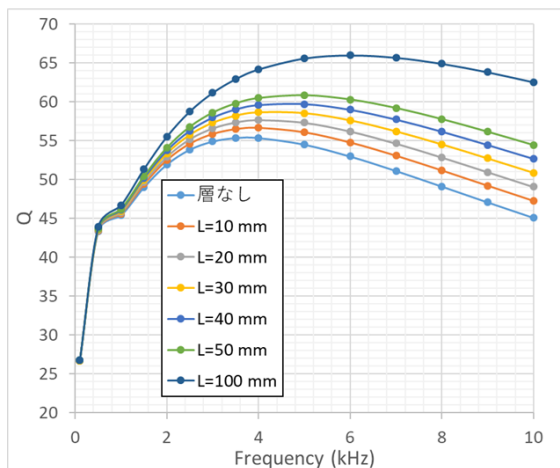
(a)



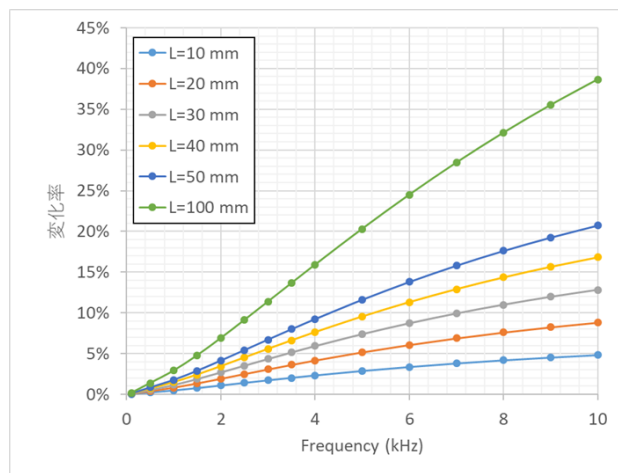
(b)

図 3.2-64 (a)送電コイルの Q 値 (b)送電コイルの Q 値の変化率

図 3.2-65 は受電コイルの Q 値とその変化率である。受電コイルは L=100 mm、10 kHz でみると、Q 値は、空気層がない場合と比べて、15 程度上昇し、40%近く上昇することがわかる。



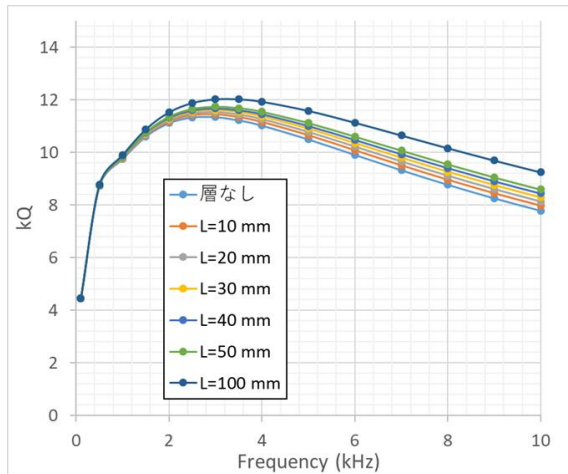
(a)



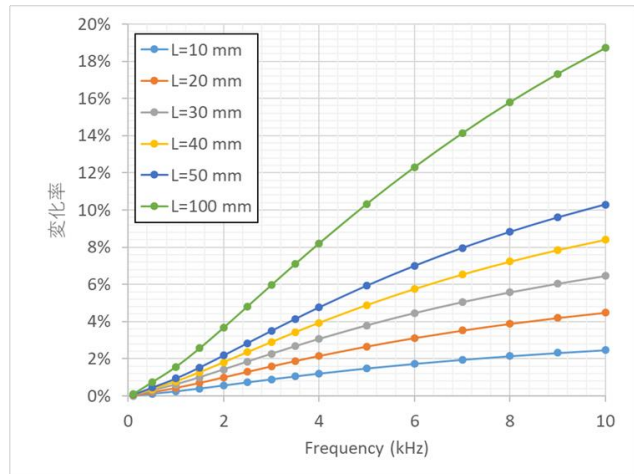
(b)

図 3.2-65 (a)受電コイルの Q 値 (b)受電コイルの Q 値の変化率

図 3.2-66 は kQ 積であり、Q 値は送電コイルと受電コイルの Q をかけ合わせたものの平方根をとって計算している。図 3.2-67 は、kQ 積から最大効率を計算したものである。L=100mm でみると、周波数が高い 10kHz だと、3.2%程度の改善が見込まれるが、効率最大である周波数 3kHz でみると、0.8%程度の効率改善が見込まれる。

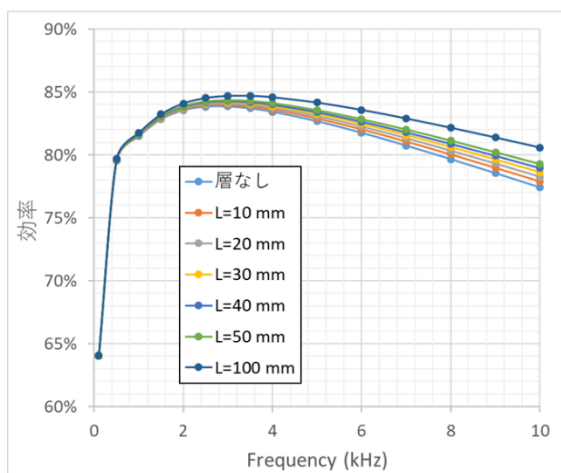


(a)

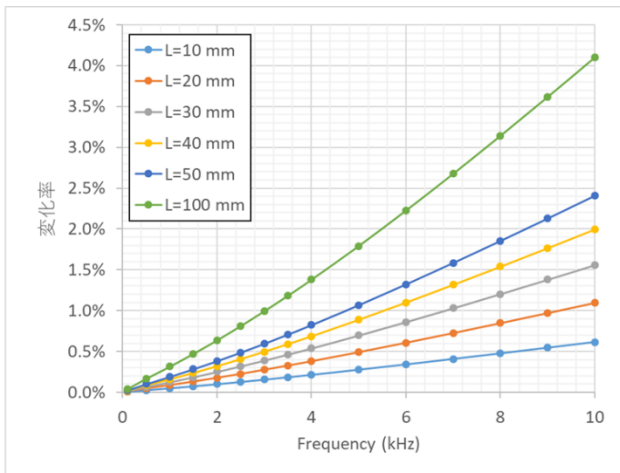


(b)

図 3.2-66 (a)コイル間の kQ 積 (b) kQ 積の変化率



(a)



(b)

図 3.2-67 (a)コイル間の最大効率 (b) 最大効率の変化率

C フェライト追加のモデリング

アルミ円柱部はフェライトが覆われていない部分があり、図 3.2-40 のジュール損の分布図からもアルミ部分に損失が集中している。図 3.2-68 のように、アルミ柱の上面、底面部分にフェライトを追加で貼り付けることで、アルミ部分の損失低減を考える。図 3.2-68 の赤部が追加したフェライトである。フェライトは同じもの (JFE の MBT1) を使用した。

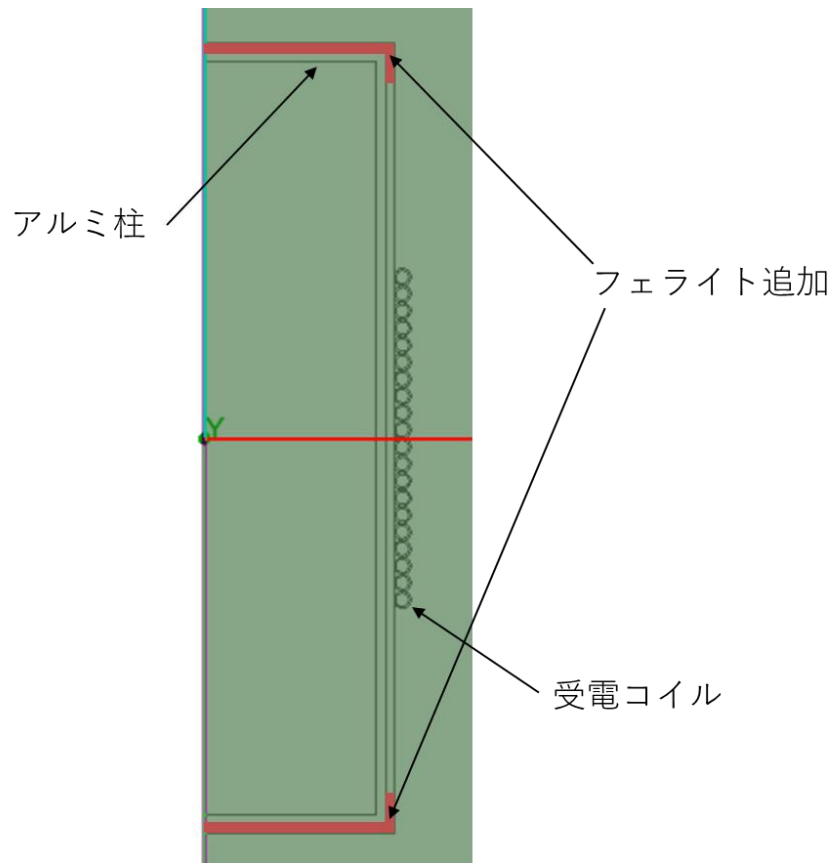
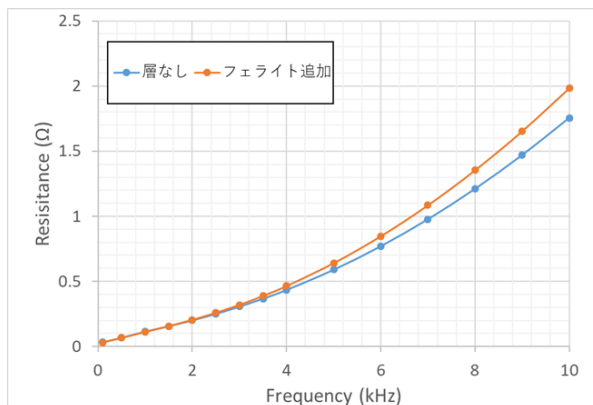


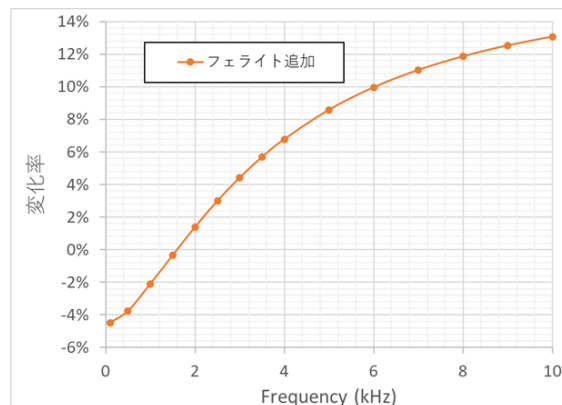
図 3.2-68 フェライト追加のモデリング

D フェライト追加の計算結果

図 3.2-69 は、送電コイルの抵抗値とその変化率である。変化率は、フェライト追加から基準値（前項の層なしモデル）を差し引き、基準値で割ったものである。低周波数では、抵抗値が基準値に比べ小さいが、2 kHz 以上になると、抵抗値が増大していることがわかる。3 kHz において、フェライトを追加することで送電コイルの抵抗値は 5%程度増加している。



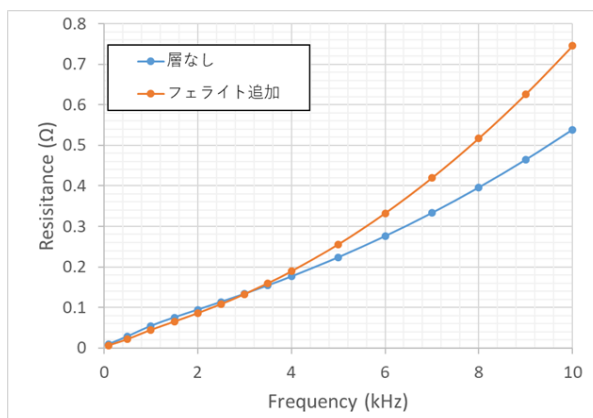
(a)



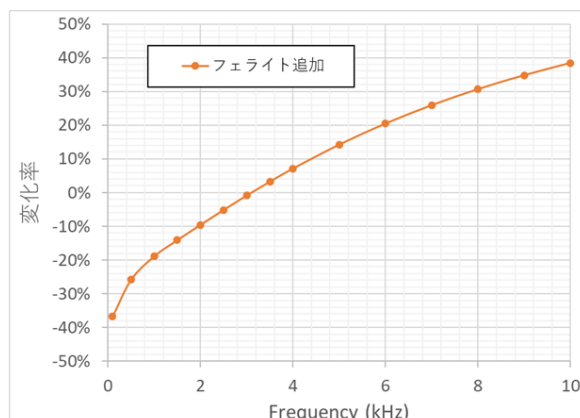
(b)

図 3.2-69 (a)送電コイルの抵抗値 (b)送電コイルの抵抗値の変化率

図 3.2-70 は受電コイルの抵抗値とその変化率である。受電コイルも同様に、低周波数では抵抗値が減少しているが、3kHz 以上で増加している。



(a)



(b)

図 3.2-70 (a)受電コイルの抵抗値 (b)受電コイルの抵抗値の変化率

表 3.2-15 は 3kHz の各材質のジュール損 (W) である。送電コイルはほとんど変化がないが、受電コイルで 7%程度減少、海水は 38%増加、アルミは 100%程度減少、フェライトは 71%増加した。アルミ、受電コイルの損失が減少できているが、海水、フェライトの損失は増加した。フェライトは、絶対値が小さいため、海水部の損失増加影響が大きいと考えられる。

表 3.2-15 フェライト追加時の各材質の損失

	TxCoil	RxCoil	Seawater	Alumi	Ferrite
層なし	0.0842567	0.0490454	0.1239397	0.0285400	0.0000183
フェライト追加	0.0845095	0.0455042	0.17110720	0.0000082	0.0000313
変化率	0.30%	-7.22%	38.03%	-99.97%	70.97%

続いて、コイルの Q 値、結合係数、kQ 積、効率を計算する。

図 3.2-71 は、コイル間の結合係数とその変化率である。フェライトを追加することで、結合係数が、0.22 から 0.27 と、25%近く大きく増加していることがわかる。アルミ円柱の上面、底面部にフェライトが入ったことで、コイル周辺部の磁束が強くなったためだと考えられる。

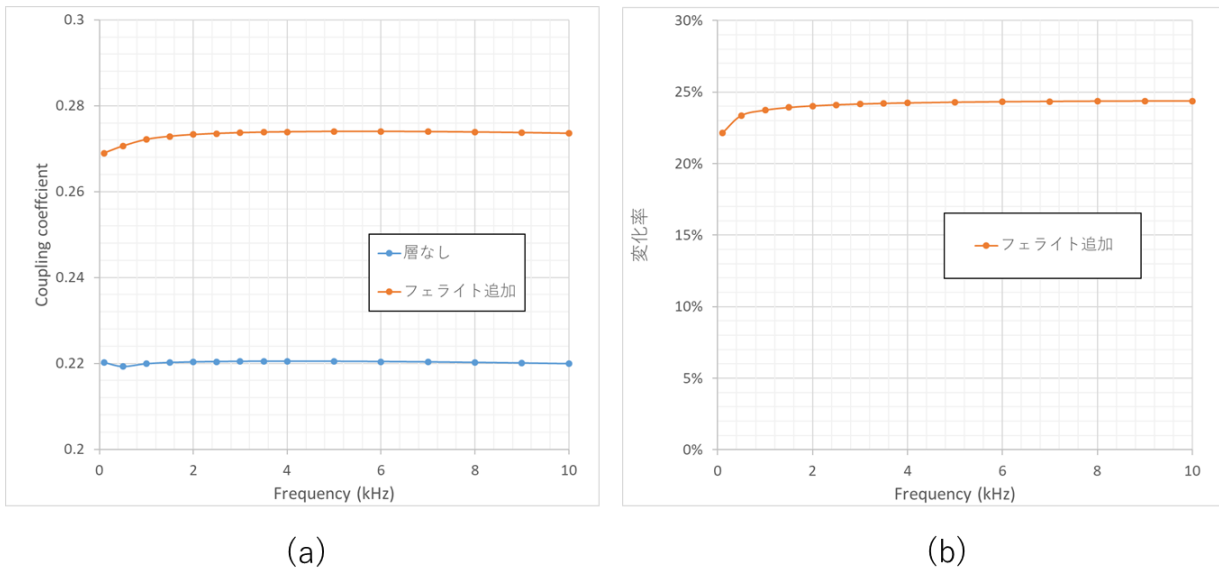
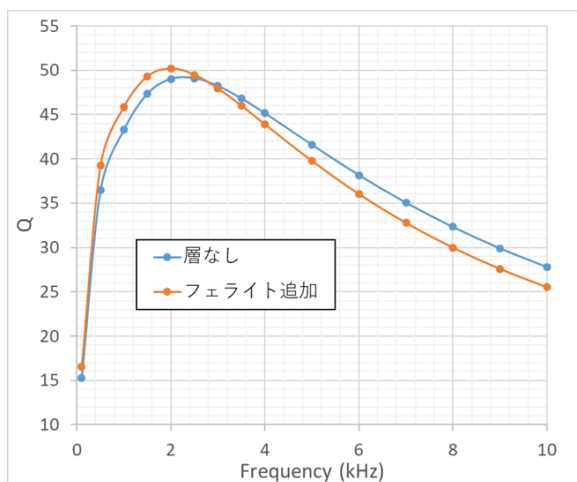
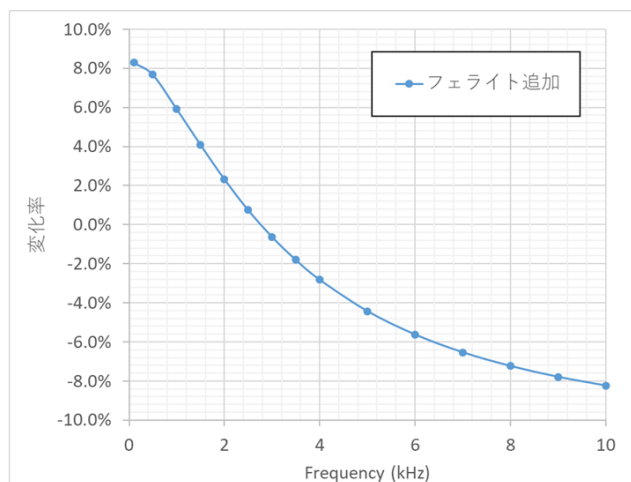


図 3.2-71 (a)コイル間の結合係数 (b)結合係数の変化率

図 3.2-72 は、送電コイルの Q 値とその変化率である。送電コイルは抵抗値変化も小さかったため、Q 値も大きく変わらない。



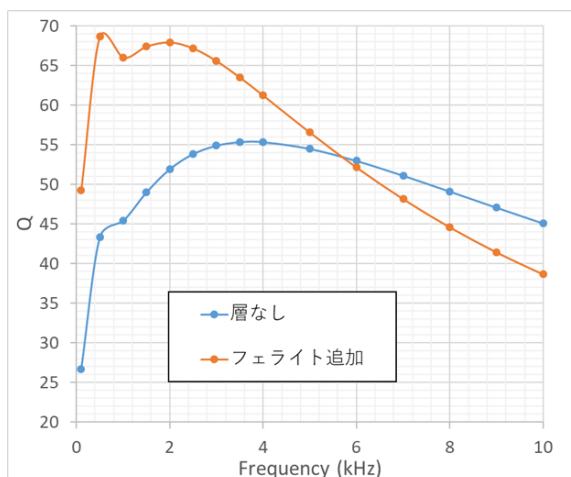
(a)



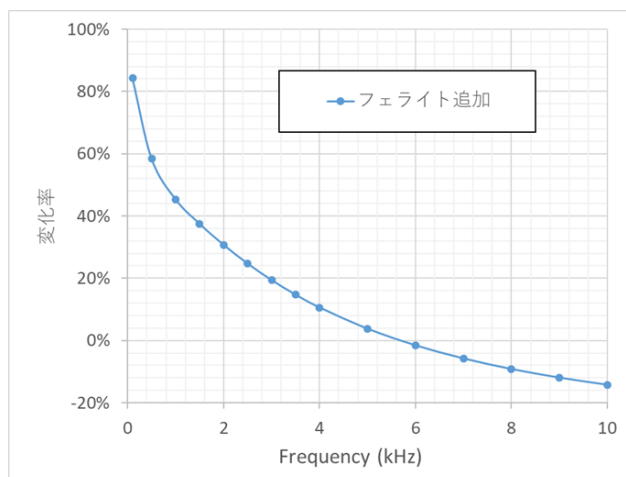
(b)

図 3.2-72 (a)送電コイルの Q 値 (b)送電コイルの Q 値の変化率

図 3.2-73 は、受電コイルの Q 値とその変化率である。6kHz 程度までは、フェライト追加でコイルの Q 値が増加することがわかった。



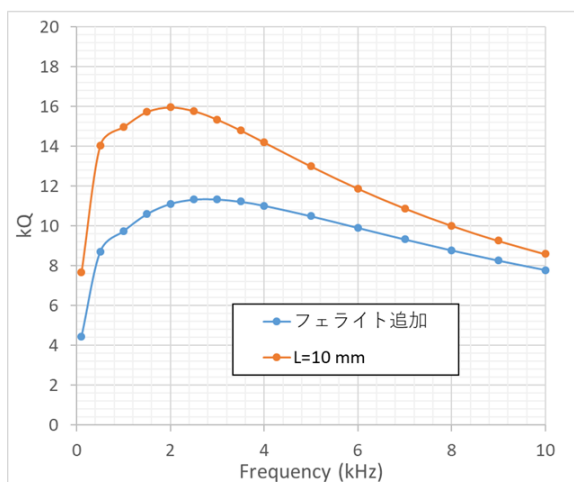
(a)



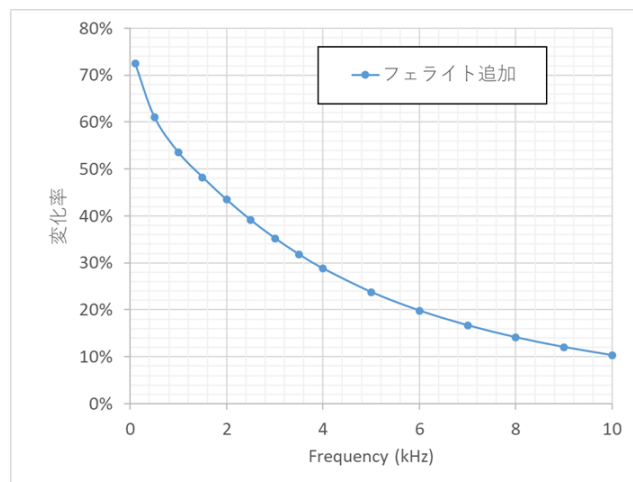
(b)

図 3.2-73 (a)受電コイルの Q 値 (b)受電コイルの Q 値の変化率

図 3.2-74 は、コイルの kQ 積とその変化率である。受電コイルの Q 値のピークが低い周波数に移動したため、kQ のピーク値は、3kHz から 2kHz となった。



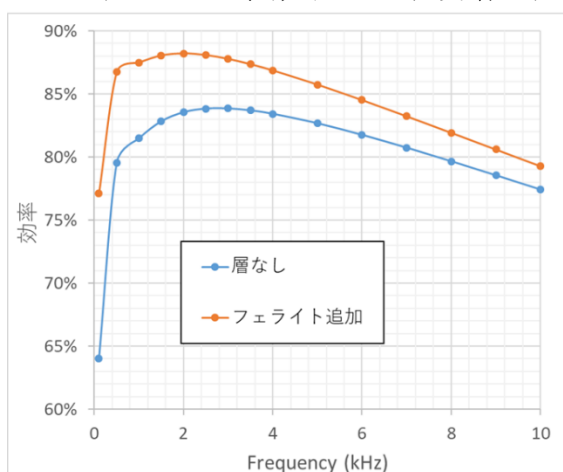
(a)



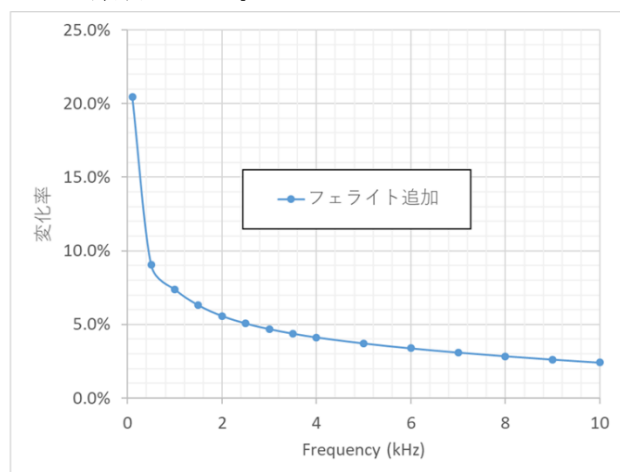
(b)

図 3.2-74 (a)コイルの kQ 値 (b)コイルの kQ 値の変化率

図 3.2-75 は、 kQ 積から求めたコイル間の最大効率である。3kHz でみると、フェライトを追加することで、効率は 5%程度増加することが期待される。



(a)



(b)

図 3.2-75 (a)フェライト追加時の効率と(b)変化率

以上から、コイル周辺部の空気層追加、アルミ柱部のフェライトを追加することで、ジュール損を減少し、 Q 値・結合係数の増加させることができ、コイル間の伝送効率を 5%程度上げることができる。

3.2.4. 損失計算の導出

海中でワイヤレス給電を行う場合、ワイヤレス給電を行うコイル、コンデンサ、磁性体などで発生する損失に加えて、海水中に発生する電磁界により損失が発生する。海中を閉空間に区切り、この閉空間内の単位時間当たり出入りする電気・磁気エネルギーのバランスを表現するのがポインティング理論である。ポインティング理論により電源から供給されるエネルギー、閉空間から放射されるエネルギー、閉空間内に蓄積されるエネルギー、閉空間内で損失するエネルギーを求めシステム要素ごとに分解すれば損失メカニズムを解析することができる。海中のワイヤレス給電システムでも複素ポインティングベクトルを解析することによりシステムの要素ごとの損失を計算することができる。

3.2.4.1. 閉空間内の電力とエネルギー

図 3.2-76 の閉曲面 S で閉じた閉空間 V を考える。この空間は海水などの損失のある媒質で満たされている。

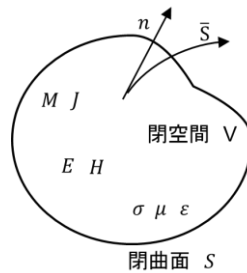


図 3.2-76 体積 V 、表面積 S の閉じた空間

複素ポインティングベクトルを Maxwell の方程式から定式化する。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mathbf{M}_i - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mathbf{M}_i - \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\mathbf{M}_i - \mathbf{M}_d \quad (3.2-48)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_i + \mathbf{J}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J}_i + \sigma \mathbf{E} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mathbf{J}_i + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d \quad (3.2-49)$$

ここで、 \mathbf{E} は電界、 \mathbf{H} は磁界、 \mathbf{J}_i は波源による電流、 \mathbf{J}_c は導体電流、 \mathbf{J}_d は変位電流、 \mathbf{M}_i は波源による磁流、 \mathbf{M}_d は変位磁流、 \mathbf{D} は電束密度、 \mathbf{B} は磁束密度、 ϵ は誘電率、 μ は透磁率、 σ は導電率である。

式(3.2-1)、(3.2-2)の両辺に \mathbf{H} 、 \mathbf{E} の内積をとると

$$\mathbf{H} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) = \mathbf{H} \cdot (-\mathbf{M}_i - \mathbf{M}_d) \quad (3.2-50)$$

$$\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = \mathbf{E} \cdot (\mathbf{J}_i + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d) \quad (3.2-51)$$

辺々引くと

$$\mathbf{H} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = -\mathbf{H} \cdot (\mathbf{M}_i + \mathbf{M}_d) - \mathbf{E} \cdot (\mathbf{J}_i + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d) \quad (3.2-52)$$

ここで、ベクトル公式

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (3.2-53)$$

より

$$\mathbf{H} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) = \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \quad (3.2-54)$$

と変形できるため

$$\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = -\mathbf{H} \cdot (\mathbf{M}_i + \mathbf{M}_d) - \mathbf{E} \cdot (\mathbf{J}_i + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d) \quad (3.2-55)$$

したがって

$$\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) + \mathbf{H} \cdot (\mathbf{M}_i + \mathbf{M}_d) + \mathbf{E} \cdot (\mathbf{J}_i + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d) = \mathbf{0} \quad (3.2-56)$$

となる。

式(3.2-56)の両辺に体積積分を行うと

$$\iiint_V \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dv = - \iiint_V \{ \mathbf{H} \cdot (\mathbf{M}_i + \mathbf{M}_d) - \mathbf{E} \cdot (\mathbf{J}_i + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d) \} dv \quad (3.2-57)$$

発散定理より

$$\iint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) d\mathbf{S} = - \iiint_V \{ \mathbf{H} \cdot (\mathbf{M}_i + \mathbf{M}_d) - \mathbf{E} \cdot (\mathbf{J}_i + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d) \} dv \quad (3.2-58)$$

$$\iint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) d\mathbf{S} + \iiint_V \{ \mathbf{H} \cdot (\mathbf{M}_i + \mathbf{M}_d) - \mathbf{E} \cdot (\mathbf{J}_i + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_d) \} dv = \mathbf{0} \quad (3.2-59)$$

ここで

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (3.2-60)$$

と定義し、物理量は $\mathbf{V} \cdot \mathbf{A}/m^2 = W/m^2$ となる

ポインティングベクトルの面積分 \mathbf{P}_e は

$$\mathbf{P}_e = \iint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{s} = \iint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{s} \quad (3.2-61)$$

となり、閉曲面 S から出ていく電力と定義される。

また、波源による入力電力密度は

$$\mathbf{p}_s = -(\mathbf{H} \cdot \mathbf{M}_i + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_i) \quad (W/m^3) \quad (3.2-62)$$

変位磁流の項は、

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{M}_d = \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mu \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{2} \mu \frac{\partial H^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \mu H^2 \right) = \frac{\partial}{\partial t} w_m \quad (3.2-63)$$

閉空間内で消失される電力密度は、

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_d = \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \varepsilon \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{\partial E^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \varepsilon E^2 \right) = \frac{\partial}{\partial t} w_e \quad (3.2-64)$$

ここで

$$w_m = \frac{1}{2} \mu \mathbf{H}^2 \quad (3.2-65)$$

$$w_e = \frac{1}{2} \varepsilon \mathbf{E}^2 \quad (3.2-66)$$

とする。

式(3.2-62)から

$$\mathbf{P}_s = - \iiint_V (\mathbf{H} \cdot \mathbf{M}_i + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_i) d\mathbf{v} = \iiint_V (\mathbf{p}_s) d\mathbf{v} \quad (3.2-67)$$

$$\iiint_V (\mathbf{H} \cdot \mathbf{M}_d) d\mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \left(\frac{1}{2} \mu \mathbf{H}^2 \right) d\mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V w_m d\mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial t} W_m \quad (3.2-68)$$

$$P_d = \iiint_V (\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_c) d\mathbf{v} = \iiint_V (\sigma \mathbf{E}^2) d\mathbf{v} = \iiint_V \mathbf{p}_d d\mathbf{v} \quad (3.2-69)$$

$$\iiint_V (\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_d) d\mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \frac{1}{2} \varepsilon \mathbf{E}^2 d\mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V w_e d\mathbf{v} = \frac{\partial}{\partial t} W_e \quad (3.2-70)$$

となる。

ここで、 W_m は磁界エネルギー (J)、 W_e は電界エネルギー (J)、 P_s は入力電力 (W)、 P_e は閉曲面 S から出ていく電力(W)、 P_d は閉空間 V の消費電力 (W)である。

上記をまとめると

$$\mathbf{P}_e - \mathbf{P}_s + \mathbf{P}_d + \frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) = 0 \quad (3.2-71)$$

$$\mathbf{P}_e = \mathbf{P}_s + \mathbf{P}_d + \frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) \quad (3.2-72)$$

入力電力 (波源による電力) は、閉曲面 S から出ていく電力と閉空間で消費される電力と磁気エネルギーの時間変化、電気エネルギーの時間変化の和に等しい。

3.2.4.2. Time-harmonic におけるポインティングベクトル

ポインティングベクトルの定義は

$$\mathcal{P} = \boldsymbol{\mathcal{E}} \times \boldsymbol{\mathcal{H}} \quad (3.2-73)$$

ここで、Time-harmonic の電磁界を考えると、

$$\boldsymbol{\mathcal{E}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z}; t) = \text{Re}[\boldsymbol{E}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z})e^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[\boldsymbol{E}e^{j\omega t} + (\boldsymbol{E}e^{j\omega t})^*] \quad (3.2-74)$$

$$\boldsymbol{\mathcal{H}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z}; t) = \text{Re}[\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z})e^{j\omega t}] = \frac{1}{2}[\boldsymbol{H}e^{j\omega t} + (\boldsymbol{H}e^{j\omega t})^*] \quad (3.2-75)$$

ここで、 $\boldsymbol{\mathcal{E}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z}; t)$ はある時間 t 、座標 (x,y,z) の電界、 $\boldsymbol{\mathcal{H}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \boldsymbol{z}; t)$ はある時間 t 、座標 (x,y,z) の磁界、 Re は実部、 Im は虚数部、 $*$ は複素共役を表す。

式(3.2-73)、(3.2-74)、(3.2-75)より

$$\boldsymbol{\mathcal{P}} = \boldsymbol{\mathcal{E}} \times \boldsymbol{\mathcal{H}} = \frac{1}{2}[\boldsymbol{E}e^{j\omega t} + (\boldsymbol{E}e^{j\omega t})^*] \times \frac{1}{2}[\boldsymbol{H}e^{j\omega t} + (\boldsymbol{H}e^{j\omega t})^*] \quad (3.2-76)$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2}[\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}^* + \boldsymbol{E}^* \times \boldsymbol{H}] + \frac{1}{2}[\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}e^{j2\omega t} + \boldsymbol{E}^* \times \boldsymbol{H}^*e^{-j2\omega t}] \right] \quad (3.2-77)$$

$$\boldsymbol{\mathcal{P}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2}[\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}^* + (\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H})^*] + \frac{1}{2}[\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}e^{j2\omega t} + (\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}e^{j2\omega t})^*] \right] \quad (3.2-78)$$

式(3.2-78)を変形し、

$$\boldsymbol{\mathcal{P}} = \frac{1}{2} \left[\text{Re}[\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}^*] + \text{Re}[\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}e^{j2\omega t}] \right] \quad (3.2-79)$$

時間平均をとると

$$\boldsymbol{\mathcal{P}}_{av} = \boldsymbol{S} = \frac{1}{2} \text{Re}[\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}^*] \quad (3.2-80)$$

となる。

マクスウェル方程式より

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\boldsymbol{M}_i - \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = -\boldsymbol{M}_i - j\omega\mu\boldsymbol{H} \quad (3.2-81)$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}_i + \boldsymbol{J}_c + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} = \boldsymbol{J}_i + \boldsymbol{J}_c + j\omega\epsilon\boldsymbol{E} = \boldsymbol{J}_i + \sigma\boldsymbol{E} + j\omega\epsilon\boldsymbol{E} \quad (3.2-82)$$

両辺に \boldsymbol{H}^* 、 \boldsymbol{E} の内積をとると。

$$\boldsymbol{H}^* \cdot (\nabla \times \boldsymbol{E}) = -\boldsymbol{H}^* \cdot \boldsymbol{M}_i - j\omega\mu\boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{H}^* \quad (3.2-83)$$

$$\boldsymbol{E} \cdot (\nabla \times \boldsymbol{H}^*) = \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{J}_i^* + \sigma\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{E}^* + j\omega\epsilon\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{E}^* \quad (3.2-84)$$

式(3.2-84)から式(3.2-83)を引くと

$$\boldsymbol{E} \cdot (\nabla \times \boldsymbol{H}^*) - \boldsymbol{H}^* \cdot (\nabla \times \boldsymbol{E}) = \boldsymbol{H}^* \cdot \boldsymbol{M}_i + \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{J}_i^* + j\omega\mu\boldsymbol{H} \cdot \boldsymbol{H}^* + \sigma\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{E}^* - j\omega\epsilon\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{E}^* \quad (3.2-85)$$

ここで、ベクトル公式より

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (3.2-86)$$

より、

$$\mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{H}^*) - \mathbf{H}^* \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla \cdot (\mathbf{H}^* \times \mathbf{E}) \quad (3.2-87)$$

したがって

$$\nabla \cdot (\mathbf{H}^* \times \mathbf{E}) = \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{M}_i + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_i^* + \sigma |\mathbf{E}|^2 + j\omega\dot{\mu} |\mathbf{H}|^2 - j\omega\dot{\epsilon}^* |\mathbf{E}|^2 \quad (3.2-88)$$

または、

$$-\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) = \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{M}_i + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_i^* + \sigma |\mathbf{E}|^2 + j\omega\dot{\mu} |\mathbf{H}|^2 - j\omega\dot{\epsilon}^* |\mathbf{E}|^2 \quad (3.2-89)$$

両辺を2で割ると

$$-\nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \right) = \frac{1}{2} \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{M}_i + \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_i^* + \frac{1}{2} \sigma |\mathbf{E}|^2 + j2\omega \left(\frac{1}{4} \dot{\mu} |\mathbf{H}|^2 - \frac{1}{4} \dot{\epsilon}^* |\mathbf{E}|^2 \right) \quad (3.2-90)$$

ここで、発散定理

$$\iint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} = \iiint_V \nabla \cdot \mathbf{A} dv \quad (3.2-91)$$

と(3.2-90)の体積積分をとると

$$-\iiint_V \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \right) dv = -\iint_S \left(\frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \right) \cdot d\mathbf{s} \quad (3.2-92)$$

$$= \iiint_V \left[\frac{1}{2} \mathbf{H}^* \cdot \mathbf{M}_i + \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_i^* + \frac{1}{2} \sigma |\mathbf{E}|^2 + j2\omega \left(\frac{1}{4} \dot{\mu} |\mathbf{H}|^2 - \frac{1}{4} \dot{\epsilon}^* |\mathbf{E}|^2 \right) \right] dv \quad (3.2-93)$$

$$= \frac{1}{2} \iiint_V (\mathbf{H}^* \cdot \mathbf{M}_i + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_i^*) dv + \frac{1}{2} \iiint_V \sigma |\mathbf{E}|^2 dv \quad (3.2-94)$$

$$= j2\omega \iiint_V \left(\frac{1}{4} \dot{\mu} |\mathbf{H}|^2 - \frac{1}{4} \dot{\epsilon}^* |\mathbf{E}|^2 \right) dv \quad (3.2-95)$$

式(3.2-94)は

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \iiint_V (\mathbf{H}^* \cdot \mathbf{M}_i + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}_i^*) dv \\ & = \iint_S \left(\frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \right) \cdot d\mathbf{s} \\ & \quad + \frac{1}{2} \iiint_V \sigma |\mathbf{E}|^2 dv \end{aligned} \quad (3.2-96)$$

$$= j2\omega \iiint_V \left(\frac{1}{4} \dot{\mu} |\mathbf{H}|^2 - \frac{1}{4} \dot{\epsilon}^* |\mathbf{E}|^2 \right) dv \quad (3.2-97)$$

となる。ここで、

$$\dot{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.2-98)$$

$$\dot{\mu} = \mu' - j\mu'' \quad (3.2-99)$$

を代入すると

$$- \iiint_V \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \right) dv \quad (3.2-100)$$

$$= \iint_S \left(\frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \right) \cdot d\mathbf{s} \quad (3.2-101)$$

$$+ \frac{1}{2} \iiint_V \sigma |\mathbf{E}|^2 dv + 2\omega \iiint_V \left(\frac{1}{4} \mu'' |\mathbf{H}|^2 - \frac{1}{4} \epsilon'' |\mathbf{E}|^2 \right) dv \quad (3.2-102)$$

$$+ j2\omega \iiint_V \left(\frac{1}{4} \mu' |\mathbf{H}|^2 - \frac{1}{4} \epsilon' |\mathbf{E}|^2 \right) dv \quad (3.2-103)$$

この式右辺の実数成分が解析空間内で消費される電力となる。

3.2.4.3. 各損失について

式(3.2-100)、(3.2-101)、(3.2-102)、(3.2-103)の解析空間内で消費される電力をまとめる表 3.2-16 となる。

表 3.2-16 損失項のまとめ

項目	式	
導電率に関する消費電力 (ジュール損)	$\frac{1}{2} \iiint_V \sigma \mathbf{E} ^2 dv$	(3.2-104)
ϵ'' に関する消費電力 (誘電体損)	$2\omega \iiint_V \left(\frac{1}{4} \epsilon'' \mathbf{E} ^2 \right) dv$	(3.2-105)
μ'' に関する消費電力 (磁気損)	$2\omega \iiint_V \left(\frac{1}{4} \mu'' \mathbf{H} ^2 \right) dv$	(3.2-106)

3.2.4.4. 各要素部における電磁波の伝搬エネルギーの損失計算

実際の AUV を想定した無線給電は、AUV の耐圧容器だけでなく、AUV のフレーム、スラスト、バラスト部などがコイル周辺部に備え付けられている。それらの構成要素で体積が大きいもの、金属であるものをモデリングし、送電コイル、受電コイルのインダクタンス値、抵抗値、Q 値の比較を行う。また、各部での損失を計算する。シミュレータは、ANSYS 社製の Maxwell を使用した。

3.2.4.4.1. 簡易モデルと詳細モデル

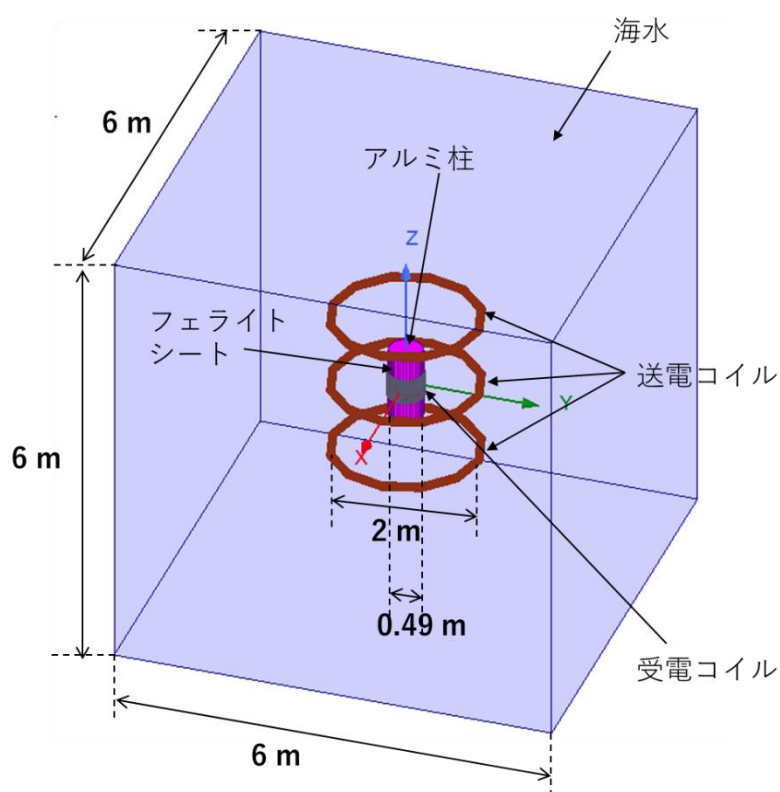


図 3.2-77 簡易モデル (全体図、w/o AUV)

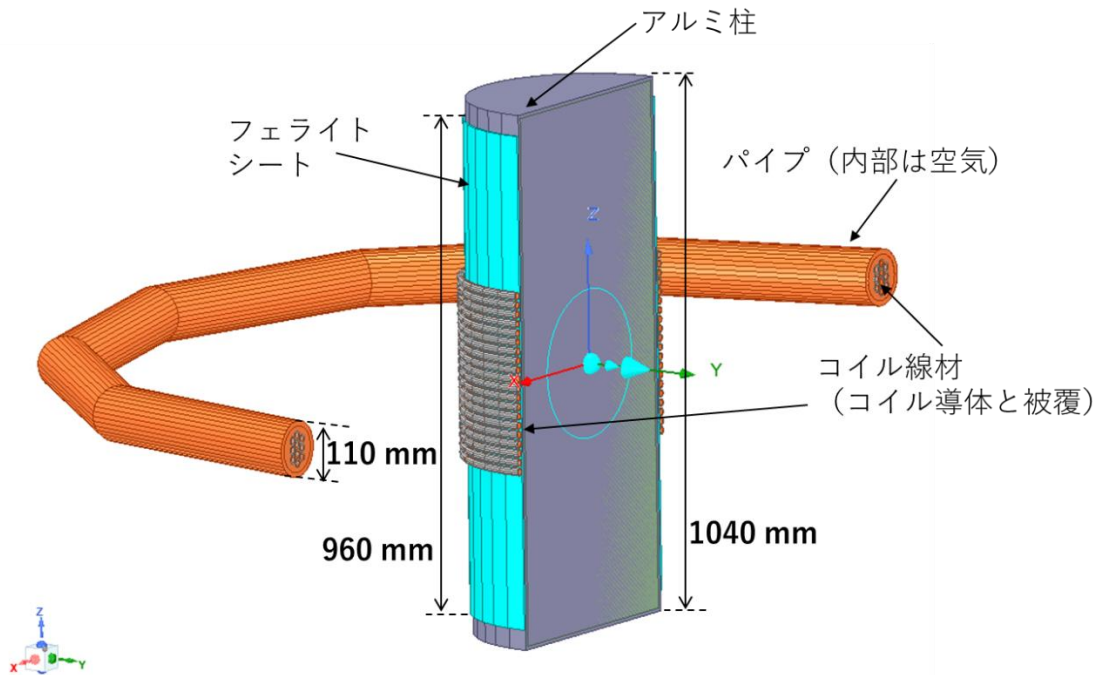


図 3.2-78 簡易モデル (拡大断面図)

図 3.2-77 は簡易モデルの全体図である。直径 2m、巻数 10 の送電コイルが 1m 間隔で 3 つ配置しており、その中央部には、AUV の耐压容器を模したフェライトを貼り付けたアルミ柱がある。フェライトの周りに直径約 0.49m、巻数 20 の受電コイルがある。解析空間は海水であり、大きさを $6\text{m} \times 6\text{m} \times 6\text{m}$ とした。図 3.2-78 は送電コイル、受電コイル、耐压容器を拡大断面図である。送電コイルは、パイプ内にコイル導体径 11.5mm、線材外形 18mm のケーブルが 10 巻されている。受電コイルは、直径 460mm、長さ 1040mm のアルミ円柱 (厚みは 7mm で内部は空洞) の上に、厚み 5mm、長さ 960mm のフェライトシート上に、送電コイルと同じ線材で 20 巻されている。コイル線材の材質は、導体部は銅、被覆部はゴムである。送電コイル部のパイプは、ポリエチレンである。各材質の電気定数は表 3.2-17 の通りである。誘電損失係数は、複素誘電率の実部と虚部の比、磁気損失係数は、複素透磁率の実部と虚部の比を表す。

コイルの励振条件は送電コイル、受電コイルに同相で 1A を励振させた。周波数は、0.1kHz から 1kHz とした。

表 3.2-17 材料の電気特性

	導電率 (S/m)	比誘電率	比透磁率	誘電損失 係数	磁気損失 係数
空気	0	1.0	1.0	0	0
銅	5.8×10^7	1.0	1.0	0	0
アルミ	3.8×10^7	1.0	1.0	0	0
ポリエチレン	0	2.25	1.0	0.001	0
ゴム	1.0×10^{-15}	3.0	1.0	0	0
フェライト	0.25	1.0	3400	0	0.015
海水	5.0	78	1.0	0	0
鉛	5.0×10^6	1.0	1.0	0	0
ステンレス	1.1×10^6	1.0	1.0	0	0

AUV (耐圧容器, フレーム, スラスタ, バラスト, 固定金属)

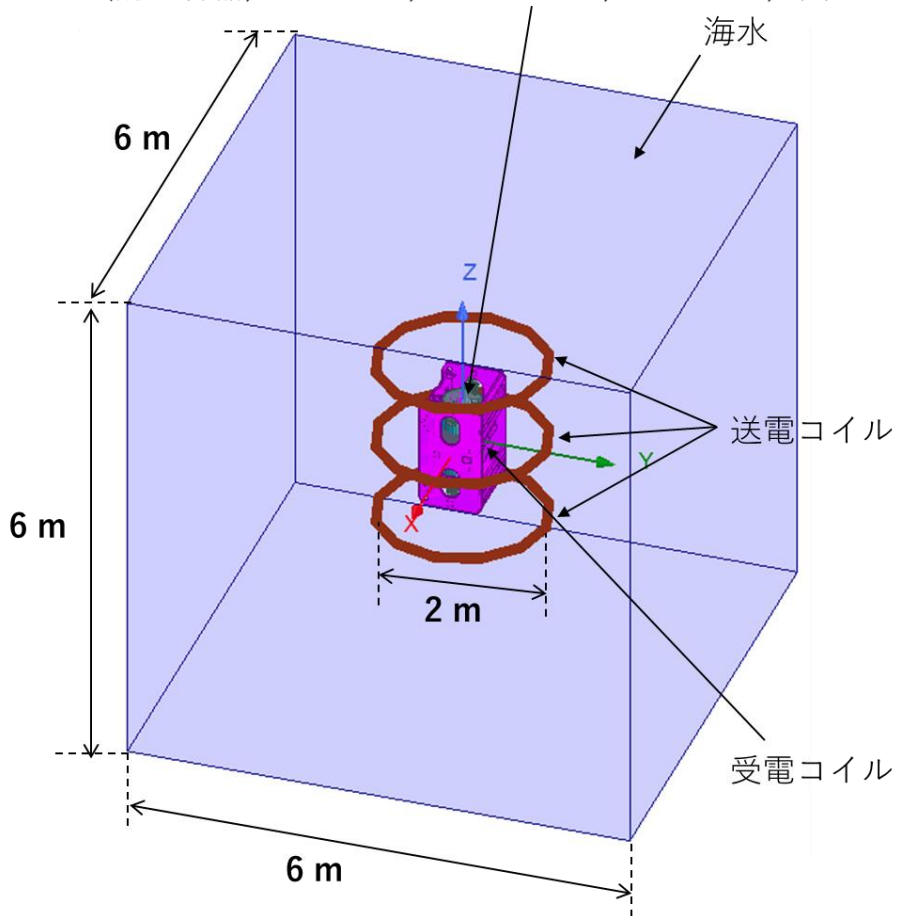


図 3.2-79 詳細モデル (全体図、w/ AUV)

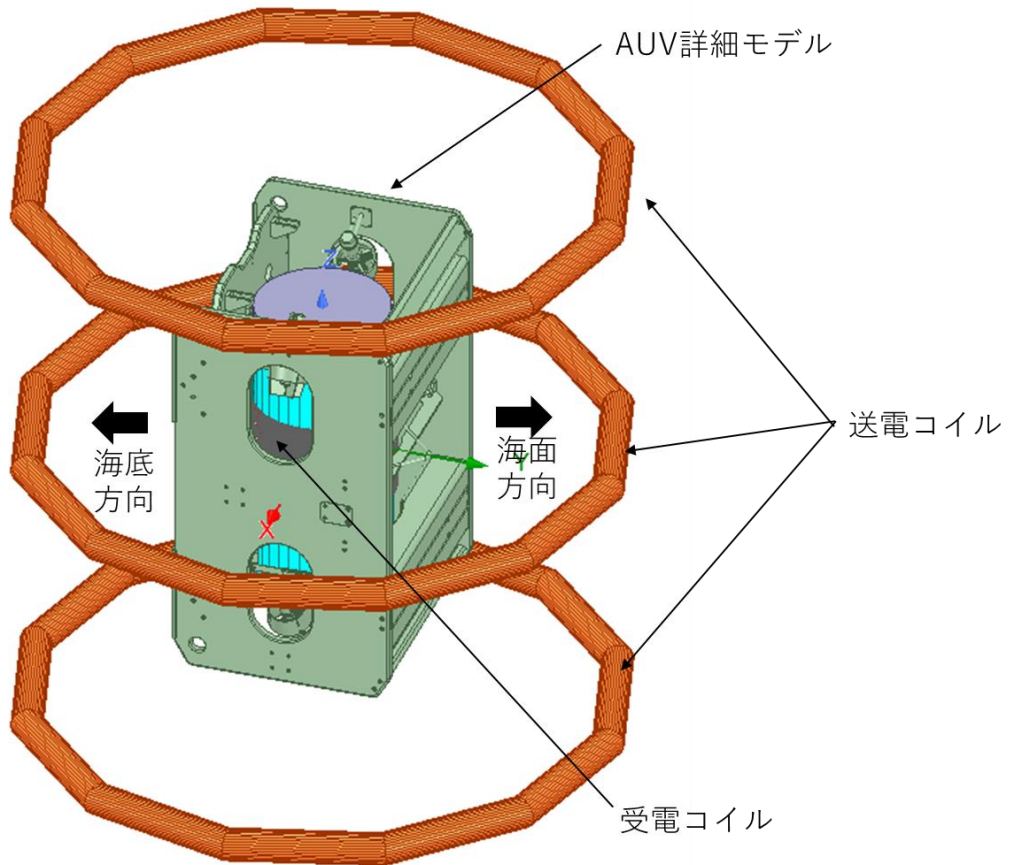


図 3.2-80 詳細モデル (拡大図)

図 3.2-79 は、AUV を詳細モデル化したものである。簡易モデルはフェライトを含む耐圧容器のみをモデリングしていたが、新たに AUV の構成要素である耐圧容器、フレーム、固定金属、バラスト、スラスト部を追加した。解析空間の材質は、海水で大きさは簡易モデルと同様に $6\text{m} \times 6\text{m} \times 6\text{m}$ である。図 3.2-80 は、詳細モデルの拡大図である。図の左側が AUV の底面、右側が上面である。

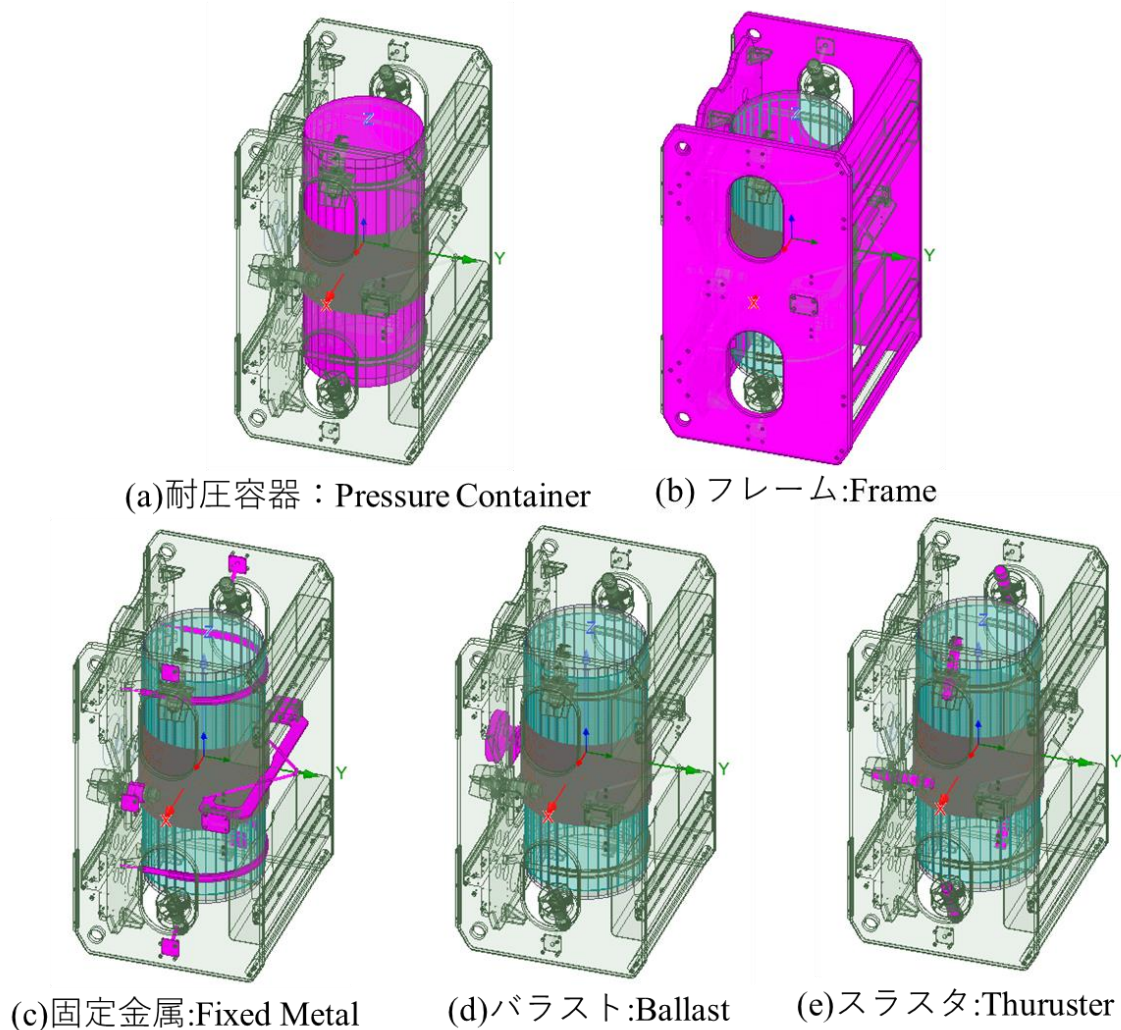


図 3.2-81 AUV の各部

図 3.2-81 は AUV の構成要素である、耐圧容器 (Pressure Container)、フレーム (Frame)、固定金属 (Fixed Metal)、バラスト (Ballast)、スラスタ (Thrusuter) である。それぞれ該当部分には赤色で示している。各部の材質は、それぞれ、フレームはポリエチレン、固定金属はステンレス、バラストはアルミと鉛、スラスタはステンレスとした。

3.2.5. 解析領域の拡大に伴う解析手法の調査・選定

2019 年度に比べて、実寸サイズの直径 2m のコイルモデルとなり、電磁界シミュレーションの解析領域が広がったため、メッシュサイズの大きさによる解析精度について調査し、最適なものを選定する。この結果をもとに電磁界シミュレーションで海水を含めたモデルの電磁界計算を行う。2018 年度の報告で、解析空間はコイル直径の 3 倍以上が望ましい結果となり、本稿においても、解析空間をコイル直径の 3 倍に固定して計算を行う。

3.2.5.1. 解析モデル

図 3.2-82 のように、巻数 10、直径 2m のコイルを海水中に配置した。コイル線材は、図 3.2-83 のように、コイル導体が銅、コイル被覆がゴムとし、コイル導体直径 8.4mm、線材直径 18mm でモデリングした。

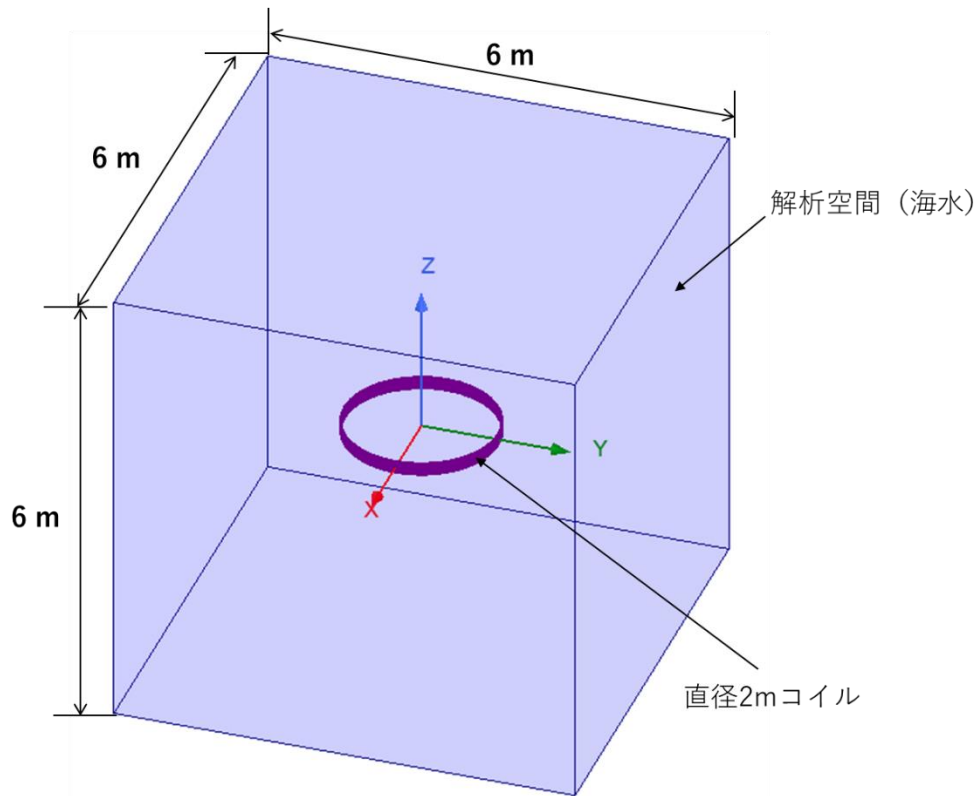


図 3.2-82 コイルのモデリングと解析空間の大きさ

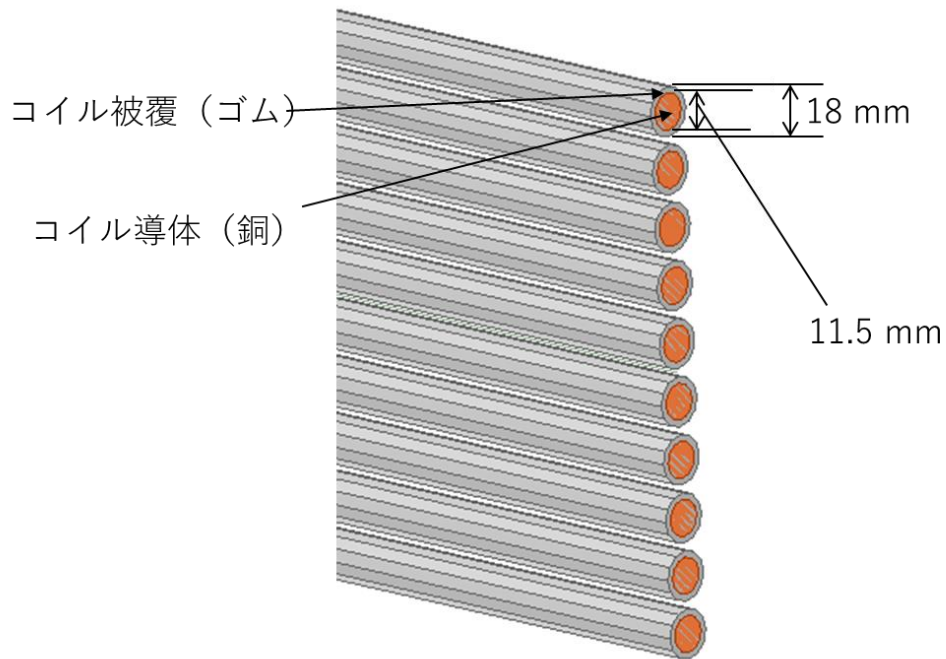


図 3.2-83 コイル線材の断面図

各材質の電気定数は、表 3.2-18 の値を用いた。解析空間は、6m × 6m × 6m の海水とした。コイル導体部の近接効果の影響があるため、コイル導体内部のメッシュを細かく切ることによって、計算精度の向上を図る。コイル導体径は 11.5mm であるため、11.5mm を基準に、導体部のメッシュの長さを 11.5mm、11.5mm/2=5.75mm、11.5mm/3=3.84mm、メッシュ設定デフォルト値（設定無し）でシミュレーションを行った。

表 3.2-18 材料の電気定数

	導電率(S/m)	比誘電率	比透磁率
真空	0	1.0	1.0
銅	5.8×10^8	1.0	1.0
ゴム	1.0×10^{-15}	3.0	1.0
海水	5.0	78	1.0

3.2.5.1.1. インダクタンス値、抵抗値の比較

図 3.2-84(a)はコイルのインダクタンス値であり、メッシュ設定デフォルト値(設定なし)の場合と、コイル導体内部のメッシュ長さを 3.84mm、5.75mm、11.5mm としたときの計算値である。(b)はメッシュ長さ 3.84mm の計算を基準（精度が高い計算値）に、メッシュ設定デフォルト値（設定なし）の場合と、表皮厚みを 5.75mm、11.5mm のものを差し引き、基

準値（メッシュ長さ 3.84mm）で割ったものである。表皮厚みを小さく設定することで解析精度が向上していることがわかる。

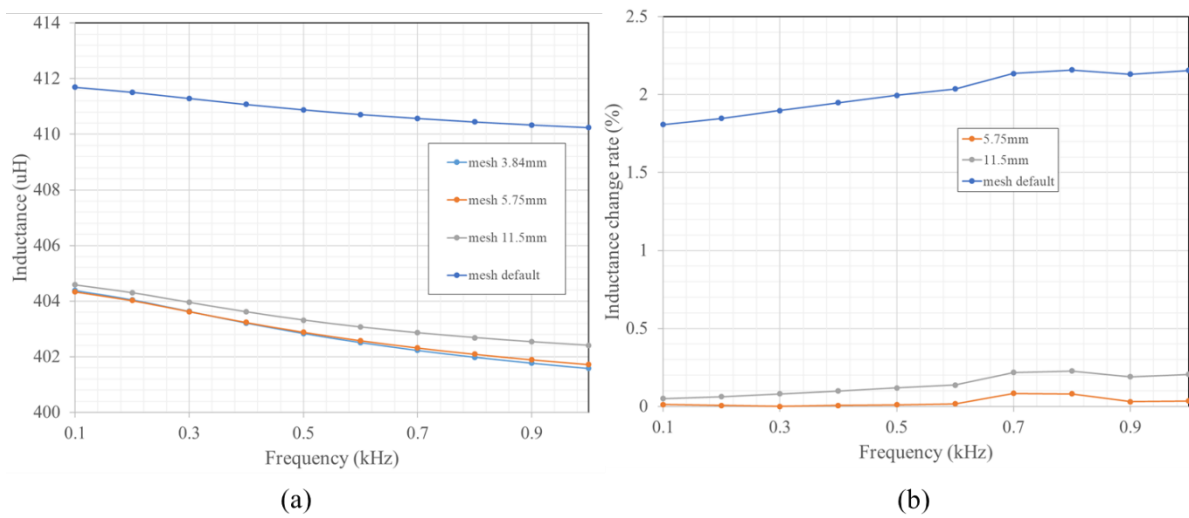


図 3.2-84 (a)インダクタンス値 (b)インダクタンスの変化率

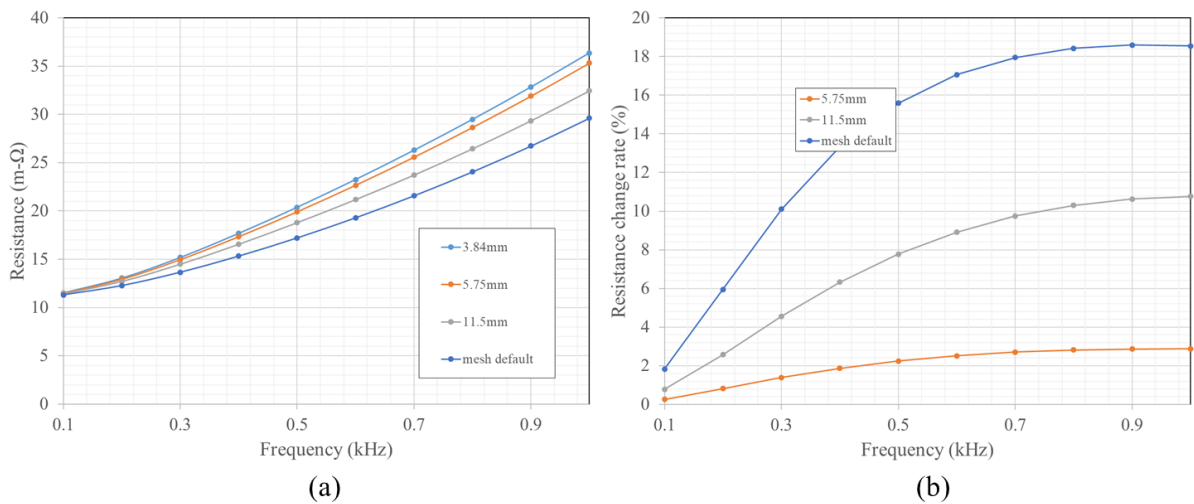


図 3.2-85 (a) 抵抗値 (b) 抵抗値の変化率

図 3.2-85(a)はコイルの抵抗値であり、(b)はメッシュ長さ 3.84mm を基準とした際の抵抗値の変化率である。インダクタンス値と同様に、コイル導体内部のメッシュサイズを考慮したメッシュ設定を行うことで、解析精度が高くなることがわかる。

3.2.5.1.2. メッシュサイズ、計算時間、メモリの比較

表 3.2-19 は、各メッシュサイズに応じた、モデル全体のメッシュ数、コイル導体部のメッシュ数、計算時間、最大メモリをまとめたものである。コイル導体部のメッシュサイズ

を細かくすることで、計算精度の向上が見込めるが、メッシュ数が増大し、解析時間もそれに伴い長くなっていくため、パラメータスイープするときなど状況に応じて、メッシュ数を変更する必要がある。

表 3.2-19

	全体のメッシュ数	コイル導体のメッシュ数	計算時間	最大メモリ
デフォルト値	79348	20761	10分	2GB
11.5mm	1058014	380541	37	20GB
5.75mm	2995502	1344593	2時間6分	60GB
3.84mm	7315701	3993165	5時間43分	136GB

3.2.5.2. 他の解析手法の調査

3.2.5.2.1. 既存シミュレータの課題

現在は3次元の電磁界シミュレーションでは、コイル導体部を単線として解析を行っているが、コイルに用いる線材をリッツ線などの複線にすることは、コイルの近接効果による損失減少などが期待され、コイルのQ値増加が見込まれる。しかしながら、複線化により、モデリングが複雑化・メッシュ数増大・PCの利用メモリ増大があるため、解析ができない、計算時間が膨大となり現実的でなくなることが懸念される。送電コイル、受電コイルのリッツ線化による伝送特性上昇は期待できるので、リッツ線解析を行える近似解法について調査・解析を行う。

3.2.5.2.2. 近似解法について

リッツ線の交流損失評価手法では、ビオ・サバル Cauer Ladder Network (BS-CLN) 解析法を用いて、リッツ線を均質化して解析する手法が開発されている。BS-CLN 解析法を用いて解析を行った。

直径2mの空芯コイルの入力特性を電線条件ごとに解析で求め、実験値と照合を行なう。

A 自己電流損抵抗

電線の特性について、電線に流れる電流自体によって発生する抵抗を自己電流損抵抗、外部磁場によって発生する抵抗を外部磁場損抵抗とし、まず自己電流損抵抗をBS-CLN解析により求める。自己電流損抵抗計算用のBS-CLN解析モデルを図3.2-86に示す。

リッツ線モデルは図3.2-86に示すような素線/バンドル配置とした。撚線仕様を下に示

す。モデル長については子撚線の撚りピッチ長（200mm）とした。

親7本：S方向、撚りピッチ 400mm

子7本：Z方向、撚りピッチ 200mm

孫5本：S方向、撚りピッチ 66.6mm

キャブタイヤ線モデルは導体の断面積が等価な単芯モデルとした（図 3.2-87）。

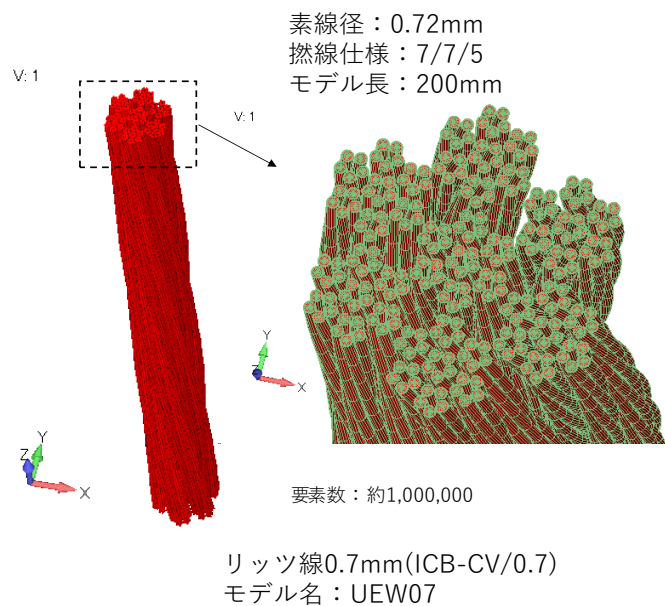


図 3.2-86 自己電流損抵抗計算用 BS-CLN 解析モデル（リッツ線）

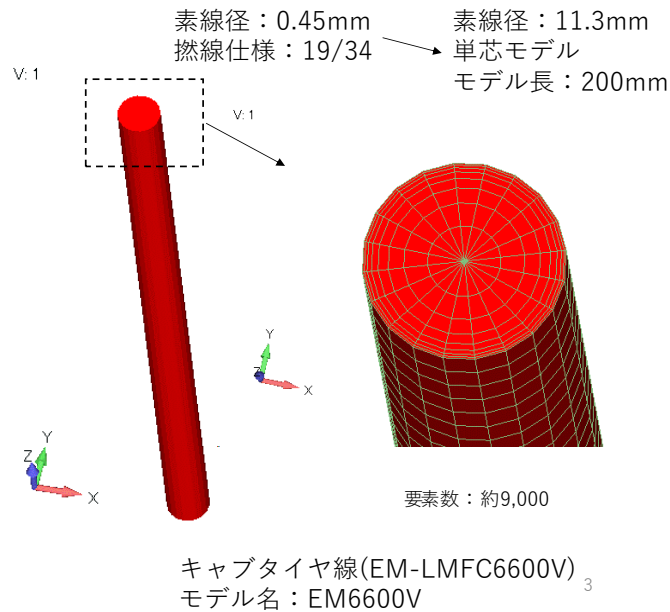


図 3.2-87 自己電流損抵抗計算用 BS-CLN 解析モデル (キャブタイヤ線)

計算結果を表 3.2-20、図 3.2-88、図 3.2-89 に示す。

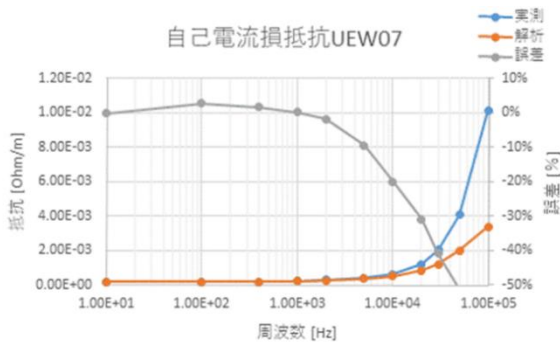
実測値はケーブルを伸ばして測定したデータとした。リッツ線については 2kHz まで数%の誤差で合致している。キャブタイヤ線については 2~5kHz まで解析値が実測値よりも上回った後、さらに周波数を上げると下回るという変化になっており、単芯でモデル化したことによる影響が見られるものの、値としては 1kHz まで 6%以下の誤差で合致している。

まず DC 抵抗に近い 10Hz ではリッツ線もキャブタイヤ線も 1%以下の誤差で合致している。その抵抗と 1kHz の抵抗との差分が AC 抵抗成分と考えると、リッツ線については $1\mu\Omega/m$ レベルで合致している。実測値はケーブルを伸ばして測定したデータであり、2本の往復導体の間の鎖交面も測定値に影響すると思われるが、その影響は AC 抵抗を増加させる方向に作用するので、解析との差が小さいということは、1kHz まではその影響も小さく、したがって解析と実測が合致しているとみることが出来る。リッツ線の 10Hz と 100Hz の実測値をみると、本来周波数が上がると抵抗も上がるはずが、2~3%低くなっており、実測値については $\mu\Omega/m$ レベルの誤差を含んでいると思われ、1kHz までのデータではその影響も考慮した評価も必要である。

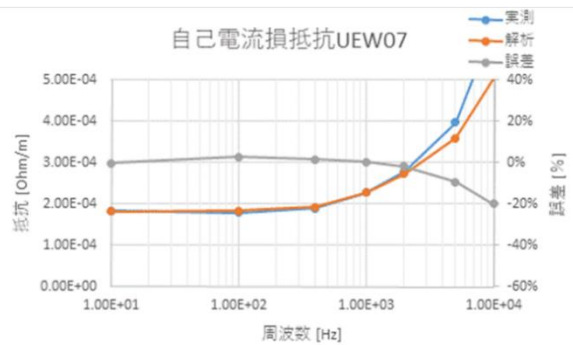
表 3.2-20 自己電流損抵抗

周波数 [Hz]	リッツ線			キャブタイヤ線		
	実測[Ω]	解析[Ω]	誤差	実測[Ω]	解析[Ω]	誤差
10	1.83E-04	1.82E-04	0%	1.76E-04	1.75E-04	-1%
100	1.78E-04	1.83E-04	3%	1.77E-04	1.77E-04	0%
400	1.90E-04	1.93E-04	2%	1.96E-04	2.01E-04	3%
1000	2.27E-04	2.27E-04	0%	2.63E-04	2.79E-04	6%
2000	2.78E-04	2.73E-04	-2%	3.49E-04	3.78E-04	8%
5000	3.97E-04	3.60E-04	-9%	5.55E-04	5.67E-04	2%
10000	6.29E-04	5.03E-04	-20%	9.14E-04	7.82E-04	-14%
20000	1.20E-03	8.30E-04	-31%	1.60E-03	1.09E-03	-32%
30000	2.06E-03	1.21E-03	-41%	2.36E-03	1.32E-03	-44%
50000	4.07E-03	1.99E-03	-51%	3.65E-03	1.70E-03	-53%
100000	1.02E-02	3.38E-03	-67%	8.70E-03	2.42E-03	-72%

ここで、実測については実測値を 72.2m で除した値を示す。

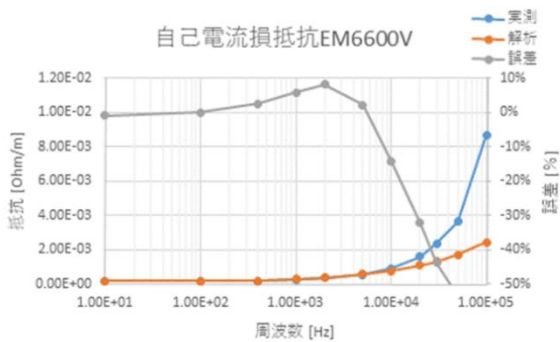


(a) 10Hz~100kHz

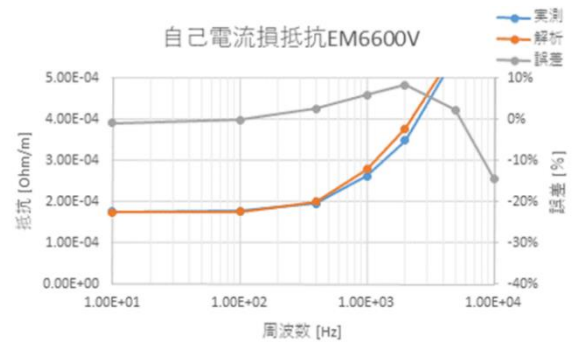


(b) 10Hz~10kHz

図 3.2-88 リッツ線自己電流損抵抗



(a) 10Hz~100kHz



(b) 10Hz~10kHz

図 3.2-89 キャブタイヤ線自己電流損抵抗

B 複素透磁率

外部磁場損抵抗を計算するために、まず各電線の等価複素透磁率を BS-CLN 解析で求める。複素透磁率計算用の BS-CLN 解析モデルを図 3.2-90、図 3.2-91 に示す。

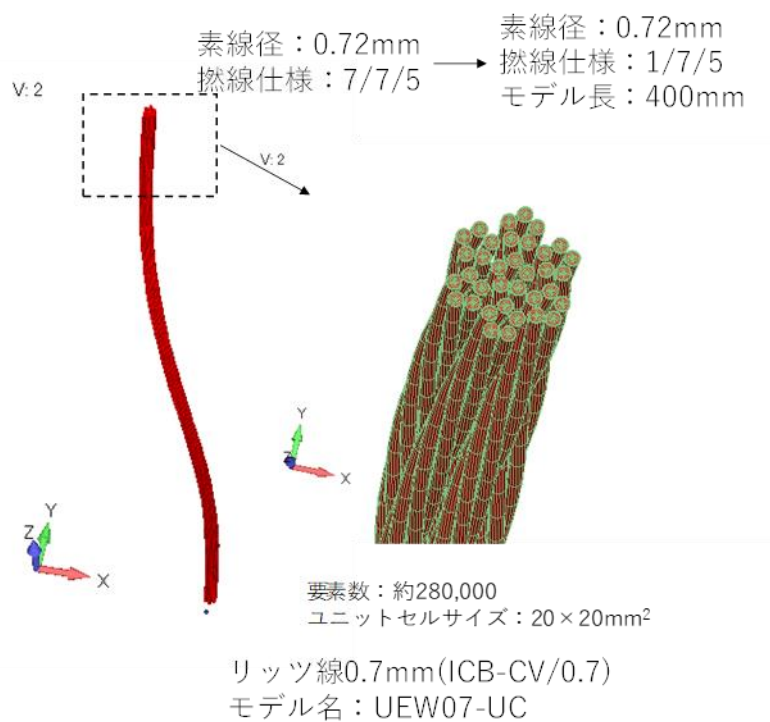


図 3.2-90 複素透磁率計算用 BS-CLN 解析モデル（リッツ線）

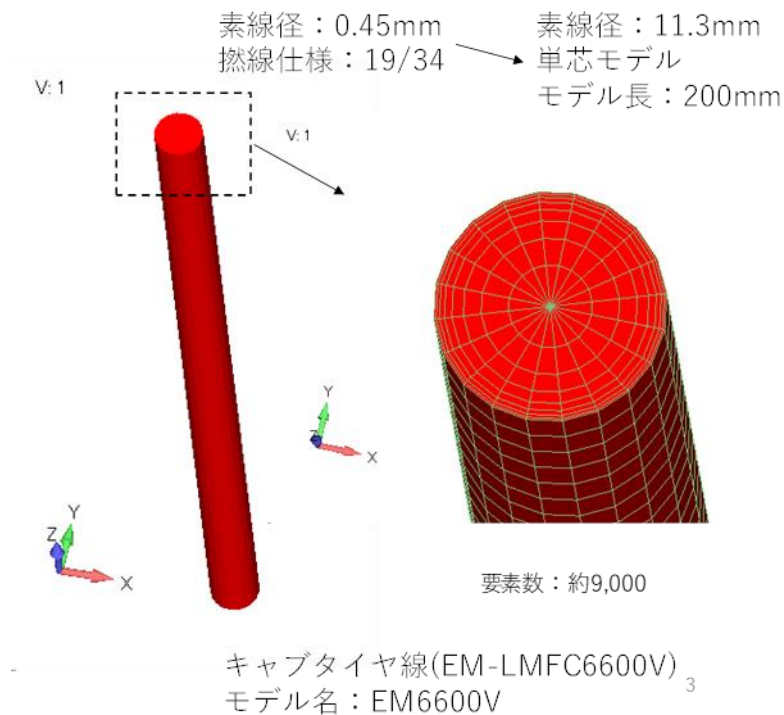


図 3.2-91 複素透磁率計算用 BS-CLN 解析モデル（キャブタイヤ線）

リッツ線モデルについては、計算規模削減目的で図 3.2-90 のように親撚線の 1 バンドルのみを親撚りピッチ長でモデル化したもので計算を行う。経験的に撚線の複素透磁率計算では素線内のみに渦電流が発生する状態での評価となり、同モデルによりほぼ等価な複素透磁率が計算可能であることがわかっている。キャブタイヤ線については自己電流損抵抗計算時と同じ単芯モデルで計算する。海中 WPT においては Rx コイル線材として EM600V を使用する。EM600V の導体部断面積は EM6600V と同じだが、被覆材の厚みが異なるため巻線ピッチが異なる。その場合自己電流損抵抗については EM6600V と同じだが、複素透磁率については UnitCell サイズが違うため EM600V についても複素透磁率を計算した。

各解析モデルの UnitCell サイズを下に示す。

UEW07-UC	:	20×20
EM6600V	:	22.6×22.6
EM600V	:	18×18

計算結果をに示す。

表 3.2-21 複素透磁率

周波数 [Hz]	UEW07		EM6600V		EM600V	
	μ'	μ''	μ'	μ''	μ'	μ''
10	1.00E+00	3.34E-05	1.00E+00	6.94E-03	1.00E+00	1.09E-02
100	1.00E+00	3.34E-04	9.83E-01	6.48E-02	9.71E-01	1.01E-01
400	1.00E+00	1.34E-03	8.65E-01	1.32E-01	7.88E-01	1.93E-01
1000	1.00E+00	3.34E-03	7.74E-01	1.00E-01	6.62E-01	1.39E-01
2000	1.00E+00	6.67E-03	7.40E-01	7.22E-02	6.17E-01	9.83E-02
5000	9.98E-01	1.66E-02	7.10E-01	4.72E-02	5.78E-01	6.32E-02
10000	9.94E-01	3.23E-02	6.96E-01	3.38E-02	5.59E-01	4.49E-02
20000	9.79E-01	5.88E-02	6.86E-01	2.44E-02	5.46E-01	3.22E-02
30000	9.58E-01	7.69E-02	6.81E-01	2.06E-02	5.40E-01	2.72E-02
50000	9.19E-01	9.16E-02	6.76E-01	1.70E-02	5.33E-01	2.24E-02
100000	8.63E-01	8.27E-02	6.70E-01	1.20E-02	5.25E-01	1.53E-02

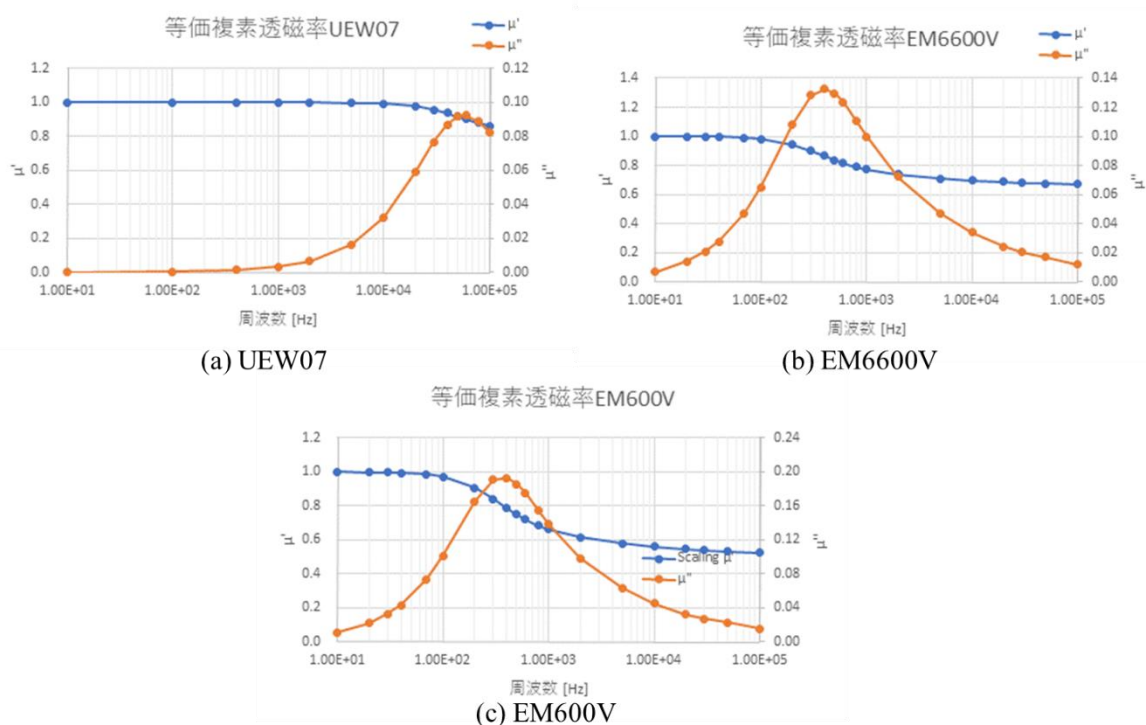


図 3.2-92 複素透磁率

C 2m コイル特性

空芯 2m コイルの特性を実測と解析で比較を行う。

図 3.2-93 に 2m コイルの解析モデルを示す。軸対称モデルとし、Z=0 面を対称として下側を省略したモデルとしている。解析ソフトは当社製の有限要素法による電磁界解析ソフトを使用し、角度方向に 1° の厚みを持ったモデルで解析を行った。このモデルのコイル部に上で求めた複素透磁率を与えて磁界解析を行い、外部磁場損抵抗を解析結果から求める。

なお、リッツ線とキャブタイヤ線は巻線ピッチに合わせた UnitCell サイズが異なるため、コイルサイズはそれに合わせた 2 種類の解析モデル(図 3.2-94)を作成して計算を行った。

本計算で得られた外部磁場損抵抗に自己電流損抵抗を加算しコイル抵抗とするが、その自己電流損抵抗は(1)項で求めた単位長さ当りの抵抗にコイルケーブル長を乗じて求める。そのコイルケーブル長は引出線込の長さとし、72.2m とした。

下に主要な解析条件を示す。コイル部には領域内に均一電流を流すコイル定義を使用する。

主要条件

モデル化領域：角度方向 1° 、上下方向 1/2 モデル (1/720 モデル)

解析モード：交流定常解析

モデル化部材

コイル：領域内に均一電流を流すコイル定義回路

コイルに電流源を接続

印加電流：交流電流 1A (振幅)

V:2

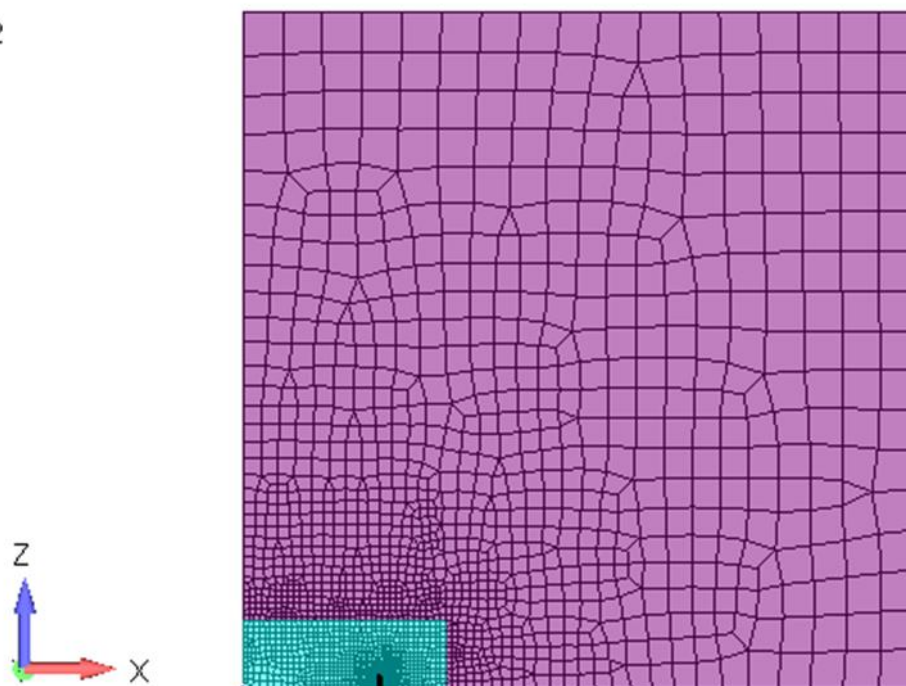


図 3.2-93 2m コイル解析モデル (全体)

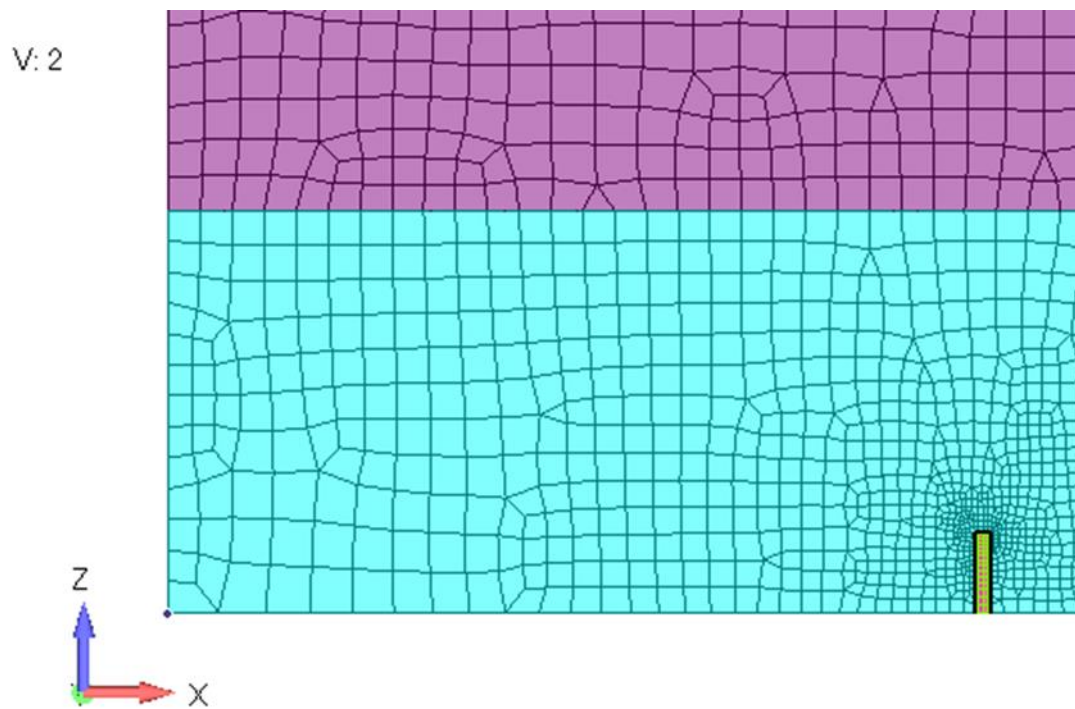


図 3.2-94 2m コイル解析モデル (コイル部)

図 3.2-95 にコイル電流が最大 (1A) のときの磁束密度分布を示す。空間全体の磁場分布がわかるようにコンタスケールは不等ピッチとしている。

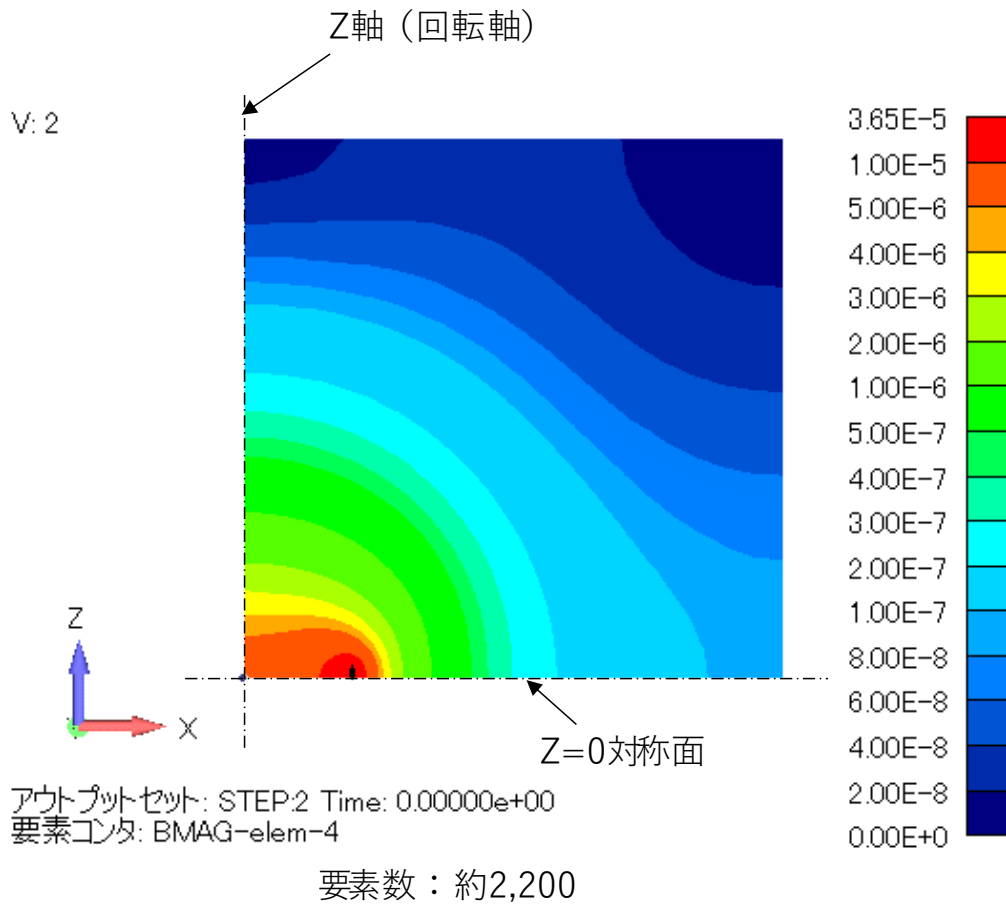


図 3.2-95 磁束密度分布 (最大電流時) 単位: [T]

表 3.2-22、表 3.2-23、図 3.2-96 に解析で計算したコイル特性と実測との比較を示す。図 3.2-96(a)のような 100kHz までのスケールでみた場合 10kHz まで実測と解析のコイル抵抗が同等レベルで推移しているように見えるが、1kHz 以下の特性を拡大した図 3.2-96(c)では解析の方が低い値になっており、1kHz では 20%低い値になっている。リッツ線のインダクタンス L については解析の方が 2~3%低い値となっている。

キャブタイヤ線については 400Hz において解析の方が 15%高い値になっているが、それより周波数が上がると解析の方が小さくなっており、1kHz では 5%程度の誤差で収まっている。キャブタイヤ線は 1kHz 以上で撚線の効果で単芯よりもコイル抵抗が高くなっている可能性も考えられる。

表 3.2-20 で報告した自己電流損抵抗の実測と解析の比較では 1kHz までほぼ同等の結果を示しているのに対し、リッツ線のコイル抵抗については 1kHz での実測と解析の乖離が 20% (約 4mΩ) になっており、その差は外部磁場損抵抗 (0.2mΩ) としては一桁高い抵抗が発生している可能性がある。なお、外部磁場損抵抗の計算根拠となる(2)項で示したモデルでは、リッツ線の場合素線内でのみ渦電流が流れる条件となることがわかっており、そういう意味では理想状態 (最小限) の外部磁場損抵抗を示しているということになるが、実際は外部磁場によって素線間あるいはバンドル間に渦電流が流れている可能性があると考えられる。

表 3.2-22 コイル特性比較 (リッツ線)

周波数 [Hz]	実測			解析		
	L [H]	R [Ω]	Q	L [H]	R [Ω]	Q
10	4.04E-04	1.35E-02	1.9	3.92E-04	1.32E-02	1.9
100	4.01E-04	1.38E-02	18.3	3.92E-04	1.32E-02	18.6
400	4.01E-04	1.55E-02	64.8	3.92E-04	1.40E-02	70.6
1000	4.01E-04	2.07E-02	121.9	3.92E-04	1.66E-02	148.2
2000	4.01E-04	2.76E-02	182.4	3.92E-04	2.05E-02	239.8
5000	4.00E-04	4.68E-02	269.0	3.92E-04	3.12E-02	394.3
10000	4.00E-04	8.38E-02	300.3	3.92E-04	5.70E-02	432.4
20000	4.01E-04	1.71E-01	294.3	3.92E-04	1.36E-01	362.5
30000	4.02E-04	3.23E-01	234.7	3.92E-04	2.38E-01	309.7
50000	4.04E-04	7.13E-01	178.2	3.91E-04	4.50E-01	273.0
100000	4.17E-04	2.61E+00	100.5	3.91E-04	8.22E-01	268.6

表 3.2-23 コイル特性誤差比較 (リッツ線)

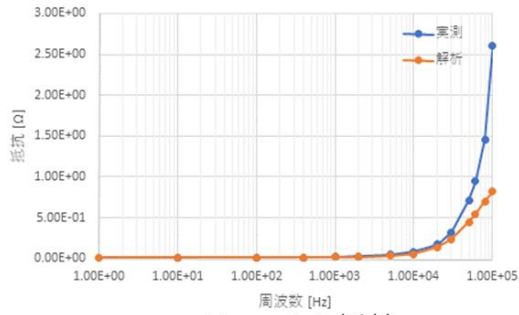
周波数 [Hz]	誤差			解析 R 内訳	
	L	R	Q	自己電流損 抵抗	外部磁場損 抵抗
10	-3%	-3%	0%	1.32E-02	2.13E-08
100	-2%	-4%	2%	1.32E-02	2.13E-06
400	-2%	-10%	9%	1.39E-02	3.41E-05
1000	-2%	-20%	22%	1.64E-02	2.13E-04
2000	-2%	-26%	32%	1.97E-02	8.52E-04
5000	-2%	-33%	47%	2.60E-02	5.29E-03
10000	-2%	-32%	44%	3.63E-02	2.07E-02
20000	-2%	-21%	23%	5.99E-02	7.60E-02
30000	-2%	-26%	32%	8.76E-02	1.51E-01
50000	-3%	-37%	53%	1.43E-01	3.07E-01
100000	-6%	-68%	197%	2.44E-01	5.78E-01

表 3.2-24 コイル特性比較 (キャブタイヤ線)

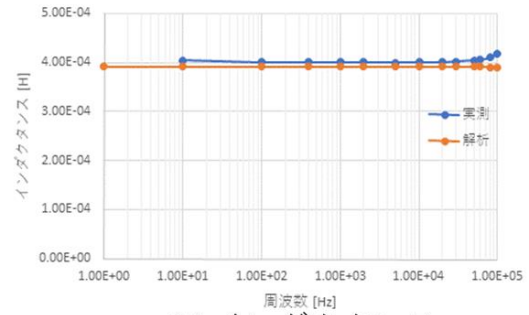
周波数 [Hz]	実測			解析		
	L [H]	R [Ω]	Q	L [H]	R [Ω]	Q
10	3.90E-04	1.23E-02	2.0	3.77E-04	1.26E-02	1.9
100	3.91E-04	1.28E-02	19.2	3.77E-04	1.32E-02	18.0
400	3.91E-04	1.58E-02	62.3	3.76E-04	1.82E-02	51.9
1000	3.90E-04	2.63E-02	93.2	3.75E-04	2.76E-02	85.2
2000	3.89E-04	4.37E-02	111.9	3.75E-04	3.85E-02	122.2
5000	3.88E-04	9.39E-02	129.8	3.74E-04	5.99E-02	196.3
10000	3.87E-04	1.61E-01	150.7	3.74E-04	8.40E-02	279.6
20000	3.87E-04	2.79E-01	174.2	3.74E-04	1.19E-01	395.7
30000	3.87E-04	4.34E-01	168.4	3.74E-04	1.47E-01	480.1
50000	3.89E-04	7.98E-01	153.4	3.74E-04	1.94E-01	606.3
100000	4.03E-04	2.35E+00	107.8	3.74E-04	2.75E-01	852.7

表 3.2-25 コイル特性誤差比較 (キャブタイヤ線)

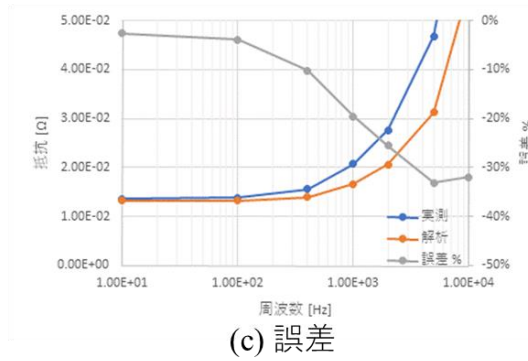
周波数 [Hz]	誤差			解析 R 内訳	
	L	R	Q	自己電流損 抵抗	外部磁場損 抵抗
10	-3%	2%	-6%	1.26E-02	4.46E-06
100	-4%	3%	-6%	1.28E-02	4.20E-04
400	-4%	15%	-17%	1.45E-02	3.70E-03
1000	-4%	5%	-9%	2.01E-02	7.54E-03
2000	-4%	-12%	9%	2.73E-02	1.13E-02
5000	-4%	-36%	51%	4.09E-02	1.89E-02
10000	-3%	-48%	86%	5.65E-02	2.76E-02
20000	-3%	-57%	127%	7.86E-02	4.02E-02
30000	-3%	-66%	185%	9.56E-02	5.12E-02
50000	-4%	-76%	295%	1.23E-01	7.10E-02
100000	-7%	-88%	691%	1.75E-01	1.00E-01



(a) コイル抵抗

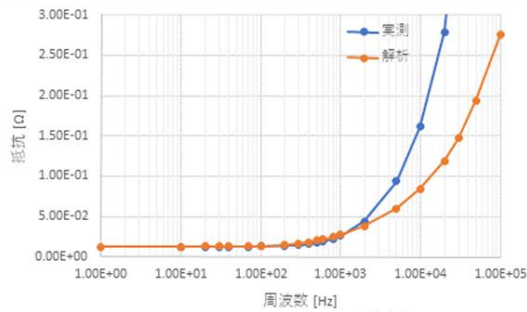


(b) インダクタンス

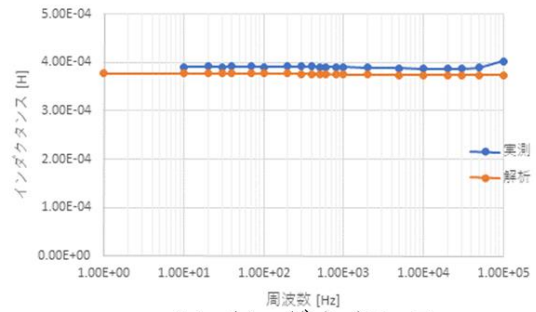


(c) 誤差

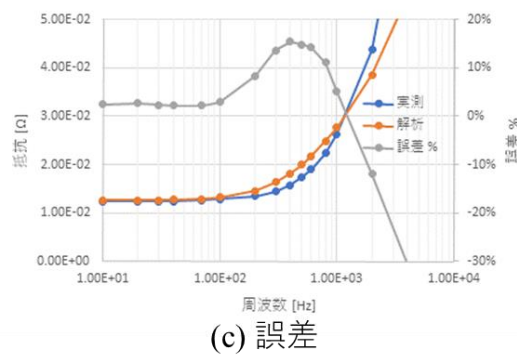
図 3.2-96 リッツ線 UEW07 コイル特性比較



(a) コイル抵抗



(b) インダクタンス



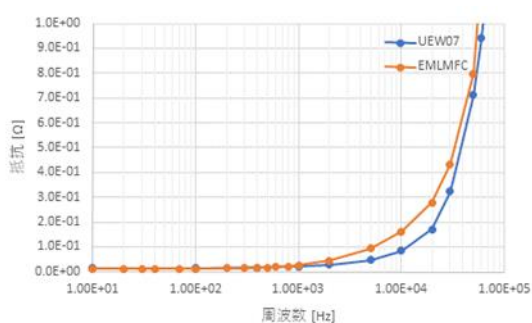
(c) 誤差

図 3.2-97 キャプタイヤ線 EM6600V コイル特性比較

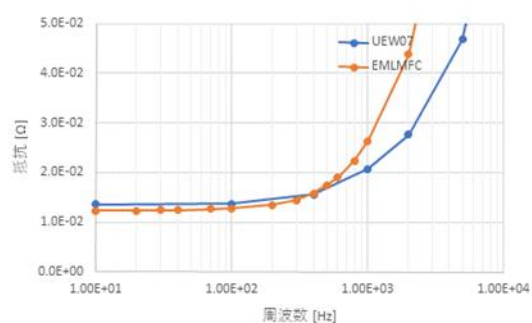
図 3.2-98、図 3.2-99 に線材の違いによるコイル抵抗の違いを示す。実測ではリッツ線と

キャブタイヤ線は 1~20kHz 付近まで差が大きくなり、それ以上で徐々に差が小さくなっていることがわかる。一方解析では 20kHz 以上でキャブタイヤ線のコイル抵抗は低い状態で推移し、リッツ線との差はかなり大きくなっていることがわかる。これは単芯モデルで解析を行ったことによる影響と考えられる。1kHz 付近でリッツ線とキャブタイヤ線のコイル抵抗を比較すると実測でも解析でもリッツ線の方が小さい（有利である）という結果になっている。ただ、解析の方が差が大きい結果となっているのは、前記推測が正しいとするとリッツ線には外部磁場によって素線間、バンドル間の渦電流が流れ、解析よりも大きいコイル抵抗になっている可能性があるということになる。

以上の結果から周波数帯によっては実測と解析の結果の乖離が大きくなっているが、1kHz 付近では線材比較で同じ傾向を示し、同程度のコイル特性を示していると考えられる。

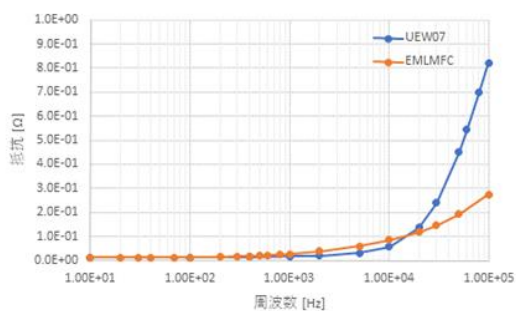


(a) 全体

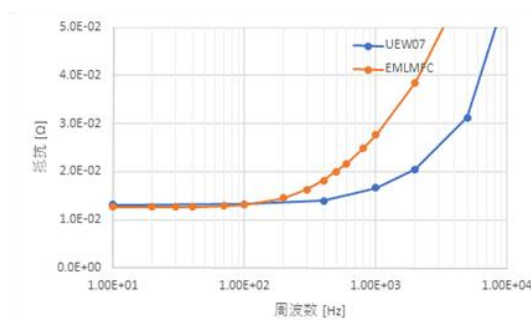


(b) 周波数一部拡大

図 3.2-98 線材比較（実測）



(a) 全体



(b) 周波数一部拡大

図 3.2-99 線材比較（解析）

3.2.6. 実機同等サイズのコイルモデルにおける電磁界シミュレーションの設定諸条件

ここでは図 3.2-100 に海中において、外周に配置した送電コイルから、送電コイルの内部に配置した AUV の受電コイルへの電力伝送系を、電磁界シミュレーションにより解析を行う。

解析に用いる電磁界シミュレーションは、Ansys 社 Maxwell を使用する。

図 3.2-100 と図 3.2-101 に、送電コイル、受電コイル、AUV を模擬した耐圧容器を有する解析モデルと、その断面のモデルを示す。

送電コイルは、パイプ内にコイル導体径 11.5 mm、線材外形 18 mm のケーブルが直径 2 m で 10 巻されており、1 m 間隔で 3 つ配置されている。受電コイルは、直径 460 mm、長さ 1040 mm のアルミ円柱（厚みは 7 mm で内部は空洞）の上に、厚み 5 mm、長さ 960 mm のフェライトシート上に、送電コイルと同じ線材で 20 巻されている。

解析空間は海水であり、解析空間端部の影響が出ない 6 m×6 m×6 m と十分な大きさを設定した。

コイル線材の材質は、導体部は銅、被覆部はゴムである。送電コイル部のパイプは、ポリエチレンである。シミュレーションに用いる各材質の電気定数は表 3.2-26 の通りである。誘電損失係数は、複素誘電率の実部と虚部の比、磁気損失係数は、複素透磁率の実部と虚部の比を示す。

コイルの励振条件は、図 3.2-100 の解析モデルに対して受電コイルが 3 kW 受電される、送電コイルに 26.0 A、受電コイルに 58.2 A を励振する。周波数は電力伝送実験を行う 1.5 kHz を中心に 0.1~10 kHz とした。

図 3.2-100 と図 3.2-101 の解析モデルは、本年度の実証実験に用いた系をモデル化したものであり、すでに送受電間電力伝送効率 80%以上を見込んでいる。この送受のコイルサイズを初期値として、より送受コイル間の電力伝送効率が向上するコイルサイズに最適化し、導出する。なお、ここでコイルサイズの最適化と表しているが、送電コイルのパイプ寸法や、受電コイルのアルミ及びフェライトの形状は変化させていない。最適化するのはコイルに使う電線の導体径と仕上り外径のみであり、電線の導体径や仕上り外径によってコイルの巻き長さ等が変化するため、コイルサイズと表している。

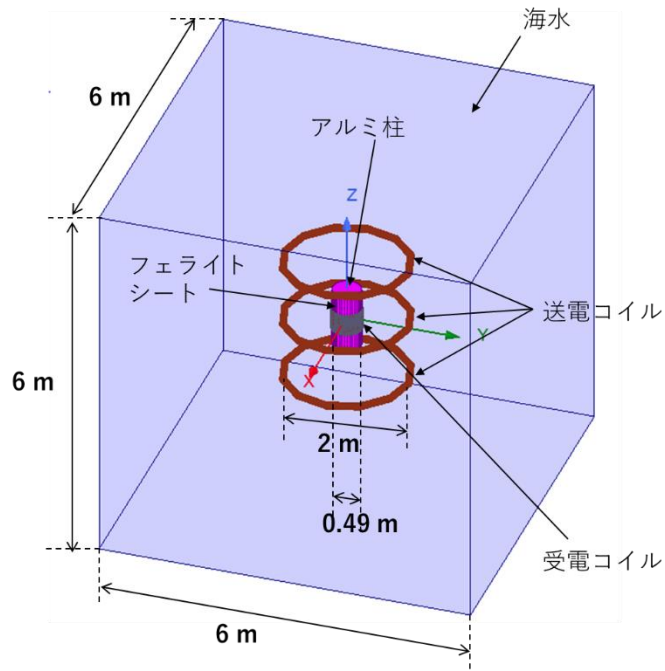


図 3.2-100 解析モデル

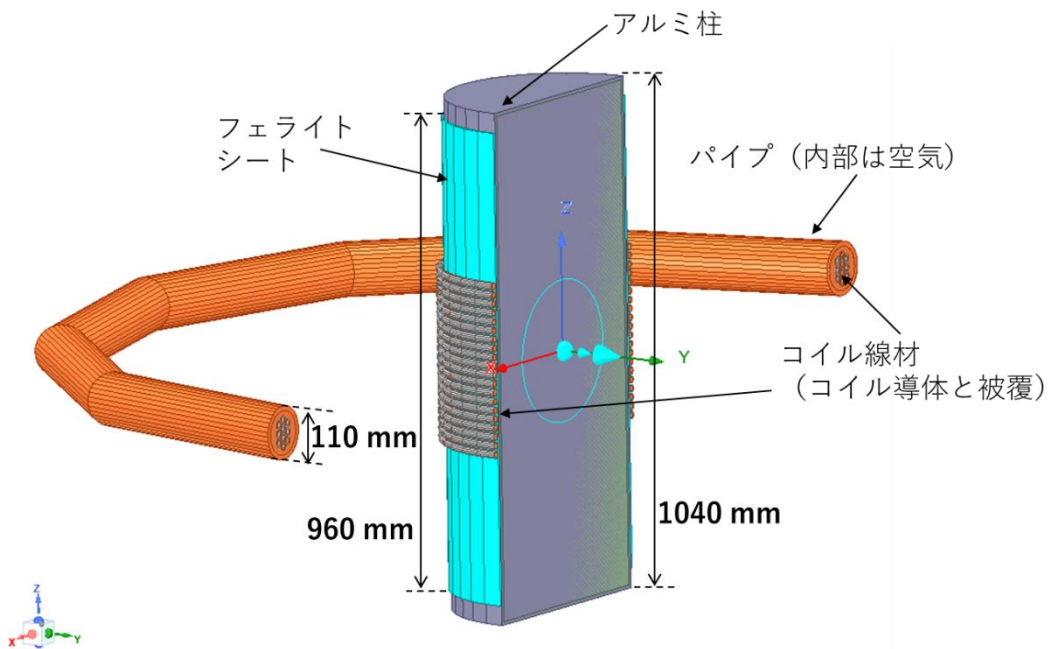


図 3.2-101 解析モデル (拡大断面図)

表 3.2-26 材料の電気特性

	導電率 (S/m)	比誘電率	比透磁率	誘電損失 係数	磁気損失 係数
空気	0	1.0	1.0	0	0
銅	5.8×10^7	1.0	1.0	0	0
アルミ	3.8×10^7	1.0	1.0	0	0
ポリエチレン	0	2.25	1.0	0.001	0
ゴム	1.0×10^{-15}	3.0	1.0	0	0
フェライト	0.25	1.0	3400	0	0.015
海水	5.0	78	1.0	0	0
鉛	5.0×10^6	1.0	1.0	0	0
ステンレス	1.1×10^6	1.0	1.0	0	0

3.2.6.1. 送電受電コイルのサイズ可変範囲

送電受電コイルの可変するサイズパラメータである導体径と仕上り外形を、送電コイルを図 3.2-102 に、受電コイルを図 3.2-103 に示す。導体径（コイルの芯線の直径）と、仕上り外形（外皮の直径）は、送受電コイルどちらも、サイズが変化しても隣り合う外皮同士は接触し、間隔が開かないものとする。

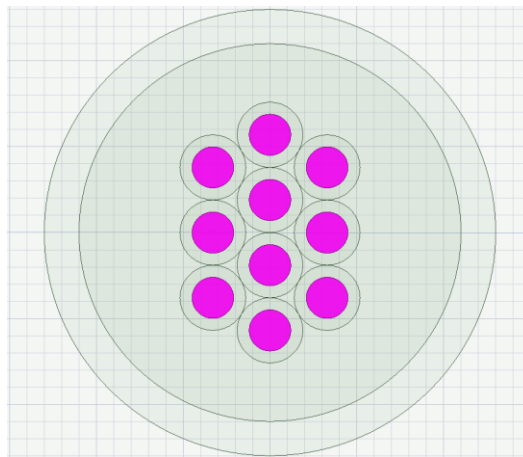


図 3.2-102 送電コイル 寸法可変箇所



図 3.2-103 受電コイル 寸法可変箇所

ここではまず、海中に配置した、送電コイル（外周の3連コイル）、受電コイル（AUVのコイル）のサイズパラメータを可変させた場合の各種電力伝送性能を電磁界シミュレーションにより確認し、送受電間の電力伝送効率を向上させるサイズを導出する。

コイル線材のサイズ可変範囲であるが、入手性を考慮し、市販の一般的な線材を想定する。図 3.2-104 と図 3.2-105 に線材の市販の線材カタログ 2 種類を示す。またカタログから抽出した可変する線材の導体径、仕上り外形の送電コイルの可変範囲を表 3.2-27 に、受電コイルの可変範囲を表 3.2-28 に示す。送電コイルは内径 110 mm のチューブへ 10 本の格納が可能な範囲として仕上り径 26 mm を最大値とし、受電コイルは長さ 960 mm のフェライトをはみ出さずにチューブへ 20 本の格納が可能な範囲として仕上り外径 47 mm を最大値とした。



図 3.2-104 住電 HST ケーブル株式会社

架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル 600V [記号：600V CV] 単芯

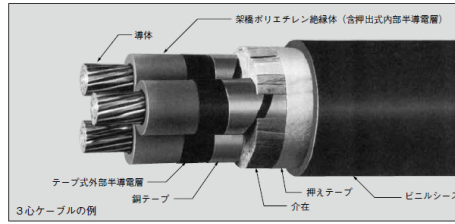
架橋ポリエチレン絶縁ビニルシース電力ケーブル

6600V

CV

難燃シース(F-CV)もあります。

- 規格：JIS C 3606
- 仕様書No.：HST-SS55-0000
(RoHS 2002/95/EC適合品)
- 用途：電力用
- 导体最高許容温度：90℃
- 線心識別：3心：白、赤、青
- シース色：黒を標準とする。



公称断面	导体形状	导体外径 (mm)	絶縁体径厚 (mm)	シース厚さ (mm)	仕上り外径 (約) (mm)	最大导体抵抗 (20℃) (Ω/km)	試験電圧 (kV/10分)	最小絶縁抵抗 (MΩ・km)	概算質量 (kg/km)	静電容量 (参考) (μF/km)	許容電流 基底温度 40℃ (A)
14	円形圧縮	4.4	4.0	1.8	17.5	1.31	17	2,500	385	0.24	105
22	円形圧縮	5.5	4.0	1.9	18.5	0.832	17	2,500	485	0.27	140
38	円形圧縮	7.3	4.0	2.0	21	0.481	17	2,000	680	0.32	195
60	円形圧縮	9.3	4.0	2.0	23	0.305	17	2,000	925	0.37	260
100	円形圧縮	12.0	4.0	2.1	26	0.183	17	1,500	1,400	0.45	355
150	円形圧縮	14.7	4.0	2.3	29	0.122	17	1,500	1,900	0.52	455
200	円形圧縮	17.0	4.5	2.4	32	0.0915	17	1,500	2,450	0.51	540
250	円形圧縮	19.0	4.5	2.5	35	0.0739	17	1,500	2,900	0.55	615
325	円形圧縮	21.7	4.5	2.6	38	0.0568	17	1,500	3,650	0.61	720
400	円形圧縮	24.1	4.5	2.7	40	0.0462	17	1,000	4,400	0.68	810
500	円形圧縮	26.9	4.5	2.8	43	0.0369	17	900	5,350	0.74	930
600	円形圧縮	29.5	5.0	2.9	47	0.0308	17	900	6,400	0.71	1,040

図 3.2-105 住電 HST ケーブル株式会社

架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル 6600V [記号：6600V CV] 単芯

表 3.2-27 送電コイルサイズの可変範囲 (線材の导体径、仕上り外形)

(a) 600V CV

600V	导体径 [mm]	仕上り外形 [mm]
単芯	1.8	6.4
	2.4	7.0
	3.0	8.0
	3.6	8.6
	4.4	9.4
	5.5	11.0
	7.3	13.0
	9.3	15.5
	12.0	19.0
	14.7	22.0
	17.0	26.0

(b) 6600V CV

6600V	导体径 [mm]	仕上り外形 [mm]
単芯	4.4	17.5
	5.5	18.5
	7.3	21.0
	9.3	23.0
	12.0	26.0

表 3.2-28 受電コイルサイズの可変範囲 (線材の導体径、仕上り外形)

(a) 600V CV			(b) 6600V CV		
600V	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	6600V	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]
単芯	1.8	6.4	単芯	4.4	17.5
	2.4	7.0		5.5	18.5
	3.0	8.0		7.3	21.0
	3.6	8.6		9.3	23.0
	4.4	9.4		12.0	26.0
	5.5	11.0		14.7	29.0
	7.3	13.0		17.0	32.0
	9.3	15.5		19.0	35.0
	12.0	19.0		21.7	38.0
	14.7	22.0		24.1	40.0
	17.0	26.0		26.9	43.0
	19.0	28.0		29.5	47.0
	21.7	31.0			
	24.1	34.0			
	26.9	38.0			
	29.5	41.0			
	34.0	47.0			

3.2.7. 電磁界シミュレーションでの最大有能電力効率の 導出

電磁界シミュレーションで導出する評価値は、
 送電コイルのインダクタ値：L1、抵抗値：R1、Q 値：Q1、
 受電側コイルのインダクタ値：L2、抵抗値：R2、Q 値：Q2、
 送受コイルで生じる、Q 値：Q、結合係数：k、kQ 積：kQ、最大有能電力効率： η_{max} を用いる。

1.5 kHz における解析結果を表 3.2-29～表 3.2-33 に示す。

まず送電コイルのサイズを初期値のまま固定し、受電コイルのサイズのみを可変する。
 表 3.2-29 は図 3.2-104、表 3.2-28 (a) の 600V CV の線材を想定したサイズパラメータ可変時の結果であり、表 3.2-30 は図 3.2-105、表 3.2-28 (b) の 6600V CV の線材を想定したサイズパラメータ可変時の結果である。

次に受電コイルのサイズを初期値のまま固定し、送電コイルのサイズのみを可変する。
 表 3.2-31 は図 3.2-104、表 3.2-27 (a) の 600V CV の線材を想定したサイズパラメータ可変時の結果であり、表 3.2-32 は図 3.2-105、表 3.2-27 (b) の 6600V CV の線材を想定したサイズパラメータ可変時の結果である。

受電コイルを可変した表 3.2-29 と表 3.2-30 では、最も高い最大有能電力効率： η_{max} が得られたコイルサイズで、必ずしも受電コイルの抵抗値：R2 が最小で、Q 値：Q2 が最大と

はならない。一方送電コイルを可変した表 3.2-31 と表 3.2-32 では、最も高い最大有能電力効率： η_{max} が得られたコイルサイズでは、送電コイルの抵抗値： R_1 が最小で、Q 値： Q_1 が最大となった。例えば表 3.2-31 で最大有能電力効率： $\eta_{max}=82.96\%$ の時、抵抗値： $R_1=363.35m\Omega$ で最小、Q 値： $Q_1=40.59$ で最大である。

最後に受電コイルのみ可変した表 3.2-29、表 3.2-30 と送電コイルのみを可変した表 3.2-31、表 3.2-32 でそれぞれ最大有能電力効率： η_{max} が得られた送受コイルサイズを組合せた場合の性能を、コイルサイズ初期値の結果と併記して表 3.2-33 に示す。最大有能電力効率： η_{max} は 81.98%から 83.79%と 1.81%の向上が確認された。また送受コイル共に抵抗値 R_1 、 R_2 が低下し、Q 値が向上し、結合係数の向上も確認できる。

また本手法によるコイルサイズ最適化の有効性が確認出来た。

表 3.2-29 受電コイルサイズ可変時の性能@1.5 kHz (送電コイル固定、線材:600V CV)

3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
12.0	19.0	1.8	6.4	1713.77	413.57	39.05	1165.00	298.65	36.76	37.89	0.18	6.90	74.92
		2.4	7.0	1713.77	413.57	39.06	1139.71	212.09	50.65	44.47	0.18	8.18	78.37
		3.0	8.0	1713.77	413.56	39.06	1102.69	174.12	59.69	48.28	0.19	9.02	80.15
		3.6	8.6	1713.77	413.55	39.06	1081.77	156.92	64.97	50.37	0.19	9.50	81.04
		4.4	9.4	1713.77	413.55	39.06	1055.51	148.31	67.08	51.18	0.19	9.76	81.49
		5.5	11.0	1713.77	413.54	39.06	1008.87	143.90	66.08	50.80	0.19	9.88	81.70
		7.3	13.0	1713.76	413.55	39.06	956.00	142.59	63.19	49.68	0.20	9.88	81.70
		9.3	15.5	1713.73	413.57	39.05	898.86	138.27	61.27	48.92	0.20	9.96	81.84
		12.0	19.0	1713.67	413.64	39.05	829.67	132.52	59.01	48.00	0.21	10.05	81.98
		14.7	22.0	1713.54	413.76	39.03	775.72	129.99	56.24	46.85	0.21	10.01	81.92
		17.0	26.0	1713.33	413.93	39.01	713.60	123.21	54.58	46.15	0.22	10.07	82.01
		19.0	28.0	1713.09	414.12	38.99	681.93	122.72	52.37	45.19	0.22	9.95	81.82
		21.7	31.0	1712.61	414.45	38.95	636.71	121.44	49.41	43.87	0.22	9.77	81.51
		24.1	34.0	1711.94	414.84	38.89	593.37	119.84	46.67	42.60	0.22	9.56	81.16
		26.9	38.0	1710.65	415.50	38.80	537.05	117.87	42.94	40.82	0.23	9.22	80.53
		29.5	41.0	1708.95	416.30	38.42	491.88	119.43	38.82	38.62	0.23	8.71	79.53
		34.0	47.0	1702.05	419.39	38.25	390.91	131.86	27.94	32.69	0.22	7.20	75.81

表 3.2-30 受電コイルサイズ可変時の性能@1.5 kHz (送電コイル固定、線材:6600V CV)

3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
12.0	19.0	4.4	17.5	1713.77	413.42	39.07	873.82	130.35	63.18	49.68	0.21	10.22	82.25
		5.5	18.5	1713.76	413.44	39.07	853.98	122.82	65.53	50.60	0.21	10.49	82.67
		7.3	21.0	1713.74	413.48	39.06	808.89	117.47	64.90	50.35	0.21	10.63	82.87
		9.3	23.0	1713.69	413.54	39.06	774.05	115.16	63.35	49.74	0.21	10.64	82.89
		12.0	26.0	1713.58	413.65	39.04	725.53	112.50	60.78	48.71	0.22	10.60	82.83
		14.7	29.0	1713.38	413.84	39.02	679.67	110.69	57.87	47.52	0.22	10.49	82.66
		17.0	32.0	1713.09	414.08	38.99	636.42	108.69	55.18	46.39	0.22	10.36	82.46
		19.0	35.0	1712.68	414.38	38.95	594.85	106.66	52.56	45.25	0.23	10.19	82.21
		21.7	38.0	1711.93	414.87	38.89	551.88	106.48	48.85	43.59	0.23	9.88	81.70
		24.1	40.0	1711.03	415.36	38.82	521.17	108.11	45.44	42.00	0.23	9.53	81.10
		26.9	43.0	1709.28	416.28	38.69	475.27	110.74	40.45	39.56	0.23	8.96	80.04
29.5	47.0	1705.44	418.35	38.70	410.25	118.11	32.74	35.59	0.22	7.96	77.84		

表 3.2-31 送電コイルサイズ可変時の性能@1.5 kHz (受電コイル固定、線材:600V CV)

3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
1.8	6.4	12.0	19.0	2171.65	1546.34	13.24	848.31	134.06	59.64	28.10	0.18	5.19	68.17
2.4	7.0			2130.12	998.07	20.11	848.31	134.07	59.63	34.63	0.19	6.46	73.45
3.0	8.0			2075.74	755.27	25.90	848.31	134.07	59.63	39.30	0.19	7.42	76.44
3.6	8.6			2042.85	639.05	30.13	848.30	134.08	59.63	42.38	0.19	8.07	78.09
4.4	9.4			2001.62	569.32	33.14	848.30	134.10	59.62	44.45	0.19	8.55	79.18
5.5	11.0			1933.89	521.55	34.95	848.30	134.13	59.61	45.64	0.20	8.93	79.97
7.3	13.0			1855.37	481.30	36.33	848.29	134.18	59.58	46.53	0.20	9.29	80.67
9.3	15.5			1777.91	442.01	37.91	848.27	134.22	59.56	47.52	0.20	9.70	81.39
12.0	19.0			1691.71	404.87	39.38	848.24	134.27	59.54	48.42	0.21	10.13	82.11
14.7	22.0			1627.61	382.57	40.10	848.19	134.32	59.52	48.85	0.21	10.42	82.56
17.0	26.0			1564.85	363.35	40.59	848.15	134.36	59.49	49.14	0.22	10.69	82.96

表 3.2-32 送電コイルサイズ可変時の性能@1.5 kHz (受電コイル固定、線材:6600V CV)

3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
4.4	17.5	12.0	19.0	1795.16	507.07	33.37	848.30	134.10	59.62	44.60	0.20	9.06	80.22
5.5	18.5			1765.15	451.76	36.82	848.30	134.13	59.60	46.85	0.20	9.59	81.21
7.3	21.0			1705.93	412.09	39.02	848.29	134.18	59.58	48.22	0.21	10.04	81.97
9.3	23.0			1659.18	391.10	39.98	848.27	134.22	59.56	48.80	0.21	10.31	82.39
12.0	26.0			1600.35	371.18	40.64	848.23	134.27	59.54	49.19	0.22	10.58	82.80

表 3.2-33 最適な送受コイルサイズ採用時の性能@1.5 kHz

	3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
最適化前	12.0	19.0	12.0	19.0	1713.67	413.64	39.05	829.67	132.52	59.01	48.00	0.21	10.05	81.98
両コイル最適化 (銅)	17.0	26.0	9.3	23.0	1564.81	364.58	40.45	773.77	115.79	62.98	50.48	0.22	11.30	83.79
両コイル最適化 (金)	17.0	26.0	9.3	23.0	1562.31	358.27	41.10	773.46	111.10	65.61	51.93	0.22	11.63	84.22

3.2.8. 最大有能電力効率の広帯域特性

図 3.2-106 には、受電コイルのサイズを固定し、送電コイルサイズを表 3.2-27 にしたがって可変した場合の最大有能電力効率： η_{max} を表 3.2-29、表 3.2-30 の 1.5 kHz を含め周波数特性を示す。

図 3.2-107 は、送電コイルのサイズを固定し、送電コイルサイズを表 3.2-28 にしたがって可変した場合の最大有能電力効率： η_{max} を表 3.2-31、表 3.2-32 の 1.5 kHz を含め周波数特性を示す。

図 3.2-108 は、送受コイルサイズ最適化前後での最大有能電力効率： η_{max} を表 3.2-33 の 1.5 kHz を含め周波数特性を示す。それぞれ 0.1~10 kHz で示す。図中の凡例は、コイルの導体径、仕上り外径となっている。

コイルサイズ可変時の最大有能電力効率の変化は、2 kHz 以下で大きく、高周波帯域において少ない。このためコイルサイズの設定は実験周波数である 1.5 kHz で重要な設計事項となる。

また 1.5 kHz 単一周波数での設計で高効率な最大有能電力効率を得られれば、広帯域においても高効率な最大有能電力効率を得られることが確認された。

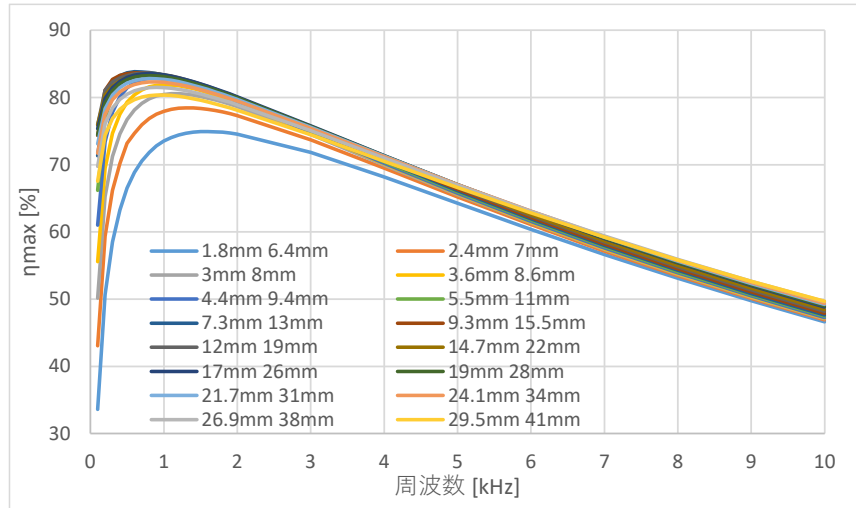


図 3.2-106 受電コイルサイズ可変時の η_{max} (送電コイルサイズ固定、線材：600V CV)

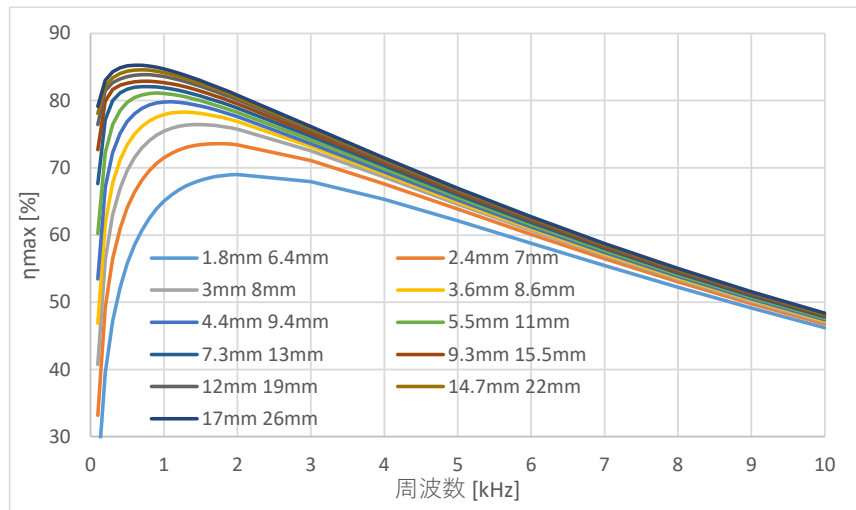


図 3.2-107 送電コイルサイズ可変時の η_{max} (受電コイルサイズ固定、線材：600V CV)

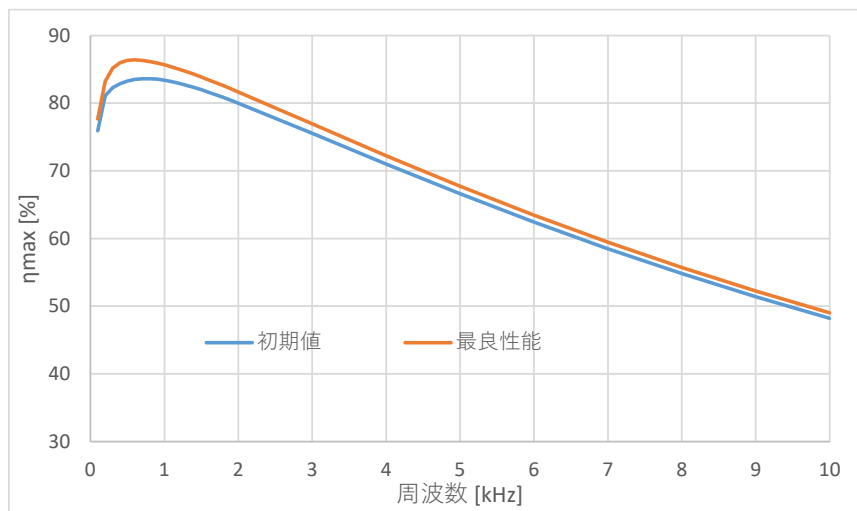


図 3.2-108 送電コイル最適化前後の η_{max}

3.2.9. 海中給電における電力損失の把握

送電、受電コイルサイズの最適化による最大有能電力効率： η_{\max} の最大化を実施したが、ここでは最大有能電力効率が低下する要因となる電力損失を把握すべく、表 3.2-29～表 3.2-33 で使用した代表的なコイルサイズにおける海中給電時の損失電力の内訳を把握する。

損失電力の内訳であるが、

◆海水、送電コイル、受電コイル、AUV の部位ごとに分けた損失

◆オーム損、誘電体損、磁気損の損失発生原因ごとに分けた損失

の 2 通りで表記する。表記は全損失電力の合計を 100%とし、2 通りでの損失内訳として単位[%]で表す。

表 3.2-34 は、表 3.2-29 で示した送電受電コイルサイズの初期値での結果である。

送電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

受電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

表 3.2-35 は、表 3.2-30 で示した受電コイルサイズ最適化での結果である。

送電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

受電コイル：導体径 9.3 mm、仕上り径 23.0 mm

表 3.2-36 は、表 3.2-31 で示した送電コイルサイズ最適化での結果である。

送電コイル：導体径 17.0 mm、仕上り径 26.0 mm

受電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

表 3.2-37 は、表 3.2-33 で示した送電受電コイル共にサイズ最適化での結果である。

送電コイル：導体径 17.0 mm、仕上り径 26.0 mm

受電コイル：導体径 9.3 mm、仕上り径 23.0 mm

また各サイズの損失内訳を、図 3.2-109 は各部位ごとに、図 3.2-110 は損失発生原因ごとに示した。図 3.2-111 は各送電受電コイルサイズでの インダクタ、抵抗、Q 値、結合係数、 η_{\max} を示す。

表 3.2-34 送電受電コイルサイズの初期値での損失電力

送電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

受電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]					単位[%]			
導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
12.0	19.0	12.0	19.0	62.49	10.03	16.64	10.84	100	98.20	0.01	1.79	100

表 3.2-35 受電コイルサイズ最適化での損失電力

送電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

受電コイル：導体径 9.3 mm、仕上り径 23.0 mm

3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]					単位[%]			
導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
12.0	19.0	9.3	23.0	65.28	10.71	12.41	11.59	100	98.15	0.01	1.84	100

表 3.2-36 送電コイルサイズ最適化での損失電力

送電コイル：導体径 17.0 mm、仕上り径 26.0 mm

受電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]					単位[%]			
導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
12.0	26.0	12.0	19.0	63.91	7.99	17.02	11.08	100	98.16	0.01	1.83	100

表 3.2-37 送電受電コイル共にサイズ最適化での損失電力

送電コイル：導体径 17.0mm、仕上り径 26.0mm

受電コイル：導体径 9.3mm、仕上り径 23.0mm

3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]					単位[%]			
導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
17.0	26.0	9.3	23.0	68.86	8.11	12.82	10.21	100	98.05	0.01	1.94	100

表 3.2-38 送電受電コイル共にサイズ最適化での損失電力（導体芯：金に変更）

送電コイル：導体径 17.0mm、仕上り径 26.0mm

受電コイル：導体径 9.3mm、仕上り径 23.0mm

3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]					単位[%]			
導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
17.0	26.0	9.3	23.0	65.01	9.35	14.42	11.21	100	98.16	0.01	1.83	100

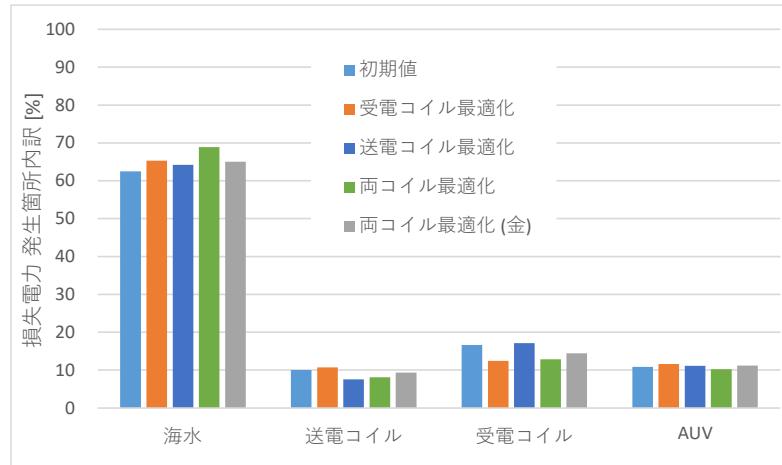


図 3.2-109 各部位における損失電力内訳

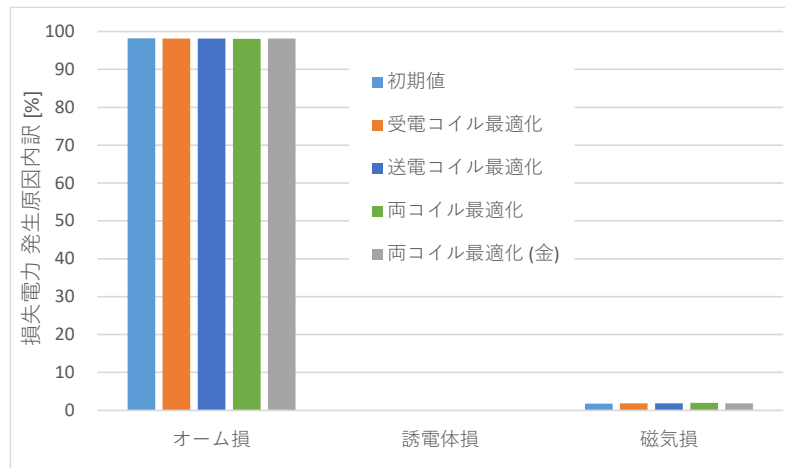


図 3.2-110 損失発生原因ごとの損失電力内訳

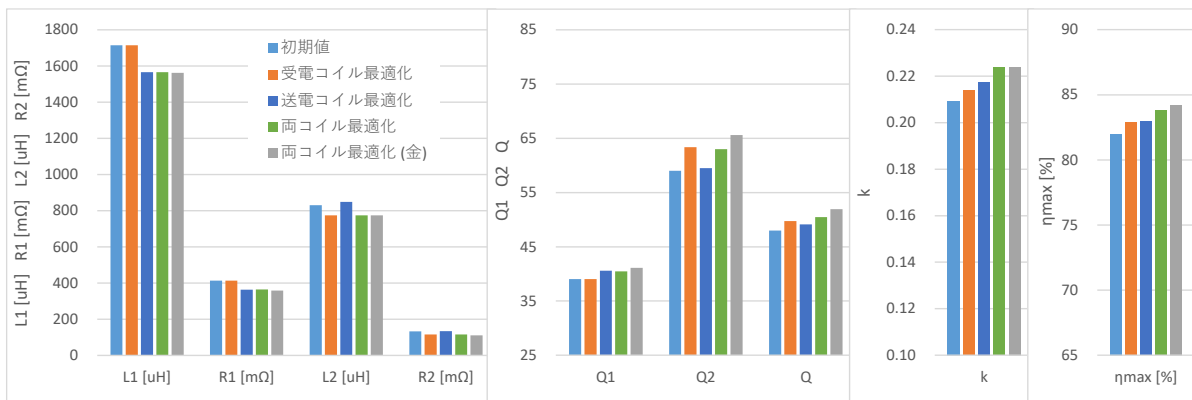


図 3.2-111 各送電受電コイルサイズでの インダクタ、抵抗、Q 値、結合係数、 η_{max}

図 3.2-111 より、送電コイル受電コイルの各単体のサイズ最適化、またその各コイルサイズ結果を組合せた両コイルサイズの最適化を実施することで損失電力の合計は低下しており、最大有能電力効率： η_{max} の最大化の理由となっている。

損失電力の内訳としては、最大の損失箇所は海水である。送受コイルサイズの最適化が行われても、海水が電力伝送路であることには変わりはないため、表 3.2-33、図 3.2-111 に示すように送電受電の両コイルのサイズ最適化によりこの部分の抵抗成分を低下させたことが最大有能電力効率 η_{\max} 向上の要因である。

また損失の主箇所である海水と送受電コイルは、図 3.2-110 よりオーム損が発生原因である。このオーム損を低減可能であれば最大有能電力効率向上が可能である。海水は唯一の電力伝搬路であり代替は困難である。そのため送電受電コイル共に芯の材質をより低損失ものに交換することで損失低減の対策とする。具体的には送受コイルの芯の材質をこれまでの銅から金に変更し、導電率が銅： 5.8×10^7 S/m から金： 6.3×10^7 S/m へ上昇することで、コイルの芯部分のオーム損の低減を実施する。送受コイルサイズ最適化後のモデルに芯材を金にした結果を表 3.2-33、表 3.2-38、図 3.2-109～図 3.2-111 に追加する。送受コイル共に最適化された同サイズの銅を用いたコイルに対して、最大有能電力効率 η_{\max} は 0.4%の向上が得られた。これは送電コイルの抵抗値 R_1 が $6.31 \text{ m}\Omega$ 、受電コイルの抵抗値 R_2 が $4.69 \text{ m}\Omega$ それぞれ低減したことによる、オーム損低減と考えられる。

また次章では、より詳細に損失電力の発生箇所を視覚的に把握する。

3.2.10. 損失電力発生箇所の確認

図 3.2-112 に近傍の海水を含め電力伝送装置の損失箇所を損失電力の合計で示す。

(a)は最適化前の送電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

受電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

(b)は送電受電コイル共に最適化後の送電コイル：導体径 17.0 mm、仕上り径 26.0 mm

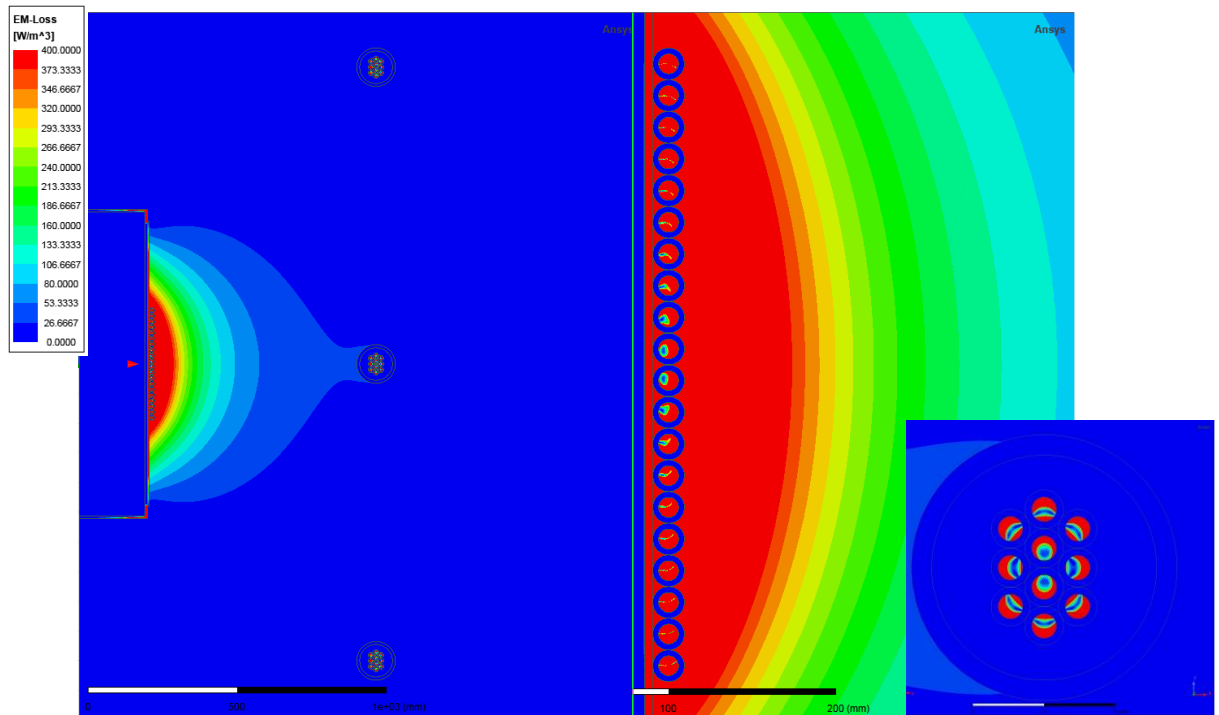
受電コイル：導体径 9.3 mm、仕上り径 23.0 mm

であり、図は左から全体、受電コイルの断面、中央の送電コイルの断面である。

まず海水での損失電力発生であるが、両コイルモデル共に、電力伝搬路である海水部分の損失分布に存在し、図 3.2-109 より 60～70%の損失電力内訳として存在する。

送電コイルの断面であるが、サイズ最適化前後のどちらのコイルサイズも表皮効果により芯線外側での損失が大きい。最適化後は芯線径が大きく断面積拡大による単位面積あたりの通過電力が低減したことが損失電力低減となっていると考察できる。ただし芯線径拡大は、表 3.2-31、表 3.2-32 より送電コイルのインダクタ値が低下し、所望のインダクタ値が得られない懸念がある。送電コイルの芯線径の拡大による損失電力低下や最大有能電力効率向上の飽和を今後見極める必要がある。

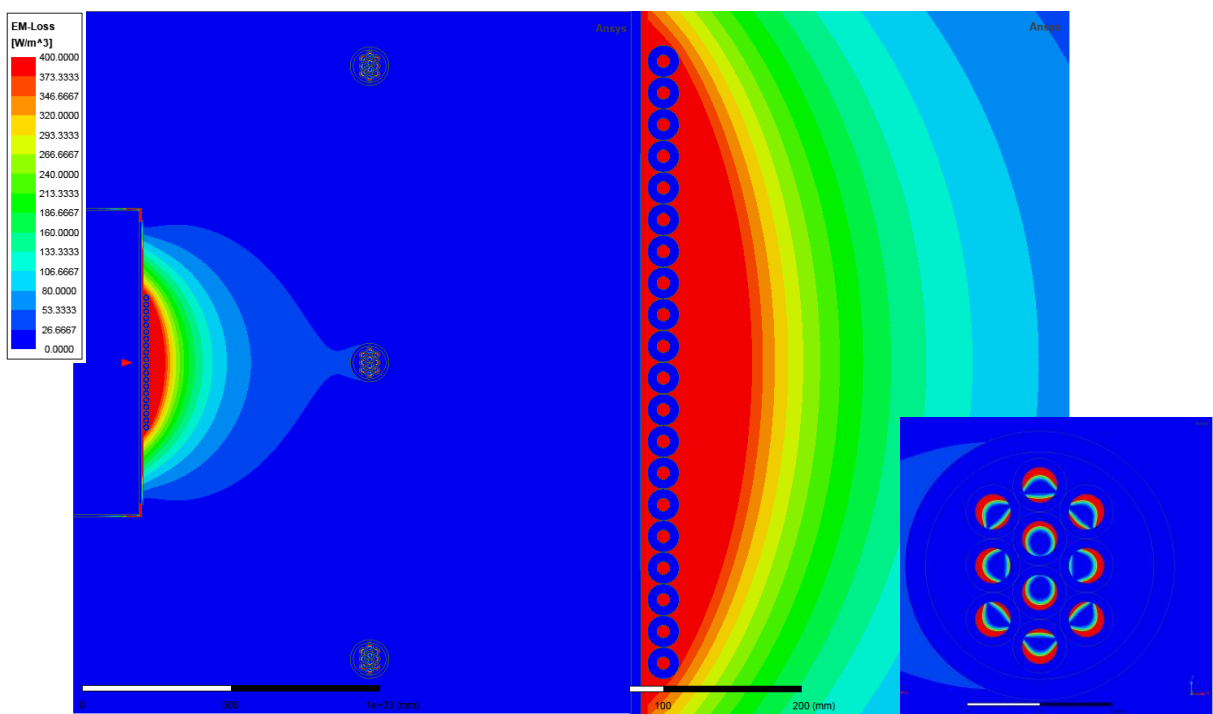
受電コイルの断面であるが、サイズ最適化前後どちらのコイルサイズも表皮効果により芯線外側での損失が大きい。これは送電コイルと同特性である。ただし送電コイルと異なりより細い芯線径の最適化後が低損失となっており、また表 3.2-29、表 3.2-30 より最大有能電力効率 η_{\max} が最大となる芯線径の最適値の存在が確認された。



(a) 最適化前

送電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm

受電コイル：導体径 12.0 mm、仕上り径 19.0 mm



(b) 最適化後

送電コイル：導体径 17.0mm、仕上り径 26.0mm

受電コイル：導体径 9.3mm、仕上り径 23.0mm

図 3.2-112 全体、受電コイル断面、送電コイル断面での合計損失電力

3.2.11. 海中給電装置近傍物体の充電効率への影響

これまで海中給電装置の検討は、装置の6面共に海水を満たした状態での検討を行ってきた。実際の運用状態を考慮すると、装置が海面、海底の土壌、金属近傍に配置された場合や以上の媒質に囲まれた状態での運用も考えられ、各種周辺状態における充電性能への影響を確認する必要がある。

ここでは海中給電装置の5面を海水とし1面に空気、土、金属を近接した場合の各種性能と、海中給電装置の1面を海水とし5面に土、金属を近接した場合の各種性能を、電磁界シミュレーションにより検討する。送受電コイルサイズはすべて初期値を用いた。

3.2.11.1. 海中給電装置近傍の1面に物体を配置した場合

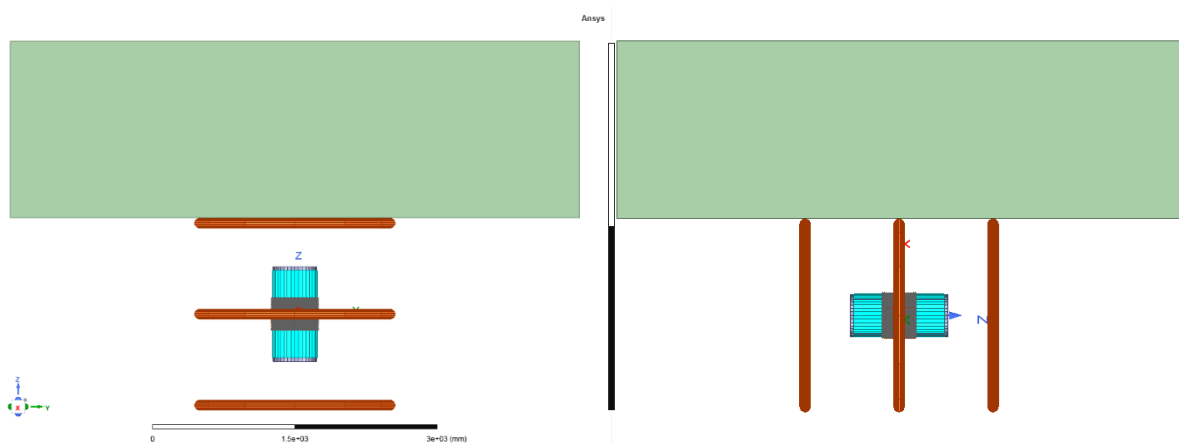
図 3.2-113 に示すように、装置近傍の1面への物体の置き方として2通りを示す。残り5面は海水で満たしている。また海中給電装置と物体の距離を、物体なし、1445 mm、945 mm、445 mm、0 mm（装置と物体が接触）と可変した場合での各種性能を検討する。

表 3.2-39 にコイル上部の1面を空気と近接させた場合、表 3.2-40 にコイル側面の1面を空気と近接させた場合、表 3.2-41 にコイル上部の1面を土と近接させた場合、表 3.2-42 にコイル側面の1面を土と近接させた場合、表 3.2-43 にコイル上部の1面を金属と近接させた場合、表 3.2-44 にコイル側面の1面を金属と近接させた場合のインダクタ、抵抗、Q値、結合係数、最大有能電力効率 η_{max} と各種損失電力の内訳を%表示で示す。

媒質定数は以下とした。

土：導電率 0 S/m 比誘電率 13.0 比透磁率 1.0 誘電損失係数 0.29 磁気損失係数 0

金属（ステンレス）：導電率 1.1×10^6 S/m 比誘電率 1.0 比透磁率 1.0 誘電損失係数 0 磁気損失係数 0



(a) 1面に物体近接その1（コイル上部） (b) 1面に物体近接その2（コイル側面）

図 3.2-113 海中給電装置と近接物体の配置関係（図は装置と物体が接触状態）

表 3.2-39 コイル上部の1面を空気と近接させた場合

1面海面近接その1 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η max [%]
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
空気なし	12.0	19.0	12.0	19.0	1637.88	311.61	49.54	851.15	113.53	70.66	59.16	0.21	12.21	84.9
1445					1640.25	313.00	49.39	853.06	113.72	70.70	59.09	0.21	12.20	84.9
945					1640.00	312.06	49.53	853.10	114.94	69.95	58.86	0.21	12.16	84.8
445					1640.13	306.56	50.42	853.30	114.62	70.16	59.48	0.21	12.28	85.0
0					1640.19	294.09	52.56	853.31	114.59	70.18	60.74	0.21	12.54	85.3

1面空気近接その1 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]						単位[%]			
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	近接物	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
空気なし	12.0	19.0	12.0	19.0	64.97	10.41	16.41	8.21	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
1445					64.59	10.37	16.53	8.50	0.00	100	97.80	0.00	2.20	100
945					64.80	10.44	16.62	8.15	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
445					64.37	10.54	16.73	8.36	0.00	100	97.76	0.00	2.24	100
0					63.48	10.79	17.19	8.54	0.00	100	97.72	0.00	2.28	100

表 3.2-40 コイル側面の1面を空気と近接させた場合

1面海面近接その2 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η max [%]
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
空気なし	12.0	19.0	12.0	19.0	1637.88	311.61	49.54	851.15	113.53	70.66	59.16	0.21	12.21	84.9
1445					1640.21	311.79	49.58	852.52	114.49	70.18	58.99	0.21	12.17	84.9
945					1640.02	309.21	49.99	853.03	114.71	70.09	59.19	0.21	12.22	84.9
445					1640.17	300.74	51.40	853.11	113.94	70.56	60.23	0.21	12.43	85.2
0					1640.42	279.09	55.40	853.14	113.50	70.84	62.65	0.21	12.94	85.7

1面空気近接その2 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]						単位[%]			
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	近接物	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
空気なし	12.0	19.0	12.0	19.0	64.97	10.41	16.41	8.21	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
1445					64.74	10.40	16.49	8.37	0.00	100	97.79	0.00	2.21	100
945					64.61	10.53	16.70	8.16	0.00	100	97.76	0.00	2.24	100
445					63.30	10.89	17.47	8.34	0.00	100	97.68	0.00	2.32	100
0					61.77	11.32	18.10	8.82	0.00	100	97.60	0.00	2.40	100

表 3.2-41 コイル上部の1面を土と近接させた場合

1面土近接その1 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η max [%]
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
土なし	12.0	19.0	12.0	19.0	1637.88	311.61	49.54	851.15	113.53	70.66	59.16	0.21	12.21	84.9
1445					1640.34	313.46	49.32	853.35	114.82	70.05	58.78	0.21	12.14	84.8
945					1640.15	312.53	49.46	853.08	114.73	70.08	58.87	0.21	12.16	84.8
445					1640.32	308.01	50.19	853.56	115.18	69.84	59.21	0.21	12.23	84.9
0					1640.07	293.36	52.69	853.40	114.58	70.20	60.82	0.21	12.56	85.3

1面土近接その1 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]						単位[%]			
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	近接物	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
土なし	12.0	19.0	12.0	19.0	64.97	10.41	16.41	8.21	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
1445					64.95	10.44	16.61	8.00	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
945					64.69	10.42	16.59	8.30	0.00	100	97.79	0.00	2.21	100
445					64.44	10.48	16.68	8.39	0.00	100	97.77	0.00	2.23	100
0					63.39	10.77	17.19	8.65	0.00	100	97.72	0.00	2.28	100

表 3.2-42 コイル側面の1面を土と近接させた場合

1面土近接その2 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
土なし	12.0	19.0	12.0	19.0	1637.88	311.61	49.54	851.15	113.53	70.66	59.16	0.21	12.21	84.9
1445					1640.30	312.06	49.54	852.83	114.84	69.99	58.89	0.21	12.15	84.8
945					1640.03	309.23	49.98	853.02	114.69	70.10	59.19	0.21	12.22	84.9
445					1640.33	300.88	51.38	853.30	114.15	70.45	60.17	0.21	12.43	85.1
0					1640.04	277.79	55.64	852.74	112.31	71.56	63.10	0.21	13.02	85.8

1面土近接その2 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]						単位[%]			
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	近接物	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
土なし	12.0	19.0	12.0	19.0	64.97	10.41	16.41	8.21	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
1445					64.79	10.44	16.58	8.19	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
945					64.71	10.49	16.64	8.15	0.00	100	97.76	0.00	2.24	100
445					62.78	11.02	17.65	8.55	0.00	100	97.66	0.00	2.34	100
0					62.02	11.21	17.91	8.87	0.00	100	97.62	0.00	2.38	100

表 3.2-43 コイル上部の1面を金属（ステンレス）と近接させた場合

1面金属近接その1 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
金属なし	12.0	19.0	12.0	19.0	1637.88	311.61	49.54	851.15	113.53	70.66	59.16	0.21	12.21	84.9
1445					1636.87	309.50	49.84	852.91	114.21	70.38	59.23	0.21	12.21	84.9
945					1622.70	297.24	51.45	852.40	110.79	72.51	61.08	0.20	12.50	85.2
445					1566.52	275.71	53.55	850.88	112.18	71.48	61.87	0.20	12.37	85.1
0					1252.11	354.82	33.26	843.71	109.08	72.90	49.24	0.19	9.19	80.5

1面金属近接その1 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]						単位[%]			
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	近接物	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
金属なし	12.0	19.0	12.0	19.0	64.97	10.41	16.41	8.21	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
1445					64.36	10.50	16.77	8.35	0.02	100	97.77	0.00	2.23	100
945					63.88	10.75	17.10	8.16	0.11	100	97.73	0.00	2.27	100
445					61.12	11.40	18.09	8.50	0.89	100	97.62	0.00	2.38	100
0					48.54	12.13	18.53	6.65	14.14	100	97.82	0.00	2.18	100

表 3.2-44 コイル側面の1面を金属（ステンレス）と近接させた場合

1面金属近接その2 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
金属なし	12.0	19.0	12.0	19.0	1637.88	311.61	49.54	851.15	113.53	70.66	59.16	0.21	12.21	84.9
1445					1636.15	309.61	49.81	852.67	114.78	70.01	59.05	0.21	12.15	84.8
945					1626.90	304.99	50.27	851.88	114.15	70.34	59.47	0.20	12.15	84.8
445					1609.43	306.81	49.44	850.71	113.71	70.51	59.04	0.20	11.91	84.6
0					1560.14	335.14	43.87	846.78	114.66	69.60	55.26	0.20	10.88	83.2

1面金属近接その2 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]						単位[%]			
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	近接物	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
金属なし	12.0	19.0	12.0	19.0	64.97	10.41	16.41	8.21	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
1445					64.54	10.54	16.67	8.23	0.02	100	97.77	0.00	2.23	100
945					64.31	10.64	16.82	8.18	0.05	100	97.75	0.00	2.25	100
445					63.97	10.75	17.25	7.88	0.15	100	97.74	0.00	2.26	100
0					64.86	10.16	16.20	7.38	1.39	100	97.90	0.00	2.10	100

2通りの方法で送電コイル1面に近接物体（空気、土、金属）を配置した本検討は、空気は装置を海面に近接した場合を想定、土や金属は装置を海底に配置した場合を想定している。

空気、土の場合、送電コイルと物体が接触した2通りどちらの状態においても、物体がない状態と同等の最大有能電力効率を得られることを確認した。

金属の場合、物体がない状態と比較し送電コイルと金属が接触したその1では最大有能電力効率が4.4%の低下、その2では1.7%の低下となった。この場合の損失要因はその1の場合、近接金属により、送電コイルによるオーム損が増加したことであり。またその2の場合、近接金属で発生するオーム損である。しかし金属と送電コイルを445 mm 離し

た場合、どちらの配置方法でも物体がない状態と同等の最大有能電力効率を確認した。

また土を近接した場合、土による電力損失は微小であり最大有能電力効率に影響を与えないことを確認した。

3.2.11.2. 海中給電装置近傍の5面に物体を配置した場合

図 3.2-114 に装置近傍5面へ土または金属（ステンレス）を配置した状態を示す。残り1面は海水で満たしている。また海中給電装置と物体の距離を5面同時に、物体なし、1445 mm、945 mm、445 mm、0 mm（装置と物体が接触）と可変した場合での各種性能を検討する。

表 3.2-45 に土と、表 3.2-46 に金属と近接させた場合のインダクタ、抵抗、Q 値、結合係数、最大有能電力効率 η_{max} と各種損失電力の内訳を%表示で示す。

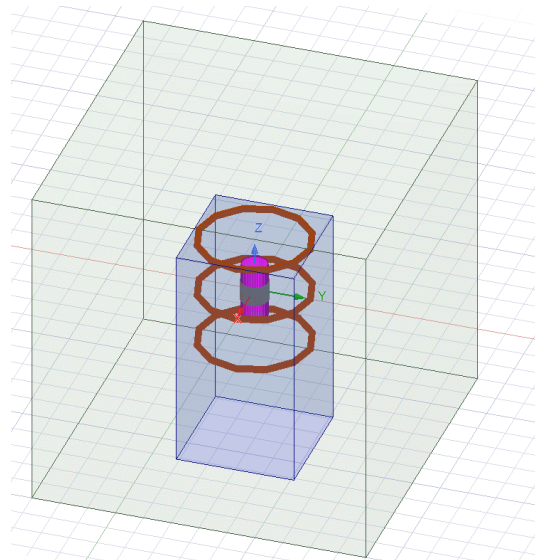


図 3.2-114 海中給電装置5面と近接物体の配置関係（図は装置と物体が5面で接触状態）

表 3.2-45 コイル5面を土と近接させた場合

5面土 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
土なし	12.0	19.0	12.0	19.0	1637.88	311.61	49.54	851.15	113.53	70.66	59.16	0.21	12.21	84.9
1445					1640.58	309.83	49.91	853.40	114.92	69.99	59.10	0.21	12.20	84.9
945					1640.09	298.40	51.80	853.07	112.61	71.39	60.81	0.21	12.55	85.3
445					1640.17	269.17	57.43	853.14	111.42	72.17	64.38	0.21	13.28	86.0
0					1639.81	214.34	72.10	853.08	107.51	74.79	73.43	0.21	15.16	87.6

5面土 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]					単位[%]				
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	近接物	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
土なし	12.0	19.0	12.0	19.0	64.97	10.41	16.41	8.21	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
1445					64.44	10.44	16.90	8.22	0.00	100	97.77	0.00	2.23	100
945					63.80	10.63	17.06	8.51	0.00	100	97.74	0.00	2.26	100
445					61.54	11.28	18.06	9.12	0.00	100	97.61	0.00	2.39	100
0					55.88	12.94	20.56	10.62	0.00	100	97.27	0.00	2.73	100

表 3.2-46 コイル5面を金属（ステンレス）と近接させた場合

5面金属 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		3連コイル TX1			AUV RX2			Q	k	kQ	η_{max} [%]
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2				
金属なし	12.0	19.0	12.0	19.0	1637.88	311.61	49.54	851.15	113.53	70.66	59.16	0.21	12.21	84.9
1445					1619.68	288.17	52.97	851.72	111.60	71.93	61.73	0.20	12.55	85.3
945					1564.59	253.58	58.15	848.18	109.62	72.92	65.12	0.20	12.72	85.5
445					1414.42	203.63	65.47	838.03	103.16	76.56	70.80	0.17	12.21	84.9
0					878.41	301.81	27.43	807.89	93.31	81.60	47.31	0.10	4.93	66.8

5面金属 コイルとの距離[mm]	3連コイル TX1		AUV RX2		単位[%]						単位[%]			
	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	導体径 [mm]	仕上り外形 [mm]	海水	送電コイル	受電コイル	AUV	近接物	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計
金属なし	12.0	19.0	12.0	19.0	64.97	10.41	16.41	8.21	0.00	100	97.78	0.00	2.22	100
1445					62.91	10.85	17.45	8.67	0.11	100	97.70	0.00	2.30	100
945					59.34	12.13	19.26	8.82	0.44	100	97.50	0.00	2.50	100
445					51.59	14.20	22.26	9.22	2.73	100	97.25	0.00	2.75	100
0					29.28	15.50	23.10	5.54	26.59	100	97.68	0.00	2.32	100

表 3.2-45、表 3.2-46 に示した、海水のみ、5面土、5面金属での、各部位における損失電力内訳を図 3.2-115 に、損失発生原因ごとの損失電力内訳を図 3.2-116 に、電受電コイルサイズにおける インダクタ、抵抗、Q 値、結合係数、 η_{max} を図 3.2-117 に示す。近接物とコイルは接触状態である。

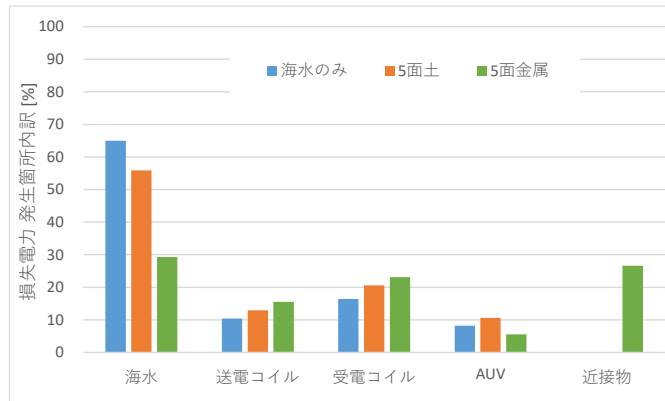


図 3.2-115 各部位における損失電力内訳（5面近接物配置近接物と送電コイル接触）

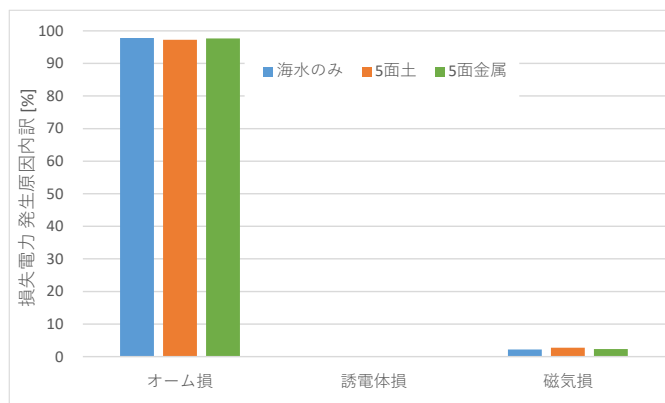


図 3.2-116 損失発生原因ごとの損失電力内訳（5面近接物配置 近接物と送電コイル接触）

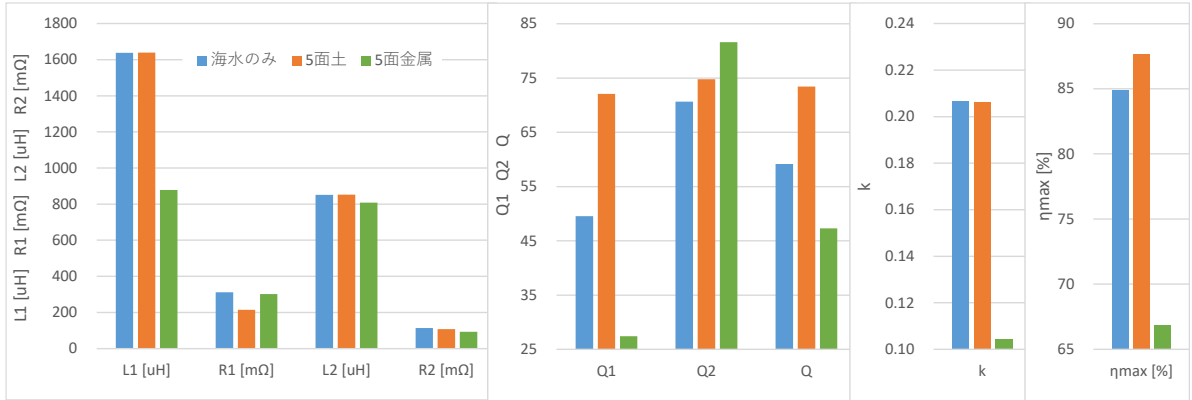


図 3.2-117 送電受電コイルサイズにおける インダクタ、抵抗、Q 値、結合係数、
 η_{max} (5 面近接物配置 近接物と送電コイル接触)

表 3.2-45、表 3.2-46 に示した、海水のみ、5 面土、5 面土金属での、各部位における損失電力内訳を図 3.2-118 に、損失発生原因ごとの損失電力内訳を図 3.2-119 に、電受電コイルサイズにおける インダクタ、抵抗、Q 値、結合係数、 η_{max} を図 3.2-120 に示す。近接物とコイルの距離は 445 mm である。

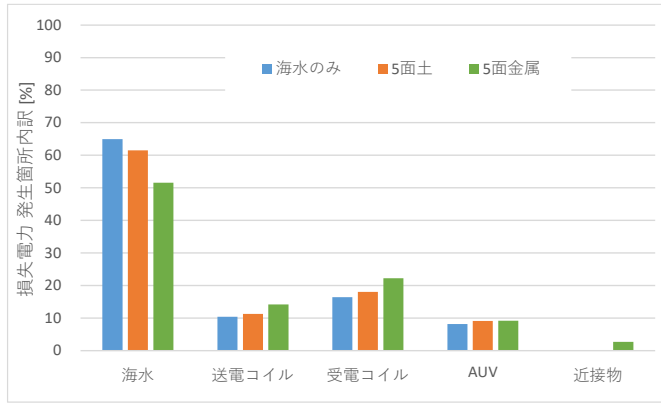


図 3.2-118 各部位における損失電力内訳 (5 面近接物配置 近接物と送電コイル 445 mm)

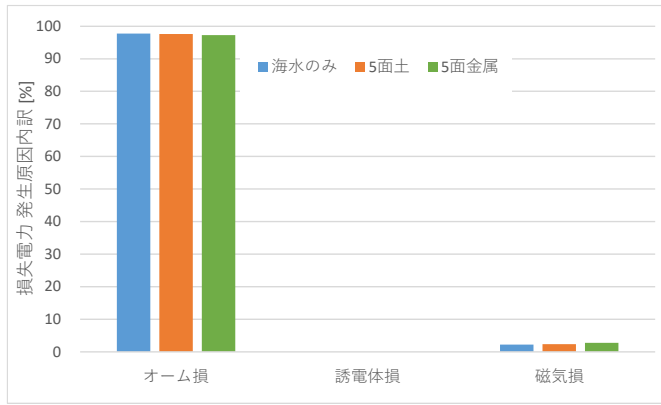


図 3.2-119 損失原因ごとの損失電力内訳 (5 面近接物配置 近接物と送電コイル 445 mm)

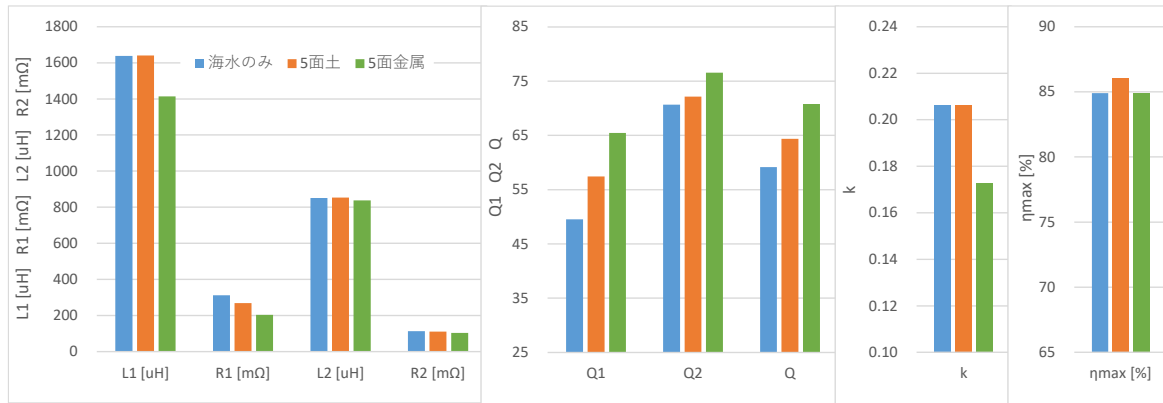


図 3.2-120 送電受電コイルサイズにおける インダクタ、抵抗、Q 値、結合係数、 η_{max} (5 面近接物配置 近接物と送電コイル 445 mm)

表 3.2-45、表 3.2-46 で性能を示した 5 面を物体で送電コイルと物体が接触するように囲んだ場合の磁界分布と損失合計を示す図を、図 3.2-121 は土の場合、図 3.2-122 は金属の場合で示す。

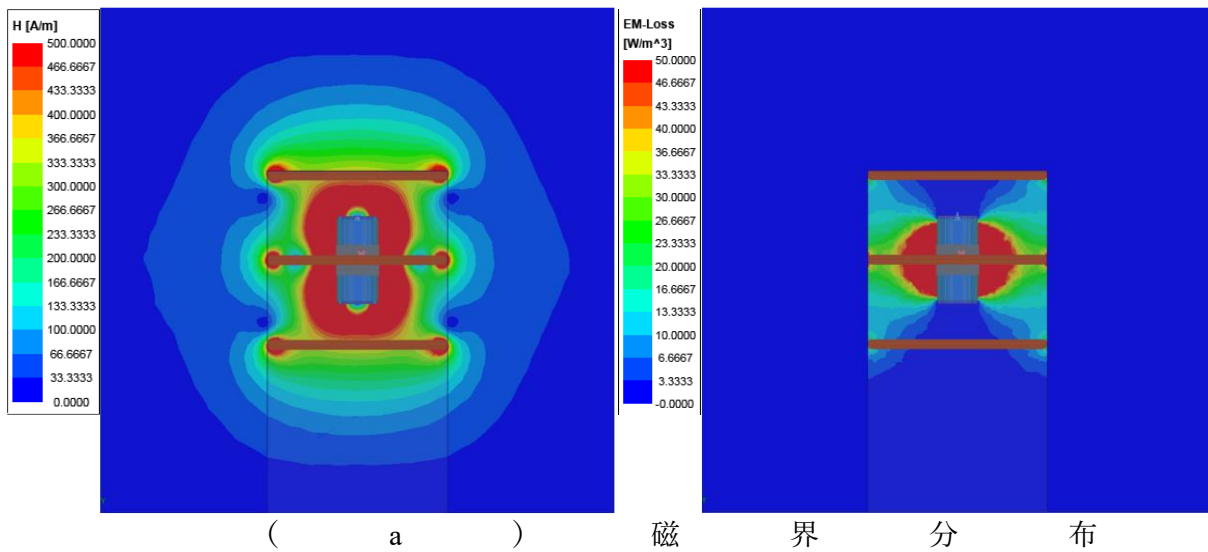


図 3.2-121 送電コイルを土が接触するように囲んだ場合の磁界分布と損失合計

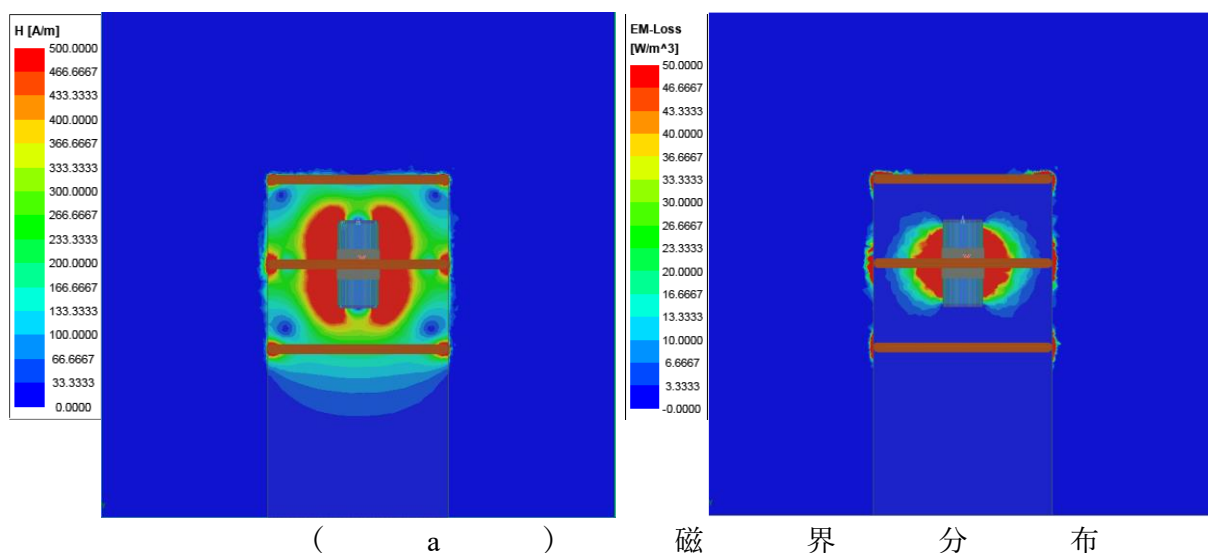


図 3.2-122 送電コイルを金属が接触するように囲んだ場合の磁界分布と損失合計

充電装置を囲む 1 面のみを海水とし、残り 5 面を土または金属と設定した。これは充電装置に AUV が侵入するために 1 面のみ海水とし、残り 5 面を物体とすることで、6 面共に海水の理想状態から比較し、最も電磁界の影響を受ける解析モデルとして提案した。

5 面に近接する物体が土の場合、送電コイルと物体が接触した状態においても、近接物体がない海水中の状態と同等の最大有能電力効率が得られることを確認した。これは土での電力損失が微小なためであり、1 面だけに土が接続した場合と同様である。

5 面の近接物体が金属の場合、物体がない状態と比較し送電コイルと金属が接触した場合では最大有能電力効率が 18.1% の低下となった。図 3.2-122 に示すように、この損失要因は、送電コイルに近接した金属部分でのオーム損の発生と、磁界分布が主に受電コイルに近い海水部分に集中するため、受電コイルによるオーム損が増加した、2 つの要因のためである。しかし金属と送電コイルを 5 面共に 445 mm 離れた場合、どちらの配置方法でも近接金属がない状態と同等の最大有能電力効率を確認した。

3.2.12. AUV の配置位置（回転）条件による電力伝送効率

AUV は一般的に、海中において自律的に一定の場所の停留位置を留まることが可能である。しかし海流の強度や駆動電源の消耗により、機能が働かず、送電コイルの中で AUV の位置や向きが変動することも考えられる。そのためここでは送電コイル内に AUV が存在するが、図 3.2-123 のように AUV が X、Y、Z の 3 方向に送電コイル中心に配置されているが Y 軸に 0 から 90 度回転の範囲で回転した場合の各種性能と、図 3.2-124 のように AUV が Y、Z の 3 方向に送電コイル中心に配置されているが Z 方向に 1m オフセットし、Y 軸に 0 から 90 度回転の範囲で回転した場合の各種性能をそれぞれ表 3.2-47 と表 3.2-48 にまとめる。

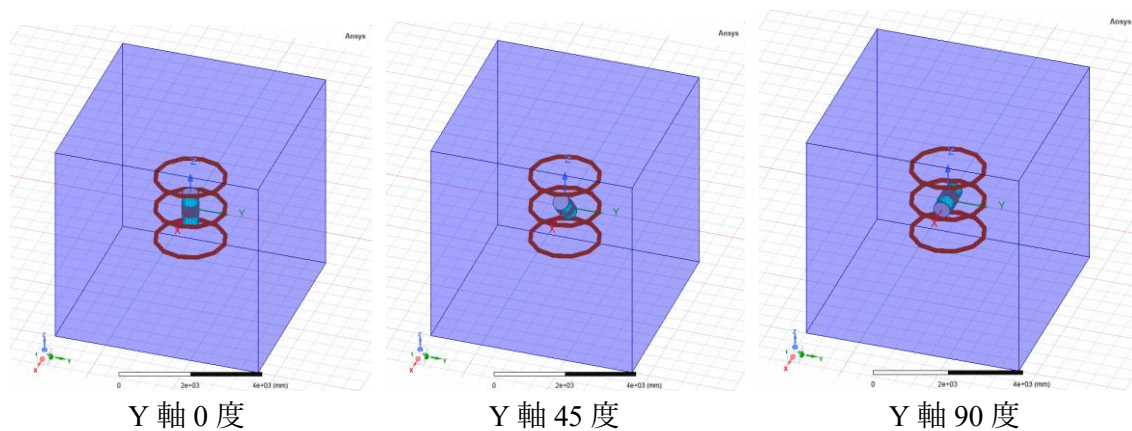


図 3.2-123 X、Y、Z 方向 0m における、AUV の回転状態

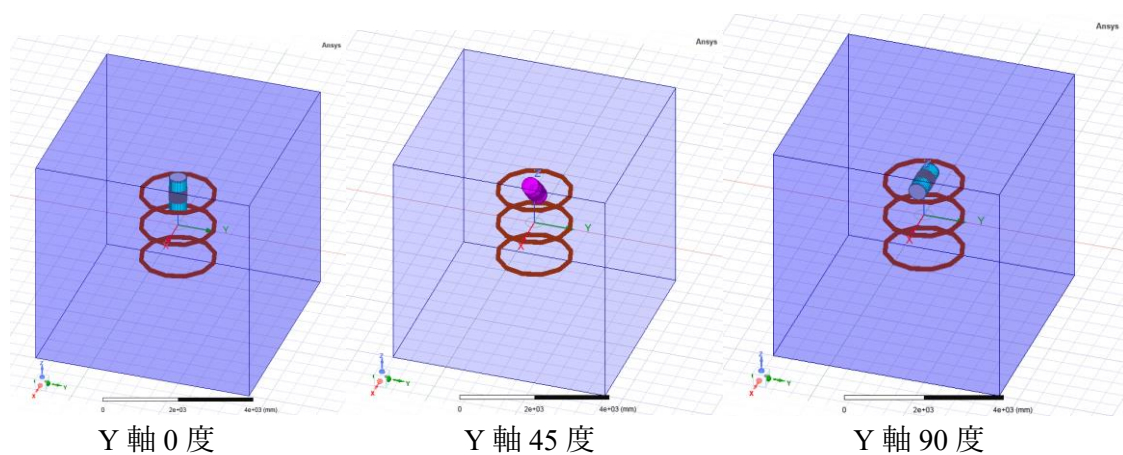


図 3.2-124 X、Y 方向 0m、Z 方向 1m における、AUV の回転状態

表 3.2-47 X、Y、Z 方向 0m での、AUV の回転状態における、各種性能

	周波数 1.5kHz 回転角度 [deg]	3連コイル TX1			AUV RX2					kの予想値		kQ	η_{max} [%]
		L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2	Q	k	cos θ	k*cos θ		
実験値	0	1629.20	372.43	40.91	817.83	121.72	62.83	50.70	0.20	---	---	10.14	82.1
基本状態	0	1637.26	313.45	49.23	844.49	112.16	70.96	59.10	0.21	1.00	0.21	12.18	84.9
	15	1635.64	312.25	49.37	844.62	112.61	70.69	59.08	0.20	0.97	0.20	11.78	84.4
	31	1629.35	308.62	49.76	844.64	112.78	70.58	59.26	0.18	0.86	0.18	10.54	82.7
	44	1622.09	304.39	50.22	844.65	112.53	70.74	59.61	0.15	0.72	0.15	8.94	80.0
	60	1613.31	299.06	50.84	844.62	112.05	71.04	60.10	0.10	0.50	0.10	6.26	72.7
	76	1608.05	295.79	51.24	844.66	112.09	71.02	60.32	0.05	0.24	0.05	3.01	52.1
	直角	89	1606.02	294.09	51.47	844.28	112.05	71.01	60.46	0.00	0.02	0.00	0.21

表 3.2-48 X、Y 方向 0m、Z 方向 1m での、AUV の回転状態における、各種性能

	周波数 1.5kHz 回転角度 [deg]	3連コイル TX1			AUV RX2					kの予想値		kQ	η_{max} [%]
		L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2	Q	k	cos θ	k*cos θ		
実験値	0	1612.09	357.61	42.16	817.59	120.98	63.2	51.62	0.17	---	---	8.71	79.5
基本状態	0	1617.46	300.88	50.66	843.48	111.56	71.26	60.09	0.17	1.00	0.17	10.47	82.6
	15	1617.37	301.05	50.63	844.04	111.64	71.25	60.07	0.17	0.97	0.17	10.13	82.1
	30	1613.12	299.22	50.81	844.01	111.73	71.20	60.15	0.15	0.87	0.15	9.14	80.4
	45	1606.26	295.06	51.31	843.50	112.12	70.90	60.31	0.12	0.71	0.12	7.52	76.7
	60	1600.53	291.49	51.75	843.56	112.28	70.81	60.53	0.09	0.50	0.09	5.32	68.8
	75	1598.37	290.27	51.90	843.94	111.93	71.06	60.73	0.05	0.26	0.05	2.73	48.9
	直角	90	1597.29	289.27	52.04	844.03	111.64	71.25	60.89	0.00	0.00	0.00	0.00

表 3.2-48 には、解析周波数 1.5kHz、各回転角度における、送電コイルのインダクタンス値 L1、抵抗値 R1、Q 値 Q1、AUV の受電コイルのインダクタンス値 L2、抵抗値 R2、Q 値 Q2、総合性能として Q 値、結合係数 k、kQ 積、 η_{max} をそれぞれ示す。

また、表 3.2-47 の回転角度が 15 度沖でなく例えば本来 45 度のものが 44 度となっているが、これは 45 度では電磁界シミュレーションにおいてセルの生成に不具合が生じたため、1 度ずらすことで計算を行ったためである。

表 3.2-47 と表 3.2-48 共に、最上段は回転角度 0 度での実験値の値である。これは同じく 1 段下の回転角度 0 度のシミュレーション値と同条件の測定したものであり、両表共に全パラメータでの傾向の一致が確認できる。また表 3.2-47 と表 3.2-48 の η_{max} の差分が、実験値同士で-2.6%、シミュレーション同士で-2.2%とほぼ同じ割合で AUV が中央から z 方向に 1m 移動した η_{max} の低下割合が等しく、シミュレーションの有効性が確認できている。

両表のどちらの条件においても、AUV が回転すると η_{max} が低下し、90 度の時に 0% になることがわかった。またこの要因は結合係数 k が回転角 θ の $\cos \theta$ の割合で低下することに起因していることが確認された。図 3.2-123 と図 3.2-124 の(c)で示される送電コイルと AUV が直行した 90 度の場合、充電効率は 0%となる。

つまり送電コイル内で高い充電効率を維持するには、コイル内で AUV を極力回転させないことが重要である。

3.2.13. AUV の直径条件による電力伝送効率

送電アンテナの中央で充電が行われる AUV は、特に AUV の導体の直径の変化など多種多様な形状が考えられる。ここでは AUV の直径を可変したときの各種性能をシミュレーションにより導出し、各種 AUV の直径に対応できている充電システムとなっているか確認する。

図 3.2-125 に充電系の全体像を示す。図 3.2-125 (b) は見やすさを重視し、TX コイルを 1 段で表記しているが、シミュレーションでは TX コイル 3 段で実施する。

またこのサイズは全章までの解析を行っていたものと同様である。この図を元に AUV の直径を可変させたもの図 3.2-126 に示す。解析周波数は 1.5kHz である。

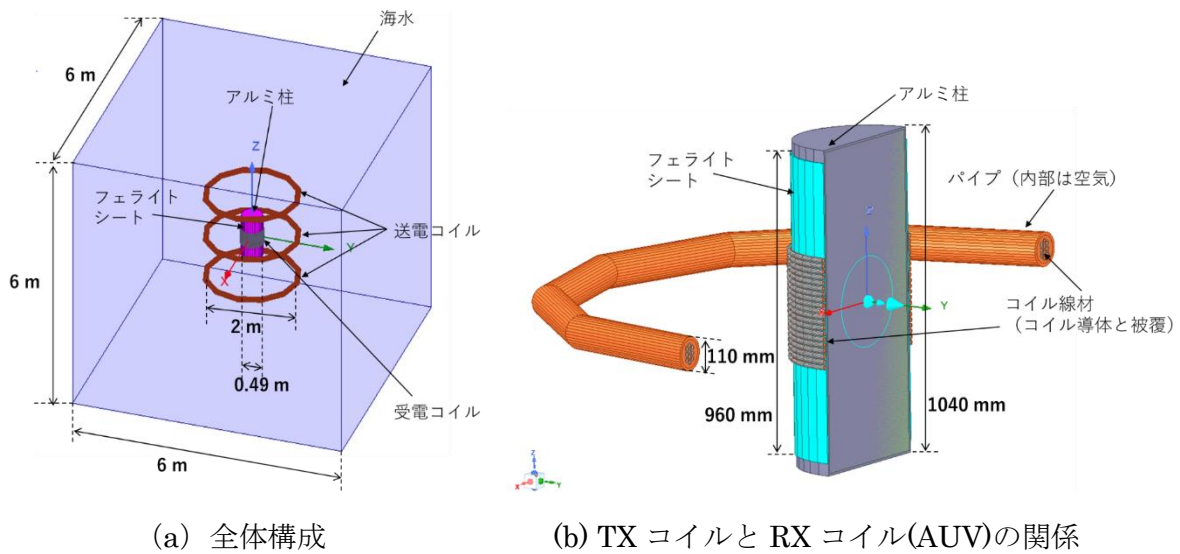


図 3.2-125 海中での充電系

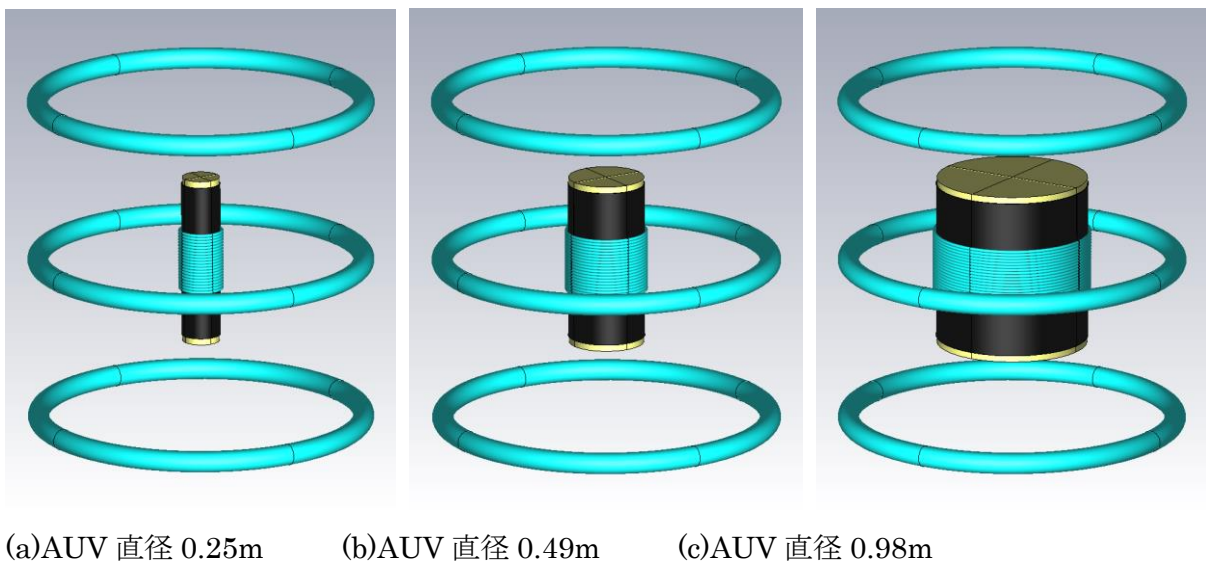


図 3.2-126 AUV 直径を可変した 3 条件

図 3.2-126(b)が従来から解析を進めてきた標準サイズである。このサイズを元に直径 0.25m と直径 0.98m を追加し性能を確認する。また TX コイルの巻数や直径、RX コイルの巻数等の他のパラメータは同一とする。つまり AUV の直径が大きくなると、RX コイルの線材の全長は長くなり、TX コイルと RX コイルは近接する事になる。

また図 3.2-127 に示すように、電磁界シミュレーションより TX コイルと RX コイルの等価回路を導出し、それぞれのコイルに整合回路を使用する。

ここで

TX コイル側の

等価インダクタンス： L_{r1} 、Q 値： Q_1 、特性インピーダンス： R_g 、整合回路： C_1 、 C_{01}

RX コイル側の

等価インダクタンス： L_{r2} 、Q 値： Q_2 、特性インピーダンス： R_L 、整合回路： C_2 、 C_{02}

両コイル間の結合係数： k

であり、電磁界シミュレーションで L_{r1} 、 Q_1 、 L_{r2} 、 Q_2 、 k を導出する。

次に $R_g = R_L = 10\Omega$ での整合回路を導出し、TX-RX コイル間の伝送電力である $WM1$ - $WM2$ を最大化させる。

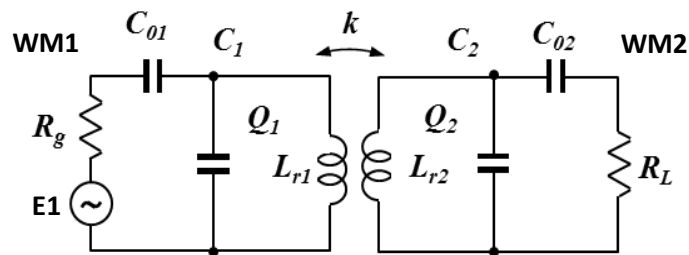


図 3.2-127 TX コイルと RX コイルの等価回路と整合回路

以下、表 3.2-49、表 3.2-50、表 3.2-51 に、AUV 直径 0.25m、0.49m、0.98m での解析結果を示す。

(a)は整合回路の定数と、整合回路使用時の電源電圧 E_1 、送電インダクタでの電流値 L_1 、受電インダクタでの電流値 L_2 、送電電力 $WM1$ 、受電電力 $WM2$ 、送電電力 $WM1$ と受電電力 $WM2$ の比を計算した総合効率を示す。

(b)は電磁界シミュレータで算出した送電コイルのインダクタ L_1 、抵抗値 R_1 、Q 値 Q_1 、受電コイルのインダクタ L_2 、抵抗値 R_2 、Q 値 Q_2 、両コイルでの Q 値 Q 、結合係数 k 、 kQ 積 kQ 、最大電力効率 η_{max} を示す。

(c)は印加電力 $WM1$ を 100W と正規化した場合の部位ごとと発生原因ごとの損失電力、整合回路での不整合損失を示す。 $WM1$ を 100W と正規化したことで各損失電力を[%]とすると、損失電力の内訳として確認することができる。

全ての AUV 直径において、整合回路を使用した実運用を想定したシミュレーションで

は、最大効率 η_{\max} を若干下回る効率となっている。これは整合が若干でもズレによる整合回路での不整合損失と考えられる。これにより 3 モデル共に 10%以下の損失が確認できる。

構造上、AUV の直径が大型化するにすると、受電コイルの総延長は長くなるのでこれに伴いインダクタンス値 L_2 が上昇と抵抗値 R_2 の上昇も確認できる。また送受間のコイル距離が近接することから結合係数 k の上昇も確認された。ただし Q_2 は低下するがこれは抵抗値 R_2 の上昇によるためである。最大効率 η_{\max} の上昇は kQ 積の上昇のためだが、 Q_2 の低下により Q 値も低減となる。AUV の直径が大型化することによる最大効率 η_{\max} の上昇は、インダクタンス値 L_2 の上昇による抵抗値 R_2 が、 Q_2 の低下を上回るコイル間近接による結合係数 k の上昇のためである。

また今回のサイズパラメータにおいては、電力効率 75%以上が得られる目処を得た。

表 3.2-49 各種コイル性能 AUV 直径 0.25m

(a) 整合回路 と 各箇所での電力、電流、電力、電力伝送効率

	[uF]		[uF]		[V]		[kW]		[A]
C01	3.57	Cr1	3.54	E1	359	WM1	3.9918	L1	31.3395
C02	7.35	Cr2	16.52			WM2	3.0107	L2	84.301
						効率	75.42	[%]	

(b) コイル性能

3連コイル TX1			AUV RX2						
L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2	Q	k	kQ	η max [%]
1668.03	386.56	40.67	523.84	79.48	62.11	50.26	0.160098	8.05	78.0

(c) 損失電力とその要因 (送電電力 WM1=100[W]時)

単位[W]					単位[W]				単位[W]
海水	送電コイル	受電コイル	AUV	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計	整合回路
9.51	1.87	2.93	1.58	15.90	15.54	0.00	0.36	15.90	8.68

表 3.2-50 各種コイル性能 AUV 直径 0.49m

(a) 整合回路 と 各箇所での電力、電流、電力、電力伝送効率

	[uF]		[uF]		[V]		[kW]		[A]
C01	4.14	C1	3.06	E1	355	WM1	3.8022	Lr1	26.3613
C02	6.44	C2	8.86			WM2	3.0392	Lr2	57.9835
						効率	79.93	[%]	

(b) コイル性能

3連コイル TX1			AUV RX2						
L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2	Q	k	kQ	η max [%]
1713.67	413.64	39.05	829.67	132.52	59.01	48.00	0.21	10.05	82.0

(c) 損失電力とその要因 (送電電力 WM1=100[W]時)

単位[W]					単位[W]				単位[W]
海水	送電コイル	受電コイル	AUV	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計	整合回路
8.54	1.40	2.24	1.47	13.64	13.40	0.00	0.24	13.64	6.43

表 3.2-51 各種コイル性能 AUV 直径 0.98m

(a) 整合回路 と 各箇所での電力、電流、電力、電力伝送効率

	[uF]		[uF]		[V]		[kW]		[A]
C01	5.11	Cr1	2.40	E1	351	WM1	3.5443	L1	21.0262
C02	5.80	Cr2	3.52			WM2	3.0079	L2	40.1256
						効率	84.87	[%]	

(b) コイル性能

3連コイル TX1			AUV RX2						
L1 [uH]	R1 [mΩ]	Q1	L2 [uH]	R2 [mΩ]	Q2	Q	k	kQ	η max [%]
1718.94	425.62	38.06	1409.30	242.12	54.86	45.70	0.31	13.95	86.7

(c) 損失電力とその要因 (送電電力 WM1=100[W]時)

単位[W]					単位[W]				単位[W]
海水	送電コイル	受電コイル	AUV	合計	オーム損	誘電体損	磁気損	合計	整合回路
6.95	0.97	1.59	1.31	10.81	10.65	0.00	0.16	10.81	4.32

3.3. kW 級ポジションフリーワイヤレス給電システムの確立

3.3.1. 10 分の 1 モデルを用いた実験

最終的な送電コイルのサイズは直径 2 m、受電コイル直径 0.5 m である。コイルの線材、磁性体の効果、海水の影響、および電磁界シミュレーションとの整合性を確認するため、10 分の 1 のサイズの実験モデルを試作し、検証を行った。10 分の 1 モデルを用いることで、実際のサイズを用いるよりも試作や実験が容易にできる利点がある。

3.3.1.1. 10 分の 1 モデルの作製

3.3.1.1.1. 磁性材料の選定

受電コイルは AUV の耐圧容器に巻き付けて形成するが、耐圧容器はアルミなどの金属で作られるため、金属上に直接コイルを巻くとコイル性能が劣化してしまう。そのため本提案では、磁性材料を金属の上に貼り、その上からコイルを巻く構成を考えた。

使用する磁性材料を選定するため、図 3.3-1 のように平巻コイルとアルミ板を配置し、ベクトルネットワークアナライザ (VNA、Keysight Technologies、E5061B) を用いて GPST 法 (Gain-Phase/Shunt-Through) にてコイル定数を測定した。表 3.3-1 の磁性材料を置いた場合の測定結果を図 3.3-2 に示す。磁性材料がない場合はコイルのインダクタンス値が大きく減少し、Q 値も劣化している。一方、磁性材料を置いた場合はインダクタンス値が増加し、Q 値も良いことが確認できた。

この結果より、調査した材料のうち Q 値が高い 3 つはいずれもフェライト系であったことから、フェライト系を実験に使用する。また 10 分の 1 モデルでは貼り付け面の曲率を考慮すると薄い方が好ましく、実験では FLX-221 フェライトシートを採用することにした。

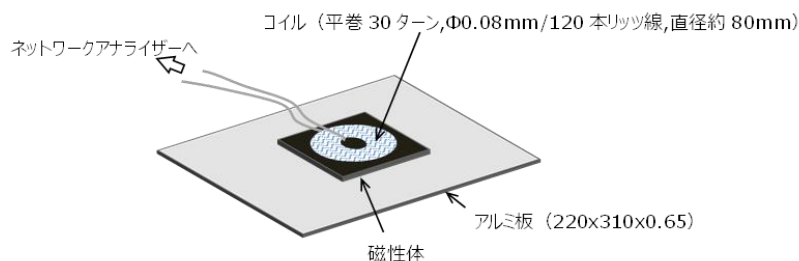
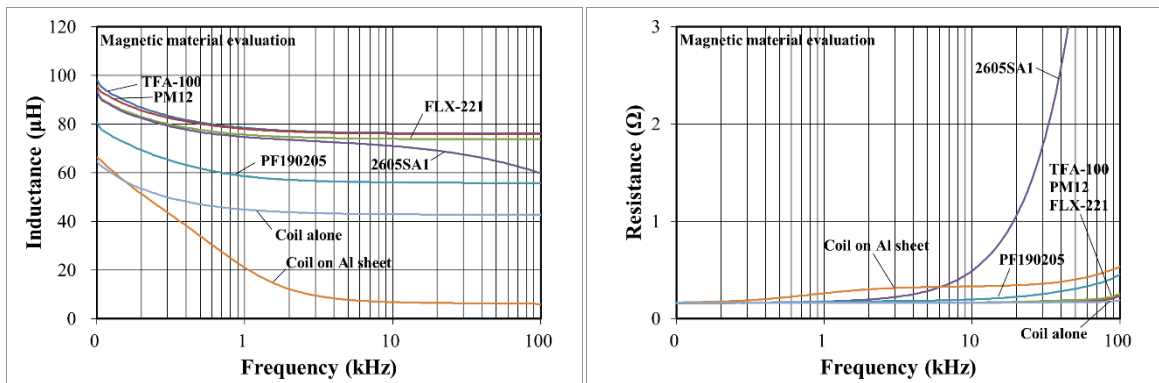


図 3.3-1 磁性材料の測定系

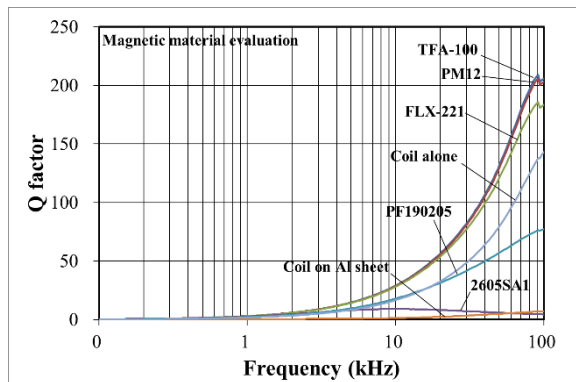
表 3.3-1 調査した磁性材料

メーカー	品番	サイズ (mm)	特性
トーキン	TFA-100EA-6.7N	100×100×6.7	フェライト系電波吸収体 $\mu' = 200 @ 10 \text{ MHz}$
戸田工業	PM12	100×100×5.0	Mn-Zn フェライト $\mu' = 3200 @ 10 \text{ kHz}$
	FLX-221	126×126×0.45	Ni-Zn フェライトシート $\mu' = 500 @ 100 \text{ kHz}$
日立金属	2605SA1	142×142×0.025	アモルファス、飽和磁束密度 $B_s = 1.56 \text{ T}$ ($\mu' = 5000$)
フジフィルム	PF190205	180×180×0.4	樹脂系、フレキシブルシート $\mu' = 173 @ 10 \text{ kHz}$



(a) インダクタンスの周波数特性

(b) 抵抗値の周波数特性



(c) コイル Q 値の周波数特性

図 3.3-2 磁性材料を変えたときのコイル定数の測定結果

3.3.1.1.2. 送電コイルと受電コイル

図 3.3-3 に 10 分の 1 モデルの送電コイルと受電コイルの概略図を示す。送電コイルはビ

ニルホースの中に電線を巻き入れた構造としている。また受電コイルは、耐圧容器に見立てた胴体部分をアクリルパイプで構成したもの（図 3.3-4 (a)）、アルミパイプで構成したもの（図 3.3-4 (b)）、アルミパイプの表面にフェライトシートを貼り付けた構成としたもの（図 3.3-4 (c)）を作製した。なおアクリルパイプの受電コイルは、単線を使用したものとリッツ線を使用したものの 2 種類を作製した（単線とリッツ線の仕様は表 3.3-2 参照）。

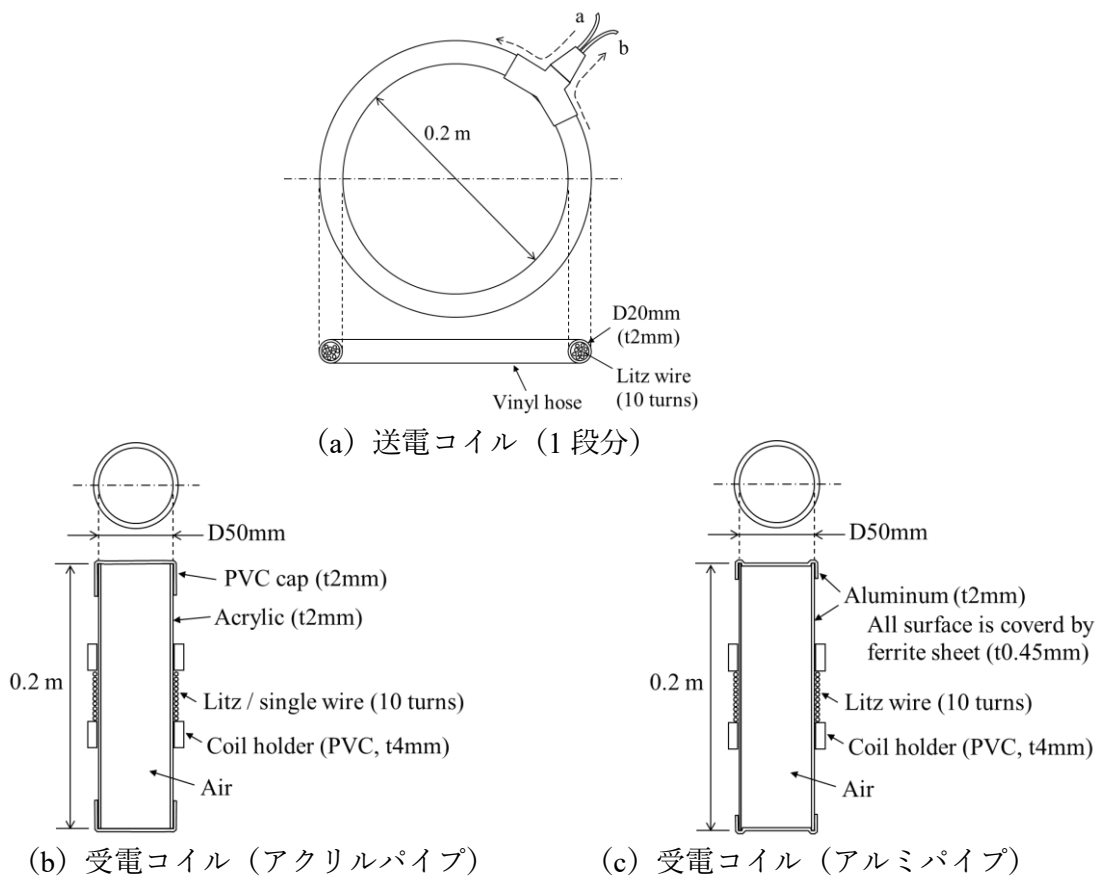


図 3.3-3 送電コイルと受電コイルの概略図



図 3.3-4 試作した受電コイルの外観

表 3.3-2 単線とリッツ線の仕様

線種	線形 (mm)	被覆厚 (mm)	素線径 (mm)	素線数	導体断面積 (mm ²)
単線	3.2	0.8	1.6	1	2.0
リッツ線	3.0	0.2	0.05	1200	2.4

VNA を用いて GPST 法で受電コイルの特性を測定した結果を図 3.3-5 と表 3.3-3 に示す。アルミパイプに直接コイルを巻いたもの (図 3.3-4 (b)) はインダクタンス値が小さく Q 値も低い、フェライトを貼った上に巻いた場合 (図 3.3-4 (c)) はインダクタンス値が大きく、Q 値も高い。これによりフェライトの効果が大いことが確認できた。また、図 3.3-4 (a) のアクリルパイプに巻いたリッツ線と単線のコイル特性を比較すると、インダクタンス値に大差はないが、周波数が高くなるにつれてリッツ線の Q 値が高くなり、抵抗値も小さい。10 分の 1 モデルでは数十 kHz の周波数を使用する想定であるため、リッツ線を使用することで良いコイル特性を得られることがわかった。

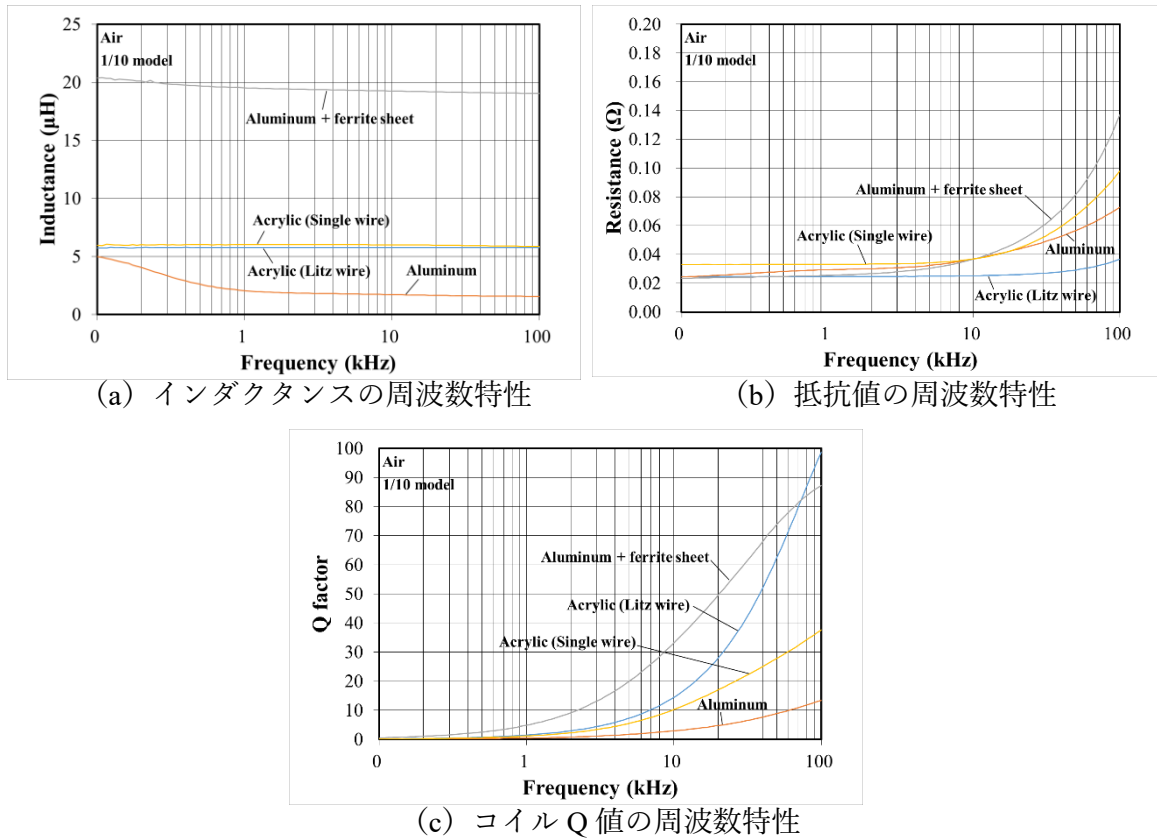


図 3.3-5 受電コイルのコイル特性測定結果

表 3.3-3 30 kHz における受電コイルのコイル特性測定結果

受電コイル構成	測定結果 (空气中 @30 kHz)			
	線種	L (μH)	Q	R (Ω)
アクリルパイプ	単線	5.94	21.1	0.051
アクリルパイプ	リッツ線	5.77	39.0	0.027
アルミパイプ	リッツ線	1.62	6.1	0.048
アルミパイプ+フェライト	リッツ線	19.14	59.0	0.059

3.3.1.2. 実験システム

実験に用いた測定系の概略図を図 3.3-6 (a) に、測定中の送電コイルと受電コイルの写真を図 3.3-6 (b) に示す。送電コイル (図中 Tx coil) は 図 3.3-3 (a) に示したコイルを 3 つ使い、#2、#1、#3 の順に直列に接続している。

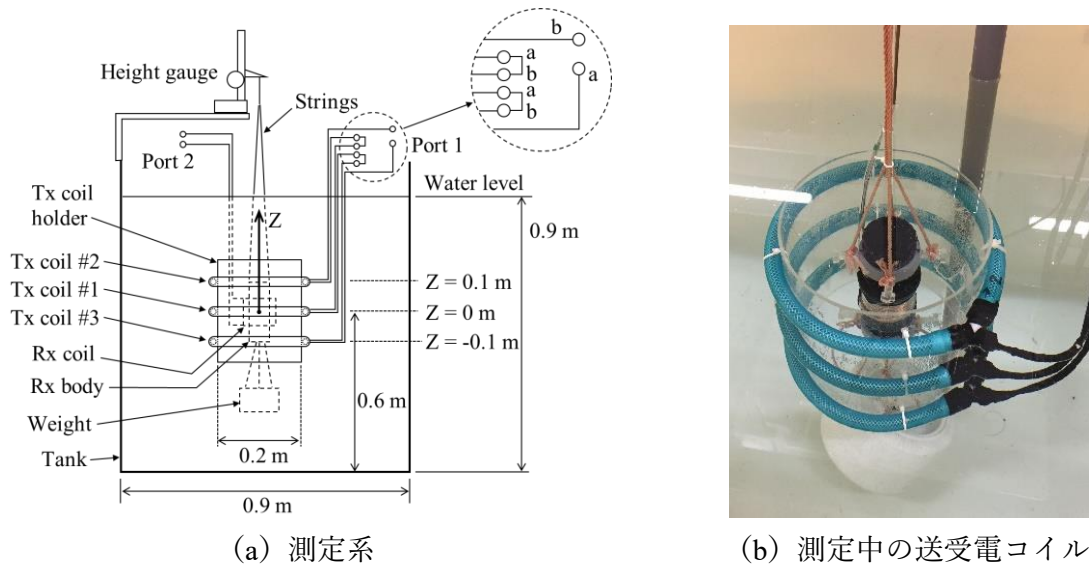


図 3.3-6 10分の1モデルの実験システム

3.3.1.3. 10分の1モデルの測定結果

3.3.1.3.1. コイル特性の測定方法

コイル特性であるインダクタンス (L 値)、Q 値、結合係数 (k) については、VNA を図 3.3-7 のように接続してコイル間の S パラメータを測定し、S パラメータを式(3.3-1)~(3.3-4) によって Z パラメータに変換して、式(3.3-6)、(3.3-7)から求めた。

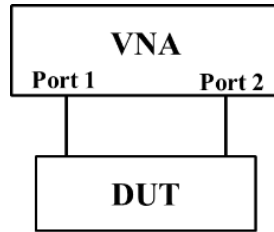


図 3.3-7 コイル特性の測定系

$$Z_{11} = Z_0 \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \quad (3.3-1)$$

$$Z_{12} = Z_0 \frac{2S_{12}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \quad (3.3-2)$$

$$Z_{21} = Z_0 \frac{2S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \quad (3.3-3)$$

$$Z_{22} = Z_0 \frac{(1 + S_{22})(1 - S_{11}) + S_{12}S_{21}}{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}} \quad (3.3-4)$$

ここで Z パラメータは実部と虚部がある。

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \quad (3.3-5)$$

結合係数 k は Z パラメータの虚数部を用いて以下の式より計算する。

$$k = \frac{|X_{21}|}{\sqrt{X_{11}X_{22}}} \quad (3.3-6)$$

ポート 1、2 に接続したコイルのインダクタンス L_1 および L_2 と、コイル Q 値の Q_1 および Q_2 は、虚数部および実数部を用いて以下の式より計算する。

$$L_1 = \frac{X_{11}}{\omega_0} \quad Q_1 = \frac{X_{11}}{R_{11}} \quad L_2 = \frac{X_{22}}{\omega_0} \quad Q_2 = \frac{X_{22}}{R_{22}} \quad (3.3-7)$$

ここで $\omega_0 = 2\pi f_0$ は周波数 f_0 での角速度である。

3.3.1.3.2. 送電コイルと受電コイルのコイル特性

媒質の条件を表 3.3-4 のように空気、水道水、塩水 1%~5%と変えて、送電コイルと、アルミパイプ+フェライトの受電コイルの特性を測定した結果を図 3.3-8 に示す。なおこの結果は、受電コイルが送電コイルの中央に位置しているときの測定値である。インダクタンス値は媒質条件によらずほぼ一定であった(塩水 1%の低域側の差は校正ずれによる測定ミス)。一方、Q 値は媒質により差が生じ、導電率が高いほど劣化することが確認できた。

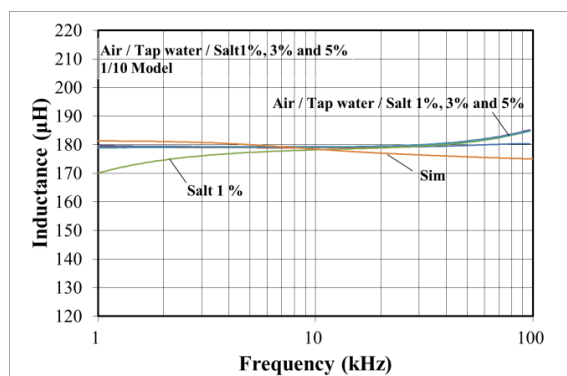
図 3.3-9 は結合係数を測定した結果である。媒質を変えても結合係数は変化しないことが確認できた。また塩水 5%相当での電磁界シミュレーション結果も重ねて表示している。絶対値に約 1 割の差があるものの、傾向はおおむね一致していることが確認できた。

図 3.3-10 に送電コイルの中で受電コイルを動かしたときの結合係数の変化を示す。図

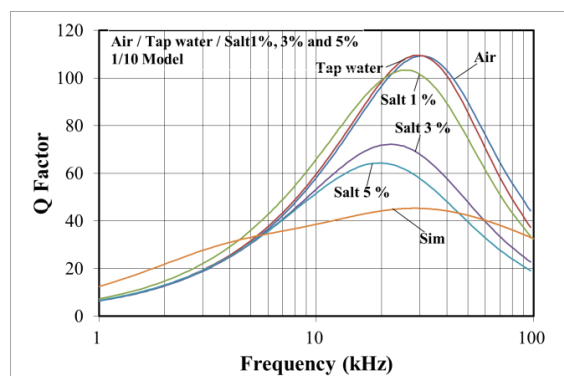
3.3-10 (a) は送電コイルの中心軸上で受電コイルを動かしたときの結合係数の周波数特性を表し、図 3.3-10 (b) は受電コイルを横方向にも動かした場合の位置と結合係数の変化を表している。この結果より送電コイル内を受電コイルが動いたときの結合係数の変化は0.175~0.237 に収まることがわかった。

表 3.3-4 実験時の塩分濃度、導電率、水温

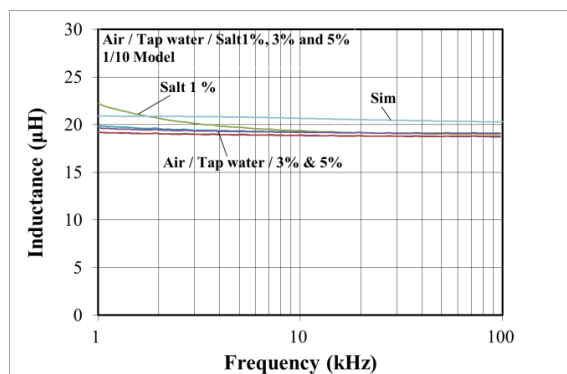
	塩分実測値	導電率 (S/m)	水温 (°C)
水道水	0.01%	0.02	20.0
塩水 1%	0.97%	1.66	19.3
塩水 3%	2.97%	4.56	25.0
塩水 5%	5.04%	6.77	25.0



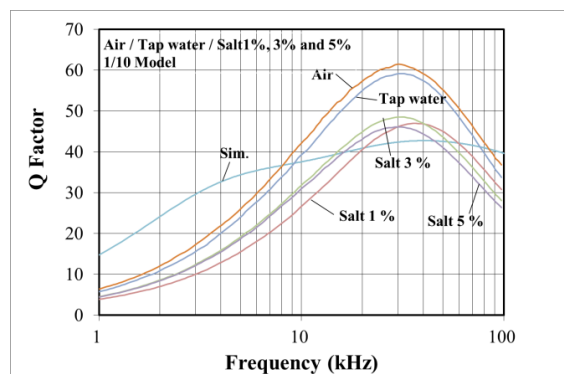
(a) 送電コイルのインダクタンス



(b) 送電コイルの Q 値



(c) 受電コイルのインダクタンス



(d) 受電コイルの Q 値

図 3.3-8 媒質と送受電コイル特性測定結果

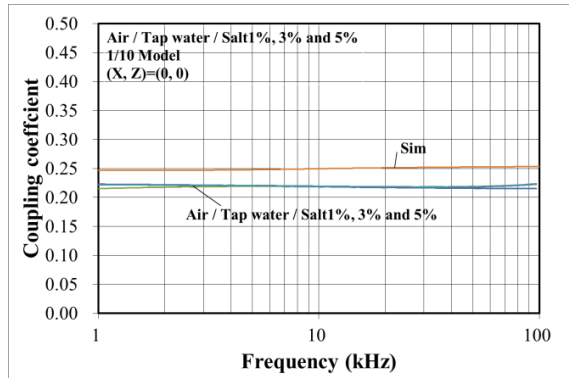
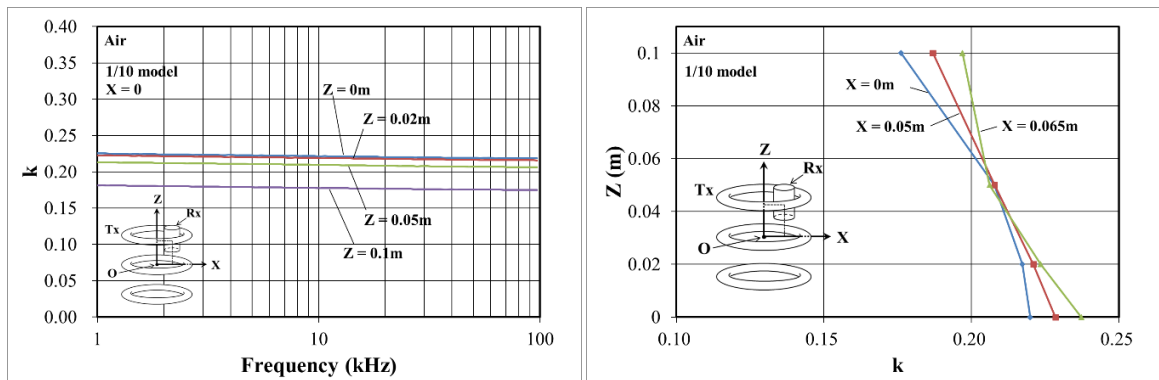


図 3.3-9 送電-受電コイル間の結合係数の測定結果 (位置は中心 (X, Z)=(0, 0) で固定)



(a) 位置と結合係数の周波数特性

(b) 位置と結合係数の変化

図 3.3-10 受電コイルの位置と結合係数の測定結果

3.3.1.3.3. kQ 積を用いた伝送効率の計算

ワイヤレス給電での2つのコイル間の最大有能電力効率 η は、2つのコイルのQ値とコイル間の結合係数kの積により以下の式で計算できる [13]。

$$\tan 2\theta = kQ \quad \eta_{max} = \tan^2 \theta \quad (3.3-8)$$

ここでQを、送電コイルのQ値を Q_1 、受電コイルのQ値を Q_2 としたときの以下の相乗平均とする。

$$Q = \sqrt{Q_1 Q_2} \quad (3.3-9)$$

式(3.3-8)を用いて、図 3.3-8 と図 3.3-9 の結果からコイル間の伝送効率を計算した結果を図 3.3-11 に示す。塩分濃度が高くなるほど効率は落ちる傾向にあるが、30 kHz あたりで効率が最大となることがわかる。したがって、今回の実験では 30 kHz の周波数を用いて電力伝送効率の測定を行うこととした。また、塩水 5%相当での電磁界シミュレーション結果も図 3.3-11 に表示しているが、おおよその傾向は合うものの実測との乖離がある。図 3.3-8 のQ値に差があることから、通常の電磁界シミュレーションではリッツ線の効果を正しく

解析できなかつたと思われる。

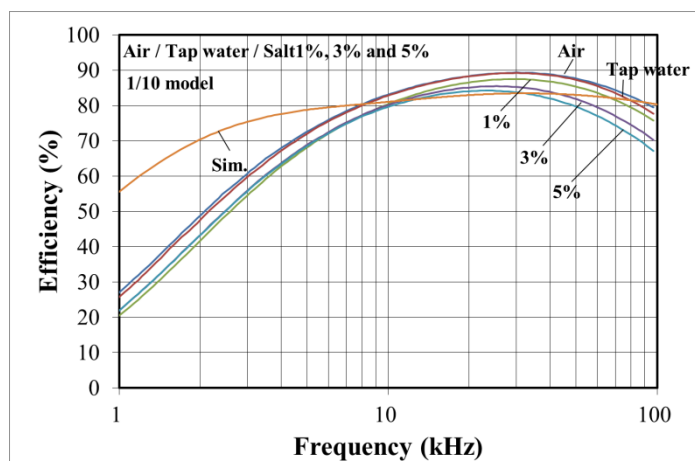


図 3.3-11 kQ 積によるコイル間の伝送効率

3.3.1.3.4. 整合回路の設計

アルミパイプ+フェライトの受電コイルの空気中でのインダクタンス (L 値)、Q 値、結合係数の実測値 (図 3.3-8、図 3.3-10) から 30 kHz の測定値を抽出した結果を表 3.3-5 に示す。この結果を基に回路シミュレータ CST-DS の最適化機能を用いて整合回路の容量を計算した。シミュレータの回路図を図 3.3-12 に示す。なお、ポートのインピーダンスは 10 Ω とした。回路図は受電コイルが $Z=0$ m (中心位置)、および $Z=0.1$ m (上限位置) にある場合を想定してそれぞれのインダクタンス、Q 値、結合係数を入れて計算した。コンデンサの初期値は 2 段のバンドパスフィルタ (BPF) の整合回路の計算法により計算した [14] [15]。表 3.3-6 に計算したコンデンサの値と実験で用いた値を示す。実験に用いたコンデンサは伝送特性が最適に整合するように調整を行った。

表 3.3-5 コイル特性 (受電コイルはアルミパイプ+フェライトのもの)

特性	Z = 0 m		Z = 0.1 m	
	送電コイル	受電コイル	送電コイル	受電コイル
L (μ F)	180.9	18.8	174.8	18.8
Q	108.1	50.2	123.4	55.5
R _s (m Ω)	315.4	70.6	267.0	63.9
k	0.2199		0.1762	

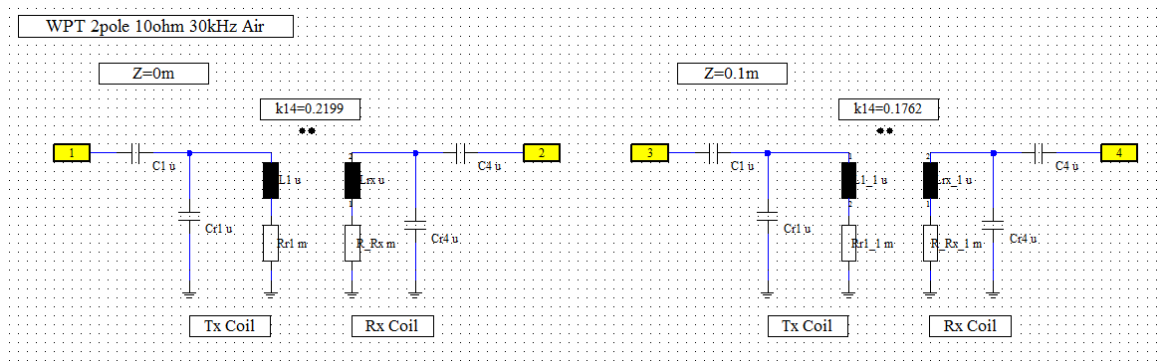


図 3.3-12 回路シミュレータの回路図

表 3.3-6 コンデンサの計算値と実験値

容量値 (μF)	番号	初期値	最適化	実験使用
送電側	C1	0.139	0.117	0.117
	Cr1	0.0253	0.0516	0.049
受電側	C4	0.678	0.932	0.582
	Cr4	1.240	1.324	1.189

3.3.1.3.5. 伝送効率の確認とシミュレーション比較

ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて図 3.3-13 に示す方法でコイル間の伝送効率の周波数特性を測定した。VNA の伝送効率は S_{21} を測定し以下の式(3.3-10)で計算した。

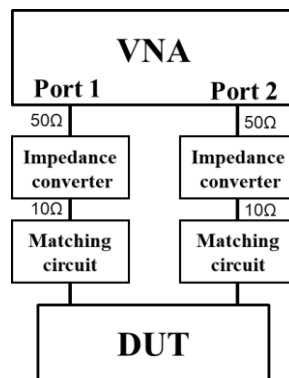


図 3.3-13 ベクトルネットワークアナライザを用いた測定系

$$\eta = |S_{21}|^2 \times 100 [\%] \quad (3.3-10)$$

伝送効率の周波数特性の実測値と回路シミュレーションとの比較を図 3.3-14 に示す。30 kHz における伝送効率はどちらも 85%であり、良く一致している。この結果から、回路シミュレーションでの整合回路設計手法の有効性が確認できた。

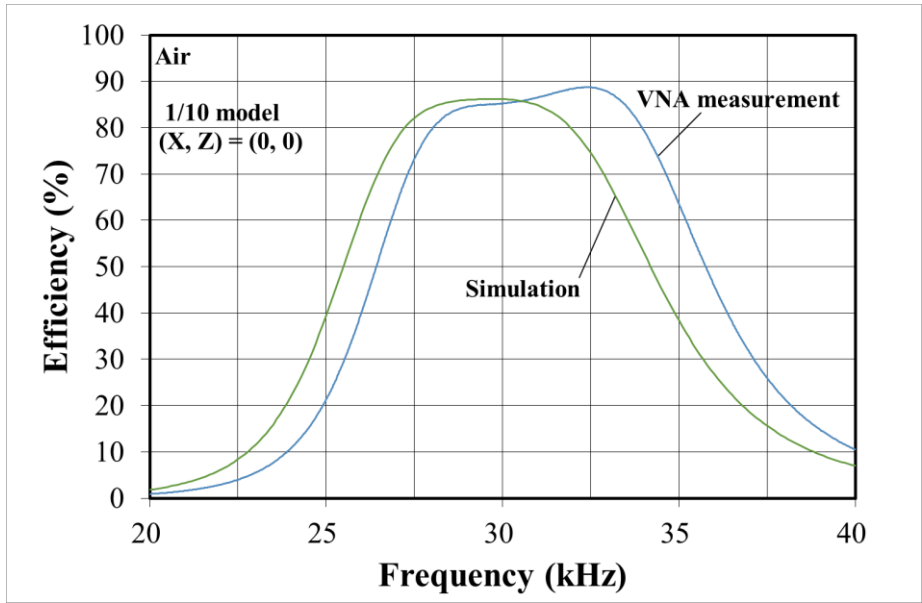


図 3.3-14 伝送効率の周波数特性

3.3.1.3.6. 伝送効率への媒質の影響確認

図 3.3-6 の測定系において受電コイルが送電コイルの中央に位置しているときの、空気、水道水、塩水 1%、3%、5% での伝送効率の周波数特性の測定結果を図 3.3-15 示す。媒質の導電率が上がるにつれて伝送効率が低下する傾向は見られるが、塩水 5% でも伝送効率 80% 以上を確認できた。

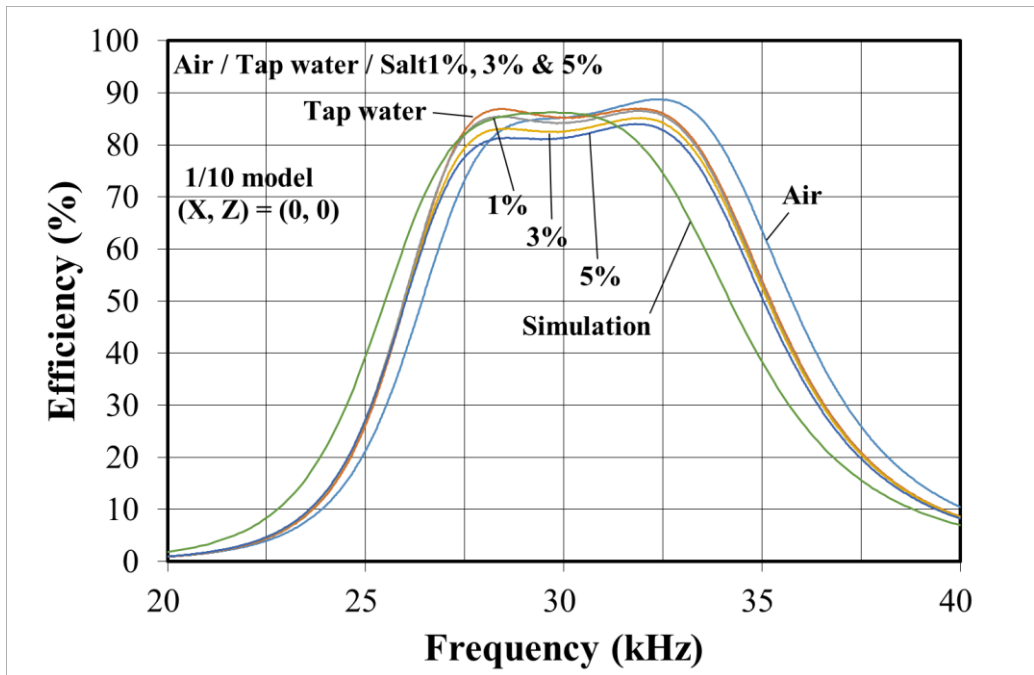


図 3.3-15 伝送効率の周波数特性と媒質の影響

3.3.1.3.7. 伝送効率に対するフェライトの効果

フェライトの効果を確認するため、受電コイルをアルミパイプに直接巻いたもの（図 3.3-4 (b)）でも 3.3.1.3.6 と同様に伝送効率を確認した。その結果を図 3.3-16 に示す。図 3.3-15 と比較して明らかに伝送効率が下がっていることから、フェライトが不可欠であることが確認できた。

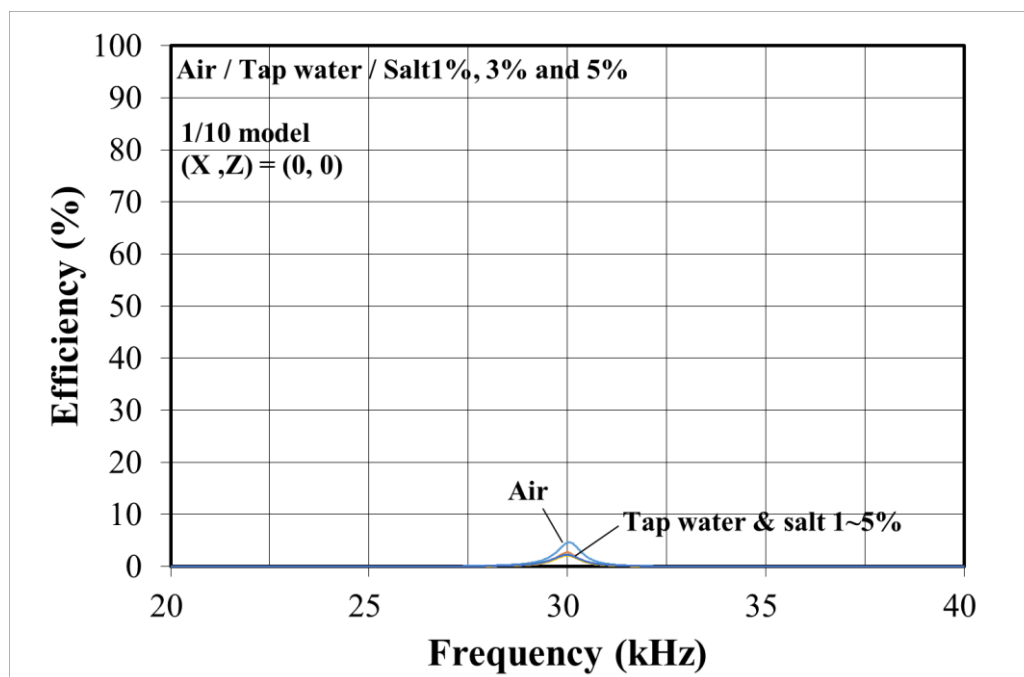


図 3.3-16 フェライトがない場合の伝送効率の周波数特性

3.3.1.3.8. 電力を印加した場合の伝送効率

5%塩水中で、パワーアナライザを用いた図 3.3-17 に示す系で実際に電力を印可しながら、受電コイルの位置を送電コイル内で変えて伝送効率を測定した結果を図 3.3-18 に示す。入力電力は 10 W、周波数は 30 kHz である。この結果、送電コイル内で受電コイルの位置が変化しても効率の変化は小さく安定していることから、本提案による海中でのポジションフリーワイヤレス給電が可能であると確認できた。

なお VNA で測定した結果と比較すると効率は 10%程度低下したが、これまでの実験 [14] でも同様の結果を得ており、低下の理由については測定経路の損失等が考えられた。3.3.1 には反映できていないが、次年度以降は導線を太くし線路も短くして、電流センサも非接触型にするなど対策を施し VNA との差は改善できている。

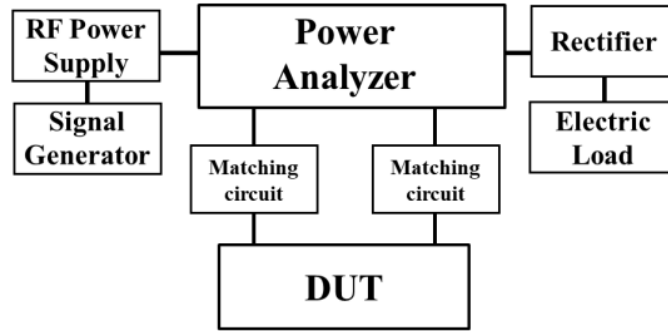


図 3.3-17 パワーアナライザを用いた電力伝送効率の測定系

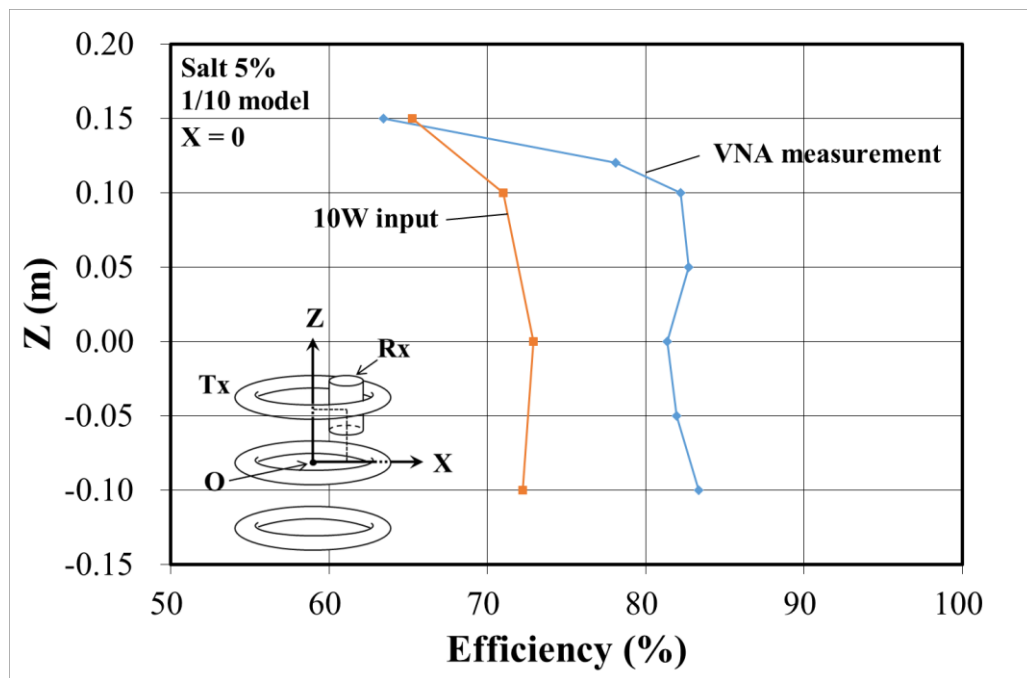


図 3.3-18 電力伝送効率の測定結果 (5%塩水)

3.3.2. 新 10 分の 1 モデルを用いた実験

AUVとして当初は航行型 AUV を想定し、コイルを巻く耐圧容器の寸法を直径 0.5 m、長さ 2 m と想定していたため、3.3.1 では 10 分の 1 モデルの寸法を直径 0.05 m、長さ 0.2 m として行った。しかしながら、実験や運用の観点からホバリング型 AUV を最終実験に用いるよう変更することになり、耐圧容器の寸法が直径 0.5 m、長さ 1 m と、長さのみ半分になる。その影響を確認するため、新しく 10 分の 1 モデルを直径 0.05 m、長さ 0.1 m で作製し実測による確認を行うこととした。

3.3.2.1. 耐圧容器仕様変更の影響について

耐圧容器の長さ半減に加え、蓋の開閉作業の妨げにならないよう蓋部にフェライトを貼らない方針となったため、図 3.3-19 のように旧仕様に基づいた 10 分の 1 モデルと、新仕様に基づいた 10 分の 1 モデルを作製した。旧仕様では蓋部の表面までフェライトを貼っており、金属体の表面がすべてフェライトで覆われている構成になっているが、新仕様では蓋部にフェライトは貼っておらず、金属がむき出しとなっている。なおこの実験では 2 mm 厚のフェライトを使用して作製している。

3.3.1 と同様に図 3.3-6 の方法で測定し、40 kHz における結果を表 3.3-7 に示す。結合係数や Q 値の低下はあるものの効率 80%以上を確認できたことから、耐圧容器の最終形状は直径 0.5 m、長さ 1 m とし、蓋部へのフェライトを貼らない構造で進めることとした。

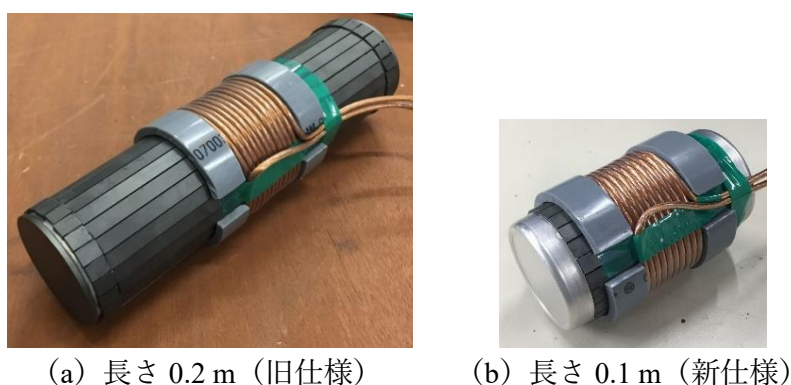


図 3.3-19 耐圧容器仕様変更確認用 10 分の 1 モデルの外観

表 3.3-7 耐圧容器仕様変更確認の結果 (@40 kHz)

仕様	長さ	条件	結合係数	受電コイル Q 値	最大有能 電力効率	40W 印加 電力効率
旧	0.2 m	空气中	0.388	146.1	97.1%	-
新	0.1 m	空气中	0.186	85.2	91.6%	-
新	0.1m	塩水 5%	0.186	74.8	86.4%	81.2%

3.3.2.2. フェライトの選定

フェライトは同じ材料なら厚いほど性能は良いが、厚くなると重量が増すため AUV に浮力材を追加しなければならなくなるなどの不都合が生じる。一方で厚みが足りないと磁気飽和 [16]してしまい、大電力に耐えることができない。そこで 2 種類の代表的なフェライトについて評価することにした。一つは 13.56MHz の NFC 用などでよく使用される Ni-Zn 系フェライトで、入手性が良く、薄くて曲がるシートなど品揃えも豊富にあるため、海中給電に使用することに都合はよいが、厚みのある板材はない。もう一つは Mn-Zn 系フェ

ライトで、低パワーロス材としてトランスコアなどに使用されることが多く、厚みのある板状の焼結体で供給されているが、曲面である耐压容器に貼り付けるには工夫が必要になる。

実験には図 3.3-20 に示す 10 分の 1 モデルの受電コイルを用いて電力と伝送効率の関係を確認した。厚み 0.3 mm の Ni-Zn 系フレキシブルフェライトシートを使用したときと、厚み 4 mm の Mn-Zn 系フェライト板材を使用したときの送信電力と伝送効率のグラフを図 3.3-21 に示す。厚み 4 mm のフェライトでは送信電力（図中の Tx power）が増えても伝送効率は一定であるが、厚み 0.3 mm のフェライトでは、送信電力が増えるにつれて効率が下がる現象が発生した。これは磁気飽和していることを表しており、厚み 0.3 mm のフェライトでは kW 級の電力伝送は不可能であることがわかった。

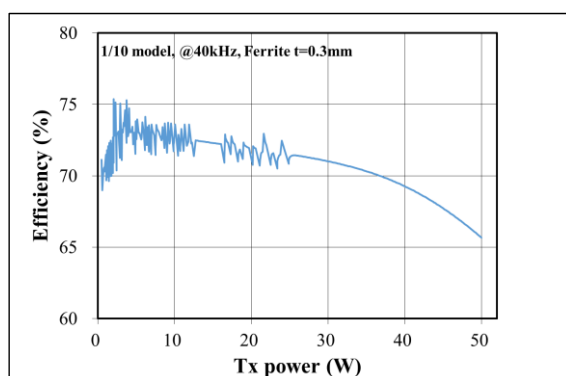


(a) Ni-Zn フェライト 0.3 mm 厚

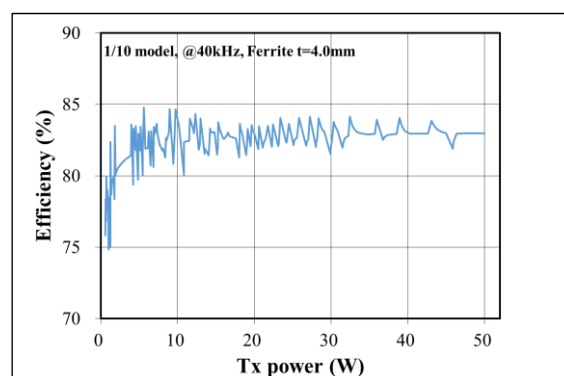


(b) Mn-Zn フェライト 4 mm 厚

図 3.3-20 フェライト実験用 10 分の 1 モデルの外観



(a) Ni-Zn フェライト 0.3 mm 厚



(b) Mn-Zn フェライト 4 mm 厚

図 3.3-21 フェライトの違いによる電力伝送効率の確認結果

次に、実寸サイズで kW 級の電力伝送に必要なフェライト厚みを、シミュレーションを用いて検討した（シミュレータは ANSYS の Maxwell を使用）。

結果を図 3.3-22 に示す。フェライト厚み 2 mm では送信電力 300 W で伝送効率の低下が発生している。一方、フェライト厚み 5 mm では送信電力 5.5 kW まで伝送効率の低下がない。この結果より、目標の 3 kW 給電に対して、フェライトの厚みが 5 mm あれば十分な性能があると言えることから、フェライトは Mn-Zn 系の 5mm 厚みに決定した。

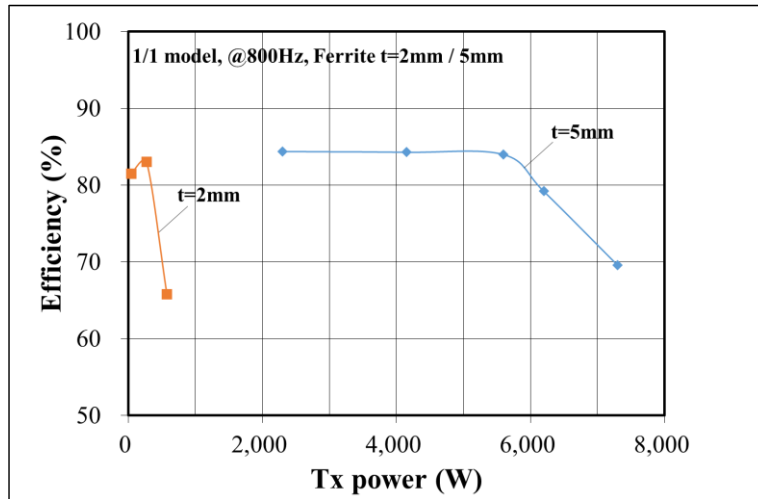


図 3.3-22 フェライト厚みと送信電力と伝送効率のシミュレーション

3.3.2.3. コイル巻き数の検討

これまで受電側のコイルの巻き数を 10 ターンと想定して検討していたが、実寸サイズのシミュレーションを実施してみたところ、周波数によっては整合が取りにくいことが判明した。図 3.3-23 に整合回路を、表 3.3-8 にシミュレーション結果を示す。

1000 Hz では 10、15、20 ターンのいずれのコイル巻き数でも負荷と信号源のインピーダンスの一致すなわち伝達される電力が最大となるようにする（=整合を取る）ことができる 4 つのコンデンサの組み合わせを容易に求めることができた。一方 400 Hz では 10 ターンと 15 ターンにおいて受電側直列コンデンサの解がなく送電側のコンデンサを調整することで整合を取ったが、効率が 20 ターンの場合より低下することがわかった。したがって、10 ターンではなく 20 ターンに方針を変える方が良いと思われるが、10 分の 1 モデルで実験による検証を行ってから決めることにした。

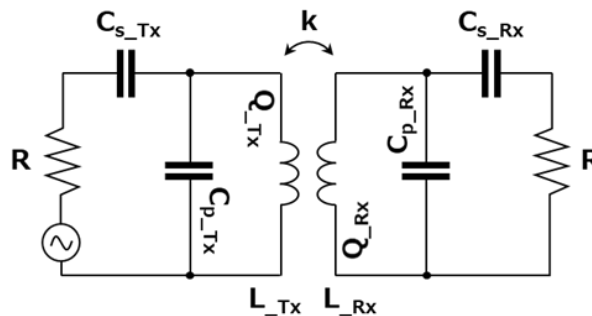


図 3.3-23 整合回路 (Tx が送電側、Rx が受電側)

表 3.3-8 実寸サイズにおける整合シミュレーション結果

Simulation	@400 Hz			@1000 Hz		
	10	15	20	10	15	20
Rx-coil Turns	10	15	20	10	15	20
L_Tx (μH)	1672.6	1672.5	1672.3	1664.1	1664.3	1664.4
Q_Tx	60.4	60.3	59.8	41.5	41.6	41.5
L_Rx (μH)	246.3	483.6	757.3	244.9	480.9	752.5
Q_Rx	69.1	69.8	66.4	74.8	71.9	66.8
k	0.18	0.19	0.20	0.18	0.19	0.20
Cs_Tx (μF)	200.0	65.0	37.4	9.0	7.5	7.7
Cp_Tx (μF)	60.0	74.0	74.8	9.2	9.1	9.0
Cs_Rx (μF)	Thru	Thru	120.0	50.0	20.8	13.4
Cp_Rx (μF)	640.0	330.0	198.0	103.0	45.0	25.8
Efficiency (S_{21}) ² %	74	84	85	83	83	83

検証として、10分の1モデルで10ターンと20ターンを作製し、伝送効率に差があるかどうかを確認する実験を行った。実験に用いた10分の1モデルを図 3.3-24 に、結果を表 3.3-9 に示す。ターン数を増やすとQ値 (Q_Rx) は下がるが結合係数は上がり、伝送効率には差がないことが確認できたため、今後は20ターンで設計を進める方針に決めた。20ターンにすることでコイルのインダクタンスが増え、整合に用いるコンデンサの容量を減らすことができることから、耐圧容器内で大きなスペースを占めるコンデンサの体積を削減することにも効果が期待できる。



(a) 10 ターン



(b) 20 ターン

図 3.3-24 コイル巻き数検証用の10分の1モデルの外観

表 3.3-9 10分の1モデルを用いたコイル巻き数検証実験の結果

Rx-coil Turns	10	20
L_Tx (μH)	175.60	176.14
Q_Tx	73.03	73.93
L_Rx (μH)	23.78	63.95
Q_Rx	74.77	70.26

k	0.185	0.206
Cs_Tx (μF)	0.080	0.090
Cp_Tx (μF)	0.010	0.002
Cs_Rx (μF)	0.270	0.150
Cp_Rx (μF)	0.480	0.110
Efficiency (%) Tx power = 40 W	81.22	81.24

3.3.3. 電線材の選定

交流電力の損失が小さい電線を調査するため、表 3.3-10 と図 3.3-25 に示す、特徴の異なる 5 種類の電線を準備し、それぞれで直径 2m の 10 ターンコイルを作製してコイル特性を確認した。3.3.1.1.1 と同様に VNA を用い GPST 法にて測定した結果を図 3.3-26 に示す。

表 3.3-10 評価した電線の一覧

	名称	品番	導体断面積	電線径	特徴
①	リッツ線	ICB-CV/0.09	99.7 sq	20.5 mm	φ 0.09 mm 細線を使用
②	リッツ線	ICB-CV/0.4	98.5 sq	19.6 mm	φ 0.40 mm 細線を使用
③	リッツ線	ICB-CV/0.7	99.7 sq	20.2 mm	φ 0.72 mm 細線を使用
④	扁平電線	Z-TFFC	80 sq	42×9.3 mm	断面が扁平。柔軟性高い
⑤	一般電線	EM-LMFC-6600V	100 sq	22.6 mm	通常電線。末端加工が容易

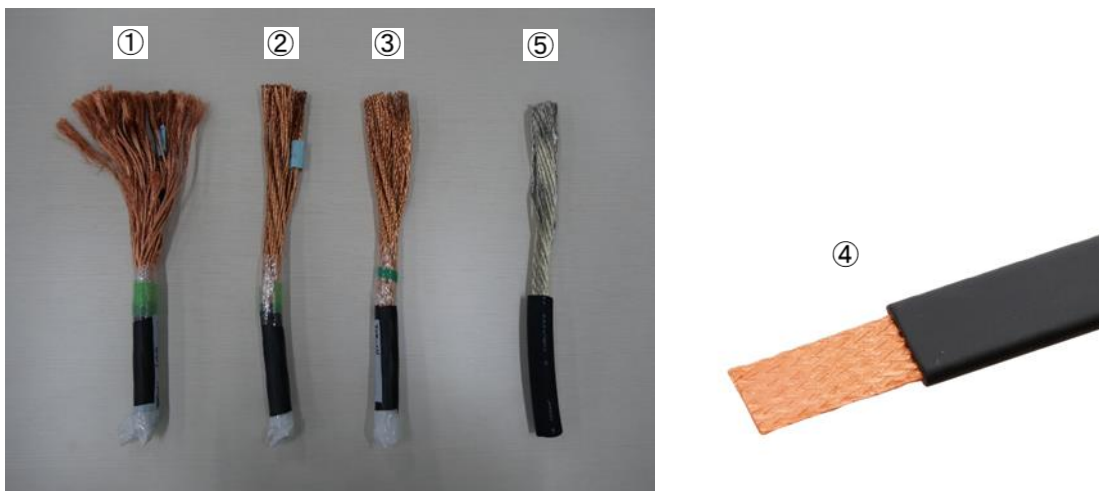
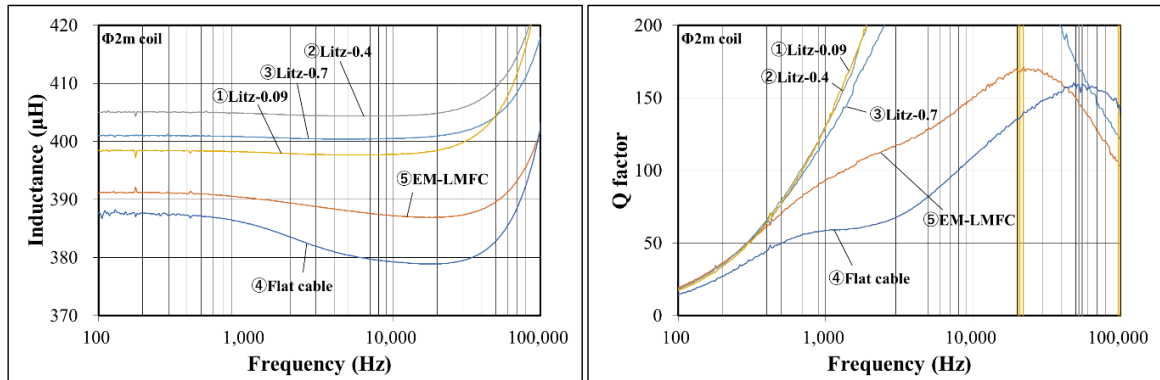


図 3.3-25 評価した電線の外観



(a) インダクタンスの周波数特性

(b) コイル Q 値の周波数特性

図 3.3-26 電線の種類とコイル特性

各電線のインダクタンスの差は 5%前後と少ないものの、Q 値においては 400 Hz 辺りからリッツ線とその他の電線との差が開き始め、1 kHz 以上では顕著な差になっている。したがって、リッツ線を使用すれば伝送効率は良くなるのが式(3.3-8)よりわかるが、一方でリッツ線には末端部分を端子加工するための処理が困難であるという欠点がある。リッツ線は全ての細線に絶縁被覆がそれぞれ施されているため、薬品や溶融はんだなどで溶かして細線同士の導通を取らなければ端子を取り付けることができない。導体断面積が 100 sq にもなると専門業者に依頼しなければならず、長さの調整が困難になるなど実験上の支障になる可能性がある。それに比べて一般的な電線には細線毎の絶縁被覆はないため、容易に圧着端子などを用いて自前で端子加工をすることができる。本検討においては、本番の海中給電に使用する周波数が数百 Hz から 1 kHz あたりになると想定していることと、端子加工の容易さから、⑤の一般電線を使用することにした。将来、Q 値の不足が原因で伝送効率が上がらない場合や、電力伝送に使用する周波数を高くする場合には、コイルに使う電線をリッツ線に変えることで解決できると考える。

上記検討結果より、2 分の 1 モデルには線径が約半分となる 38sq の一般電線を選択し、耐圧性能も見直して 600V EM-LMFC の 38sq 品を採用する。

3.3.4. コンデンサ仕様の検討

整合回路に使うコンデンサは耐圧が数 kV、容量が 100 μF 以上で高周波特性の良い特殊仕様のものが必要になると思われる。このため、パワーエレクトロニクス用の大容量コンデンサや、容量が低い高耐圧コンデンサを複数直並列に結合する方法などの検討を行った。表 3.3-11 に調査したコンデンサの一覧を示す。

表 3.3-11 コンデンサ調査結果

仕様	パナソニック		VISHAY	ル克蘭シェ	指月電機	ニチコン
品番	EZPE	ECQU	MKP1848	CX	MEC~HV	EM
容量 (μF)	10~110	4.7	1~400	20~400	650~950	1~50

定格電圧 (V)	500	275	450 ~ 1200	600 ~ 1900	900 ~ 1200	200 ~ 450
定格電流 (A)	5 ~ 18.5	6	8.5 ~ 50.5	66 ~ 100	35 ~ 65	14 ~ 18
tan δ	0.28 ~ 0.44	-	0.028	0.0035 ~ 0.0251	-	0.15%
ESR (m Ω)	22 ~ 4.4	-	54 ~ 1.5	1 ~ 4	5.2 ~ 2	-
最大サイズ (mm)	35×56×57.5	31×23×33	65×57.5×52.5	ϕ 85×64	116×50×185	59×34×49

周波数を 500 Hz として 3 kW の電力伝送を行った場合のシミュレーションを図 3.3-27 の等価回路で行い、各コンデンサにかかる電圧と電流を表 3.3-12 にまとめた。この結果を受けて実寸サイズで使用することを想定したコンデンサモジュールを作製した (表 3.3-13)。

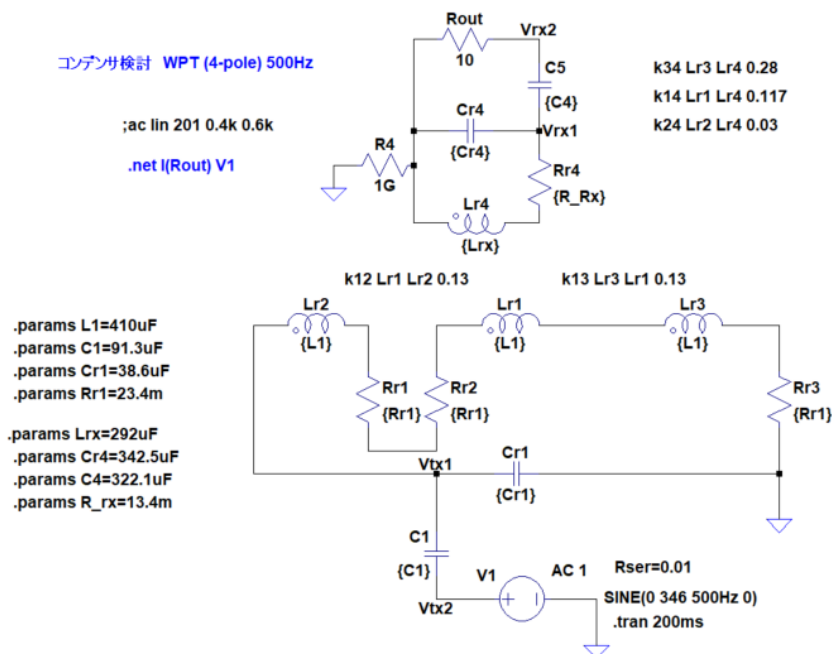


図 3.3-27 コンデンサ仕様検討シミュレーションの回路

表 3.3-12 各コンデンサにかかる電圧と電流

	回路記号	容量 (μ F)	ピーク電圧 (V)	ピーク電流 (A)
送電側	直列用 (C1)	100	154	46
	並列用 (Cr1)	40	399	48
受電側	直列用 (C4)	330	35	36
	並列用 (Cr4)	400	356	384

表 3.3-13 コンデンサモジュールと発熱実験結果

		送電側(Tx)直列コンデンサ	送電側(Tx)共振コンデンサ	受電側(Rx)直列コンデンサ	受電側(Rx)共振コンデンサ
単品仕様	メーカー	Panasonic	左に同じ	左に同じ	左に同じ
	品番	EZPE1B406MTA	ECQUAAF475K	EZPE50117MTA	ECQUAAF475K
	容量	40μF	4.7μF	110μF	4.7μF
	耐圧	77Vrms	275Vrms	35Vrms	275Vrms
	許容電流	11Arms	6Arms	18.5Arms	6Arms
	壁面温度	<70℃	<70℃	<70℃	<70℃
	サイズ	57.5 x 35 x 56mm	31 x 23 x 33mm	57.5 x 35 x 56mm	31 x 23 x 33mm
要求仕様	容量	100μF	40μF	330μF	400μF
	周波数	500~1000Hz	500~1000Hz	500~1000Hz	500~1000Hz
	電圧	109Vrms (154Vp-p)	282Vrms (399Vp-p)	25Vrms (35Vp-p)	252Vrms (356Vp-p)
	電流	33Arms (46Ap-p)	34Arms (48Ap-p)	26Arms (36Ap-p)	27.2Arms (384Ap-p)
モジュール仕様(現品)	容量測定値	95.89μF	39.55μF	319.8μF	379.69μF*
	モジュール構成	2直 x 5並	1直 x 9並	1直 x 3並	1直 x 86並 (1ブロック=10並)
	モジュールサイズ(LxWxH)	217x122x60.5mm	259x38x36.8mm	143x62x60mm	279.5x121x53.5mm
	耐圧	154Vrms	275Vrms	35Vrms	275Vrms
	許容電流	55Arms	54Arms	55.5Arms	516Arms
	外観				
実験	流した電流	33.1Arms	34.2~34.3Arms	26.0~27.2Arms	30.3~32.5Arms*
	通電時間	2h	2h	2h	3h
	周波数	840Hz	900Hz	1000Hz	1000Hz
	開始時温度	23.7℃	22.1℃	20.2℃	23.0℃
	終了時温度	32.3℃	40.1℃	30.5℃	34.9℃
	温度上昇	8.6℃	18.0℃	10.3℃	11.9℃
	開始時周囲温度	25.9℃	23.3℃	20.8℃	23.2℃
	終了時周囲温度	29.0℃	29.6℃	26.1℃	32.0℃
	終了時表面一周温度	3.3℃	10.5℃	4.4℃	2.9℃

*1ブロックのみで実験
(272÷8.6=31.6(A))

表 3.3-13 には各コンデンサモジュールを 48 cm×38 cm×20 cm の樹脂製ケース内に置き、3 kW を伝送した場合に相当する電流を流して発熱を確認した結果も合わせて掲載している。これより 2 時間通電後で最大 10.5℃上昇することがわかる。

AUV の耐圧容器は閉空間であるため、コンデンサモジュールは発熱抑制と占有体積を考慮しなければならないが、この結果から耐圧容器内の雰囲気温度を 60℃以内に抑えられれば、このコンデンサモジュールの使用条件内に収まることがわかった。また、コンデンサモジュールの許容電流を要求仕様の約 2 倍で設計したことの妥当性も確認できた。

3.3.5. 2 分の 1 モデルを用いた実験

設計指針を策定するため、10 分の 1 モデルによる検討結果を踏まえて 2 分の 1 モデルを作製して、小型水槽を用いた実験を行った。2 分の 1 モデルの送電コイルの直径は 1 m で、3 段の各コイルの間隔は 0.5 m になり、受電コイルの直径は 0.25 m で、耐圧容器の長さは 0.5 m になる。

3.3.5.1. 2分の1モデルの作製

3.3.5.1.1. 送電コイル

3.3.3で述べたように電線には600VEM-LMFCの38sqを使用する。巻いた電線を収容し、かつその周囲に空気層を保持するために、外形90mmのポリエチレンパイプを使用して図3.3-28に示すような直径1mの八角形状の構造体を作製した。このパイプ内に電線を10回巻き入れてコイルにし、これを合計3つ作製して0.5m間隔で配置し、直列に接続することで2分の1モデル送電コイルとした。図3.3-29に外観を、図3.3-30に水槽中の配置図を示す。各コイル間は水中コネクタを介して1.1mの電線で接続し、電源や測定機に接続するための引出線の長さは7mにしている。空气中、および5%塩水を入れた水槽中でコイル特性を測定した結果を図3.3-31に、水槽内の塩分濃度実測値を表3.3-14に示す。水槽中でのQ値のピークは2kHzにあり88.8であった。なお、海水の塩分濃度は約3.5%であるが、ばらつきを考慮した上で実環境よりも劣悪な環境を構築するために塩分濃度を5%として実験した。

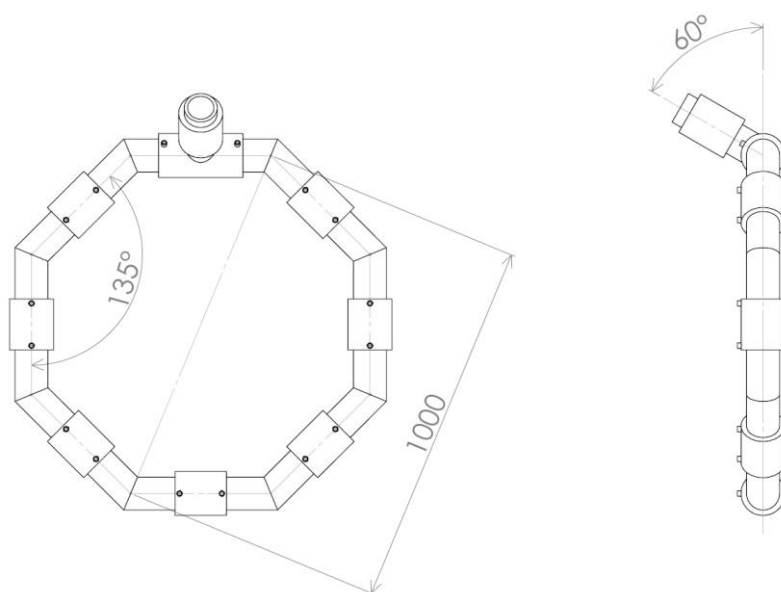
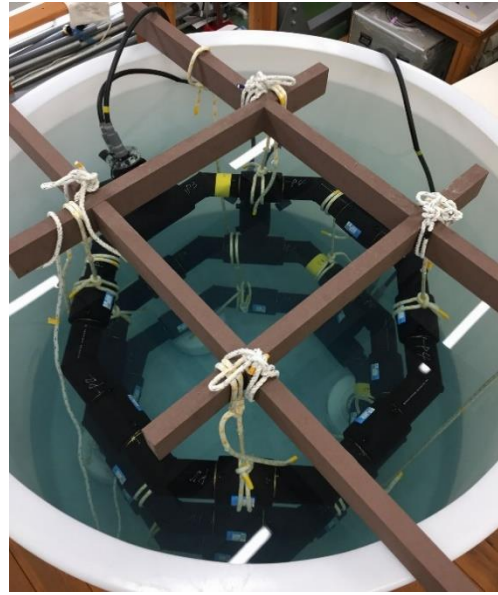


図 3.3-28 2分の1モデル送電コイル（1段分）の外形図



(a) 空気中の送電コイル



(b) 水槽中の送電コイル

図 3.3-29 2分の1モデル送電コイルの外観

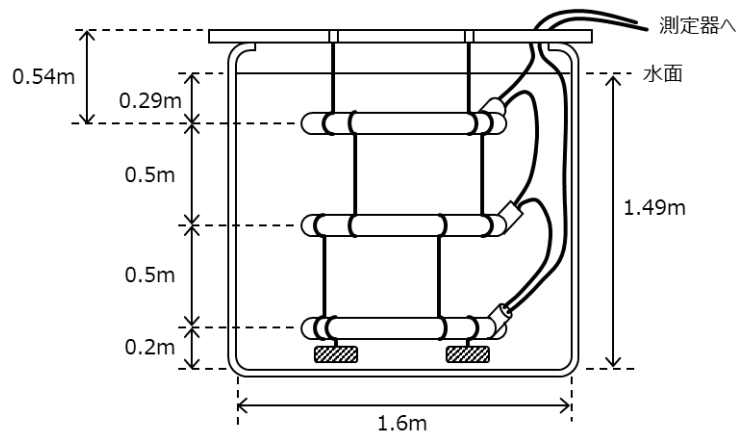
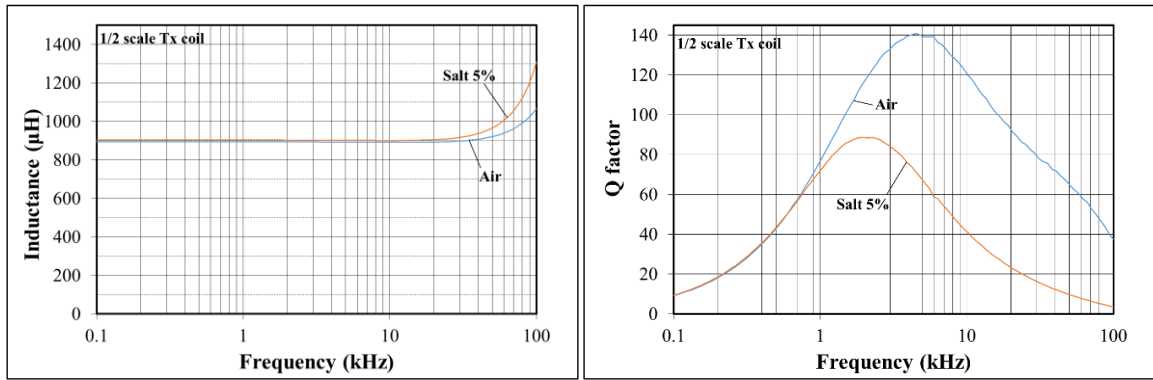


図 3.3-30 水槽中の2分の1モデル送電コイルの配置図

表 3.3-14 水槽内の水温、導電率、塩分濃度

水温	16.4°C
導電率	6.39 S/m (25°C換算値)
塩分濃度	4.7% (25°C換算値)



(a) インダクタンス値の周波数特性

(b) コイル Q 値の周波数特性

図 3.3-31 2 分の 1 モデル送電コイルのコイル特性

3.3.5.1.2. 受電コイル

2 分の 1 モデルの耐圧容器の外形を図 3.3-32 に示す。側面に 30.5 mm×123 mm×厚み 5 mm のフェライトを図 3.3-33 のように 1 周 24 枚、これを 4 列貼って合計 96 枚で耐圧容器の側面部を覆った (図 3.3-34)。その上から送電用コイルと同じ 600V EM-LMFC の 38sq の電線を 20 回巻いて受電コイルを作製した。完成した受電コイルの外観を図 3.3-35 に、水槽中の受電コイルの配置図を図 3.3-36 に示す。測定用の引出線の長さは 7.8m である。

空気中と、5%塩水の水槽中でコイル特性を測定した結果を図 3.3-37 に示す (水槽内の条件は表 3.3-14 参照)。塩水 5%ではコイル Q 値のピークは 1.5 kHz にあり 70.2 であった。



図 3.3-32 2 分の 1 モデル耐圧容器外形図

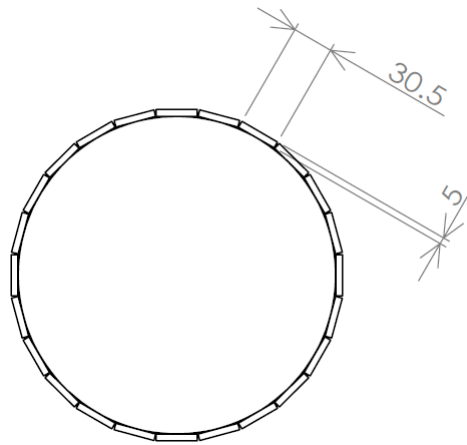


図 3.3-33 2分の1モデルのフェライト貼付け構成

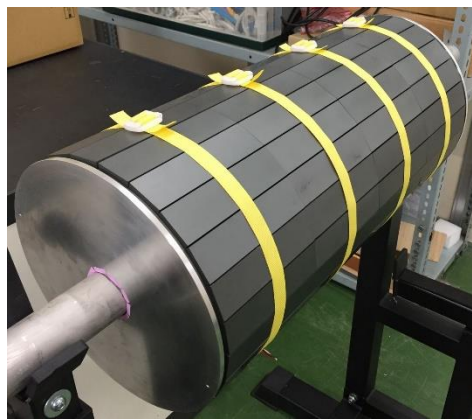


図 3.3-34 2分の1モデル耐圧容器へのフェライト貼付け



(a) 空気中の受電コイル



(b) 水槽中の受電コイル

図 3.3-35 2分の1モデル受電コイルの外観

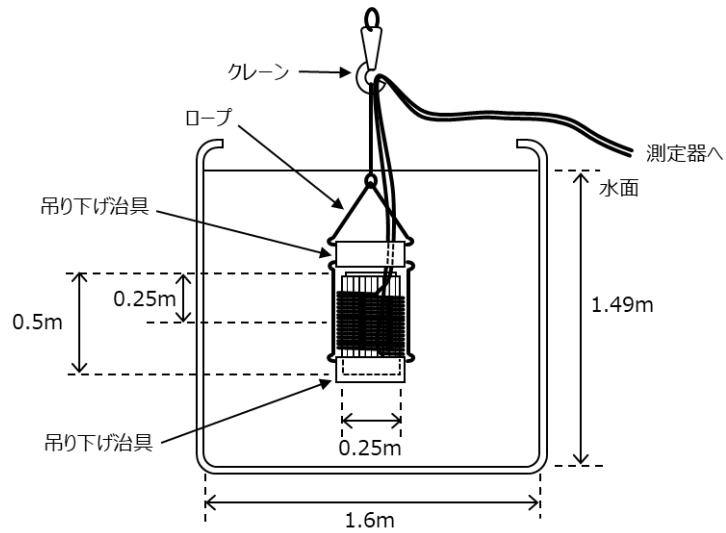
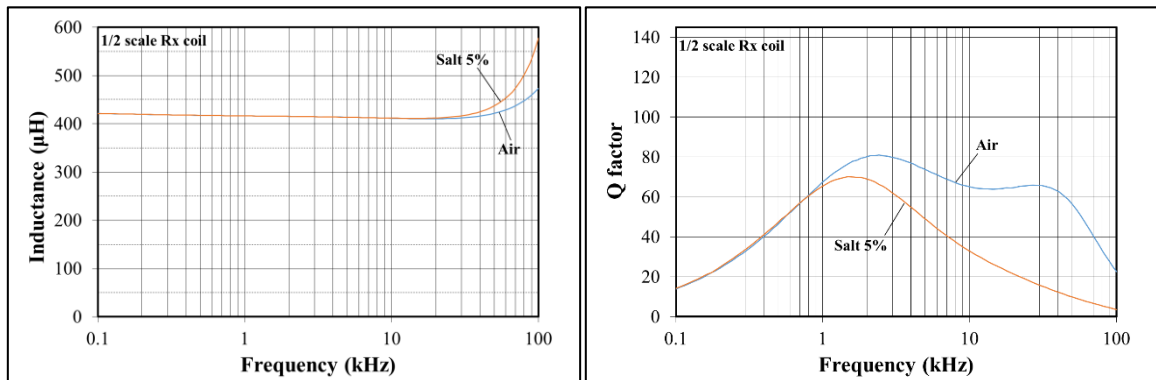


図 3.3-36 水槽中の2分の1モデル受電コイルの配置図



(a) インダクタンス値の周波数特性

(b) コイルQ値の周波数特性

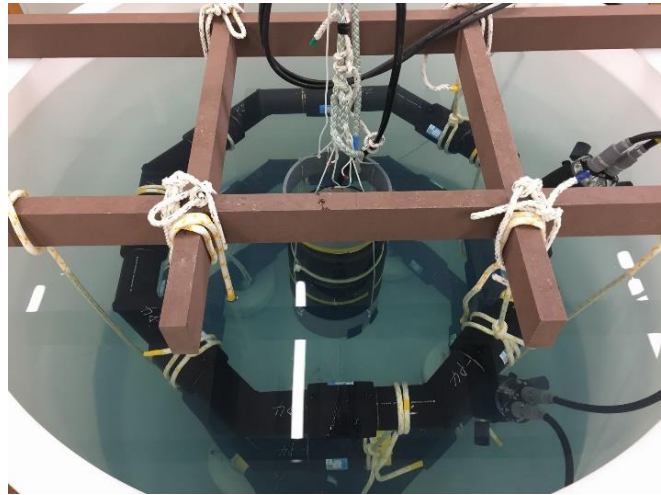
図 3.3-37 2分の1モデル受電コイルのコイル特性

3.3.5.2. 実験システム

3.3.5.1.1 の送電コイルと 3.3.5.1.2 の受電コイルを組み合わせることで2分の1モデルの実験システムを構築した。外観を図 3.3-38 に、水槽中の配置図を図 3.3-39 に示す。また、送電コイルの中心位置を原点として受電コイルの位置を (x, z) とする座標系を図 3.3-40 のように定義した。



(a) 空気中



(b) 水槽中

図 3.3-38 2分の1モデル実験システムの外観

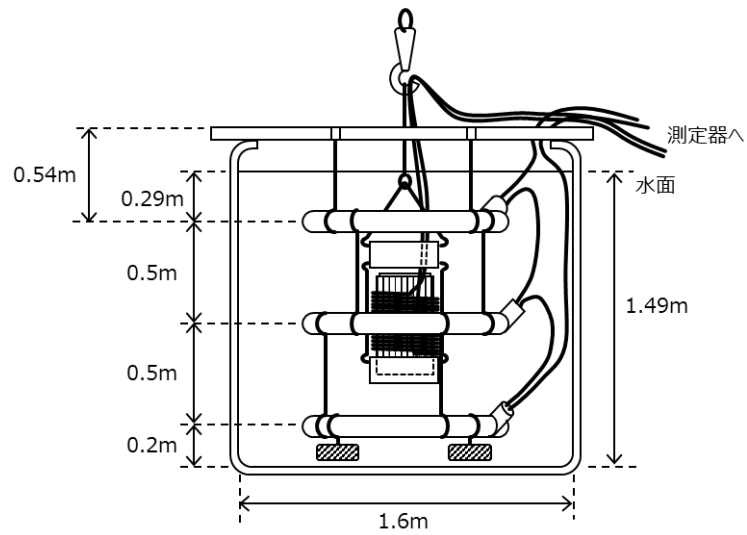


図 3.3-39 水槽中の2分の1モデル実験システムの配置図

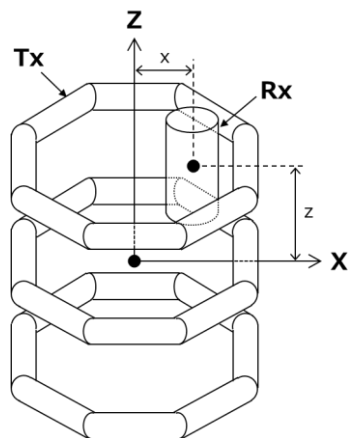
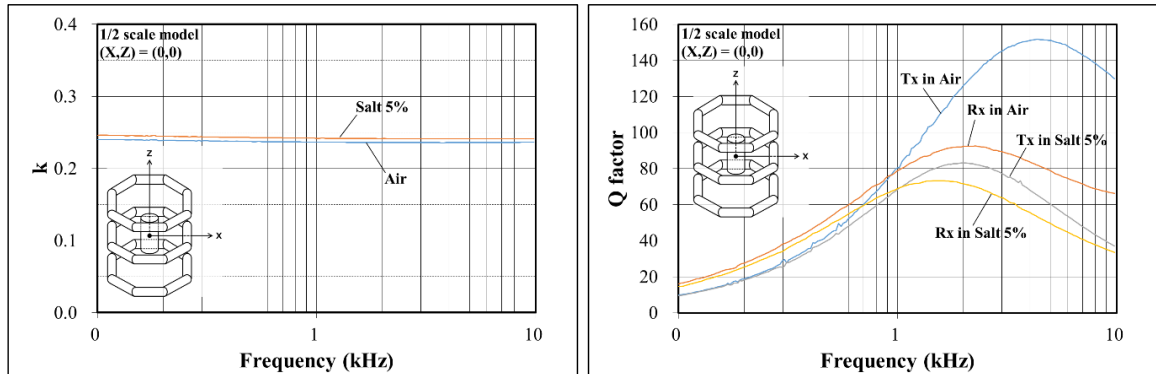


図 3.3-40 2分の1モデル実験システムの座標系

3.3.5.3. 2 分の 1 モデルの測定結果

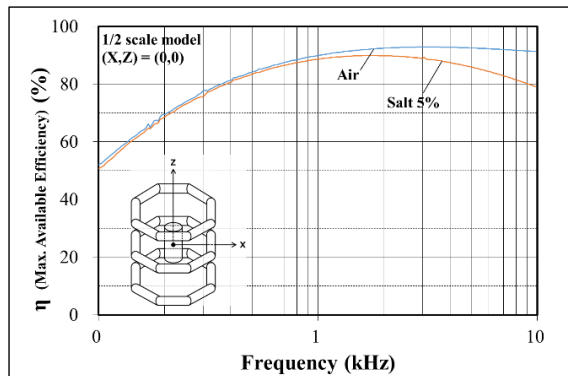
3.3.5.3.1. 最大有能電力効率

3.3.1.3.3 と同様に結合係数 k とコイル Q 値の測定結果から最大有能電力効率を求めた。その結果を図 3.3-41 に示す。この結果より、塩水中の本実験システムにおいては 2 kHz で効率が最大となり、89.8%になることがわかった。



(a) 結合係数の周波数特性

(b) コイル Q 値の周波数特性



(c) 最大有能電力効率

図 3.3-41 中心位置における空気中と塩水中での測定結果

3.3.5.3.2. 整合回路

効率が最大となる 2 kHz で共振するよう整合回路定数を求めた結果を表 3.3-15 に、作製した整合回路部を図 3.3-42 に示す。また、水槽中の中心位置での整合状態を VNA で測定した結果を図 3.3-43 に示しているが、 $S_{21}=0.944$ であることから式(3.3-10)より、整合回路込みで効率 89.1%が得られていることがわかる。

表 3.3-15 2分の1モデル実験システムの整合回路定数

@2 kHz	Value
L_Tx (μH)	954.5
Q_Tx	83.1
L_Rx (μH)	414.4
Q_Rx	71.5
k	0.241
Cs_Tx (μF)	4.00
Cp_Tx (μF)	3.52
Cs_Rx (μF)	7.37
Cp_Rx (μF)	11.00
Efficiency (S ₂₁) ² %	89.1

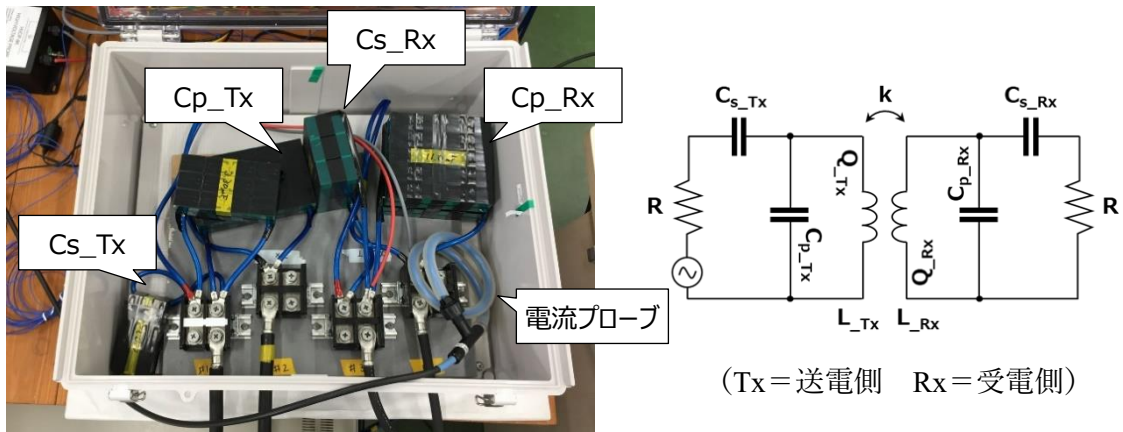


図 3.3-42 2分の1モデル実験システムの整合回路部

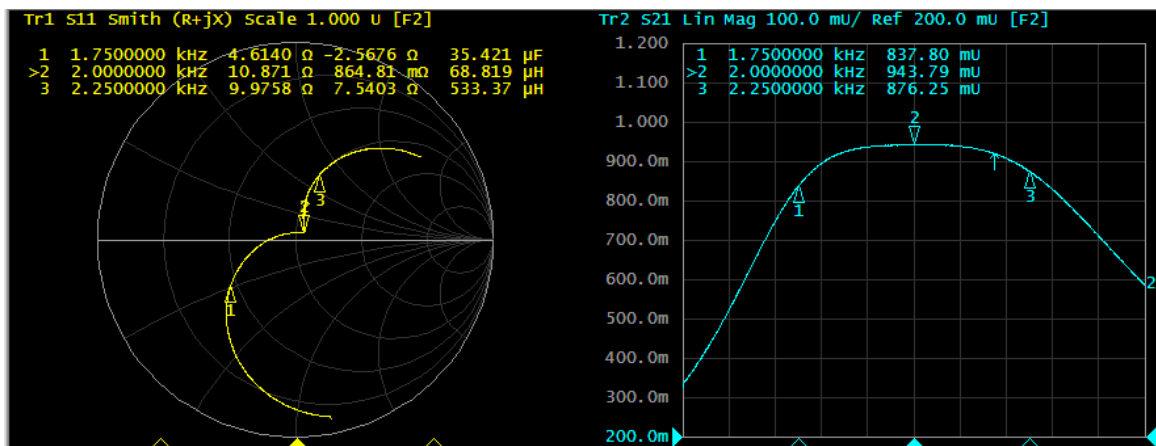


図 3.3-43 水槽（塩水 5%）中の中心位置での整合状態（左 = S₁₁、右 = S₂₁）

3.3.5.3.3. 電力を印加するための実験システム構成

将来的にはインバータを交流電源として使用する想定であるが、この実験では周波数を変えて測定することがあることを考慮し、2分の1モデル実験システムでは交流電源としてファンクションジェネレータ（FG）と高周波アンプの組み合わせを使用した。ただし本システムで用いる高周波アンプの能力上限により、本実験では送電コイルへの入力を1kWまでと制限した。実験システムのブロック図を図 3.3-44 に、実験システムの全景を図 3.3-45 に、機器一覧を表 3.3-16 に示す。

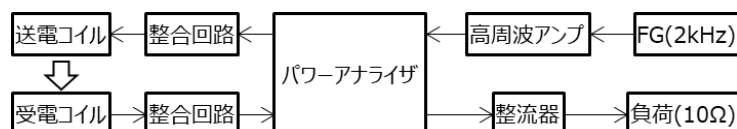


図 3.3-44 2分の1モデル実験システムのブロック図

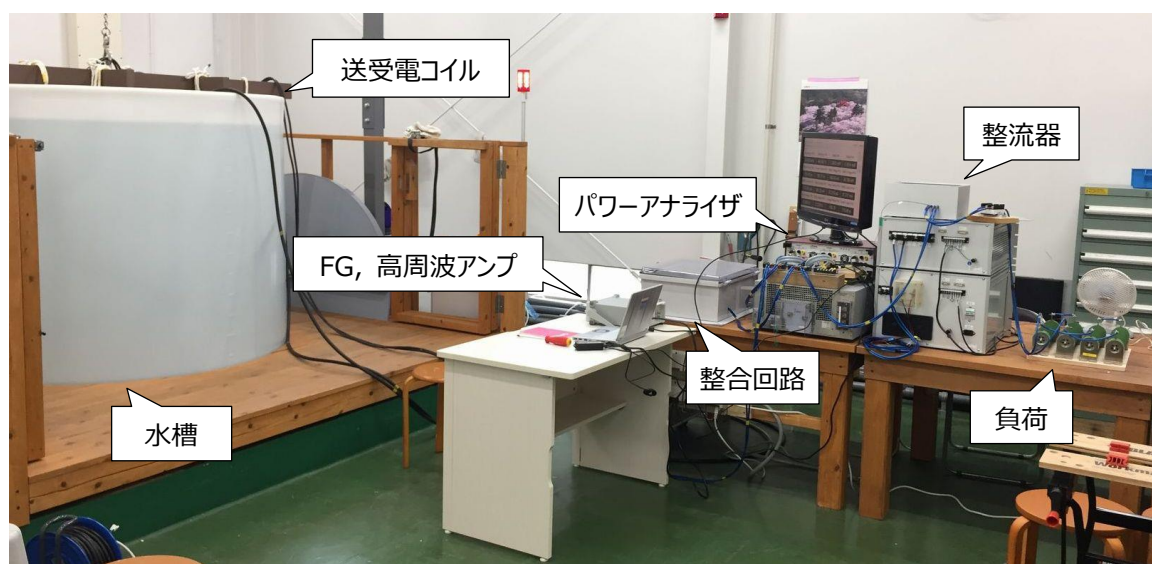


図 3.3-45 2分の1モデル実験システムの全景

表 3.3-16 実験システム機器一覧

機器名	メーカー	品番
信号発生器 (FG)	GW INSTEK	AFG-2105
高周波アンプ	NF	4520A
パワーアナライザ	N4L	PPA5530
整流器	新電元工業	S50VB80
固定抵抗 (2直2並)	TE	TE1000B10RJ

3.3.5.3.4. 電力伝送効率

給電領域は送電コイル内側全域になるので図 3.3-40 の座標系においては $-0.5 \text{ m} \leq x \leq 0.5 \text{ m}$ 、 $-0.5 \text{ m} \leq z \leq 0.5 \text{ m}$ に相当するが、受電コイルの径と送電コイルのパイプ径の影響で x の取り得る範囲は $-0.3 \text{ m} \leq x \leq 0.3 \text{ m}$ までになる。また、座標系は上下左右対称であることから、測定は第 1 象限のみで行った。なお、受電コイルが給電領域内で最も端に寄ったときの x の値は 0.3 m であるが、測定系の制約上、 $z = 0.5 \text{ m}$ のときのみ $x = 0.25 \text{ m}$ が最端となる。

塩水 5% の水槽中で受電コイルの位置を変えながら、周波数 2 kHz で 1 kW の電力を送電コイルに入力したときの効率を測定した結果を図 3.3-46 に示す。最も効率が低くなる、受電コイルが送電コイルの中心軸上で最上端にあるとき ($x = 0 \text{ m}$ 、 $z = 0.5 \text{ m}$ の位置) でも 85.9% という高効率を得られた。この結果より、本研究で提案している海中ワイヤレス給電システムが、ポジションフリーかつ高効率で給電できる可能性を持つことが確認できたと言える。

また、海水に接するコイルの巻き方やコイル周辺の構造に必要な特性については損失メカニズム検討と合わせて検証しなければならないが、本実験の構成にて高効率の電力伝送が実現できていることから、電線やフェライトの選択、ターン数の設定など、基本設計はできたと考える。2 分の 1 モデルの主な設計仕様を表 3.3-17 にまとめる。

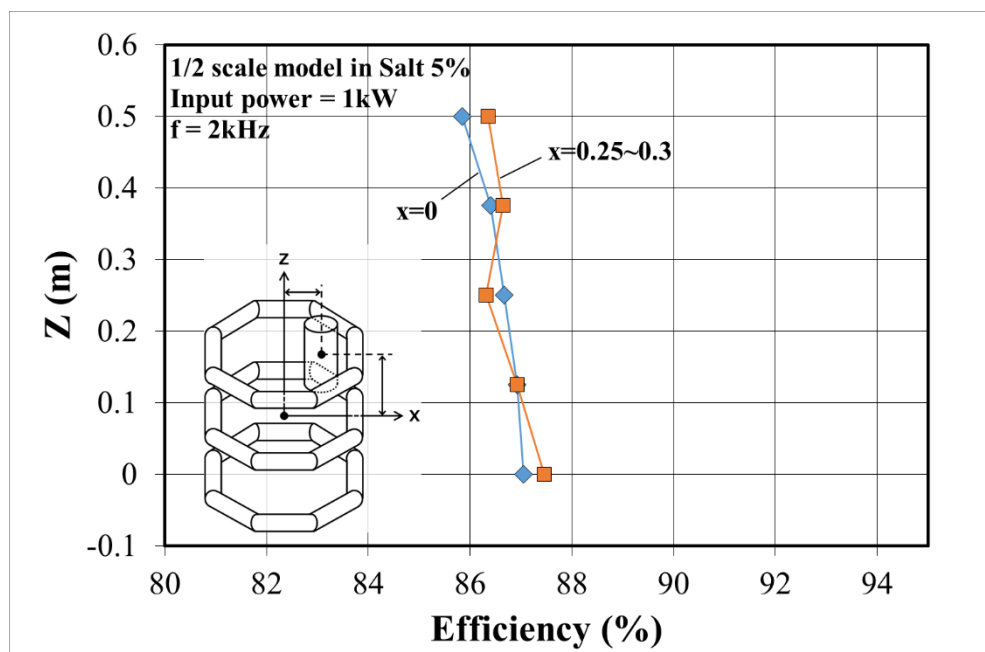


図 3.3-46 2 分の 1 モデルの電力伝送効率の測定結果

表 3.3-17 2分の1モデルの主な設計仕様

項目	仕様
送電コイル	直径 = 1 m、パイプ外径 = 0.09 m、3 段直列接続
耐圧容器	直径 = 0.25 m、長さ = 0.5 m
フェライト仕様	MBT1 (JFE フェライト)、123×30.5×5 mm
フェライト貼付け仕様	24 枚/周×4 列 (計 96 枚)、耐圧容器の側面のみ貼付け
電線仕様	600V EM-LMFC、38 sq、外径 10.9 mm (古河電工産業電線)
送電コイル巻数	10 ターン × 3 段
受電コイル巻数	20 ターン
共振周波数	2 kHz

3.3.5.3.5. 磁気飽和実験

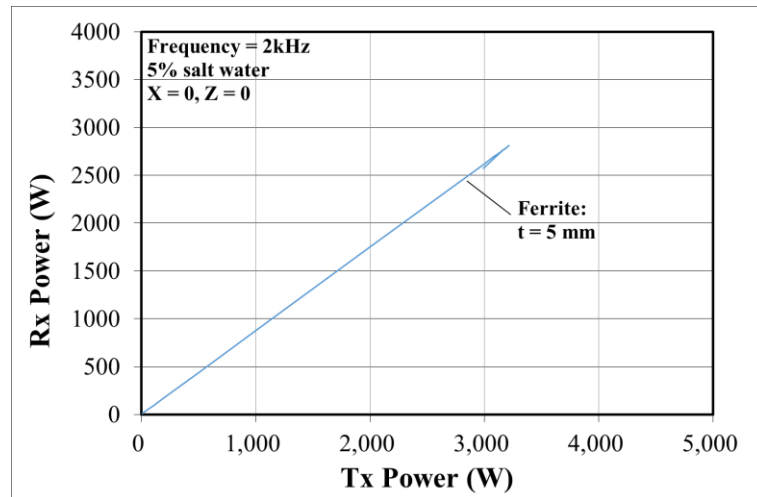
実験システム構成を図 3.3-47、表 3.3-18 のように見直し、3 kW の電力伝送実験ができるように改良した。このシステムを用いて 3.3.5.3.4 と同じ送電コイルと受電コイルを用いて送電電力 (Tx Power) を増やしながら受電電力 (Rx Power) を測定した結果を図 3.3-48 (a) に示す。またこのときの受電コイルに流れる電流を図 3.3-48 (b) に示す (測定は中心位置で実施)。この結果からわかるように、受電電力が 3 kW に到達する手前で電力をそれ以上増やすことができなくなっており、この時点で磁気飽和が発生したと推察できる。このときの受電コイルに流れる電流は 60 Arms を超えたあたりであった。



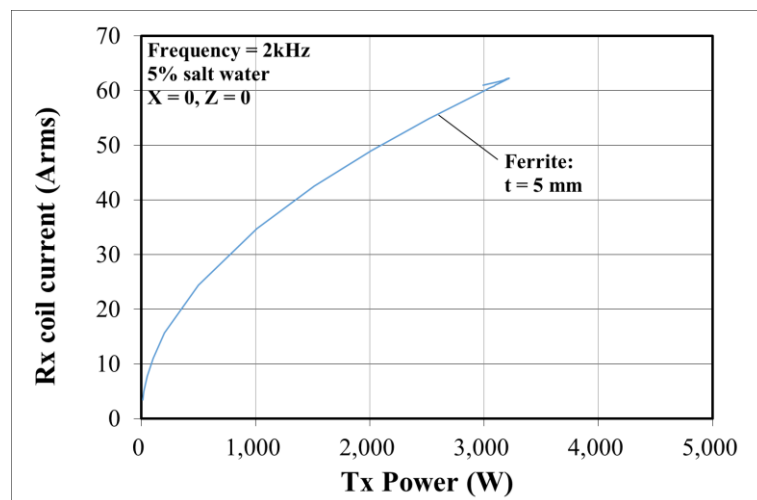
図 3.3-47 3 kW 対応した 2 分の 1 モデル実験システムのブロック図

表 3.3-18 3 kW 対応した 2 分の 1 モデル実験システムの機器一覧

機器名	メーカー	品番
交流電源	KIKUSUI	PCR6000WE2R
パワーアナライザ	N4L	PPA5530
整流器	新電元工業	S50VB80
双方向電源 (電子負荷)	Electro-Automatik	PSB 9750-60



(a) 送電電力と受電電力

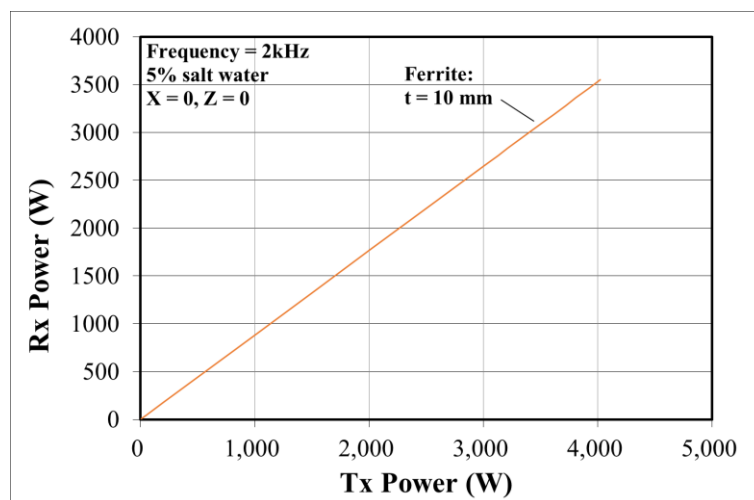


(b) 送電電力と受電コイル電流

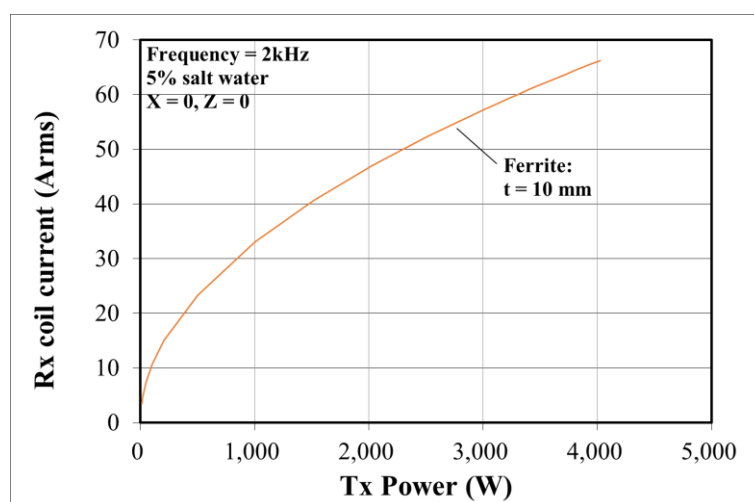
図 3.3-48 フェライト 5 mm 厚の 2 分の 1 モデル電力印加実験

図 3.3-22 で 5 mm 厚のフェライトでは送電電力 5.5 kW まで磁気飽和しないという解析結果を得ていたが、のちにこの値はピーク値であることが判明し、送電電力の実効値で 3.9 kW が限界であった。おおよそ解析と近い実験結果だったと言える。

ここでは磁気飽和対策として、フェライトの厚みを増やすことを考えた。厚みを増やすとフェライト中の磁束密度は小さくなるので、磁界強度が同じでも磁気飽和は発生しなくなる。フェライトの厚みを倍の 10 mm にして実験した。その結果を図 3.3-49 に示す。コイル電流が 60 Arms を超えても磁気飽和は発生しておらず、対策の効果が確認できた。なおこの実験では送電 4 kW で止めているが、機器の上限により中断したためであり、磁気飽和したわけではない。



(a) 送電電力と受電電力



(b) 送電電力と受電コイル電流

図 3.3-49 フェライト 10 mm 厚の 2 分の 1 モデル電力印加実験

これで磁気飽和対策できることは確認できたが、一方でフェライトの厚みを倍にするとフェライトの重量も倍になってしまう。5 mm の場合では AUV に使用するフェライト重量を 33.36 kg と見積もっていたが、倍の 66.72 kg になった場合、浮力調整などで AUV の設計に支障をきたす可能性がある。そこで、フェライト厚み 5 mm のままで対策する方法を 3.3.6.1 で検討した。

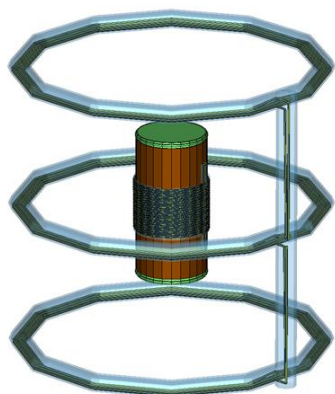
3.3.6. 実寸モデルを用いた実験

3.3.6.1. 磁気飽和対策検討

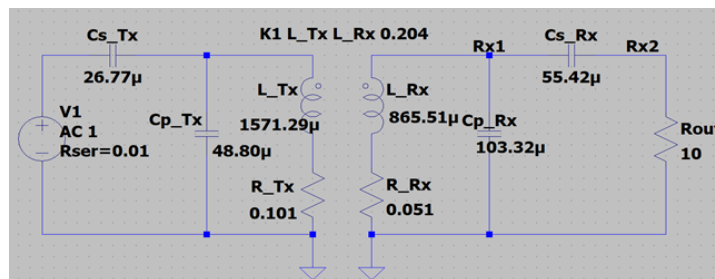
受電コイルに流れる電流を減らすことができれば磁気飽和対策になるのではないかと考え、整合条件を探すためシミュレーションによる検討を行った。電磁界シミュレーション

(MW STUDIO) で実寸モデルを作り、海水中での送電コイルと受電コイルのインダクタンス値、Q 値、抵抗値および結合係数 k を求めて、回路シミュレータ (LT-Spice) で受電コイルに流れる電流を確認した。電磁界シミュレーションモデルを図 3.3-50 (a) に、回路シミュレータに用いた条件を図 3.3-50 (b) と表 3.3-19 に示し、受電電力が 3 kW のときの受電コイル電流のシミュレーション結果を図 3.3-51 に示す。

この結果から、共振周波数を高くしていくことでコイル電流が減る傾向があることがわかったため、フェライトの厚みは 5 mm のままで実寸モデルを作製することにした



(a) 電磁界シミュレーションモデル



(b) 回路シミュレーションモデル
(Tx = 送電側、Rx = 受電側)

図 3.3-50 実寸モデルのシミュレーションモデル

表 3.3-19 回路シミュレーションに用いた値

F (Hz)	500	600	700	800	900	1000
L_Tx (μH)	1571.29	1568.66	1566.57	1564.67	1563.22	1561.96
Q_Tx	49.08	49.61	49.65	49.30	48.74	48.01
R_Tx (Ω)	0.101	0.119	0.139	0.160	0.181	0.204
L_Rx (μH)	865.51	864.20	863.10	862.17	861.33	860.58
Q_Rx	53.58	53.31	52.76	52.05	51.24	50.38
R_Rx (Ω)	0.051	0.061	0.072	0.083	0.095	0.107
k	0.204	0.205	0.205	0.205	0.205	0.205
Cs_Tx (μH)	26.77	19.29	14.78	11.8-	9.71	8.18
Cp_Tx (μH)	48.80	32.24	22.61	16.56	12.54	9.75
Cs_Rx (μH)	55.42	34.46	24.59	18.83	15.07	12.43
Cp_Rx (μH)	103.32	68.60	48.56	35.97	27.58	21.71

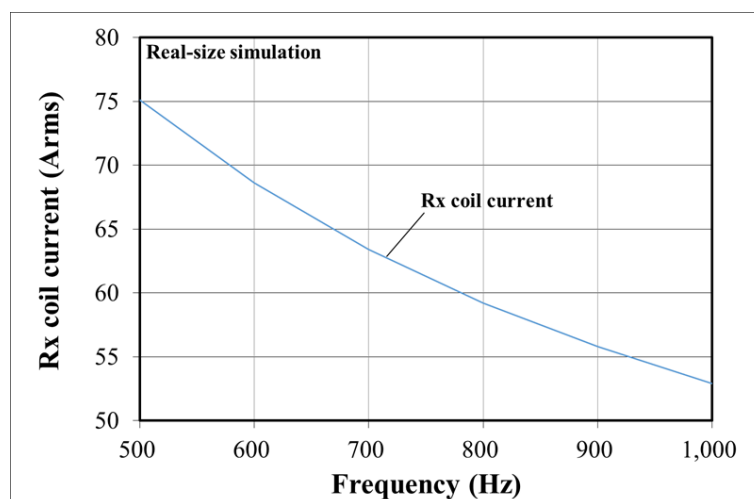


図 3.3-51 受電コイル電流のシミュレーション結果

3.3.6.2. 実寸モデルの作製

これまでの検討結果を踏まえて実寸モデルを作製した。

3.3.6.2.1. 送電コイル（充電スタンド）

主な仕様を表 3.3-20 に、外観を図 3.3-52 に示す。詳細寸法は 3.4.2 章に掲載する。なおここで作製した送電コイルは実寸モデル実験だけでなく最終実験の充電スタンドとしても使用する。

表 3.3-20 送電コイル（充電スタンド）の主な仕様

項目	仕様
コイル直径	2 m
電線収納パイプ外径	0.11 m（ポリエチレン製）
電線仕様	600V EM-LMFC、100 sq、外形 18 mm（古河電工産業電線）
コイル巻数／段	10 ターン
その他	コイル間隔 1 m、3 段を直列接続

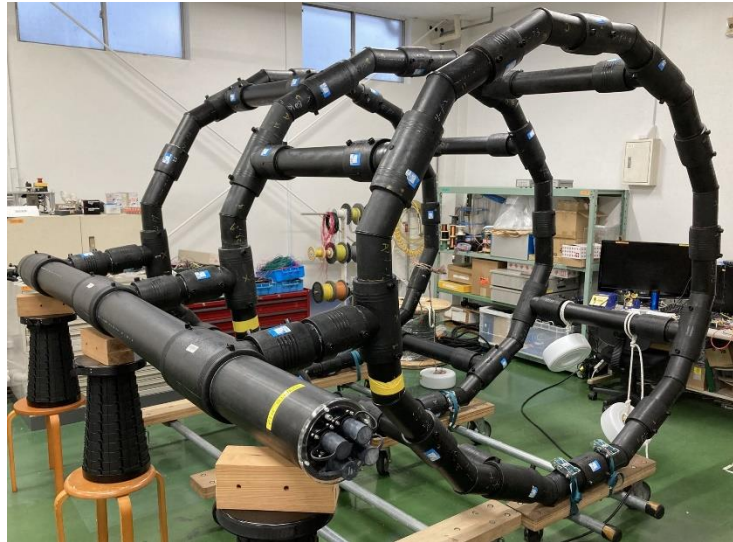


図 3.3-52 実寸モデルの送電コイル（充電スタンド）外観

3.3.6.2.2. 受電コイル（模擬 AUV）

実寸モデル受電コイルの筐体（AUV 模擬筐体）図面と外観を図 3.3-53、図 3.3-54 に示す。寸法および材質は AUV の耐圧容器と同一にしている。

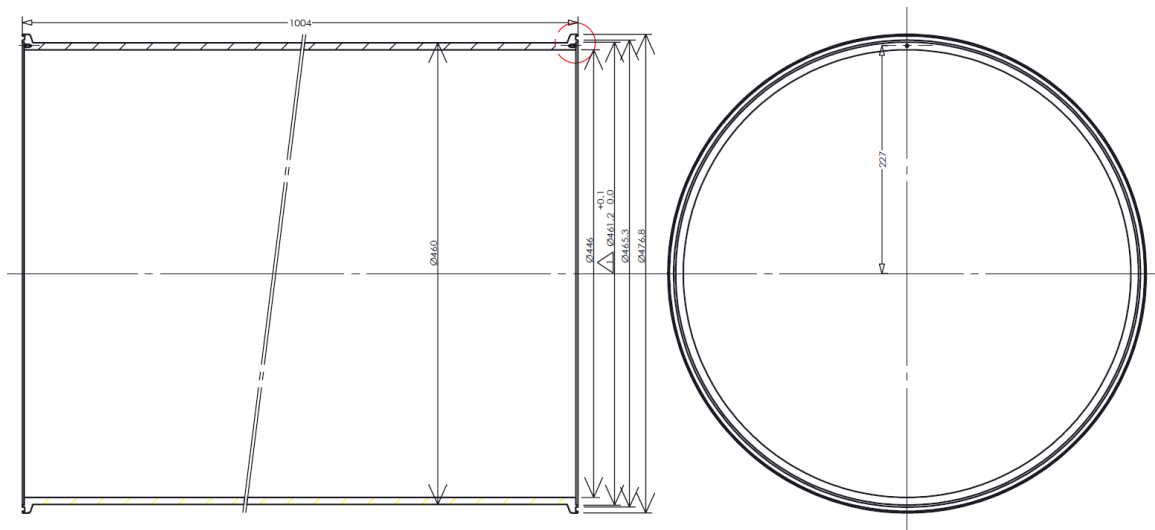


図 3.3-53 AUV 模擬筐体図面（胴体部長さ 1004 mm、直径 460 mm）

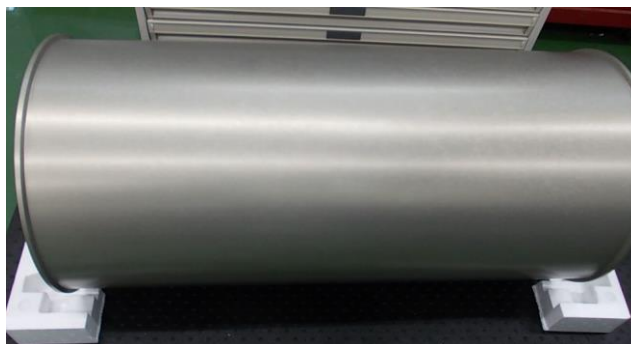


図 3.3-54 AUV 模擬筐体の外観

この耐圧容器の側面に $120\text{ mm} \times 29.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ のフェライトを 1 周 48 枚貼り、それを 8 列繋いで側面全体を覆っている。その上から電線を 20 ターン巻いて受電コイルを作製した。主な仕様を表 3.3-21 に、外観を図 3.3-55 に示す。

表 3.3-21 受電コイル（模擬 AUV）の主な仕様

項目	仕様
耐圧容器	直径 = 0.46 m、長さ = 1 m、アルミ合金
電線仕様	600V EM-LMFC、100 sq、外径 18 mm（古河電工産業電線）
コイル巻数	20 ターン
フェライト仕様	MBT1（JFE フェライト）、 $120 \times 29.5 \times 5\text{ mm}$
フェライト貼付け仕様	48 枚/周 \times 8 列（計 384 枚）、耐圧容器の側面のみ貼付け

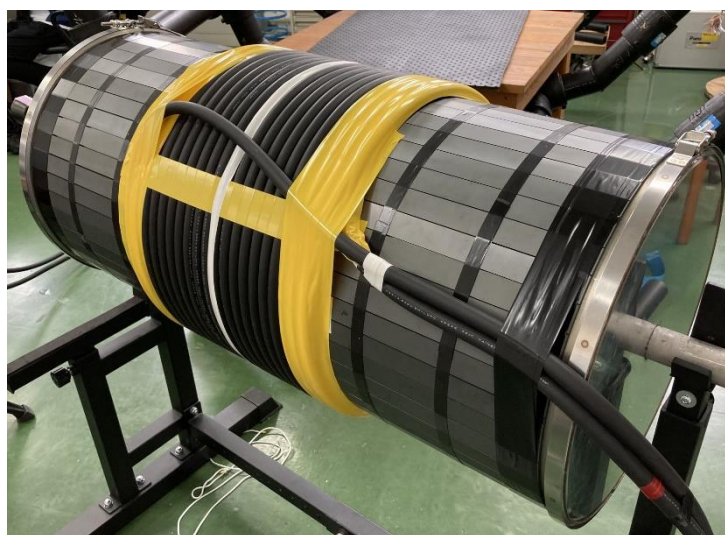


図 3.3-55 実寸モデルの受電コイル（模擬 AUV）外観

作製した実寸モデルの受電コイルの重量を確認した結果を表 3.3-22 に示す。内部の空間が大きいので浮力も大きく、実験時の磁性安定性を考慮し 90 kg の土のうをおもりとして内部に入れて重量調整を行い、水中姿勢を安定させた。（図 3.3-56）

表 3.3-22 実寸モデル受電コイルの重量確認結果

空気中	塩水中（塩分濃度 5%）
212 kg（本体 122 kg+土のう 90 kg）	11 kg



図 3.3-56 水槽中の実寸モデル受電コイル

3.3.6.3. 磁気飽和の確認

3.3.6.1 の結果を確認するため、実験室内に図 3.3-57 のように配置して空気中で電力伝送の実験を行った。これまでの小型モデルの実験で、コイルのインダクタンス値および結合係数は空気中と海水中とでほとんど差はなく、共振周波数も変化しないことがわかっているため、空気中で電力を印加しても磁気飽和に対する傾向は確認できると判断した。

共振周波数を 1 kHz にして実験を行った。コイル特性と回路定数を表 3.3-23 に、実験結果を図 3.3-58 に示す。表 3.3-23 には 3.3.6.1 で行ったシミュレーションのうち 1 kHz (1000 Hz) の結果も比較のため掲載している。

シミュレーションは海水中の条件設定であり、実測は空気中なのでコイル Q 値に差はあるのは当然として、結合係数などおおよそ近い値になっている。しかし送電コイルのインダクタンス値は 90 μH ほど実測値が大きく、受電コイルのインダクタンス値は逆に実測の方が 40 μH 小さい。この差によってコンデンサの値に違いが生じ、シミュレーションとは異なって実測では受電コイル電流が 60 Arms を超えてしまい、受電電力が 2.3 kW あたりで磁気飽和した。

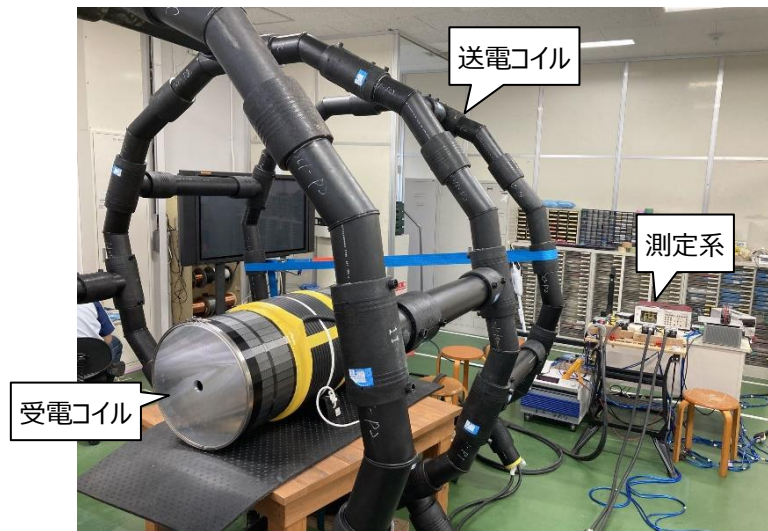
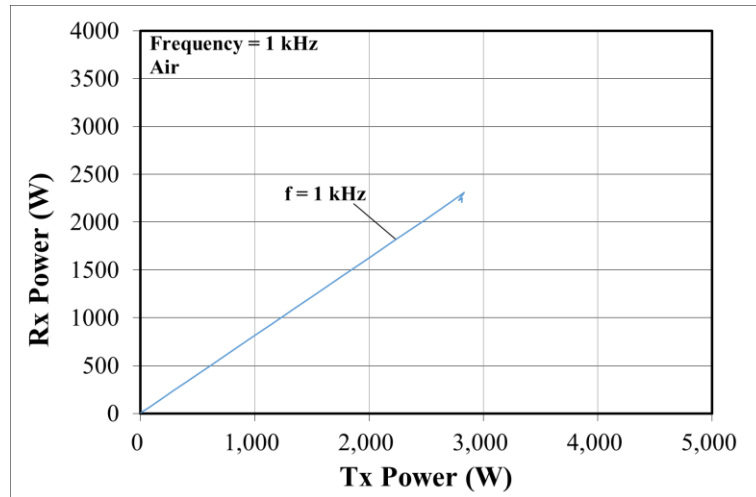


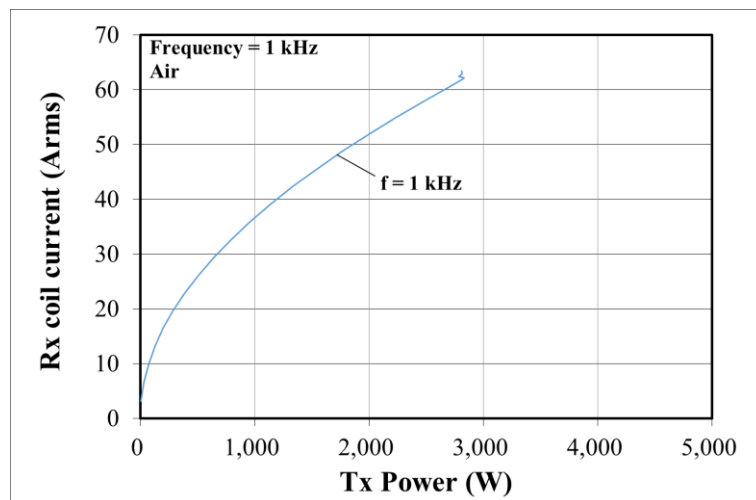
図 3.3-57 実寸モデル実験環境（空气中）

表 3.3-23 実寸モデルのコイル特性と回路定数（シミュレーションと実測値）

F = 1 kHz	Simulation (Sea water)	Measurement (Air)
L_Tx (μH)	1561.96	1649.9
Q_Tx	48.01	107.1
R_Tx (Ω)	0.204	0.097
L_Rx (μH)	860.58	820.0
Q_Rx	50.38	74.7
R_Rx (Ω)	0.107	0.069
k	0.205	0.207
Cs_Tx (μH)	8.18	7.89
Cp_Tx (μH)	9.75	8.81
Cs_Rx (μH)	12.43	13.06
Cp_Rx (μH)	21.71	23.56



(a) 送電電力と受電電力



(b) 送電電力と受電コイル電流

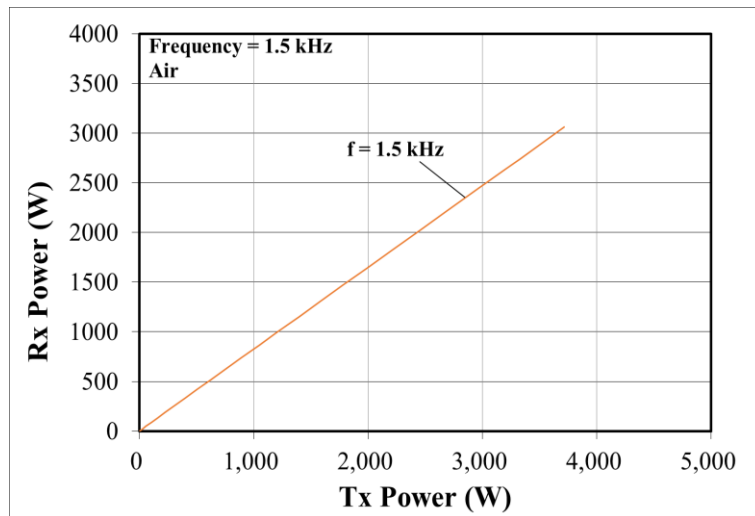
図 3.3-58 実寸モデル電力印加実験（空气中、周波数=1 kHz）

このままでは 3 kW の電力伝送はできない。送電コイルおよび受電コイルのインダクタンス値を調整することも難しいため、図 3.3-51 の受電コイル電流のシミュレーション結果の傾向から、共振周波数を 1 kHz からさらに上げることで受電コイル電流が減り、磁気飽和対策になるのではと考えた。共振周波数を 1.5 kHz で実験したときのコイル特性と回路定数を表 3.3-24 に、実験結果を図 3.3-59 に示す。また 1.5 kHz の整合回路に用いたコンデンサモジュールの仕様についても表 3.3-25 に示しておく。

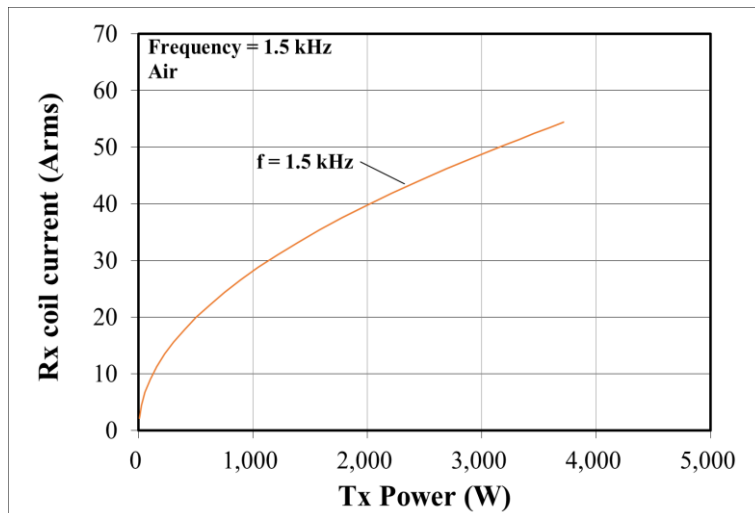
表 3.3-24 実寸モデルのコイル特性と回路定数（1 kHz と 1.5 kHz の実測値）

Measurement (Air)	1 kHz	1.5 kHz
L_Tx (μH)	1649.9	1647.7
Q_Tx	107.1	122.4
R_Tx (Ω)	0.097	0.126

L_Rx (μH)	820.0	816.3
Q_Rx	74.7	70.0
R_Rx (Ω)	0.069	0.109
k	0.207	0.207
Cs_Tx (μH)	7.89	4.21
Cp_Tx (μH)	8.81	3.16
Cs_Rx (μH)	13.06	6.30
Cp_Rx (μH)	23.56	8.84



(a) 送電電力と受電電力



(b) 送電電力と受電コイル電流

図 3.3-59 実寸モデル電力印加実験 (空气中、周波数 = 1.5 kHz)

表 3.3-25 1.5 kHz 整合回路のコンデンサモジュールの仕様

	容量値 (μF)	コンデンサ品番	直列数	並列数	耐圧 (Vrms)	許容電流 (Arms)
Cs-Tx	4.21	ECQUAAF335K	3	4	825	20
Cp-Tx	3.16	ECQUAAF335K	5	5	1375	25
Cs-Rx	6.30	ECQUAAF335K	3	6	825	30
Cp-Rx	8.84	ECQUAAF475K	5	10	1375	60

表 3.3-24 には比較のため 1 kHz の値も掲載している。周波数を変えたことでコンデンサの定数が変わっているがインダクタンス値と結合係数に大きな変化はない。共振周波数を 1.5 kHz にした結果、予想どおり 1 kHz のときより受電コイル電流が減少し、磁気飽和せずに受電電力 3 kW を達成することができた。なおこのときの伝送効率 は 82% であった。

周波数を上げると海水中では伝送効率は低下する傾向であるが、空気中から数%の低下なら 80% を達成できる可能性がある と判断し、電力 3 kW を優先して周波数を 1.5 kHz に決めて、今後の実験を進めることにした。

3.3.6.4. 実験システム

日本サルヴェージ株式会社の所有する海水プールにて図 3.3-60、図 3.3-61 に示す給電実験システムを構築した。送電コイルは上段のコイルが水面下 1 m になる位置で固定している。なお実験場所の選定については 3.4.3 章で述べる。

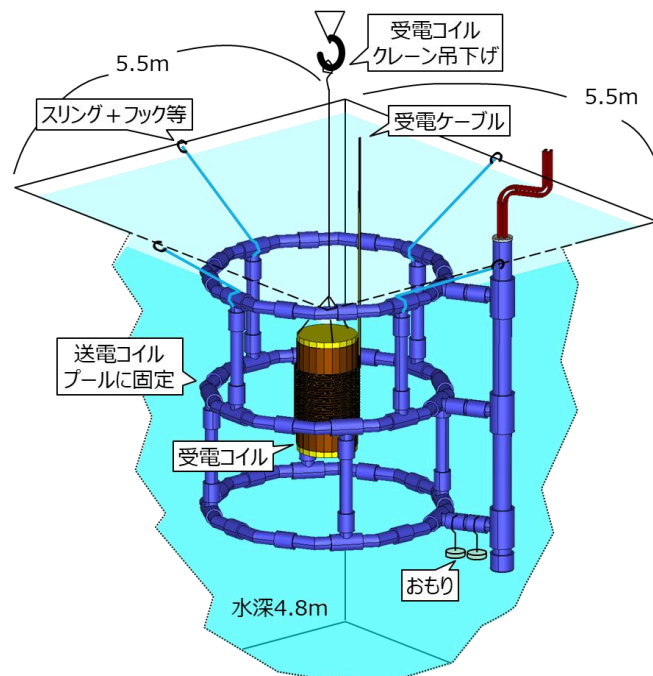


図 3.3-60 実寸モデルの実験システム概略図

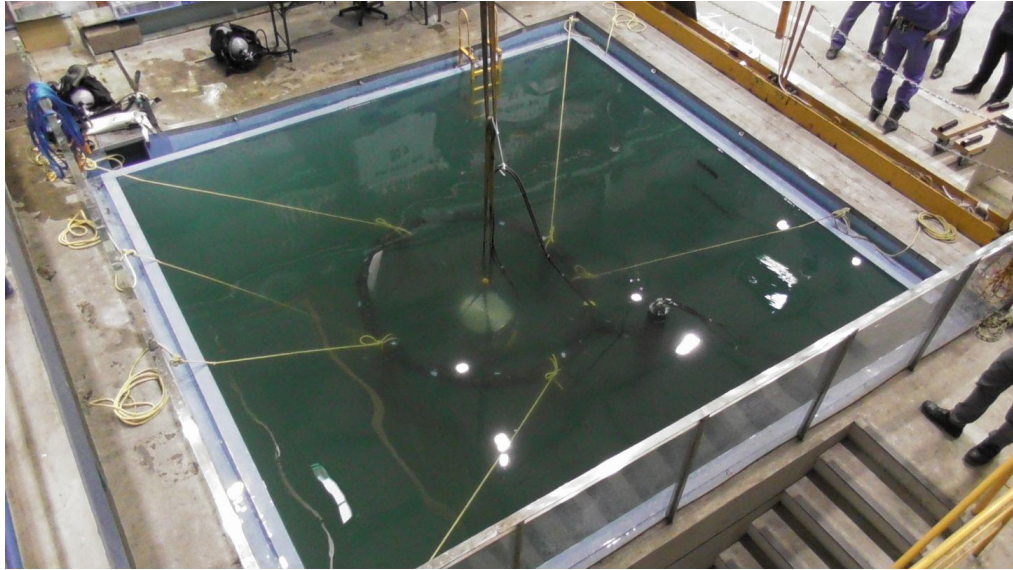
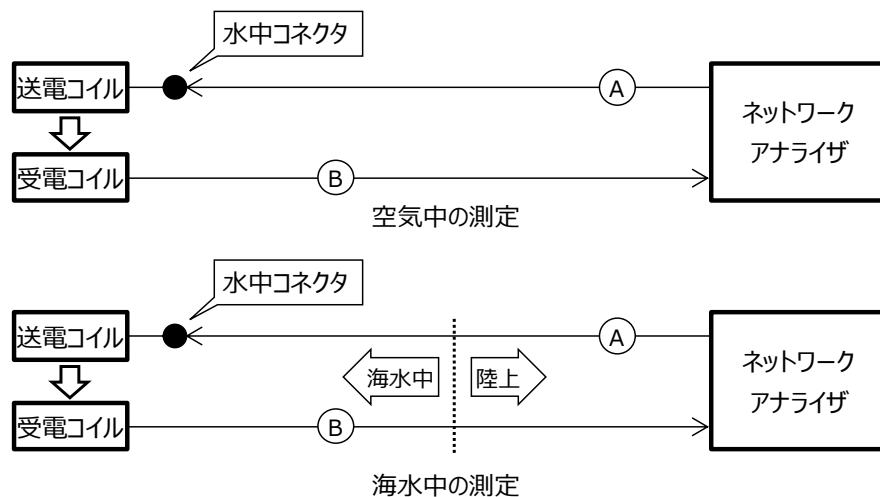


図 3.3-61 海水プールに設置した実寸モデルの実験システム

3.3.6.5. 実寸モデルの測定結果

3.3.6.5.1. コイル特性と最大有能電力効率

各コイルのインダクタンス値、Q 値および結合係数 k を測定し、最大有能電力効率を求めた。測定系は図 3.3-62 のように接続しており、測定時の海水プール内のコンディションは表 3.3-26 に示す。各測定結果を図 3.3-63 ~ 図 3.3-66 に示す。

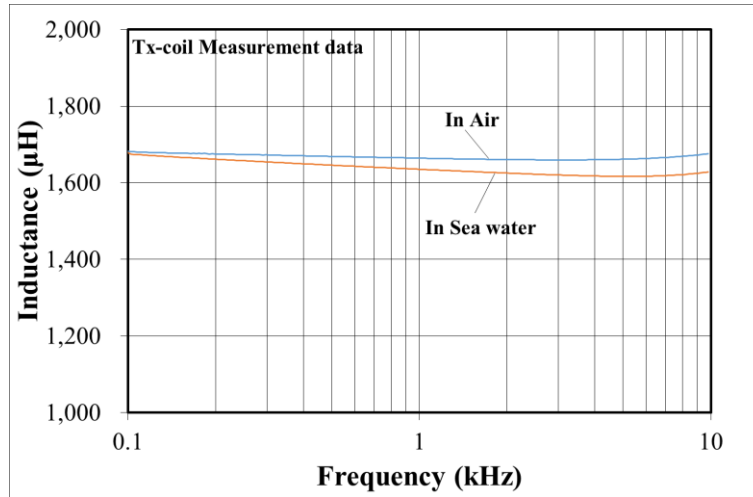


- ① 8mの38sq×2本並列のケーブルで接続（水中コネクタ付き）
- ② 受電コイルの引出線は15m（コイル電線をそのまま延長した）

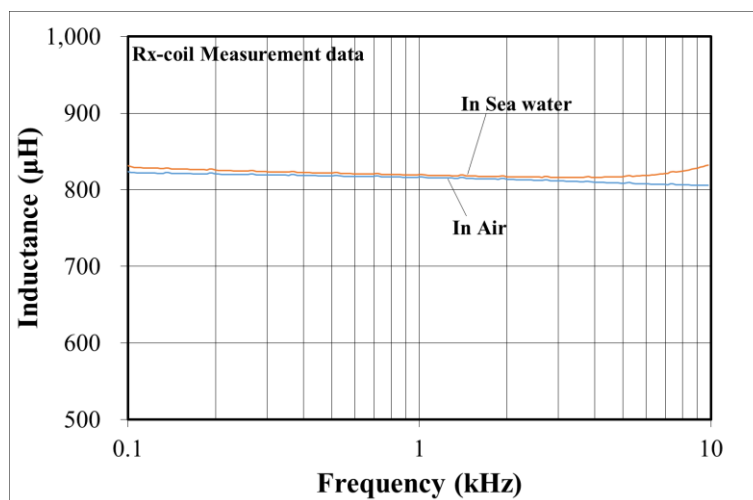
図 3.3-62 実寸モデルのコイル特性の測定系

表 3.3-26 海水プールコンディション (HORIBA: ES-71、9382-10DQ プローブ)

	水温	導電率 (25 °C換算)	塩分濃度 (25°C 換算)
測定値	11.2 °C	4.85 S/m	3.0%

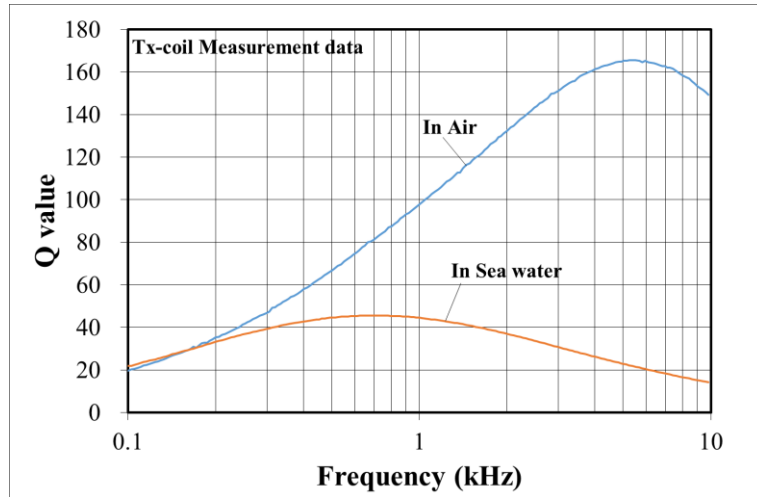


(a) 送電コイル

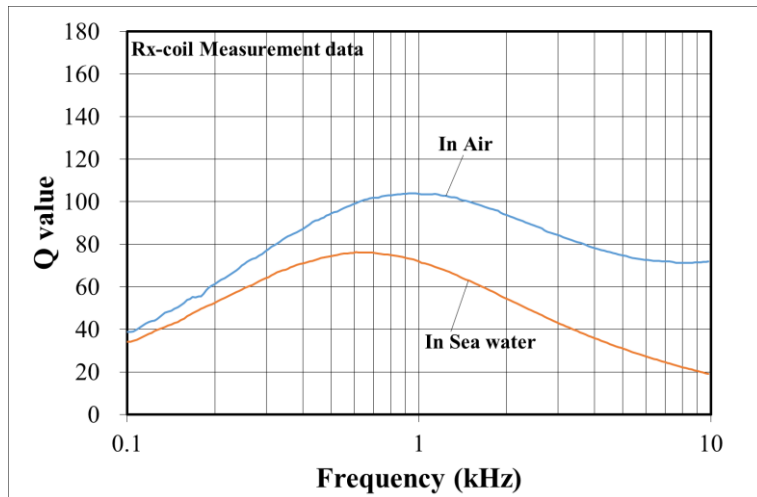


(b) 受電コイル

図 3.3-63 実寸モデルのインダクタンス値の周波数特性



(a) 送電コイル



(b) 受電コイル

図 3.3-64 実寸モデルのコイル Q 値の周波数特性

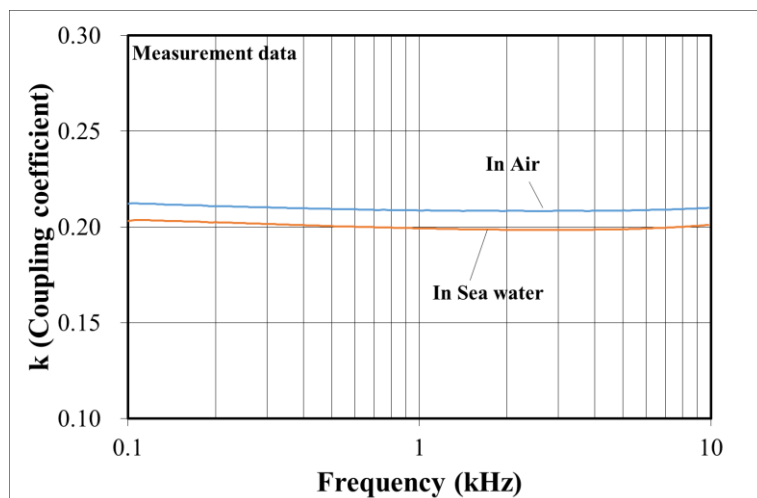


図 3.3-65 実寸モデルの結合係数の周波数特性

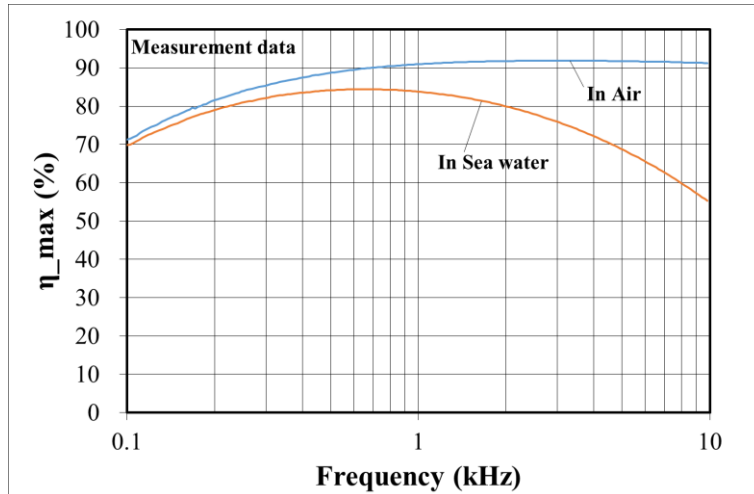


図 3.3-66 実寸モデルの最大有能電力効率

図 3.3-63 ~ 図 3.3-66 はいずれも送電コイルの中心に受電コイルが位置しているときの測定結果であり、空気中のデータも比較のため掲載している。

空気中に比べて海水中ではコイル Q 値の低下が大きいことがグラフからわかる。図 3.3-66 の最大有能電力効率 (η_{\max}) においても海水中は空気中に比べて低下しているが、周波数 0.64 kHz をピークに 0.22 kHz ~ 2 kHz の範囲で 80% を超えていることが確認できた。

周波数 1.5 kHz において、受電コイルの位置を図 3.3-67、表 3.3-27 のように変えて測定した結果を表 3.3-28、表 3.3-29 に示す。最大有能電力効率が大きく下がるどころはなく、送電コイル内の給電できる領域では 79.5% ~ 84.3% に収まった。これにより高効率でポジションフリーのワイヤレス電力伝送ができる可能性が確認できた。

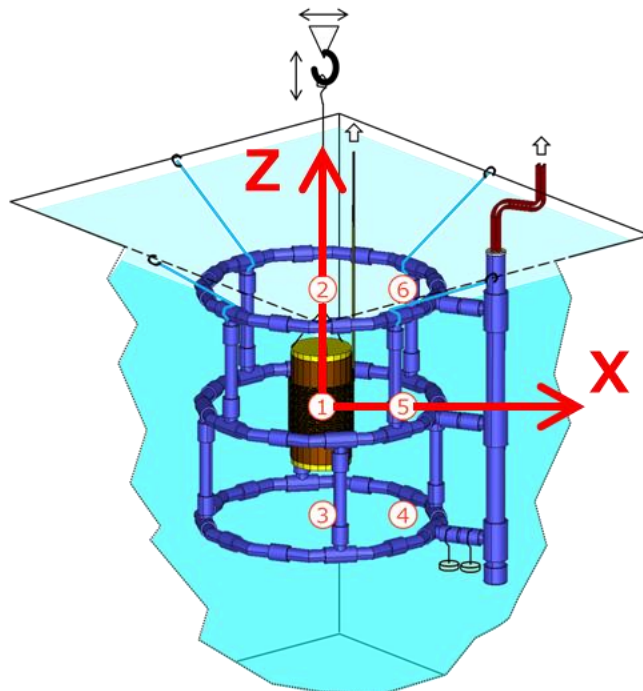


図 3.3-67 実寸モデルの測定座標系と測定位置図

表 3.3-27 測定位置番号と座標の対応表（座標中心は①）

		X	
		0 m	0.6 m
Z	1 m	②	⑥
	0 m	①	⑤
	-1 m	③	④

表 3.3-28 結合係数の測定結果 (@1.5 kHz)

		X	
		0 m	0.6 m
Z	1 m	0.169	0.198
	0 m	0.199	0.229
	-1 m	0.175	0.196

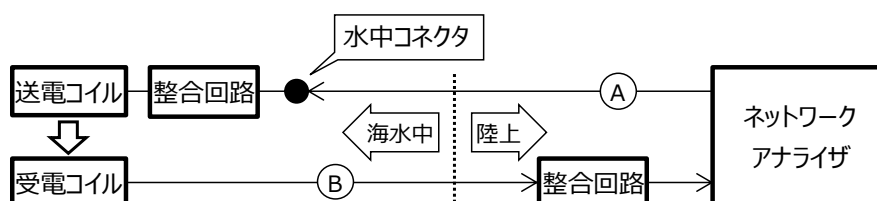
表 3.3-29 最大有能電力効率 (%) (@1.5 kHz)

		X	
		0 m	0.6 m
Z	1 m	79.5	82.3
	0 m	82.0	84.3
	-1 m	80.1	82.0

(送電コイルと受電コイルが接触するため、X方向の最大値は0.6 mになる)

3.3.6.5.2. 整合状態の確認

表 3.3-25 のコンデンサを接続し、海水中的の実寸モデル整合状態を確認した。測定系を図 3.3-68 に、測定結果を図 3.3-69 に示す。 $S_{21}=0.906$ なので伝送効率は 82%となる。なお、送電側の整合回路部は送電コイルと一体に構成した防水構造ユニット内に収めた。



- ① 8mの38sq×2本並列のケーブルで接続（水中コネクタ付き）
- ② 受電コイルの引出線は15m（コイル電線をそのまま延長した）

機器名	メーカー	品番
ネットワークアナライザ	Agilent	E5061B

図 3.3-68 実寸モデルの整合状態確認の測定系

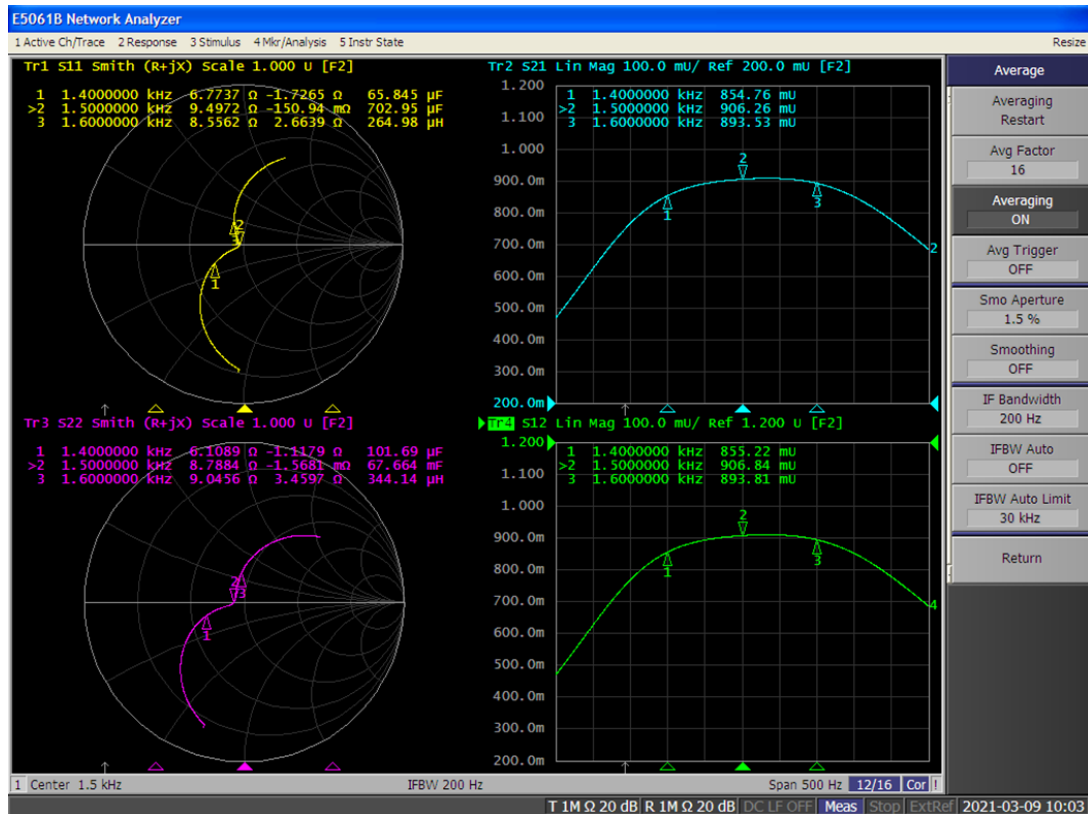
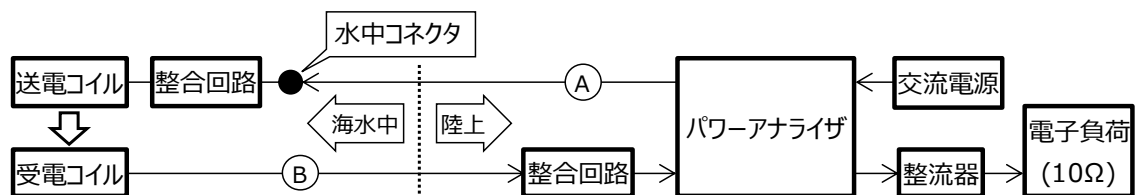


図 3.3-69 実寸モデルの整合状態の測定結果

3.3.6.5.3. 電力伝送効率

次に実際に電力を印可して 3 kW の電力伝送と効率の確認を行った。実験系を図 3.3-70 および図 3.3-71 に示す。



機器名	メーカー	品番
交流電源	KIKUSUI	PCR6000WE2R
パワーアナライザ	N4L	PPA5530
整流器	新電元工業	S50VB80
双方向電源(電子負荷)	Elektro-Automatik	PSB 9750-60

Ⓐ8mの38sq×2本並列のケーブルで接続（水中コネクタ付き）

Ⓑ受電コイルの引出線は15m（コイル電線をそのまま延長した）

図 3.3-70 実寸モデルの電力印加実験系

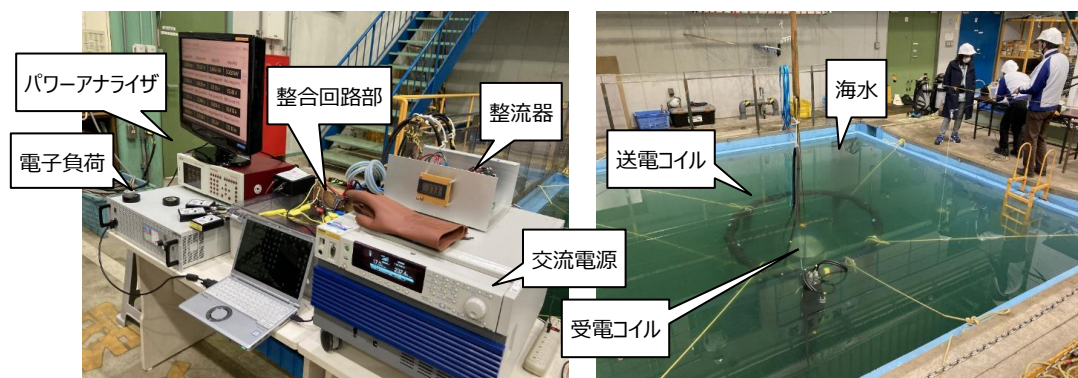


図 3.3-71 実寸モデルの電力印加実験系の外観

送電コイルの中心に受電コイルが位置しているときの 3 kW 電力伝送時の効率測定結果を表 3.3-30 に示す。1.5 kHz では 80%にわずかに届かなかったため、周波数を上下に振って効率が最大となるポイントがないか確認したところ、1.55 kHz で効率 80%に到達できた。図 3.3-69 の右上 S_{21} のグラフに見られるように波形の頂点が 1.5kHz よりも 0.05 kHz 高い側にシフトしていたためと考えられる。整合回路のコンデンサ定数はあらかじめ実験室で測定した空気中のインダクタンス値をもとに算出して作製していたが、床面や周囲影響の違いによってインダクタンス値が変わったことが原因で、整合状態がわずかに変化したものと推測できる。効率最大となる周波数をもっとも整合状態がよいと考え、以降に実施した受電コイルの位置を変えながら電力伝送効率を確認する実験は、周波数 1.55 kHz で実施した。受電コイルの測定位置を図 3.3-72 に、測定した結果を表 3.3-31 に示す。

この結果、給電領域内の最大効率は 80.7%、最小効率は 77.5%であった。差分は 3.2%しかなく、十分にポジションフリー給電できることが確認できた。なお、表 3.3-31 において Z 座標が +1.5 m 地点の値は給電領域の外側であり、給電領域内に比較して効率が下がることがわかる。

表 3.3-30 3 kW 電力伝送時の周波数を変えたときの伝送効率

周波数 (kHz)	伝送効率	送電電力 (kW)	受電電力 (kW)	コイル電流 (A)
1.45	75.4%	4.02	3.03	57
1.50	79.2%	3.84	3.04	57
1.55	80.1%	3.81	3.05	57

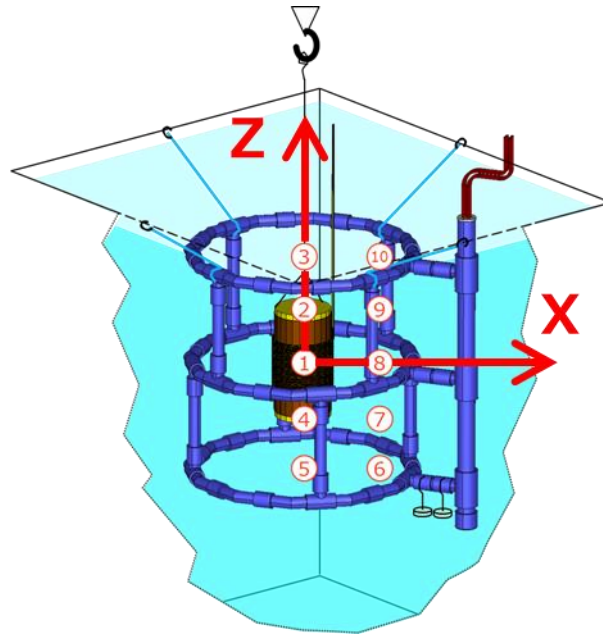


図 3.3-72 実寸モデルの 3 kW 電力伝送時の測定座標系と測定位置

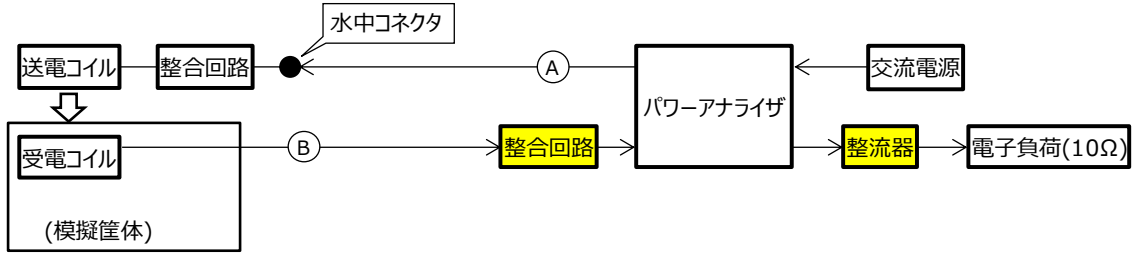
表 3.3-31 実寸モデルの 3 kW 電力伝送時の伝送効率測定結果

		X	
		0 m	0.6 m
Z	1.5 m	69.9%	64.7%
	1.0 m	③ 77.8%	⑩ 79.6%
	0.5 m	② 79.0%	⑨ 77.6%
	0 m	① 80.0%	⑧ 80.7%
	-0.5 m	④ 79.1%	⑦ 77.8%
	-1.0 m	⑤ 77.5%	⑥ 79.5%

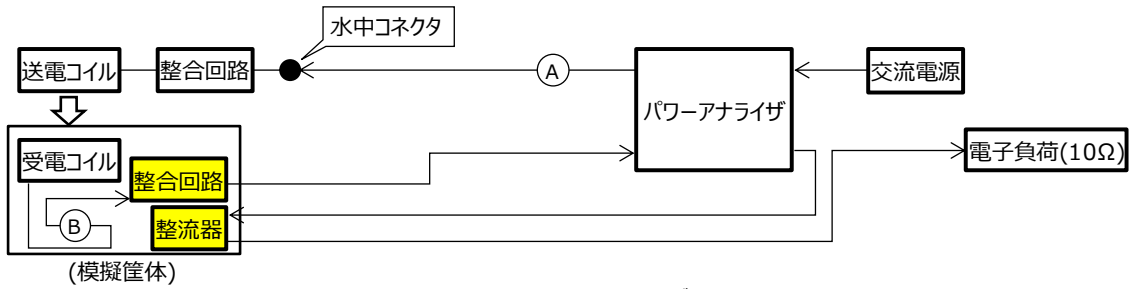
3.3.6.5.4. 部品組込の影響確認

3.3.6.5.3 の実験は受電側の整合回路や整流器などを送電コイルの磁界影響が及ばないプールの外の陸上に置いた状態で行っていた。AUV 模擬筐体にコイル電線を引き込む部分の防水構造設計が難しく、整合回路などを筐体内部に組込むことができなかつたためである。そこで部品組込の影響を空気中で実施することにした。実験系を図 3.3-73、図 3.3-74 に示す。条件①はこれまで同様に整合回路と整流器を模擬筐体の外部に置いている場合で、条件②は整合回路と整流器を模擬筐体内部に組込んだ場合である。結果は表 3.3-32 に示すとおり、組込の前後で伝送効率に差は見られなかつた。このことから、部品の組込で電力損失は生じないことが確認できた。なお充電制御回路は作製中であつたため、電池を含めた組込影響については実際の AUV にて確認する。

①：模擬筐体に受電コイルのみ搭載している状態（整合回路と整流器は給電領域外＝伝搬経路外）



②：模擬筐体に受電コイルを搭載し、整合回路と整流器を組込んだ状態（整合回路と整流器が給電領域内）

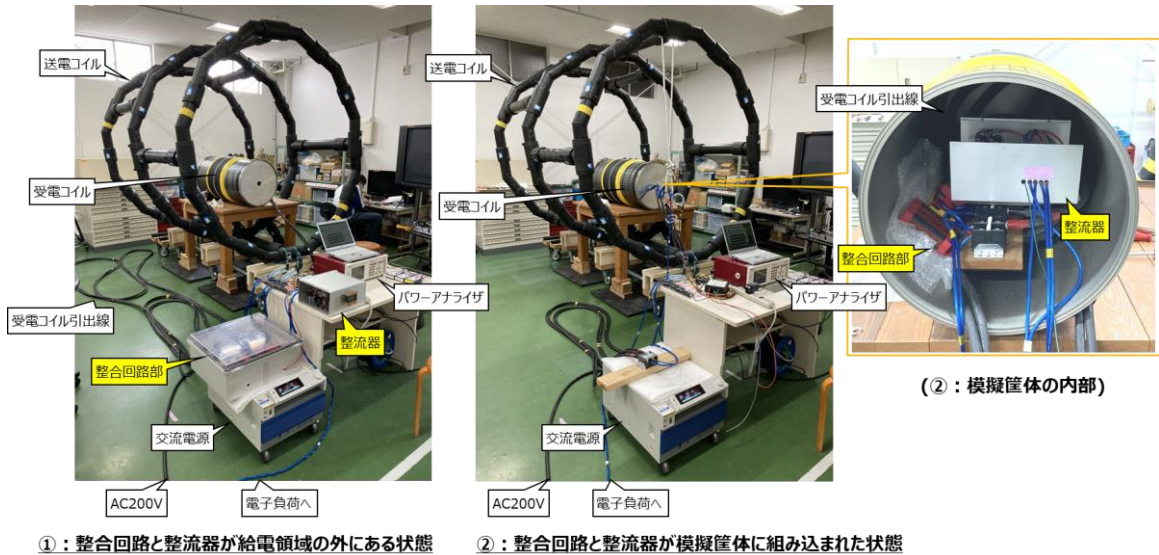


④8mの38sq×2本並列のケーブルで接続（水中コネクタ付き）

⑤受電コイルの引出線は15m（コイル電線をそのまま延長した）

機器名	メーカー	品番
交流電源	KIKUSUI	PCR6000WE2R
パワーアナライザ	N4L	PPA5530
整流器	新電元工業	S50VB80
双方向電源(電子負荷)	Elektro-Automatik	PSB 9750-60

図 3.3-73 部品組込影響確認の実験系



①：整合回路と整流器が給電領域の外にある状態

②：整合回路と整流器が模擬筐体に組み込まれた状態

図 3.3-74 部品組込影響確認の実験系外観

表 3.3-32 部品組込影響確認の実験結果

条件	①（組込前）	②（組込後）
3 kW 電力伝送効率	88.1%	88.2%

3.3.6.6. 伝搬エネルギー損失に対する考察

3.3.6.5.3 の実験結果より、3 kW 電力伝送時の効率は 80%であることが確認できた。このときの送電電力 3.81 kW の 20%、すなわち 0.76 kW が損失エネルギーになる。最大有能電力効率および整合確認結果の効率は 82%であったため、差分の 2%は電源装置との整合損分と考えると、送電電力の 18%、つまり 0.69 kW が送電コイル、受電コイル、海水による損失の合計と考えられる。

損失エネルギーに占める送電コイル、受電コイル、海水による損失の割合は、別々実施していた電磁界解析の結果より表 3.2-33 となることがわかった。この表では周波数 1.5 kHz における損失合計を 100%としてそれぞれの割合を%で表している。周波数 1.5 kHz では損失に占める海水の割合が半分近いが、一方、周波数 0.6 kHz では海水の割合が大きく減ることが見てわかる。使用する周波数を 1.5 kHz から 0.6 kHz に下げた場合、シミュレーション結果から推測した損失は 0.69 kW から 0.53 kW に減り、効率は 80%から 84%まで上がることが期待できる。ただし 3.3.6.3 で確認したとおり、周波数を下げることによって磁気飽和が発生しやすくなることがわかっている。今後は、例えば 1 kW までの給電で済む場合は共振周波数を数百 Hz で設計し、3 kW まで必要な場合は共振周波数 1.5 kHz で設計しておく、といったように、AUV 搭載に必要な仕様を見極めながら共振周波数、整合回路定数、最大電力を決めて AUV に組込んでいくことも考えられる。

表 3.3-33 損失内訳 (1.5 kHz の損失合計を 100%とした場合)

周波数	送電コイル	受電コイル	海水	損失合計
1.5 kHz	28%	24%	48%	100%
0.6 kHz	32%	26%	19%	77%

3.3.7. AUV を用いた実験

3.3.7.1. AUV の金属部材の影響確認

実験室に送電コイルを設置し、その中心に金属部材対策を施す前の AUV を配置して、空气中で最大有能電力効率 (η_{max}) を測定した。その結果と、3.3.6 で用いた実寸モデル (受電コイルの周囲に金属部材がない理想的な状態) の測定結果とを比較したグラフを図 3.3-75 に示す。ワイヤレス電力伝送に使用する 1 kHz 前後の周波数帯において AUV の効率が実寸モデルより 2%以上劣化していることがわかる。この差が金属部材の影響であると考えた。図 3.3-76 は測定時の写真である。

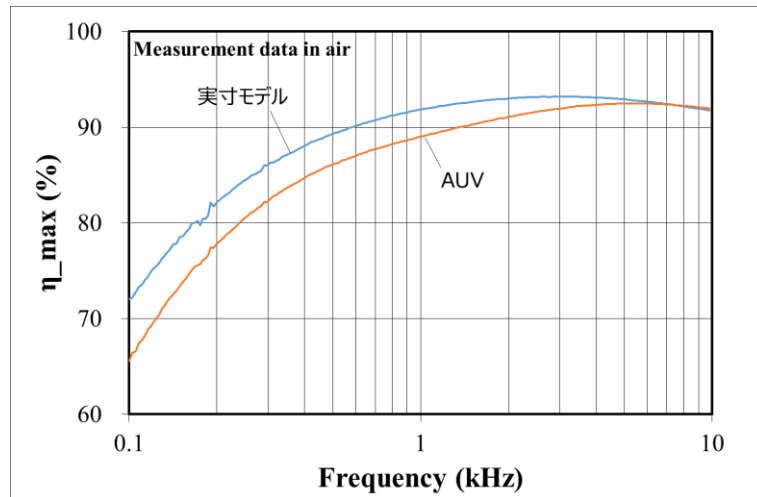
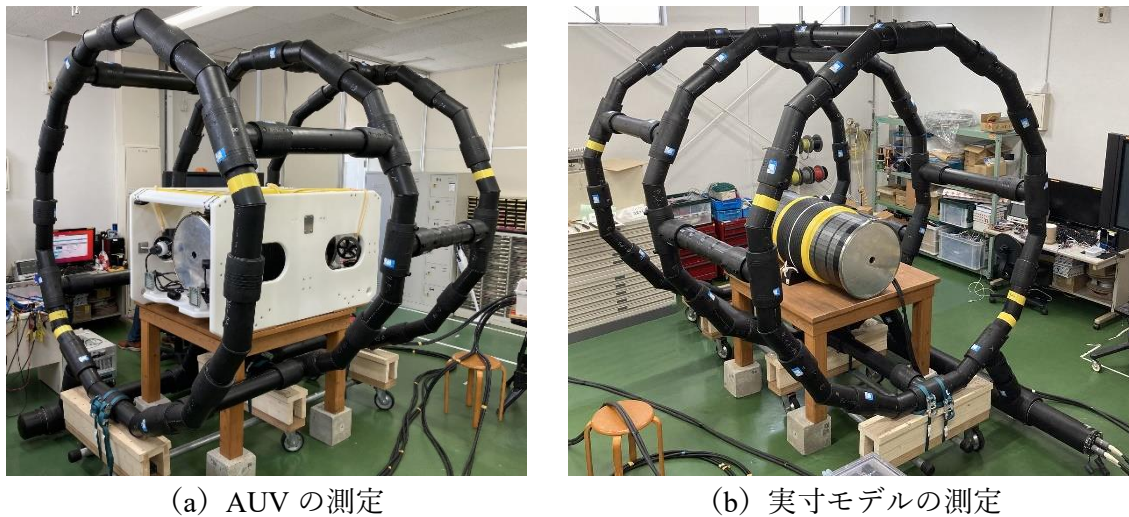


図 3.3-75 AUV（対策前）と実寸モデルの最大有能電力効率



(a) AUV の測定

(b) 実寸モデルの測定

図 3.3-76 最大有能電力効率測定時の環境

3.2 章で損失の解析を行っているが、コイルを 1A で励振した時の周波数ごとの各部材の損失を表すグラフを図 3.3-77 に改めて示しておく。周波数が増加するほど海水の損失（棒グラフの一番下の要素）が顕著になっているが、棒グラフの上 3 つの要素で示してあるスラスト、バラスト、固定具の損失も増加していることがわかる。これらの要素は実寸モデルにはなかったため、損失低下の原因になっている可能性があると考えられる。そのうちスラストとバラストは AUV の機能維持に欠かせないものであるため容易に削除や改造はできない。そこでまず固定具の影響について確認を行った。

3.2 章の解析により、図 3.3-78 に示す耐圧容器を底板に固定するための固定バンドと、AUV をクレーンで吊るための吊り金具（いずれも SUS 材）の影響が大きい可能性があるため、この 2 つの部品を取り外して最大有能電力効率の変化を確認した。その結果、図 3.3-79 に示すように、固定バンドのみを外したときに変化はないが、吊り金具を外すと 1 kHz 付近の効率が実寸モデル同等にまで回復することがわかった。

この結果より吊り金具を除去する必要があると判断し、クレーンフックを掛ける場所の代案としてフレームにスリングベルトを通して吊ることを対策とした。実際にスリングベルトを用いて吊るした写真を図 3.3-80 に示す。ただし AUV を水面に降ろした後はスリングベルトを外さなければならず、陸上に引き揚げる際には再びスリングベルトを着けなければならない。実験時に作業の手間は増えるが、将来的には非金属部材で吊り金具に対応する部分を作っておくなどの対策が可能であるため、問題はないと考えられる。

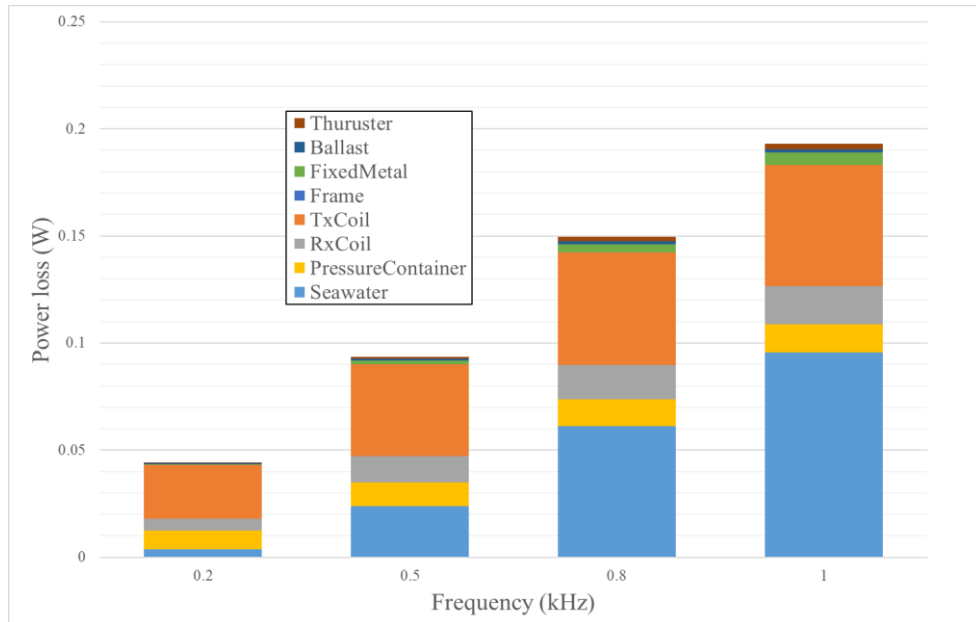
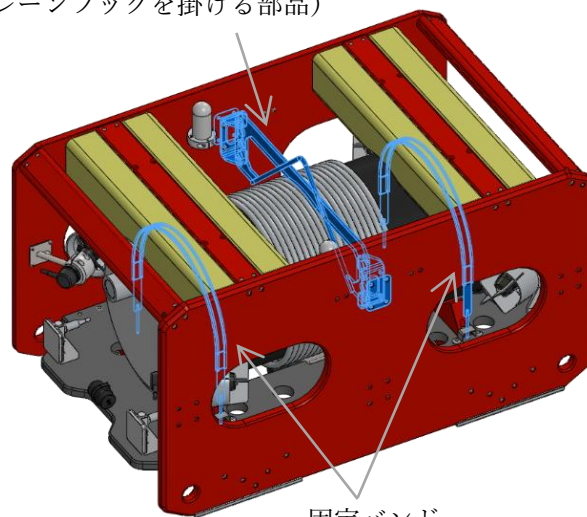


図 3.3-77 各部の損失解析結果

吊り金具
(クレーンフックを掛ける部品)



固定バンド
(耐圧容器を底板に留める部品)

図 3.3-78 AUV の金属部材の位置

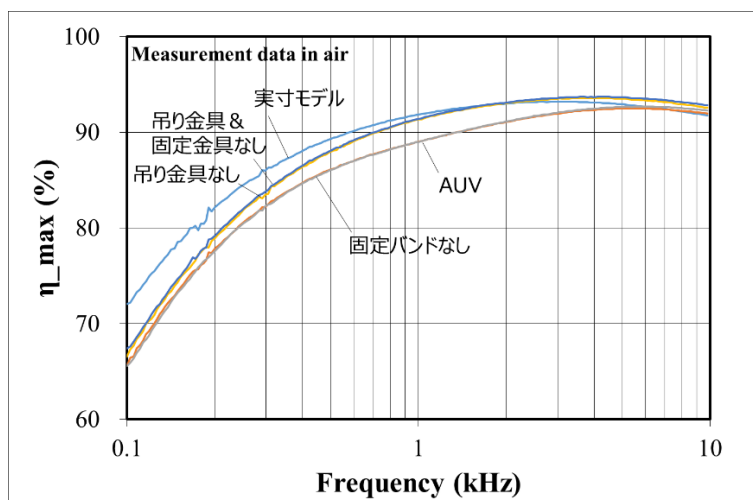


図 3.3-79 金属部材の影響確認結果

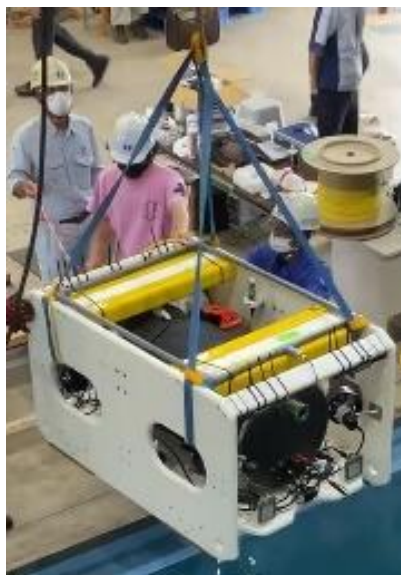


図 3.3-80 吊り金具を取り外して AUV をスリングベルトで吊った状態

3.3.7.2. 1 kW 用給電システム

2020 年度に作製した AUV に搭載していた電池(大容量電池)の仕様を表 3.3-34 に示す。この電池は AUV を 5 時間以上連続航行が可能な電池容量を持っているが、最大充電電流で充電しても約 850 W (114.8 V×7.4 A) までの電力しか受け取ることができない。つまりこの電池では 3kW の給電実験はできないことになる。そこで、この電池を用いる実験においては磁気飽和を考慮する必要はなく、効率を重視して周波数を下げ、最大 1kW の給電を行うように最適化することを考えた。

表 3.3-34 大容量電池の主な仕様

項目	仕様
定格容量	53.6 Ah
定格電圧	100.8 V
放電電圧範囲	114.8 V ~ 84 V
放電最大電流	20 A
充電最大電圧	114.8 V
充電最大電流	7.4 A
総重量	27.2 kg
総セル数	504 本 (Li-ion、18650 タイプ)
使用温度範囲 (水温)	-2 °C ~ 32 °C

3.3.7.2.1. 1 kW 給電用の周波数検討

3.3.6 で掲載した図 3.3-66 は実寸モデルの海水中の最大有能電力効率の測定結果を示しているが、800 Hz 付近で最大効率になっていた。実寸モデルの実験で確認できた磁気飽和が生じる受電電力と周波数の関係を図 3.3-81 に示すが、800 Hz だと問題なく 1 kW の電力伝送は可能と推測できる。よって 1 kW 給電用には 800 Hz を選択することとした。

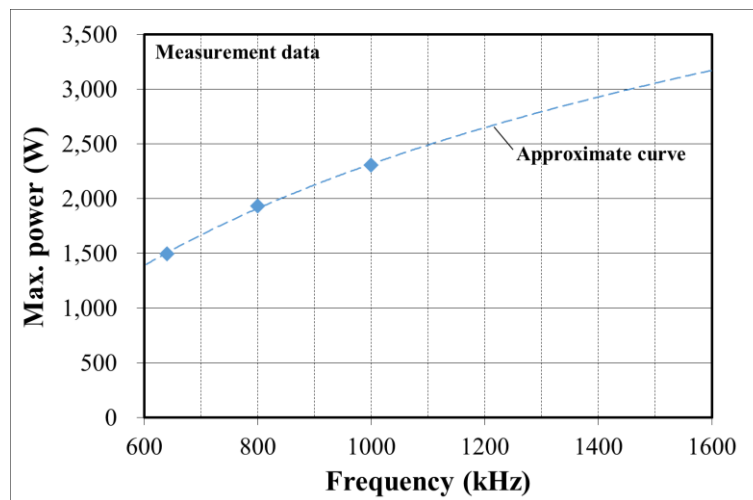


図 3.3-81 実寸モデルで磁気飽和が生じる受電電力と周波数の関係

3.3.7.2.2. 1 kW 給電用のコンデンサ作製

表 3.3-35 に整合回路のコンデンサの定数を示す。整合回路構成は図 3.3-42 と同じである。Spice モデルで 3 kW 給電時の解析を行って各コンデンサの耐電圧と許容電流の要求仕様を導き出し、約 2 倍の電流まで許容できるようにプラスチックフィルムコンデンサを直

列、並列に組み合わせて設計した。なお表中のコンデンサ品番 A とコンデンサ品番 B のブロックを並列に接続して所望の容量値に合わせている。作製したコンデンサの外観および搭載した状態を図 3.3-82、図 3.3-83 に示す。送電側の整合用コンデンサは充電スタンドの防水コネクタ付近の防水構造ユニット内に収め、受電側の整合用コンデンサは AUV 内部に収める。

表 3.3-35 整合回路コンデンサの定数 (800 Hz 用)

項目	Cs_Tx	Cp_Tx	Cs_Rx	Cp_Rx
容量値 (μF)	14.78	11.06	22.99	33.99
耐電圧 (V_{rms})	550	550	550	550
許容電流 (A_{rms})	41	35	64	94
コンデンサ品番 A	ECQUAAF475K	ECQUAAF335K	ECQUAAF475K	ECQUAAF475K
直列接続数	2	2	2	2
並列接続数	6	7	9	14
コンデンサ品番 B	ECQUAAF335K	-	ECQUAAF335K	ECQUAAF335K
直列接続数	2	-	2	2
並列接続数	1	-	2	2



(a) 送電側直列コンデンサ (C_{s_Tx})

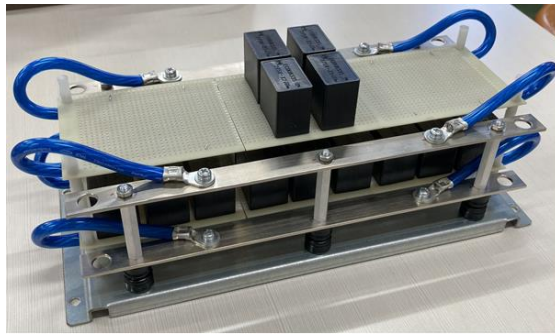


(b) 送電側並列コンデンサ (C_{p_Tx})



(c) 収納した様子

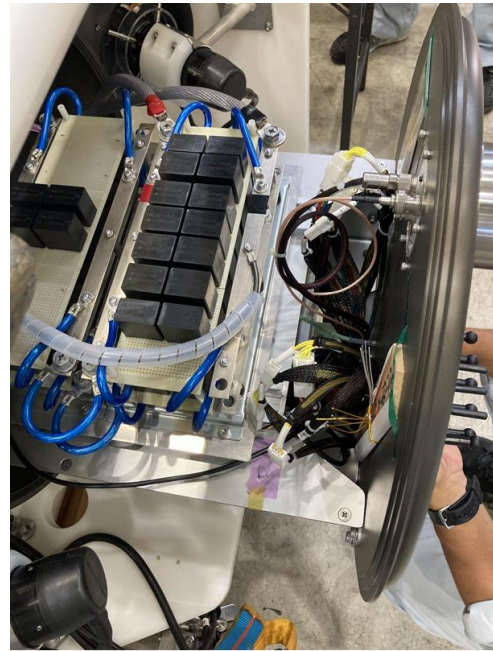
図 3.3-82 800 Hz 用送電側コンデンサの外観



(a) 受電側直列コンデンサ (Cs_Rx)



(b) 受電側並列コンデンサ (Cp_Rx)



(c) AUV に搭載した様子

図 3.3-83 800 Hz 用受電側コンデンサの外観

3.3.7.2.3. 800 Hz の整合確認結果

ネットワークアナライザを用いて整合状態を確認した結果を図 3.3-84 に示す。800 Hz における空気中の通過損失 S_{21} の値は 0.937 で、最大 87.8% の伝送効率に相当するため、問題なく整合できていると判断できる。なお受電側コンデンサを載せている AUV 制御部を耐圧容器内に入れて蓋をすると測定ができないため、図 3.3-85 のように AUV 制御部を外に出した状態で接続し、受電コイルを巻いている AUV の耐圧容器にはダミーの蓋を取付けた。

また、同じ理由で AUV に組み込んだ状態では水中の整合状態の確認も不可能である。しかしコイルのインダクタンス値と結合係数は空気中とほぼ変わらないため、海水中に入れたことで共振周波数が大きくずれることはなく、Q 値の劣化の影響のみであることが 3.3.6.5 から確認できている。したがって、海中での整合確認は行わずに空気中の確認でもって整合状態を判断することとした。

電池の代わりに電子負荷を接続して空気中での電力伝送効率を確認したところ、送信電力 1379.8 W に対して受信電力 1191.1 W であった。効率 86.3% を得られており、これで 1kW 給電システムの準備は確認できた。

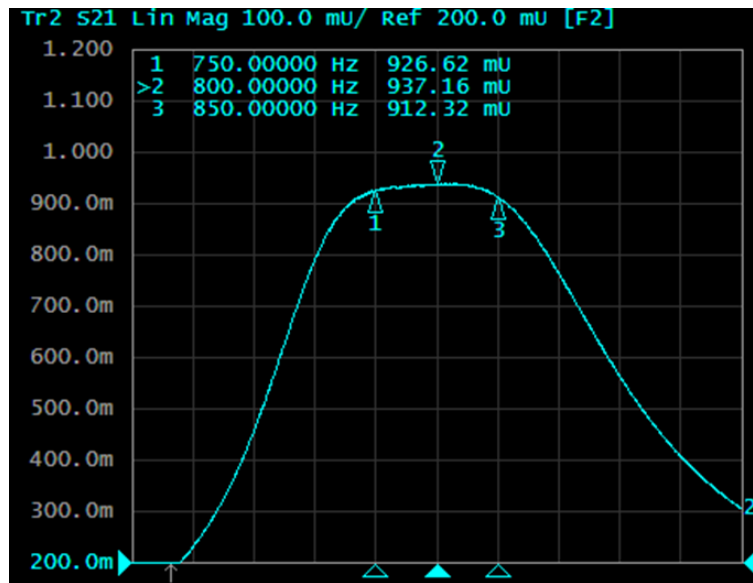


図 3.3-84 整合状態（通過損失 S_{21} ）横軸＝周波数、中心 800 Hz、スパン 500 Hz

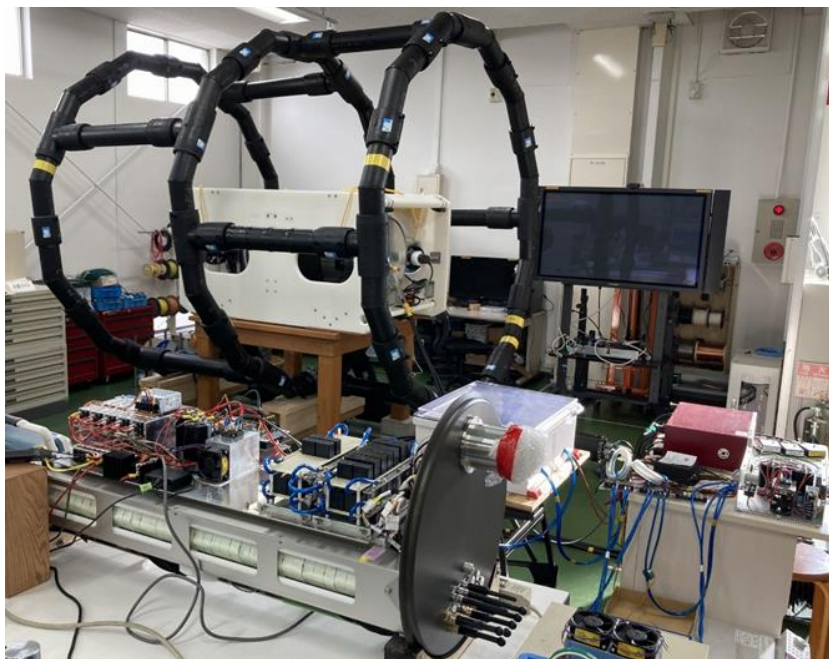


図 3.3-85 整合状態測定時の配置

3.3.7.3. 3 kW 用給電システム

3 kW の電力伝送実験が AUV を使ってできるように、電池セルを急速充電対応可能なものに変更した新しい電池モジュール（急速充電電池）を準備した。表 3.3-36 に示すように容量は従来電池の約 3 分の 1 で AUV の連続航行時間は 1～2 時間になるが、受け取れる電力は約 3 倍の最大 3.4 kW（116.2 V×30 A）になった。

表 3.3-36 急速充電電池の主な仕様

項目	仕様
定格容量	15 Ah
定格電圧	103.6 V
放電電圧範囲	116.2 V ~ 84 V
放電最大電流	45 A
充電最大電圧	116.2 V
充電最大電流	30 A
総セル数	28 枚 (Li-ion、3.7 V-15 Ah ラミネート型)
使用温度範囲 (水温)	0 °C ~ 40 °C

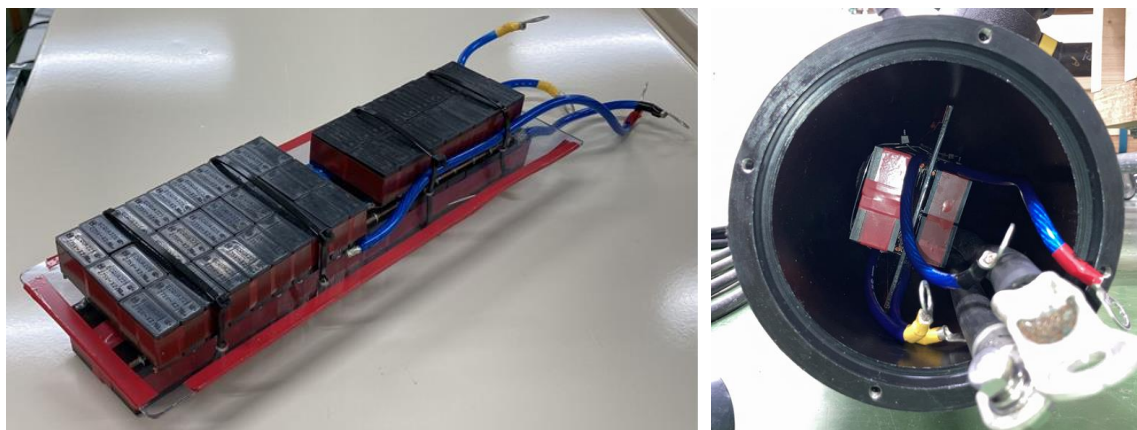
3.3.7.3.1. 3 kW 給電用のコンデンサ作製

共振周波数は磁気飽和を考慮して、実寸モデルの実験と同じく 1.5 kHz とする。3.3.7.2.2 と同様にして 1.5kHz 用のコンデンサを設計した内容を表 3.3-37 に示す。

作製したコンデンサの外観および搭載した状態を図 3.3-86、図 3.3-87 に示す。送電側の整合用コンデンサ (図 3.3-86) はプラスチック板を挟む形で直列用と並列用を一体化している。組込作業の効率化と、少量の浸水があってもコンデンサが浸漬しないよう筒の中心部に保持できる構造にした。受電側の整合用コンデンサ (図 3.3-87) も直列用と並列用を一体化し AUV 制御部に収めた。

表 3.3-37 整合回路コンデンサの定数 (1.5 kHz 用)

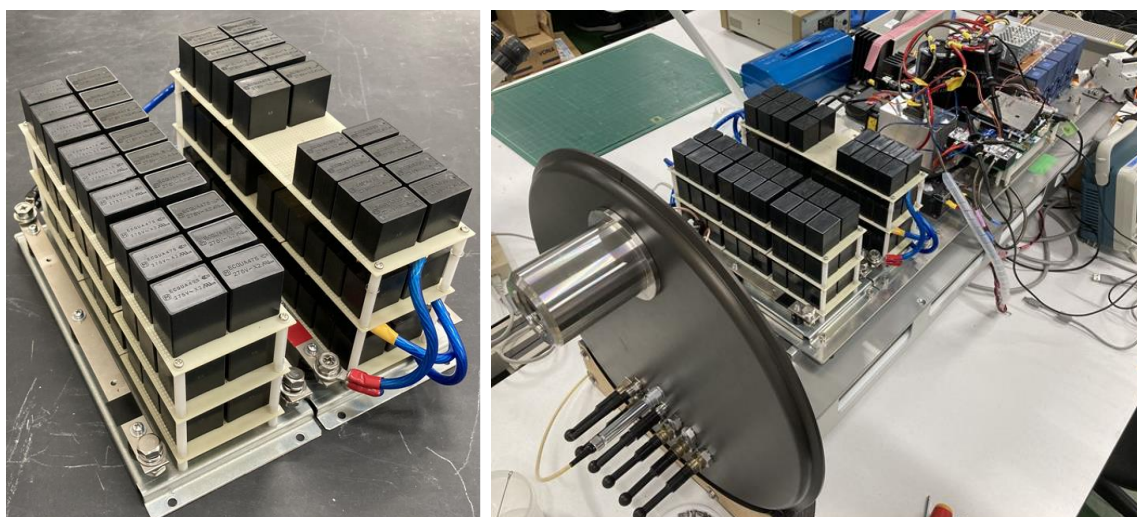
項目	Cs_Tx	Cp_Tx	Cs_Rx	Cp_Rx
容量値 (μF)	4.14	3.12	6.24	9.45
耐電圧 (Vrms)	1375	1650	1100	1650
許容電流 (Arms)	30	30	40	78
コンデンサ品番	ECQUAAF225K	ECQUAAF335K	ECQUAAF335K	ECQUAAF475K
直列接続数	5	6	4	6
並列接続数	10	6	8	13



(a) 送電側コンデンサ (C_{s_Tx} 、 C_{p_Tx})

(b) 収納した様子

図 3.3-86 1.5 kHz 用送電側コンデンサの外観



(a) 受電側コンデンサ
(C_{s_Rx} 、 C_{p_Rx})

(b) AUV に搭載したコンデンサ

図 3.3-87 1.5 kHz 用受電側コンデンサの外観

3.3.7.3.2. 1.5 kHz の整合確認結果

ネットワークアナライザを用いて整合状態を確認した結果を図 3.3-88 に示す。1.5 kHz における空気中の通過損失 S_{21} の値は 0.952 であり、最大 90.6% の伝送効率に相当するため、問題なく整合できていると判断できる。なお 1 kW 給電用の整合状態を確認したときの図 3.3-85 と同じように AUV 制御部を外に出した状態で測定した。

電池の代わりに電子負荷を接続して空気中の伝送効率を確認したところ、送信電力 3505.1 W に対して受信電力 3079.1 W であった。効率 87.8% を得られており、これで 3 kW 給電用システムの準備は確認できた。

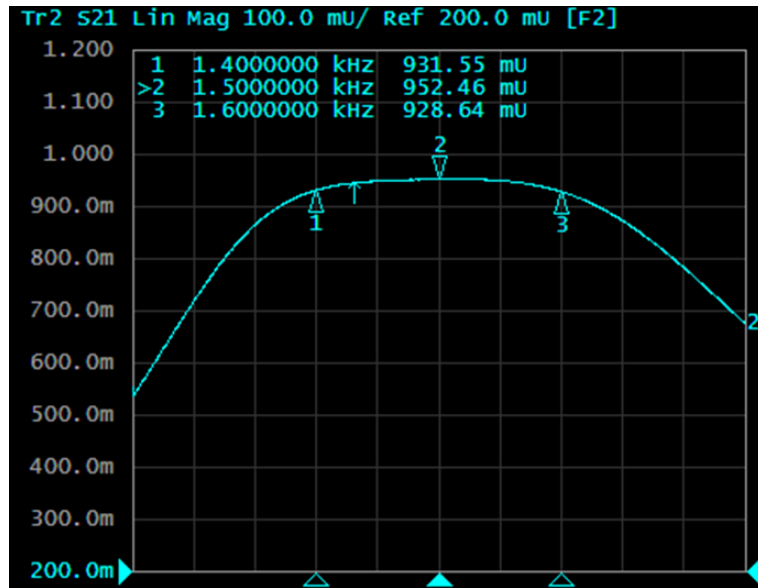


図 3.3-88 整合状態（通過損失 S_{21} ）横軸＝周波数、中心 1.5 kHz、スパン 500 Hz

3.3.7.4. 給電中の振動とその対策

実寸モデルの実験時から給電中に音が発生するようになったが、使用する周波数に起因するコイルの音鳴りと考え、これまで特に対策はしていなかった。しかし、AUVには振動に敏感な慣性航法装置（INS）を搭載しているため、最悪の場合は装置の故障につながる恐れが考えられる。そのため、どれほどの音、すなわち振動が発生しているのかを把握し、必要な対策を施した。詳細は 3.4.2 章を参照。

結果、2021年8月30日～9月3日で実施した 3.4.3 章の長期運用実験には対策が間に合わないと判断し、高価で交換手配が難しい慣性航法装置の故障を防ぐため、やむなく慣性航法装置を取り外したままで AUV を運用し実験を行った。AUV の自力航行には支障が生じるが、これによる充電機能への影響はない。

その後、振動周波数が給電に使う周波数の 2 倍になっていたことから、振動の原因はフェライトの磁気歪みと考えた [17]。この根本的な解決には磁気歪みの小さいフェライト材料を使うことであるが、透磁率や入手性を考慮すると代替になる材料は簡単には見つからない。そこで、慣性航法装置が受ける振動を減らすことを考え、慣性航法装置の設置面に制振ゴムを使う方法で対策を施し、AUV が自力航行できる状態を作り上げた。

この対策をもって、2022年2月14日～2月25日で実施 3.4.3 章の 3 kW 給電実験に臨んだ。

3.4. 海中で運用可能な AUV とポジションフリーワイヤレス給電システムの実証実験

3.4.1. kW 級電力伝送のための送電側装置及び受電側装置の確立

3.4.1.1. 実験用電源装置（当構成検討）

本章では実験用電源装置の当初構成検討を示す。実験装置の最終形はここに述べる構成とは異なっている。

3.4.1.1.1. 全体構成

実験系の電源装置構成に関して図 3.4-1 に示す。

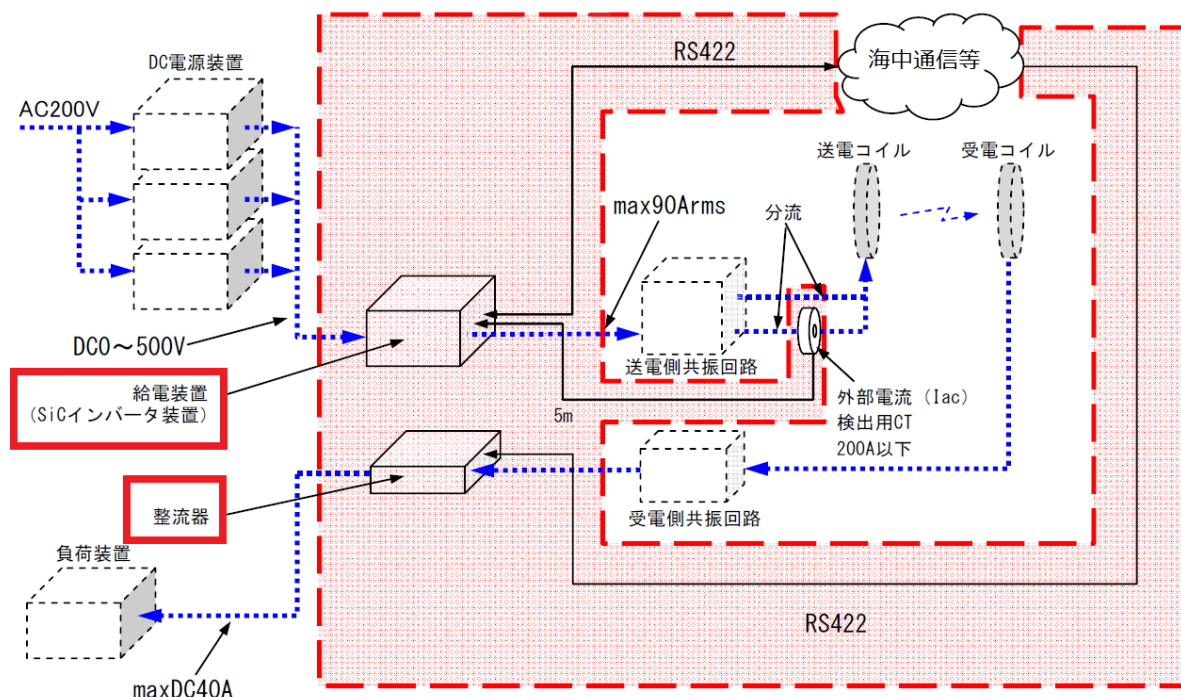


図 3.4-1 実験用電源構成

DC 電源装置に関しては商用電源 AC200V から DC0~500V を生成する汎用的な電源装置、（株式会社高砂製作所製、HX500-30）を使用するが、ワイヤレス給電のコイルに AC 供給する給電装置と受電側の整流器に関しては本研究目的に合わせて特注をしている。特に AC 給電装置としては最新のパワー半導体のスイッチング素子 SiC を用いた SiC インバータで構成している。今回特注した電源の仕様範囲は図 3.4-1 の赤枠で囲ったものとなる。

本実験装置は送電側の SiC インバータを受電側の整流装置と RS422 を介して通信する仕組みがあり、両者を組み合わせて制御することにより受電側の電力制御を行うことが可能な機器構成となっている。

3.4.1.1.2. SiC 高周波インバータ装置仕様

表 3.4-1 および表 3.4-2 高周波にインバータ装置の仕様を示す。

表 3.4-1 SiC 高周波インバータ装置仕様

一般仕様		
電源	主回路	DC0~500V max90A
	制御電源	AC85~264V 50/60Hz (3Pアース付き電源ケーブル添付)
使用温度範囲	0~40°C	
使用湿度範囲	30~80%RH (但し結露しない事)	
構造	可搬型ケース(前面パネルにハンドル付き。底面にゴム足付) パネル面およびフレーム: 銀色(アルマイト) カバー塗装色: リバイブルー(8.1G6.6/1.2)	
冷却	アルミニウム放熱器をファンで強制空冷(ユニット後方へ排気) (水冷プレートを追加する事も可能)(オプション)	
寸法	寸法 481.4W×450D×299H(突起部および取手、ゴム足等を含まない箱体寸法) ラックマウントアダプタ付き	
質量	22Kg	
詳細仕様		
出力	矩形波 500V90Arms (45kVA)	
発振周波数	100.0Hz~10000.0Hz (注1) 周波数設定分解能: 0.1Hz	
出力Duty	可変(AB両アーム間の位相シフト方式) 出力Dutyの値は、パネル面の『設定』VR(ダイヤル付10回転多回転VR)で設定。 (『LOCAL(PWM)モード』に設定した場合) 出力Dutyの値は、タッチパネル(モニタ画面)の『出力Duty』表示でモニタ可能 (0.0%~100.0% 表示分解能0.1%)	
出力自動制御	手動モード	受電側の下記項目を、設定値に従い自動制御。 負荷の状態により、3項目の設定値の何れかで自動制御される。 ・受電側出力電圧(Vout) ・受電側出力電流(Iout) ・受電側出力電力(Pout) 手動モードで運転する為には、受電側整流装置と受電側間をRS422通信で接続が必要。
	LOCAL(送電)モード	送電側の下記項目を、設定値に従い自動制御。 負荷の状態により、3項目の設定値の何れかで自動制御される。 ・インバータ入力電流(Idc) ・インバータ出力電流(Imf) ・送電コイル電流(Iac) (送電コイル電流(Iac)を計測するには、オプションのCTが別途必要。)
操作表示器	モノクロタッチパネル表示器 (バックライト色: 正常時→緑、規制運転中→橙色、警報停止時→赤)	
データ表示機能	<ul style="list-style-type: none"> ・インバータ入力電流 Idc 0.0~100.0 A ・インバータ出力PWM PWM 0.0~100.0 % ・インバータ出力電流 Imf 0.0~100.0 Arms ・送電コイル電流(外部センサ入力) Iac 0.0~500.0 Arms ・受電側出力電圧 Vout 0.0~T.B.D V ・受電側出力電流 Iout 0.0~500 A ・受電側出力電力 Pout 0.0~T.B.D kW 受電側のデータを表示する為には、別途受電側整流装置と、送電側~受電側間をRS422で接続する必要有り。	
操作	運転停止	パネル面押しボタンスイッチ操作。 裏面端子台に外部スイッチを接続すると、パネル面スイッチと外部スイッチのどちらからでも操作可能です。(外部運転スイッチ: メイク接点、外部停止スイッチ: ブレイク接点。)
	出力調整	インバータ出力方形波の電圧は、直流印加電圧の増減で調整します。 インバータ出力のPWM値は、『LOCAL(PWM)モード』にすると、パネル面の『設定』調整VRで設定可能。 『手動モード』および『LOCAL(送電)モード』の場合は、設定された値になるよう、PWMが自動調整される動作となる。
	周波数設定	タッチパネル(モニタ画面: 周波数表示窓をタッチ)から設定。 (設定分解能: 0.1Hz) (設定した周波数は不揮発メモリに記憶) 運転中には、周波数調整画面で周波数の増減が可能。

表 3.4-2 SiC 高周波インバータ装置仕様 (続き)

保護機能		
警報停止機能	停止仕様	<p>警報項目を検知すると自動的に警報停止し、タッチパネル表示器のバックライトが緑色→赤色に変わる。</p> <p>警報発生時、下記接点出力。 異常時OFFの接点出力。(A接点のリレーを正常時に励磁。) (従って異常発生時および制御電源OFF時に接点OFF。)</p> <p>警報発生し運転停止した場合、その原因をタッチパネル表示器に表示。 (モニタ画面の『異常発生』表示を押すと内訳を表示) タッチパネルからの警報リセット操作で、運転可能状態へ復旧。</p>
	警報項目	<ul style="list-style-type: none"> ・インバータ出力電流(Imf) 過電流 インバータ出力電流Imfの波形(瞬時値)をリアルタイム監視し、設定値以上になると警報停止。過電流警報(ImfOC)検出の設定値(検出基板上のVRで設定)は140Apeak。 ・インバータ入力電流(Idc) 過電流保護 インバータ入力電流Idcの値を監視し、設定値以上になると警報停止。(通常はリミッタが先に働くため警報停止に至る事はない)。過電流警報(Idc-OC)の値はパラメータ設定で、95A。 ・ヒートシンク過熱 ヒートシンク温度を監視(温度スイッチ)し、設定値以上で警報停止。 過昇温警報(ヒートシンク温度異常)の設定値(温度スイッチの値)は60°C。
出力自動リミッタ機能(規制運転)		<p>下記項目が設定値を超えようとする、自動的にインバータ出力(PWM値)を絞り出力がそれ以上出ないように規制。各設定値はパラメータ設定で変更可能。</p> <p>規制運転作動中は、タッチパネルのバックライト色が緑色から橙色に変わり該当する項目が反転表示となる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・インバータ入力電流(Idc) 設定値90A ・インバータ出力電流(Imf) 設定値90Arms ・送電コイル電流(Iac) 設定値500Arms

3.4.1.1.3. SiC 高周波インバータ装置の内部構成

図 3.4-3 に SuC 高周波インバータ装置の内部構成ブロック図を示す

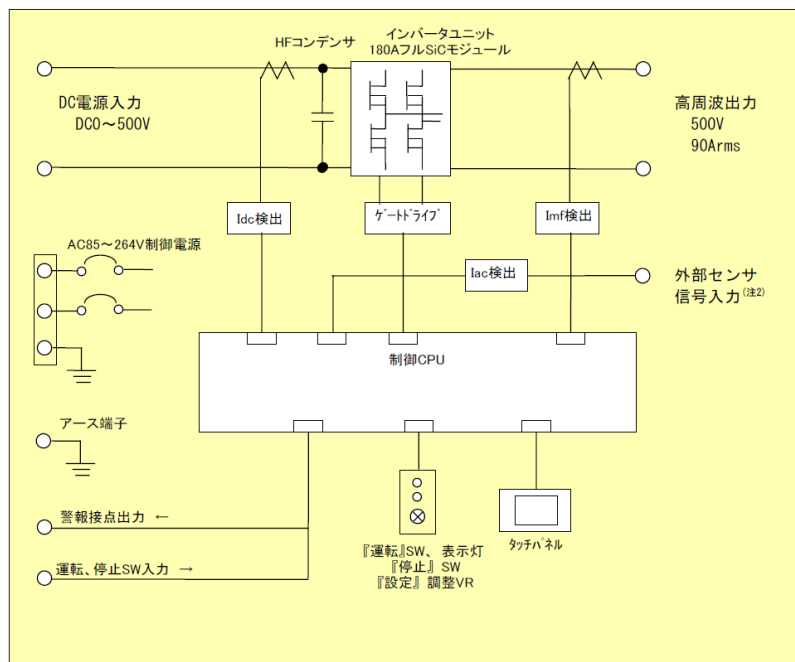


図 3.4-2 SiC 高周波インバー装置内部構成ブロック図

DC 電源入力は、過電流、過昇温等、警報が発生した場合は、インバータを停止すると共に警報接点を出力するので、この信号が発生した場合は DC 電源装置も停止するように、配線接続して使用する。またチャージ蓄積を防ぐため、DC 主回路電源入力に大容量の電解コンデンサは接続せず、高周波デカップリングコンデンサ(HFC：周波数特性の良いフィルムコンデンサおよびセラミックコンデンサを使用。合計容量 $200\mu\text{F}\times 4+4\mu\text{F}=804\mu\text{F}$)のみを実装する。

さらに外部(DC 電源入力部)に、大容量の電解コンデンサを実装するため、主回路電源投入時に多大な突入電流が流れる可能性があるので、主回路 DC 電圧の印加にあたっては出来るだけスロースタートとなるよう配慮する。またインバータの運転を停止すると多量のチャージが残り危険なので、停止時は必ずチャージの放電運転を行う。

3.4.1.1.4. SiC 高周波インバータ動作説明

フル SiC モジュールを 2 個使い、フルブリッジ回路 (H ブリッジ) を構成している。図 3.4-3 に示すように出力波形は AB 両アーム共にデューティー50% (デッドタイム除く) の方形波で、両アーム間の位相差を可変する事で PWM コントロールが可能である。FET を駆動するゲートドライブ回路は、フル SiC モジュールのゲートドライブ特性に対応した特注品を採用している (ゲート駆動電圧+18V/-4V)。

なお本装置の出力は、インバータの方形波出力が直接端子台に出力されており、絶縁トランスや出力負荷とのインピーダンス等調整用のリアクトル、キャパシタ、共振回路等は装備していない。

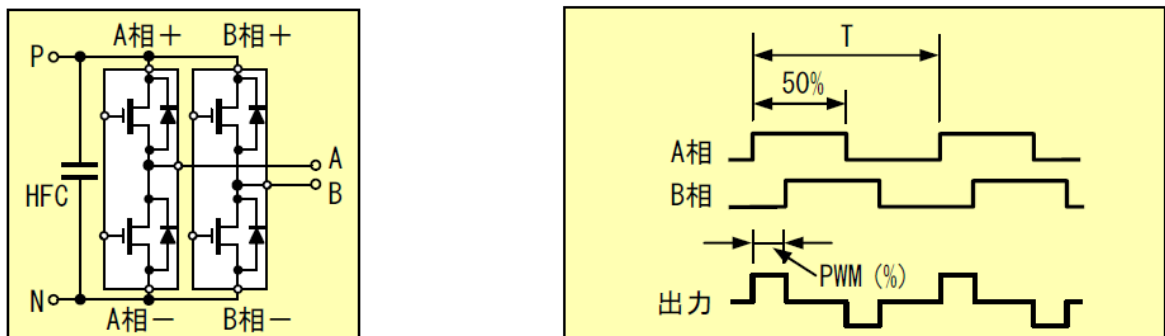


図 3.4-3 高周波インバータ動作説明図

3.4.1.1.5. SiC モジュール仕様

2 個使用している SiC モジュールの仕様は以下に示す通りである。

メーカー：ローム

型式：BSM180D12P3C007

仕様：FET $V_{ds}=1200\text{V}$ 、 $I_d=180\text{A}$ 、 $C_{iss}=9\text{nF}$ 、 $T_r=70\text{ns}$ 、 $T_f=50\text{ns}$ 、

SBD $V_f=2.1V$ 、 $T_{rr}=35nsec$

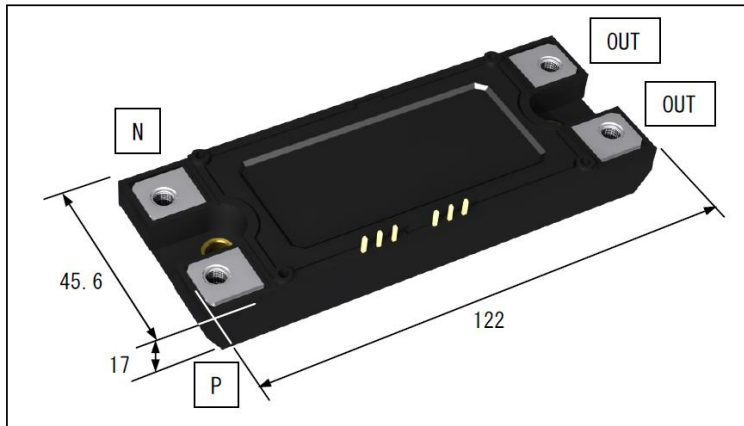


図 3.4-4 SiC モジュール外観図

3.4.1.1.6. 制御回路

制御 CPU は、インバータ制御用の専用基板を使用。装置の運転状態表示や操作は、小型タッチパネルで行う。RS232C でパソコンに接続し、内部状態等を表示する事も可能です。（オプション）パネル面操作スイッチまたは外部接点により、起動/停止できる。

起動時や設定値をステップ状に変化させた場合、パラメータで指定する速度でスロースタートする緩起動機能を装備。

3.4.1.1.7. 受電側整流装置

表 3.4-3 に受電側整流装置の仕様を示す。ただし使用周波数が未定であるため平滑用のリアクトルとコンデンサは未対応である。

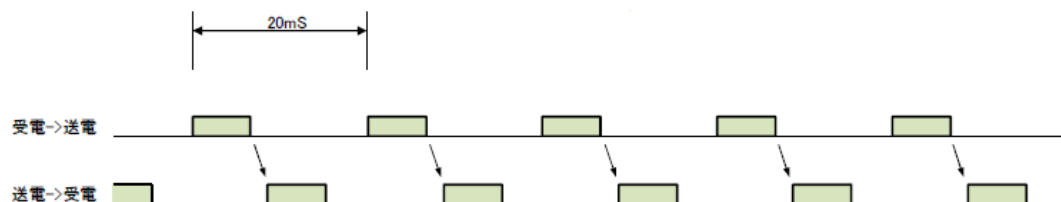
表 3.4-3 受電側整流器仕様

出力	maxDC40A	
回路構成	高周波整流器(平滑リアクトル、コンデンサは未対応)	
制御電源	外部供給AC85~265V	
外形寸法	481.4W×450D×199H[mm](突起部除く) 15kg	
データ表示	(送電側GOT に表示) 出力電圧Vout、出力電流Iout	
保護機能	警報停止) 過電流、放熱器温度上昇、通信異常	
通信	RS-422	送電ユニット~受電ユニット間通信(但し独自方式)
	RS-232C	メンテナンス用(ユーザ使用不可)
表示灯	制御電源	1点(白) 制御電源ON で点灯
	給電中	1点(赤) 給電中(出力電流5A 以上)に点灯
入出力接点	入力	1点 給電許可(要求)信号
	出力	1点 警報
冷却方式	強制空冷	
使用環境条件	温度・湿度:-10~40°C、35~80%以下(結露なきこと) 保護構造:IP20 相当(塩害地域は不可)	

3.4.1.1.8. 送電ユニット、受電ユニット間の通信仕様

RS-422 トランシーバを使用した独自の通信方式であり、コネクタのピンアサイン等含め標準の RS-422 規格には適合していない。

基本タイミングは 図 3.4-5 に示すように受電ユニットがマスターとなり 20ms 周期でデータを送電ユニットに送る。受電ユニットからのデータを受信すると送電ユニットからデータが送信される。



通信速度 19.2Kbps
 パリティ 奇数
 ビット長 8
 ストップビット 1
 通信周期 20mS

送電ユニット : 200mS以上受電ユニットからのフレームが受信できないと、「受電ユニット通信異常」と判定
 受電ユニット : 200mS以上送電ユニットからのフレームが受信できないと、受電ユニット内部のアラームフラグが立ち、ピークルコントロールに対する「送電準備完了」がOFFする。

図 3.4-5 通信基本タイミング

受電ユニットから送電ユニットへの通信フォーマットを図 3.4-6 に示す。

受電ユニット→送電ユニット データフォーマット (R→C)

20msec周期で受電ユニットから繰り返し送信される。

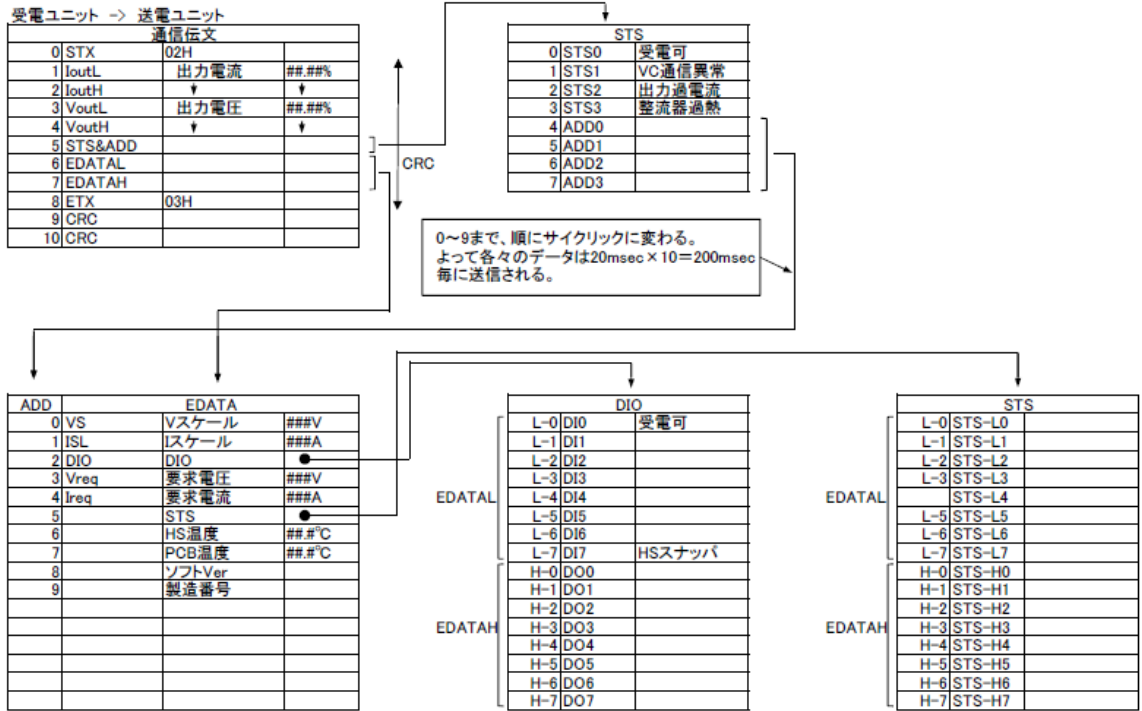


図 3.4-6 受電ユニットから送電ユニットへの通信フォーマット

次に送電ユニットから受電ユニットへの通信フォーマットを図 3.4-7 に示す。

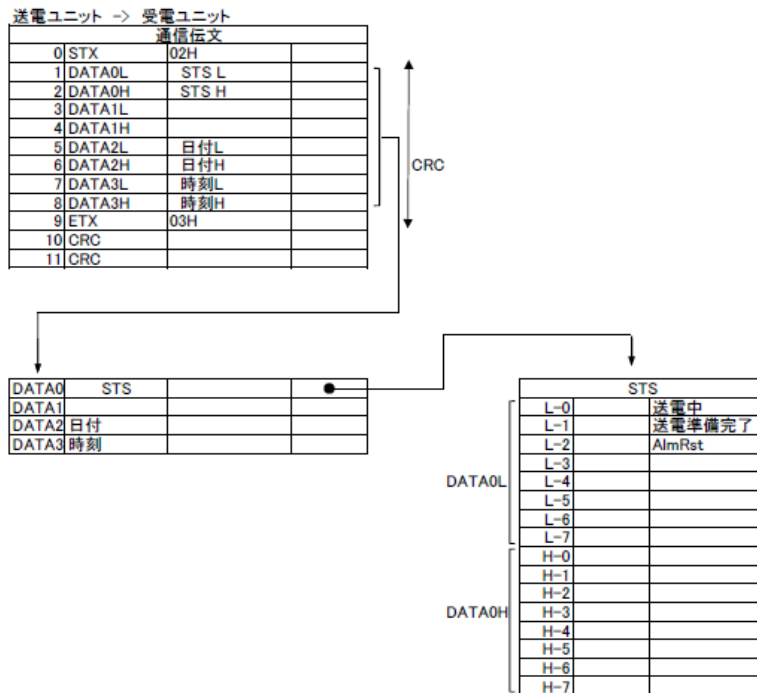


図 3.4-7 送電ユニットから受電ユニットへの通信フォーマット

3.4.1.2. SiC インバータ送電装置による電力送信の検討

3.4.1.2.1. SiC インバータ送電装置について

SiC インバータ送電装置の詳細については 3.4.1.1 中で記載した。留意事項としては出力波形に関しては方形波のみ出力が可能であり、PWM 機能として矩形波の Duty 比率を調整する機能を有しているが、PWM 機能で正弦波を生成する制御機能は有していないことである。

3.4.1.2.2. インバータによる電力送信試験

A 測定系

測定系およびインバータ設定を図 3.4-8 に示す。受電側の負荷は固定抵抗でも電子負荷でも実験結果に差が無かったことから、インバータ試験では基本的に電子負荷で実施している。また受電側の「整流平滑」には東洋エレクトロ製の整流器を使用した。これも東洋エレクトロ社に仕様を提示して制作したものであり詳細は 3.4.1.1.7 を参照。

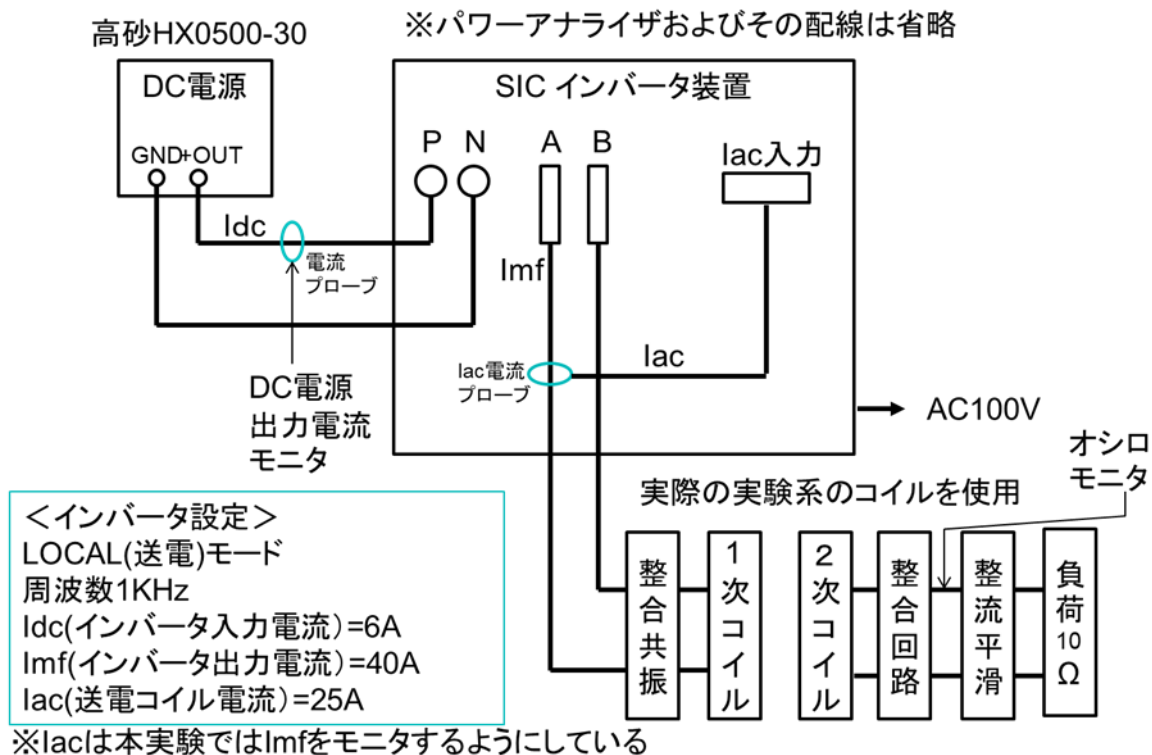


図 3.4-8 インバータ送信試験接続図

B 実験結果

実験結果例を図 3.4-9 に示す。(a)は送電側 DC 電圧設定が 50V、(b)は送信側電圧設定が 60V である。DC 電源の出力電流はインバータの極性が変動するポイントでピークが発生しているが観測されたピーク電流は(a)の条件で 14A、(b)の条件で約 9A である。また負荷入力の整流波形手前で正弦波波形がややつぶれている現象がみられる。

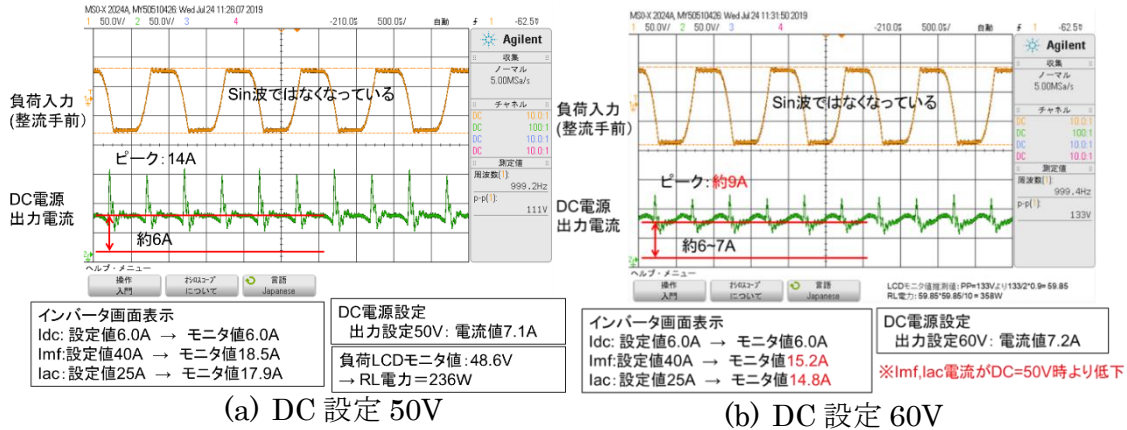


図 3.4-9 インバータ送信試験結果例(DC50/60V)

さらに SiC インバータのパラメータを変えて、何パターンか送電試験を実施した結果を以下に箇条書きする。

◇Idc 8A 設定の場合 → DC=47V 付近で Imf 過電流で出力停止

◇Idc 6A 設定の場合 → DC=65V 付近で Imf 過電流で出力停止。

※Idc を 1A に設定したときは、ほとんど電力出力ができない。(効率 2%程度)

※Imf エラー対策で設定値を最大 60A に上げてても出力停止時の DC 電圧は変わらず、

※結果的に Idc の違いで出力停止する電圧に多少の違いが出る。

ここでの最大の課題は DC 電源出力を上げる、すなわちインバータ出力を上昇させると、Imf (インバータ出力電流) が機器の定格をオーバーし出力が停止するため、目的とする電力送信ができないことであった。なお Imf の過電流停止電流は 140A である。

Imf の実測に関しては電流プローブの性能に依存し信頼できる電流値をうまく測定できず正確なところは分からなかったが、少なくとも大きなピーク電流が流れていることを示唆するデータは確認できた。

C インバータによる電力送信課題の対応

C-1 シミュレーションによる既存モデルの検討

LT-Spice を用いて SiC インバータのモデル化を行い、インバータ出力電圧±20V とした場合の既存モデルでのシミュレーションを実施して解析を行った。インバータに関しては SiC の LT-Spice 部品データを用いた実機に近いモデルでの計算を当初試みたが、シミュレーション時の計算量が大すぎて破綻してしまうため、2 個のパルス電源を用いて近似した。また実際のインバータでは極性が反転するときのデッドタイムが 400ns に固定されているが、このモデルでは全く同様の設定を行うのが困難なのでパルス電源のパラメータを正極側と負極側でそれぞれ近似調整してシミュレーションを行った。等価回路を図 3.4-10 に、シミュレーション結果を図 3.4-11 に示す。

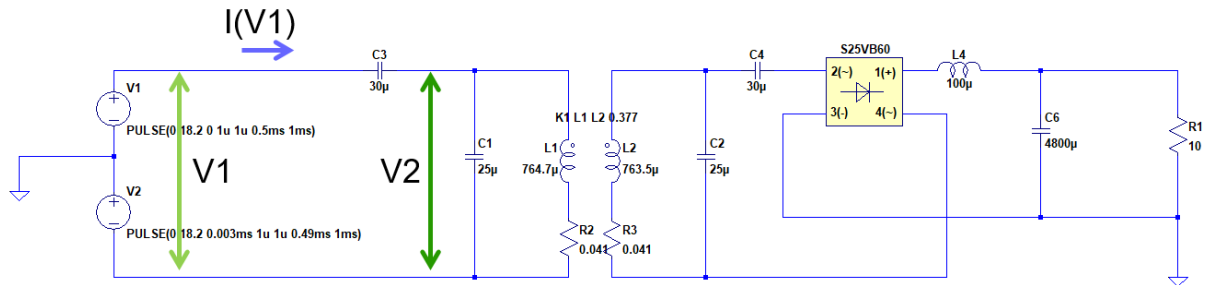


図 3.4-10 インバータ送信等価回路

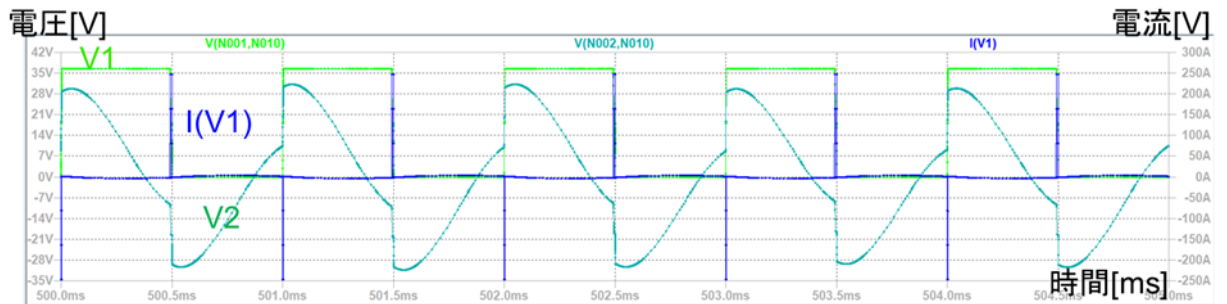


図 3.4-11 インバータ送信シミュレーション結果

図 3.4-11 はインバータの出力電流 $I(V1)$ 、電圧 $V1$ 、および整合回路のコンデンサ通過後の電圧 $V2$ の時間波形を示している。シミュレーション結果からはデッドタイムを設定しても基本的にインバータ出力は方形波であるため電圧が切り替わるタイミングで 200A 以上の大電流が発生する一方それ以外の期間では電流が発生しないという極端な特性になる。その結果、理論的には有効電力が発生する時間が一点に集中するが、実機においては機器側の電圧、電流の抑制機能によって有効電力がさらに抑えられる一方、インバータの出力電流は過大になり機器の最大電流の制約を容易に超えてしまい力率が大きく低下する。こ

のシミュレーション結果は実験結果の傾向と一致している。

C-2 シミュレーションによる改善モデルの検討

前節での検討結果を踏まえ送信出力側の過度電流を抑え、力率を改善するために、インバータの出力段に LPF フィルタ機能を搭載し、その効果が有効かどうか検討した。このときの LT-Spice モデルを図 3.4-12 に示す。LPF に関しては D に詳細を記載する。

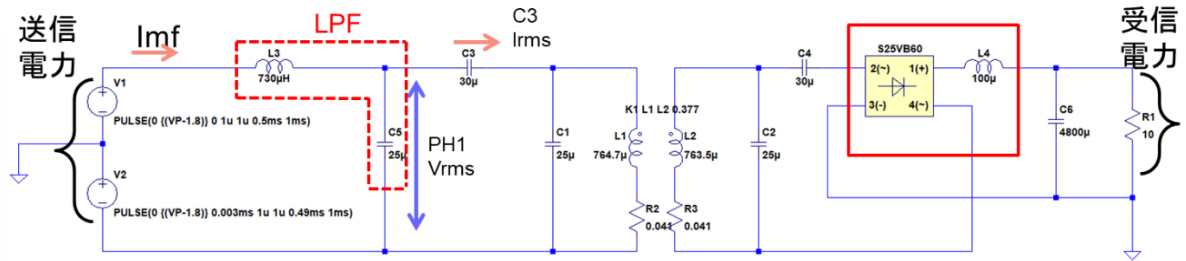


図 3.4-12 インバータ改善 Spice モデル

赤枠の整流器の部分は、実機で使用した東洋エレクトロ製の整流器とは異なるが、部品データが入手できず LT-Spice モデルにそのまま置き換えることが困難であったため、機器使用から特性の近いもので代用をした。このモデルを使用して電力計算した結果を表 3.4-4 に示す。

表 3.4-4 インバータ回線 Spice モデルでの電力計算結果

電源電圧 [V]	送信電力 [W]	受信電力 [W]	伝送効率	Imfrms[A]	力率	PH1 Vrms[V]	C3 Irms[A]
10	16.93	13.91	0.82	2.61	0.74	13.41	1.63
20	78.78	69.06	0.88	5.56	0.75	28.75	3.60
30	184.18	165.47	0.90	8.41	0.76	43.90	5.55
40	332.22	301.99	0.91	11.24	0.76	58.91	7.49
50	523.11	479.39	0.92	14.03	0.76	73.93	9.41
60	758.51	699.83	0.92	16.84	0.77	89.03	11.34
70	1039.42	962.31	0.93	19.67	0.77	104.24	13.27
80	1366.16	1267.81	0.93	22.56	0.77	119.49	15.22
90	1735.30	1614.25	0.93	25.39	0.77	134.70	17.15

上記結果より改善モデルでは伝送効率、力率ともに改善され十分な送受信電力が得られる見込みがあることが分かった。

C-3 改善モデルの測定系

改善モデルの系を実際に構築して測定をおこなった。測定系は図 3.4-13 に示す通りである。電流、電圧は専用プローブでセンシングし、電力系はパワーアナライザにセンシングデータを入力し詳細を測定した。また L3 のリアクトルは大電力が流れることを考慮してかなり大型の形状(サイズ：128×180×60、重量：6.2Kg、)のものとなっている。

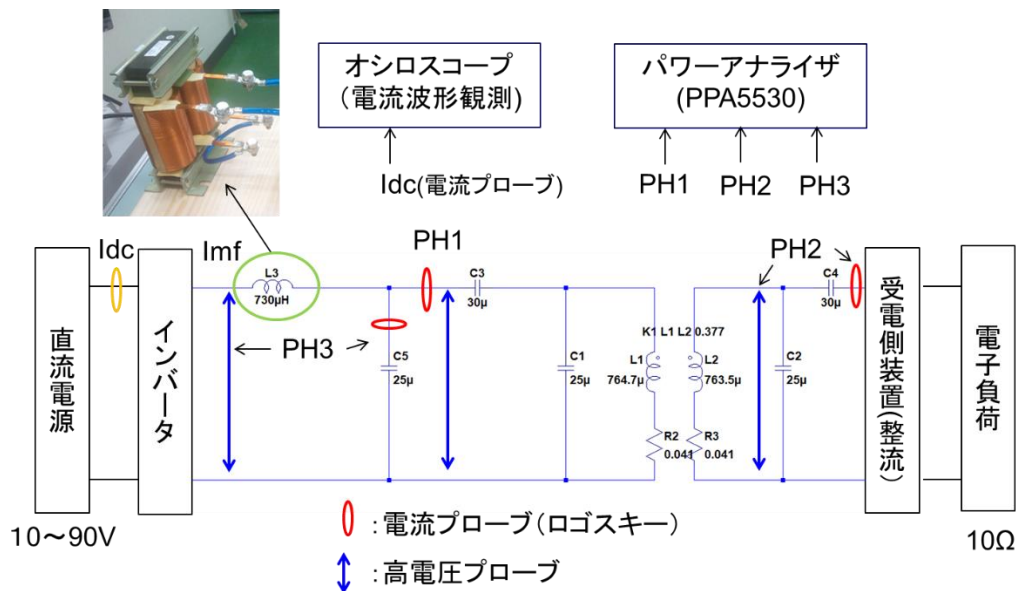


図 3.4-13 インバータ電力送信改善モデル測定系

C-4 改善モデルの測定結果

表 3.4-5 改善モデルの測定結果

直流電源	電源電圧[V]	10	20	30	40	40	50	60	60	70	80	90
	電源電流[A]	2.3	4.3	6	7.1	8.2	10.2	11.6	12.2	14.2	16.3	18.6
インバータ	Idc[A]	1.6	3.4	5	6	6.9	8.7	10.9	10.5	12.4	14.2	16.3
	Imf[A]	2.3	4.9	7.3	9.3	10.1	12.7	14.9	15.3	17.9	20.7	23.4
	Idc設定値[A]	6	6	6	6	10	10	10	20	20	20	20
	Imf設定値[A]	10	10	10	10	20	20	20	25	25	25	25
パワーアナライザ	送信力率(%)	95.116	95.321	95.616	95.966	95.891	96.088	96.182	-	96.292	96.327	96.664
	PH1Power[W]	22.265	81.093	166.21	271.24	306.73	472.79	647.23	-	921.89	1215.6	1568.4
	PH2Power[W]	20.162	73.35	150.41	245.5	277.6	427.96	585.84	-	834.72	1100.7	1422.7
	(伝送効率)	0.905547	0.904517	0.90494	0.905102	0.90503	0.90518	0.90515	-	0.905444	0.905479	0.907103

改善モデルの電力送信測定結果を表 3.4-5 に示す。この改善モデルを使用して実測で電源電圧を 10V ステップで上昇させ 1500W まで電力送信を行ったところ、実測で送信力率 90%以上での電力送信の確認できた。

C-5 シミュレーションと実測の比較検討

以下にシミュレーションと実測の比較で条件の違いや結果について考察する。

まず送受電力の比較に関しては図 3.4-14 に示す通りで、実測結果とシミュレーションを比較するとシミュレーションの方がやや高くでているが、傾向はほぼ一致している。実測との差の要因については C-1 で述べたようにインバータの部分に正確に模擬することに計算上の限界があることと、LT-Spice モデルでのパワー計算は電流、電圧の位相差の誤差の影響を受けやすいなどの理由が考えられるため、より適切なシミュレーション方法について継続して検討する。

送受電力比較

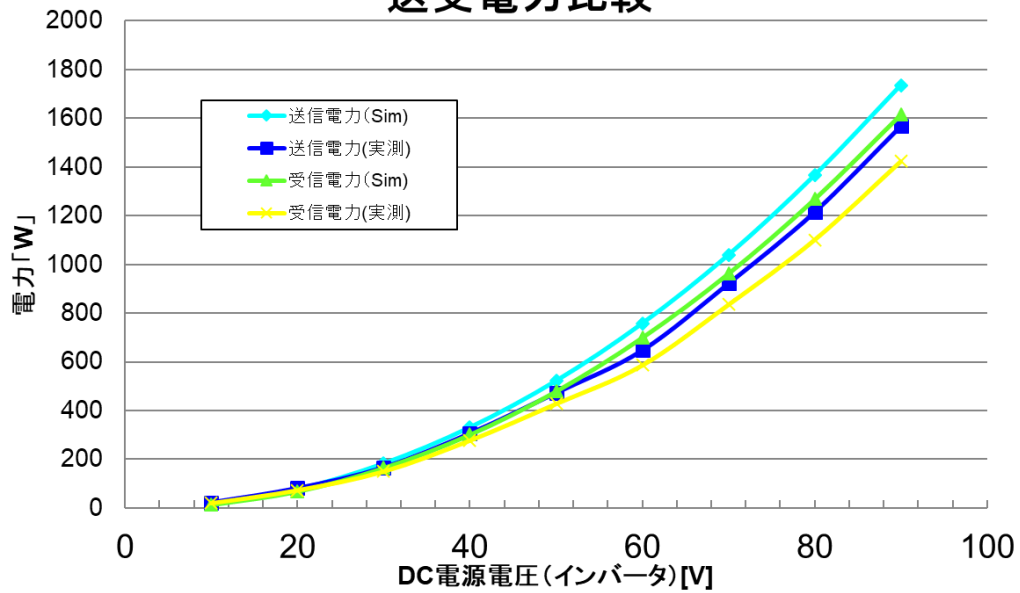


図 3.4-14 シミュレーションと実測での送受電力比較

次に力率に関して、パワーアナライザでの力率は PH1 の部分の実測値に基づき算出した電流値および電圧値の位相差から直接算出しているのに対して、シミュレーションで示している力率はインバータ等価回路上で計算される電流値(RMS)×電圧値(RMS)とパルス電源 V1 および V2 で消費される LT-Spice モデル上でのパワー計算の比で算出している。したがって前者は LPF 通過後の力率で、後者はインバータの力率と言える。

実際にパワーアナライザが計測した値のポイントでの電流、電圧のシミュレーションの時間波形をしてみると図 3.4-15 に示すように電流、電圧の位相差はほとんどなくパワーアナライザでの実測傾向に合致していることが分かる。

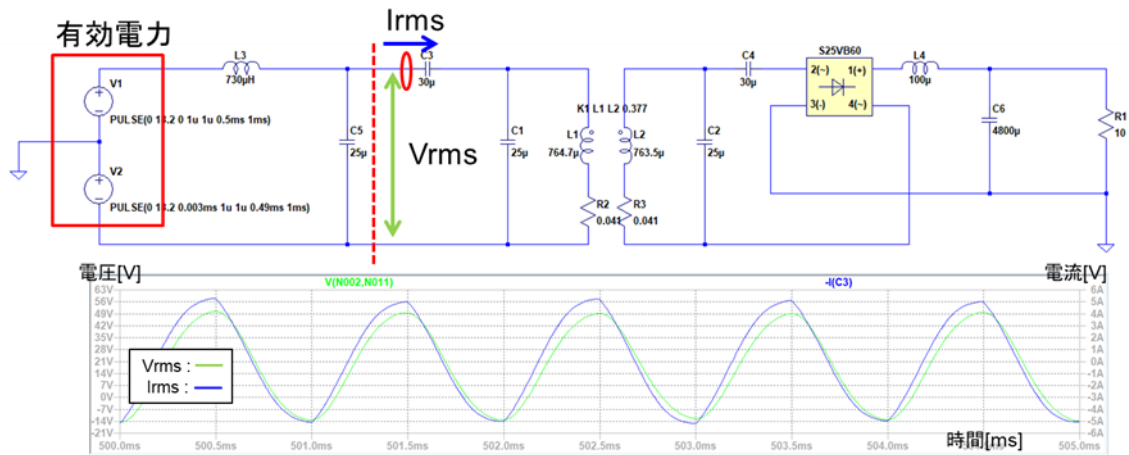


図 3.4-15 力率計算時の電流、電圧の波形シミュレーション

D インバータ送電装置のフィルタ設計についての論理的考察

D-1 フィルタ定数の決定

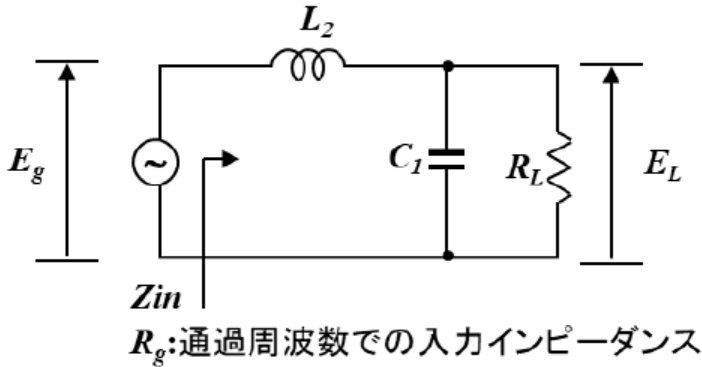


図 3.4-16 LPF の構成

図 3.4-16 に示す LPF の構成において、角周波数を ω とするとインピーダンス Z_{in} は

$$Z_{in} = \frac{R_L}{1 + (\omega C_1 R_L)^2} + j\omega \frac{(L_2 + L_2(\omega C_1 R_L)^2 - C_1 R_L^2)}{1 + (\omega C_1 R_L)^2} \quad (3.4-1)$$

となる。フィルタの通過周波数では虚部=0 となり、この時のインピーダンスを R_g とすると、

$$R_g = \frac{R_L}{1 + (\omega C_1 R_L)^2} \quad (3.4-2)$$

これより C_1 を解くと、

$$C_1 = \frac{1}{\omega R_L} \sqrt{\frac{R_L}{R_g} - 1} \quad (3.4-3)$$

また数式(3.4-1)の虚部=0 の条件から L_2 を解くと

$$L_2 = \frac{C R_L^2}{(\omega C_1 R_L)^2 + 1} \quad (3.4-4)$$

従ってターゲットとする角周波数 ω と R_g の条件が定まれば、 C_1 、 L_2 を求めることができる。

R_g は任意に定めることが可能ではあるが、電力条件や部品の性能から今回の場合、 $\omega/2\pi = 1\text{KHz}$ 、 $R_g = 3\Omega$ 、 $R_L = 10\Omega$ として計算し、 $L_1 = 729.3\mu\text{H}$ 、 $C_1 = 24.3\mu\text{F}$ を得た。実際の部品では $L_1 = 730\mu\text{H}$ 、 $C_1 = 25\mu\text{F}$ を採用した。

D-2 フルブリッジインバータへの適用

次にフルブリッジインバータでこのフィルタを適用するとどうなるか考察する。まず図 3.4-17 のような方形波周期関数を考える。このとき $f(t)$ の大きさを便宜的に 1 と定義すると、

RMS 値は基本的に周期関数の 2 乗平均の平方根になるので、RMS 値も 1 となる。

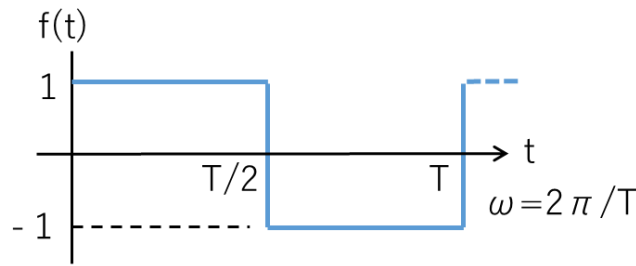


図 3.4-17 方形波周期関数

一方図 3.4-17 の関数をフーリエ級数展開すると(n :正の整数)

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \left\{ \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega) + \frac{1}{5} \sin(5\omega) + \dots + \frac{1}{(2n-1)} \sin(2n-1)\omega \right\} \quad (3.4-5)$$

となる。ここで図 3.4-16 の LPF の機能を考えると数式(3.4-5)の 3 次以降の高調波成分は無視できる。したがって図 3.4-17 の方形波周期関数を図 3.4-16 の LPF に適用した場合実質的に $f(t)$ は、

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \sin(\omega t) \quad (3.4-6)$$

となり、この時の $f(t)$ の実効値を E_{LpfRMS} とすると

$$E_{LpfRMS} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} = 0.90 \quad (3.4-7)$$

従って図 3.4-16 の系にフルブリッジのインバータを適用した時の通過周波数での実効力率は

$$\frac{E_{LpfRMS}^2/R_g}{E_{gRMS}^2/R_g} = \left(\frac{4}{\pi\sqrt{2}} \right)^2 = 0.81 \quad (3.4-8)$$

と計算される。

改善モデルで求めた実効力率は負荷の部分が単純に R で置き換えられない複雑な系になっているが表 3.4-4 から 0.77 前後であり、この章で議論した計算により求めた力率に近い値となっており、LPF の効果として実効力率は 0.8 をやや下回る程度と把握しておいて、ほぼ間違いないと思われる。

D-3 シミュレーションによる検証

LT-Spice モデルで方形波シミュレーションモデルを作成し $V1 = \pm 10V$ のフルブリッジインバータ、周期 1000Hz、としてシミュレーションを実施した。回路図モデルは図 3.4-18 に示す。シミュレーションの結果、電力値は 26.8W と計算された。

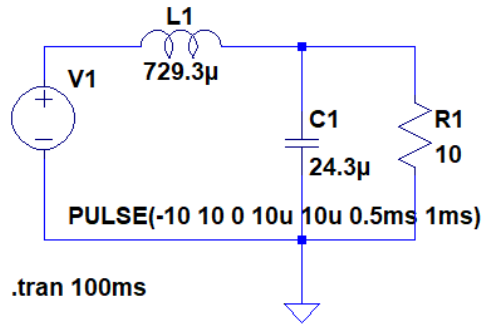


図 3.4-18 シミュレーションモデル

一方計算から求められる電力値 P は下記のようになる。

$$P = E_{LpfRMS}^2 / R_g = \left(\frac{4}{\pi\sqrt{2}} \times 10 \right)^2 / 3 = 27.0[\text{W}] \quad (3.4-9)$$

計算された値はほぼシミュレーション値と同等とみなして良い。

3.4.1.3. 環境影響試験での送受電装置

3.4.1.3.1. 環境影響試験での送電装置

海中給電の魚類への影響を調査・研究する環境影響試験では送電側装置にインバータの代わりにオシレータ+ACパワーアンプの構成またはプログラマブル AC 電源を使用した。

これらはインバータ送電装置と比較してより大きな電圧・電流で電力を送出する場合に制約があるが、使用する周波数に応じたリアクトルの用意が不要であること、および直流電源が不要であり実験機器構成がシンプルになるというメリットがあり、環境影響試験に適していると考えたためである。

3.4.1.3.2. オシレータ+ACパワーアンプ

汎用のオシレータで生成された正弦波を NF 社のパワーアンプ 4520A で増幅して送信電源とする手法である。NF 社 4520A の図面を図 3.4-19 図 3.4-19 に示す。定格は 2kVA/16.7A である。欠点は重量が 93kg と非常に重く設置などの取り扱いが容易でないことである。

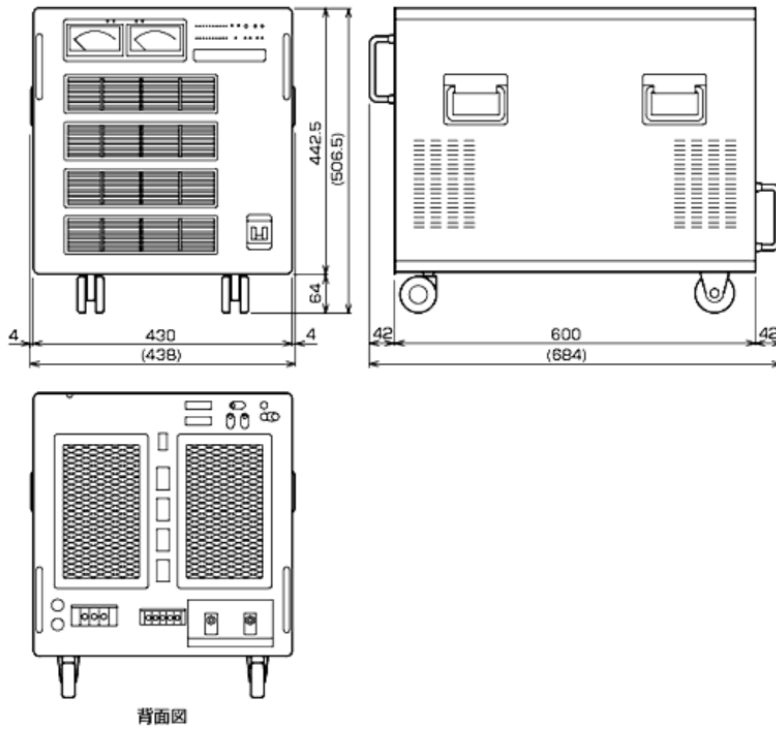


図 3.4-19 NF 社 4520A 図面

3.4.1.3.3. プログラマブル AC 電源

プログラマブル AC 電源は任意の波形を生成して電力伝送が可能であるので、オシレータは不要であり利便性が高い。今回は菊水電子の PCR6000WE2R を使用したが、この機器は 1Hz~5KHz の周波数で最大 6KVA までの出力が可能で、機器重量も 42kg であるため重量物ではあるが、パワーアンプに比較すると軽量である。機器の外観図を図 3.4-20 に示す。

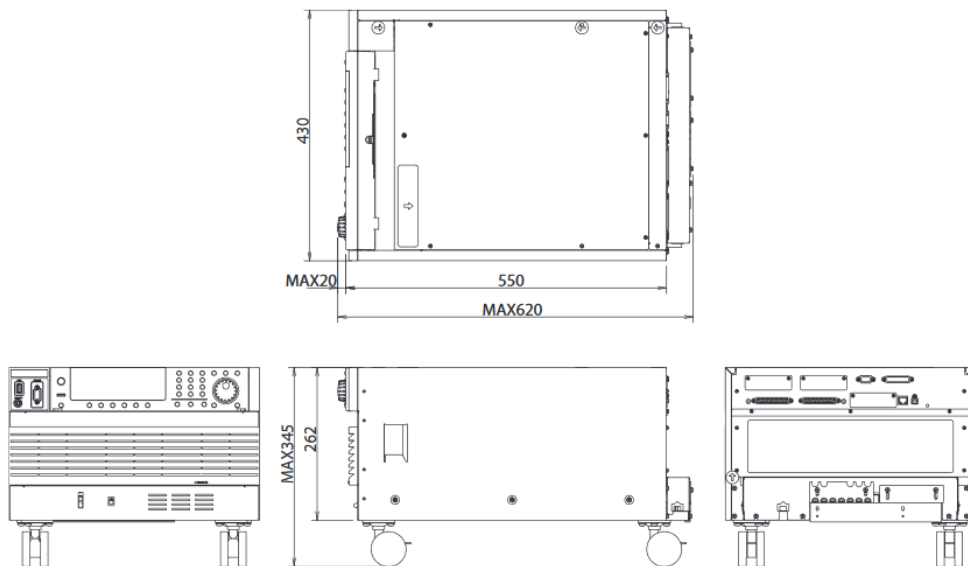


図 3.4-20 PCR6000WE2R 外観図

3.4.1.3.4. 環境影響試験での受電装置

受電装置としては東洋エレクトロ製の整流器があり、仕様についての詳細は 3.4.1.1.7 に記載した。東洋エレクトロ製のインバータ送電装置と専用の通信機能を有しており、受電側の状態に応じた送電側の制御が可能な構成となっている一方、平滑化コンデンサを追加実装する必要があることと、内蔵リアクトルを海中給電の使用周波数など試験仕様に合わせてカスタマイズする必要がある。

一方本研究で使用する周波数帯域が音響帯域であることから動作時に機器内蔵のリアクトルやコンデンサが振動して音鳴りがするという問題があり環境試験の場合魚類への影響を考えると好ましくない。しかしながら音響的な対策を機器に施すためには機器を若干改造する必要があるため、今後の環境試験でも使用可能かつ AUV にも搭載可能な小型化を実現するリアクトルを省略した箱入りの整流器の試作を 2 種類試作したので以下に詳細を述べる。なお整流器の送電側との通信機能については未対応である。

A 整流器試作 No.1

整流器試作 No.1 は環境試験用に約 1kW 程度までの電力送信に耐えられることを考慮して制作した。ダイオードブリッジに新電元製(S50VB80)を使用し放熱板を取り付け、平滑リコンデンサ 4700 μ F (耐圧 350V) を接続し LCD 電圧メータで目視可能な構成とした。回路図を図 3.4-21 に示す。

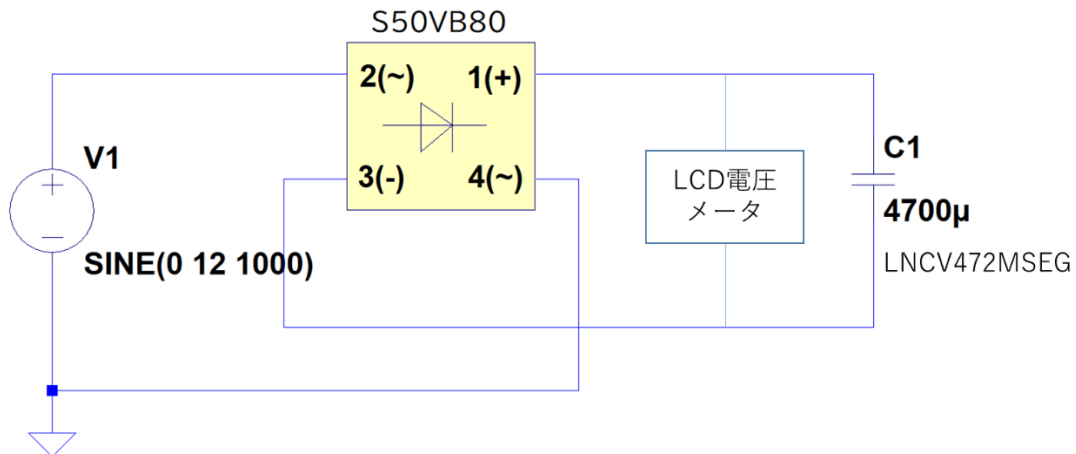


図 3.4-21 整流器試作 No.1 回路図

S50VB80 には放熱板を取り付け、系全体を金属ボックスに収めるとともに、外部部負荷に接続できるように端子穴および端子台を用意しているが、1KW 相当の抵抗負荷も金属ケ

ースに収めることが可能であるため、ボックス単体で整流器と負荷を兼ねることもできる。それぞれの写真を図 3.4-22 整流器試作 No.1 写真に示す。

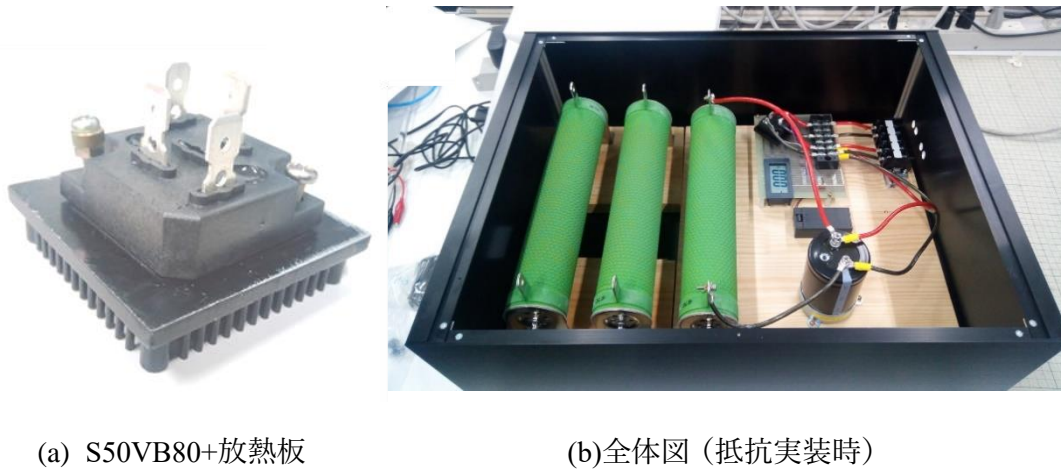


図 3.4-22 整流器試作 No.1 写真

S50VB80 の放熱デレーティングカーブを図 3.4-23 に示す。

実際には 1KW 送信時の実測値としてデバイスに約 13A の電流が流れ温度上昇が最大 127°C前後になることを確認している。したがってこの場合放熱デレーティング特性により約 25A までの電流が流せるので、12A のマージンがあると判断できる。しかし 1KW 以上の電力送信を行うことを考えると、これよりさらに温度上昇が見込まれることから総合的に考えてややマージンが不足している可能性があり、これに対応するため整流器試作 No.2 の試作検討を行った。詳細は次節に示す。

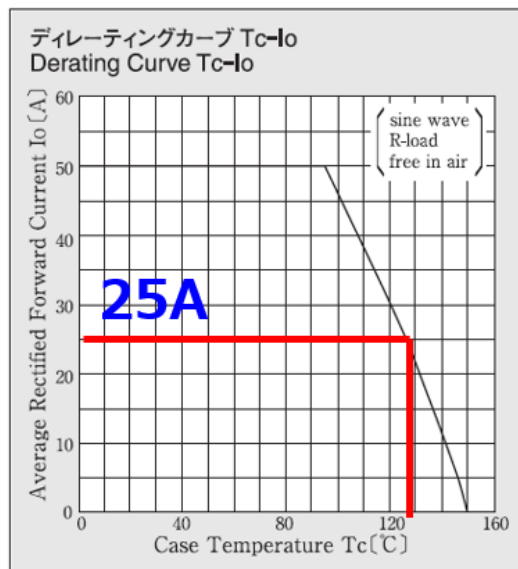


図 3.4-23 S50VB80 放熱デレーティングカーブ

B 整流器試作 No.2

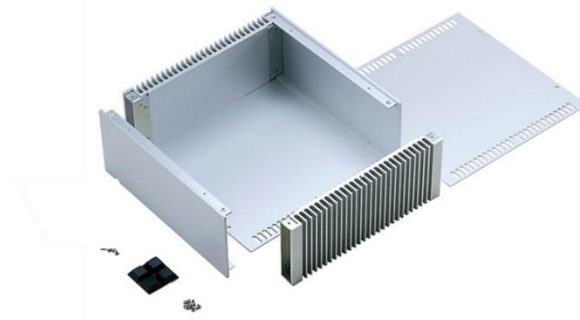
整流器試作 No.2 では少なくとも 3KW 電力送信が可能な構成とした。ダイオードブリッジの強制放熱も検討したがファンを動作させるときに別の電源が必要になるためダイオードブリッジに放熱板と放熱ケースに密着させ自然放熱の効果を高める方式にした。また平滑コンデンサも現状の部品(LNVCV472MSEG:ニチコン)でリップル電流許容値が 16.4A に対して異なるいくつかの 3KW 電力送信条件でリップル電流が RMS 値で 20A 前後に達することがあったため、2 並列化して負荷を分散した。放熱板および放熱ケースの写真を図 3.4-24 に示す。なお回路図は平滑コンデンサが 2 並列になっただけで図 3.4-21 と同様であるため省略する。

放熱板 : 395-2AB(wakefield-vette)
サイズ : 139.7×127.0×63.5 [mm]

放熱ケース : hy133-28-23ss(タカチ)
サイズ : 280×231×132.5 [mm,]



(a)放熱板



(b)放熱ケース

図 3.4-24 放熱板および放熱ケース写真

放熱ケースに各部品を組み込んだ写真を図 3.4-25 に示す。

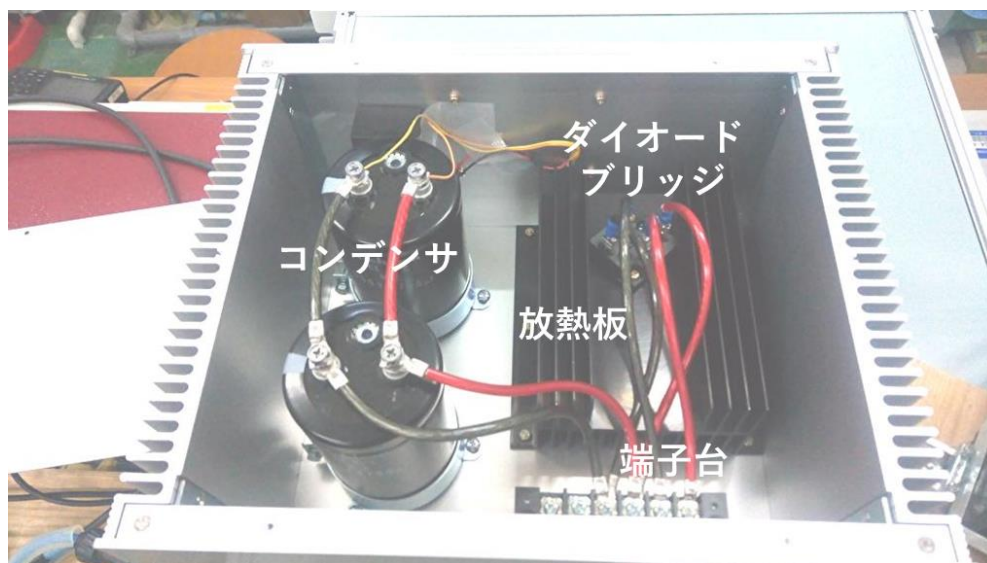


図 3.4-25 整流器試作 No.2

本整流器を使用して 3KW 送信を行った時の温度上昇のデータを抜粋して示す。ダイオードブリッジの接合部の温度上昇は約 75°C程度に抑えられることが分かった。よって図 3.4-23 の放熱ディレーティングカーブより 95°Cに対して 20°C以上のマージンがあるため整流器の最大性能として 50A まで電流を流せると判断でき十分な設計余裕がある。

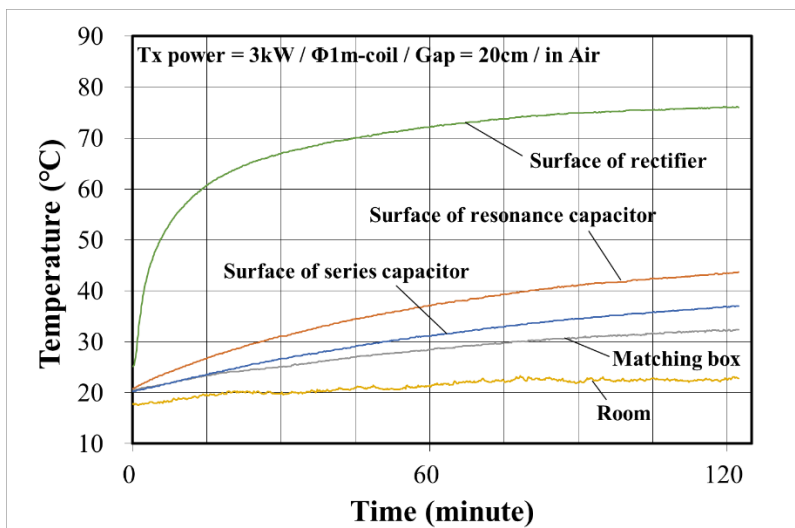


図 3.4-26 3KW 電力送信時に整流器 No.2 を使用した時の温度上昇

3.4.1.4. 受電装置(1 次試作・評価)

本研究では最終的に実際の AUV のリチウムイオン電池に充電する電力伝送を評価する必要があるため、充電システムの構築をあらかじめ行い充電時における負荷変動をはじめとする様々な特性や挙動を把握する必要がある。しかしながら AUV のワイヤレス充電システムは基本的に汎用的なものが存在しないため本研究に適した海中給電可能な充電システムを独自に構築する必要がある。本章では受電装置の 1 次試作・評価について述べる。

AUV に使用する電池候補の詳細については (DRT の報告書の部分) で割愛するが 1 モジュール 28.7V(リチウムイオン電池 7 セル)の電池を 4 直列して使用する計画であり、まず 1 モジュールを単体で充電するシステムを構成し、これを多段接続して最終的に最大 114.8V(リチウムイオン電池 28 セル)まで段階的に増やすことが可能な構成でのシステム構築を検討した。表 3.4-6 に充電装置の仕様について記載する。

表 3.4-6 充電装置仕様

項目	仕様	備考
DC/DC 電源	PCA300F-32 (Cosel 社製)	出力：最大 32V-10A 入力：DC：88-370V、 AC：85-264V、
多段接続数	1~4 台	最大出力電圧 200V 以下
充電可能セル	7 セル(28.7V)	最大 7×4=28 セル(114.8V)

数		
充電電流	3.7A	最大 5A(暫定)
充電方式	CC-CV 方式	
CC 停止電圧	28.2V	設定可変(任意)
CV 停止電流	500mA	設定可変(任意)
制御 I/F	UART 115200bps	
制御 CPU	STM32L0 シリーズ	Arm Cortex M0+ 16MHz
マイコンボード	B-L072Z-LRWAN1 LoRa®/Sigfox™ Discovery kit	Nucleo STM32L053 ボードに置き換え予定

3.4.1.4.1. 充電装置構成

A DC/DC 電源の多段接続

本装置では DC/DC 電源として Cosel 製の PCA300F-32 を使用しているが電源をスタックして直列接続する場合を 1 台の Master 電源から複数の Slave 電源を制御することが可能である。Master 電源、Slave 電源は電源の指定のポートをオープンにするか GND にするかで決定できる。Master/Slave 間は指定のコネクタ間を専用ハーネスで接続する。接続方法の詳細を図 3.4-27 に示す。

PCA300F-32 は最大 32V/10A の出力が可能であるため 4 直列で使用すると最大 128V の電圧出力の能力が確保できる。

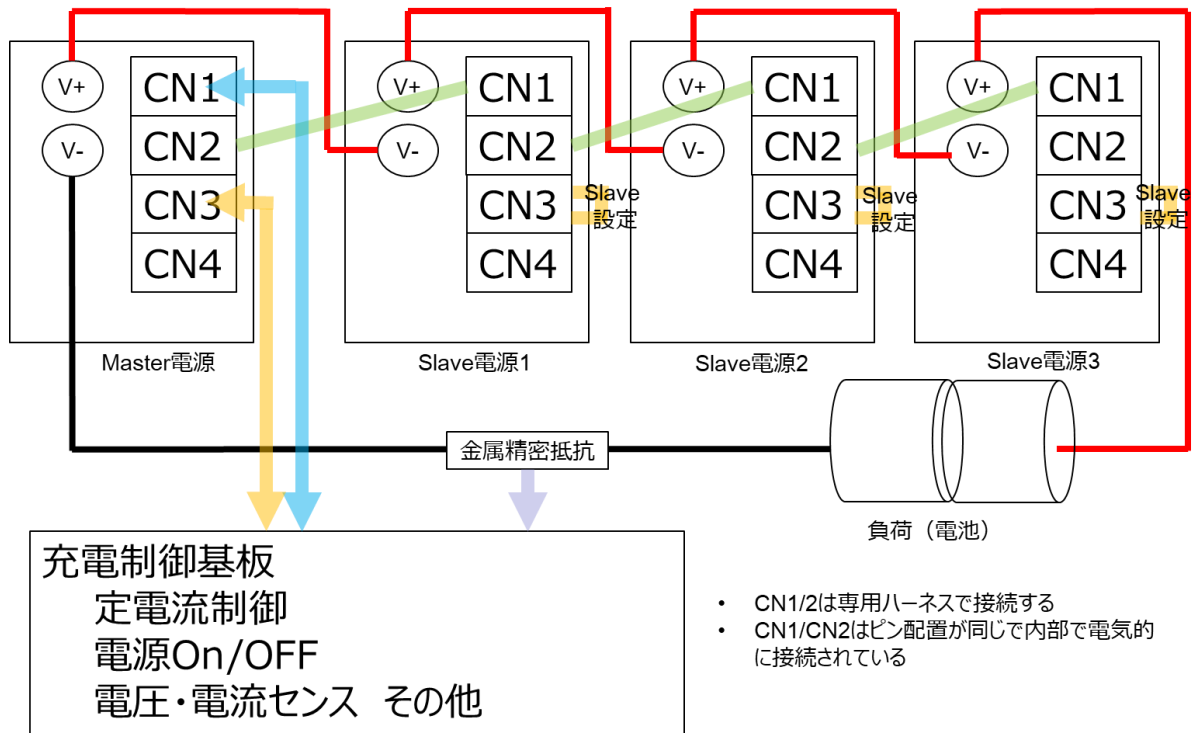


図 3.4-27 DC/DC 電源スタック化接続図

また DC/DC 電源の ON/OFF に際しては Master/Slave 間で同期する必要があるが、電源同期制御に関しては図 3.4-28 のような回路で対応する。この回路では各 Master/Slave 間は CN1/CN2 を介して接続されており RC2/RCG 間のフォトカプラを介して電源を ON/OFF することが可能である。なお AUX の 12V 電源に関しては最大 0.1A の電流出力が可能で DC/DC 電源の入力側に規定の電圧が印加されると有効になる仕様となっている。

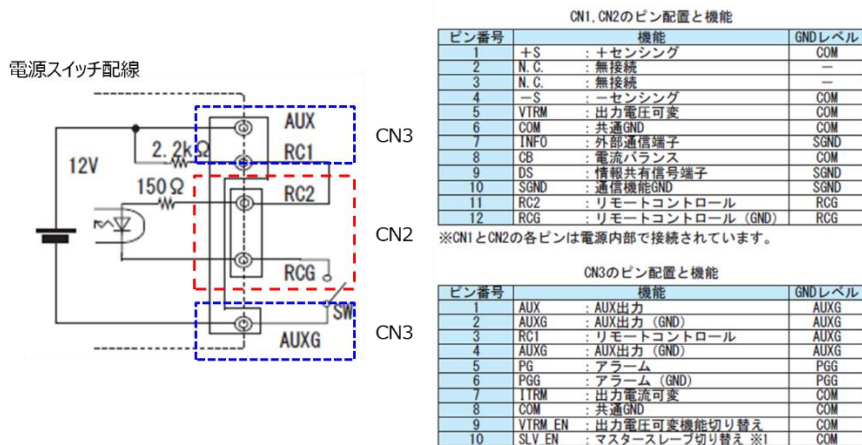


図 3.4-28 電源スイッチ同期回路

各電源への出力電圧の調整は DC/DC 電源の CN2 の VTRM 端子を使用する。出力電圧と VTRM 端子に入力される電圧との間には

$$\text{出力電圧} = (\text{VTRM 端子電圧}) \times \frac{32}{2.5} \quad [\text{V}] \quad (3.4-10)$$

の関係があり、VTRM 端子電圧が CN1/CN2 の専用ハーネスを介して同じレベルで各 Master/Slave 電源で共用されるため各 DC/DC 電源に同時に電圧制御が可能である。

B 充電制御部構成

充電制御部の全体構成を図 3.4-29 に示す。点線内は STM32 のマイコンボードで CPU および AD 変換および DA 変換機能が内蔵されている。

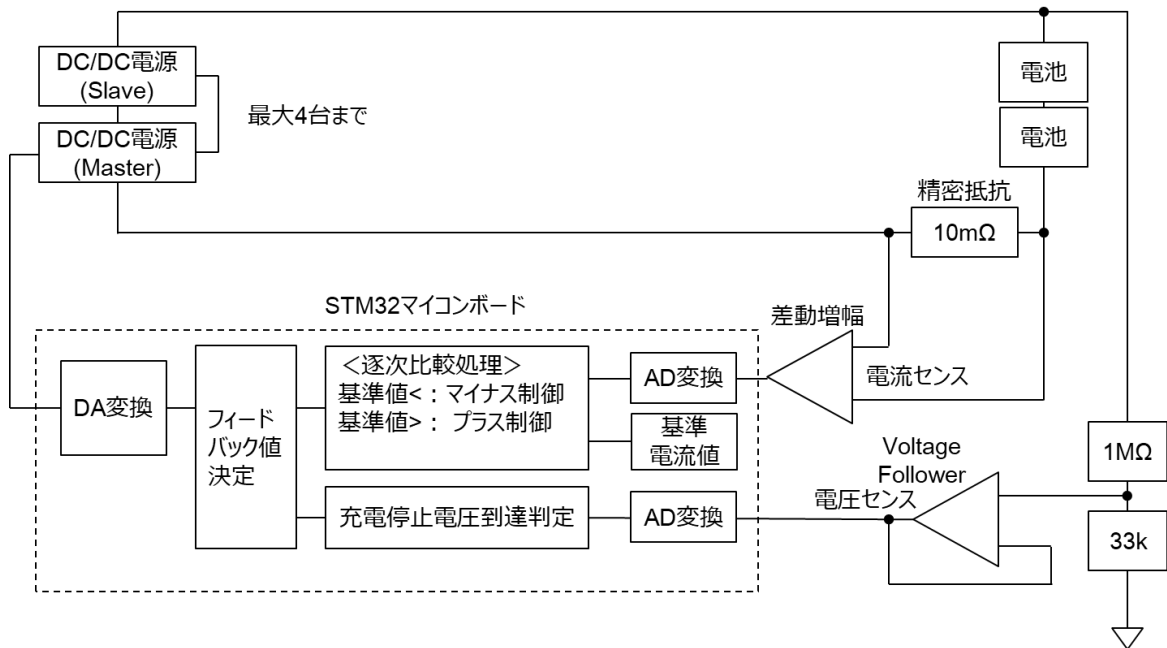


図 3.4-29 充電制御部全体ブロック図

C 回路図およびボード接続図

充電部の回路図を図 3.4-30 に示す。電源の ON/OFF のスイッチ機能は省略をしている。電圧モニタ回路は図 3.4-29 では 1 か所のみとしているが、電池毎の電圧をモニタするなど拡張性を考慮して 4 チャンネル分確保している。

また STM32 マイコンボードと DC/DC 電源および通信用 PC との配線構成を示すボード接続図を図 3.4-31 に示す。ここで注意することは STM32 ボード内に AD/DC の機能を有しているため、各ボードと通信用の PC および DC/DC 電源の GND レベルを合わせることである。そのため通信用のパソコンからの USB 給電は行わずシリアル通信と USB 通信を媒介する FT232 の USB ドライバはシャントレギュレータから生成された 5V を使用する構成として PC (通信) 側の電源系を充電側の電源系に合わせる構成としている。

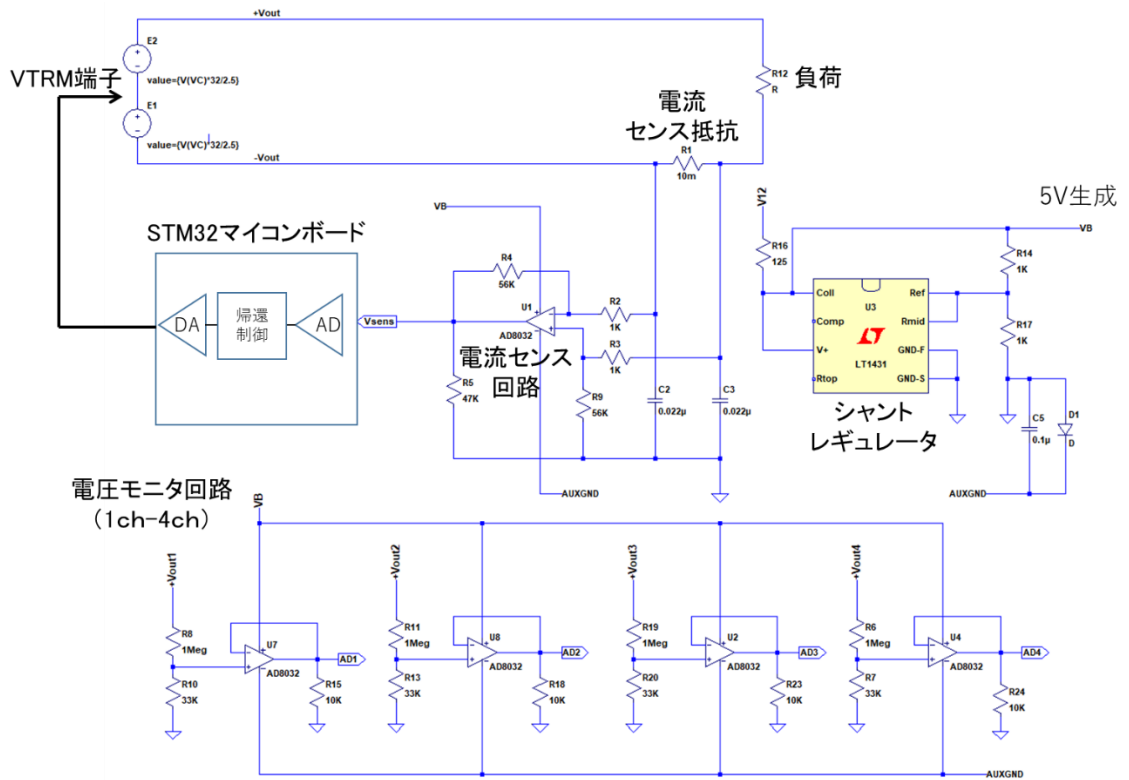


図 3.4-30 充電部回路図 (一部省略)

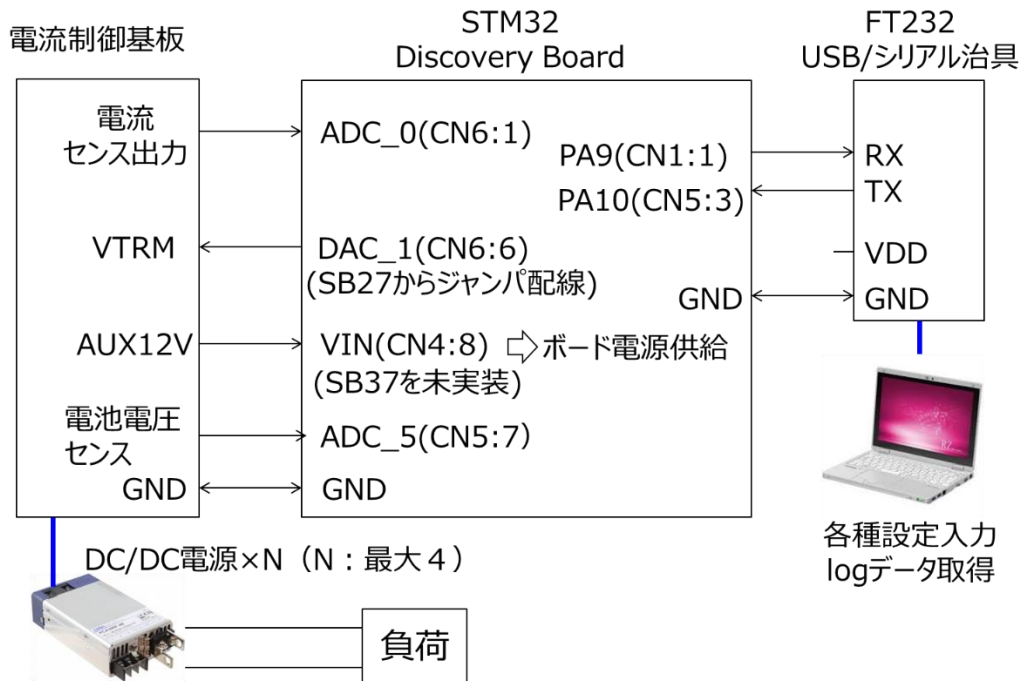


図 3.4-31 ボード接続図

D 動作フローチャート

動作フローチャート類を以下に示す。なおプログラムはC言語を使用しているがフローチャート上では可視性を考慮して必ずしもC言語の文法に合致していない。

図 3.4-32 は CC-CV の充電動作概略のフローチャートで制御の全体構成を示している。

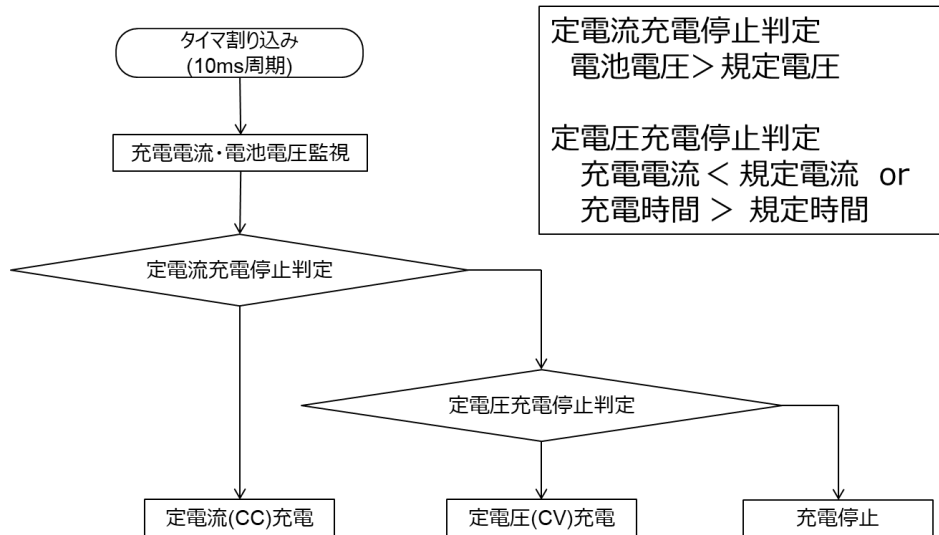


図 3.4-32 CC-CV 充電動作概略フローチャート

図 3.4-33 は Key 入力割り込みとアナログの電流センスデータを AD 変換する時の DMA 割り込み処理のフローチャートである。AD 変換は高速に処理する必要があるので、DMA を使用するとともに DMA 割り込み処理を最優先として機能するようにプログラミングしている。なお Key 入力割り込みの処理優先度は最下位としている。

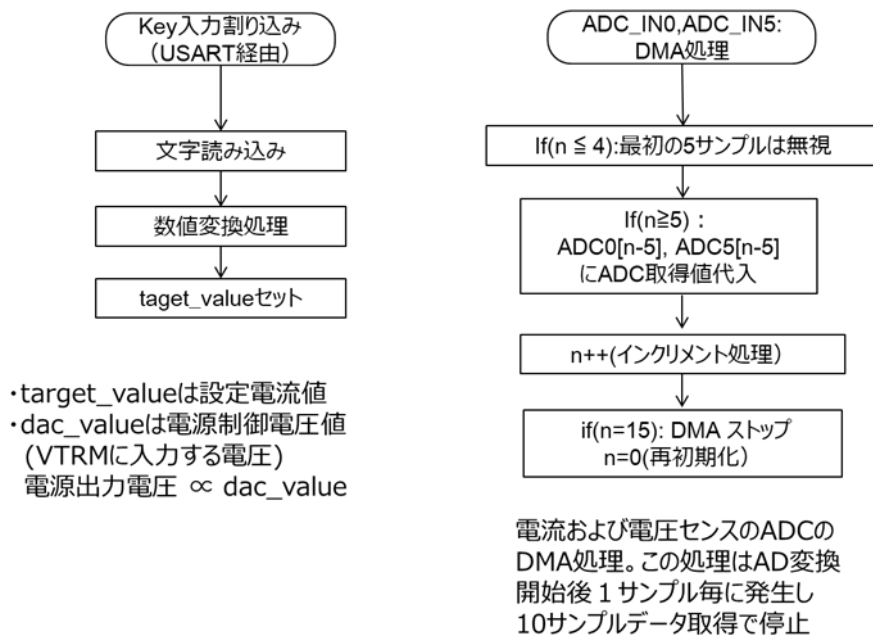


図 3.4-33 Key 入力割り込みおよび DMA 処理フローチャート

図 3.4-34 はタイマ割り込み処理の中で動作させるメインの充電制御処理のフローチャートである。タイマ割り込み間隔は暫定的に 10ms としている。この中のコアとなる処理は定電流機能を実現するところで、電流センスしたデータを基準値と比較しその差分の大小で調整するというものであるが、この処理の詳細等については(3)以下で述べるものとする。

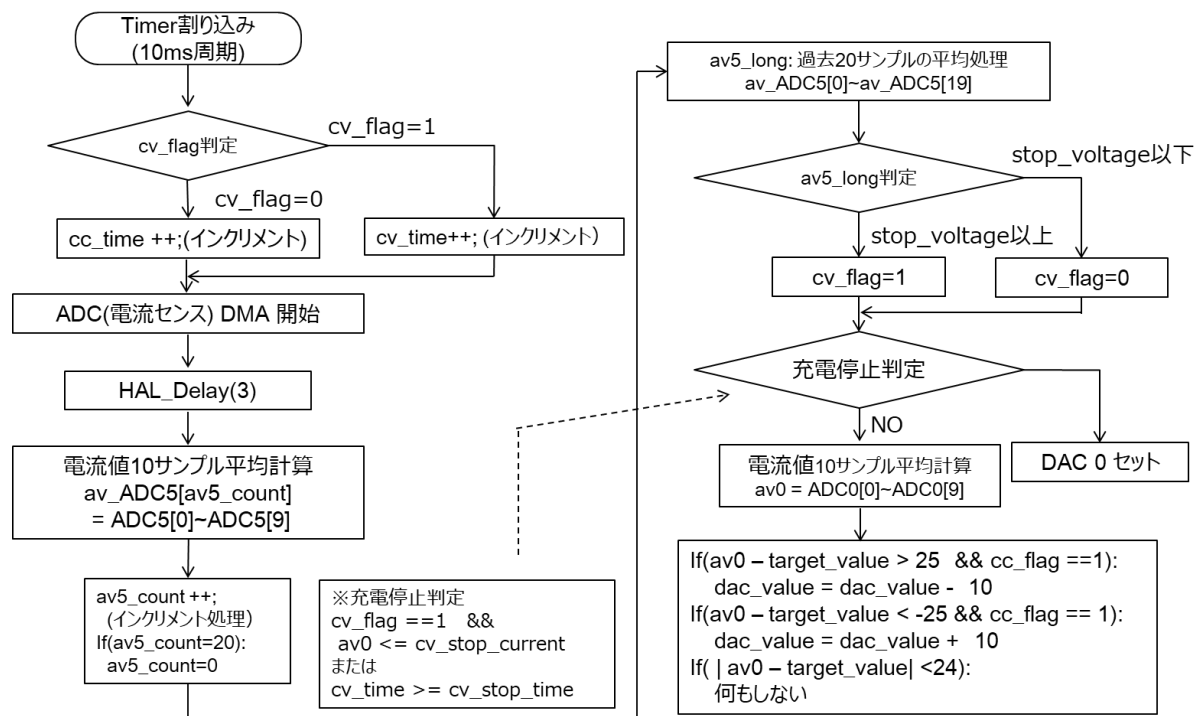


図 3.4-34 10ms 割り込みメイン処理フローチャート

3.4.1.4.2. 充電特性試験

A 充電電流の振動

Tuna-Sand バッテリー（リチウムイオン 2 次電池(18650 タイプ)の 7 直列+9 並列) の電池パックを 1 個使用して定電流充電の動作検証を行った。充電試験構成図を図 3.4-35 に示す。

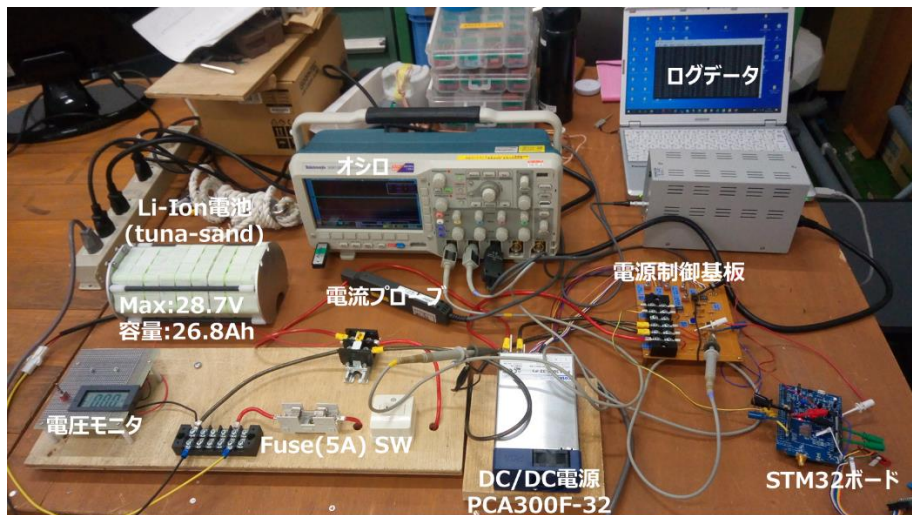


図 3.4-35 充電特性試験構成

充電電流は $0.15C=3.7A$ の規定があるのでこれに沿って設定した。図 3.4-36 に充電時の充電電流の動作波形を示すが、帰還制御が働いているが充電電流が約 2A の幅を持って振動しており充電特性としては好ましくない。

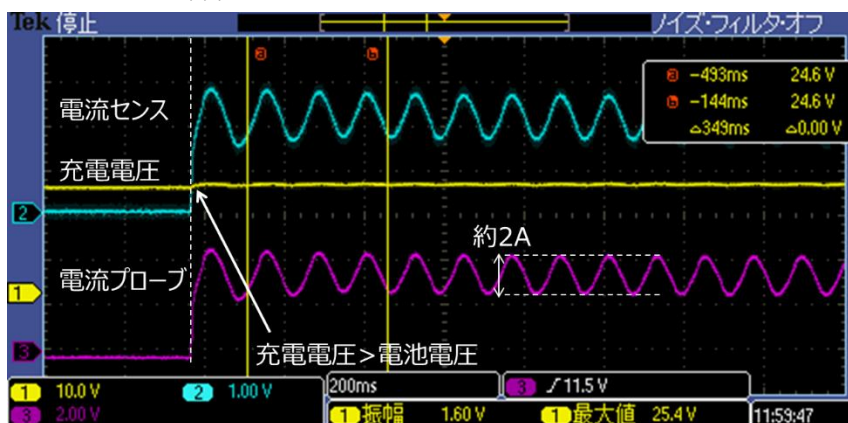


図 3.4-36 充電時の動作波形

B 充電電流の振動の改善

充電時の帰還制御はターゲット電流に近づくように DC/DC 電源の出力電圧を調整するような処理であるが、電池の内部インピーダンスが低いいためターゲット電流に対応した電圧出力値に対して少しでも差があると電流値が大きくなり電流が安定して収束しにくい。したがってターゲット電流に近くなったらできるだけ単位時間当たりの変化量、すなわちこの場合割り込み時間当たりの出力電位変動幅を小さくするような制御が有効と考えた。

当初 10ms での電位変動幅を約 100[mV]にしていたが、これを 10[mV]に変更して制御させたときの動作波形を図 3.4-37 に示す。この動作波形ではまだ多少の振動が見られるが、実際の動作は全く振動しないときと図 3.4-37 のように多少の振動がみられる状態とを遷移

しながら充電された。

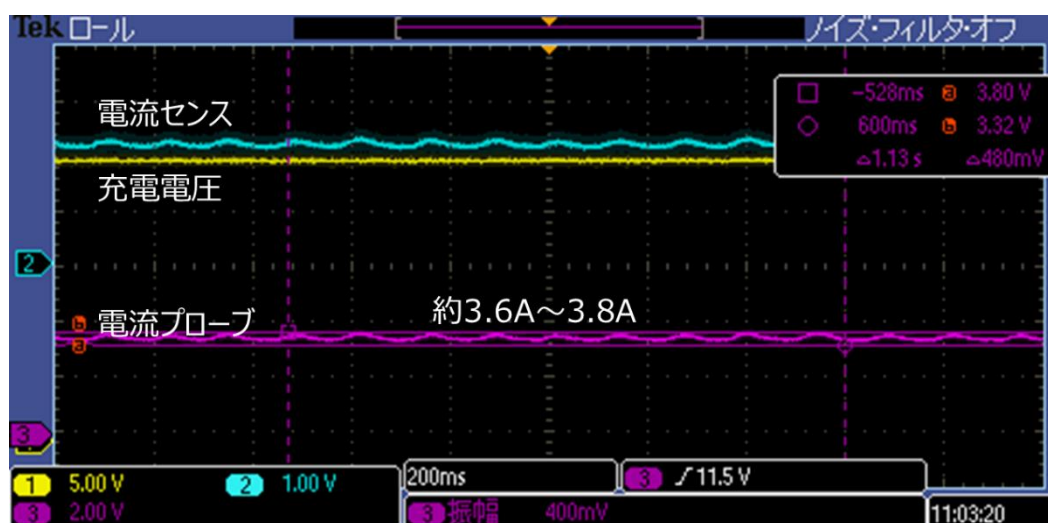


図 3.4-37 充電時の動作波形(振動改善)

CC-CV 充電の実測

本充電装置を用いて Tuna-Sand 組電池バッテリーを完全放電してからフル充電を試みたバッテリーの概略仕様を表 3.4-7 に記載した。なお単セル容量は 3400mAh であるが組電池の容量としては以下のように計算されている。

$$3.4\text{Ah} \times 0.94 (\text{組電池安全係数}) \times 0.93 (4.1\text{V 容量 DOWN}) = 2.98\text{Ah} \quad (3.4-11)$$

表 3.4-7 Tuna-Sand 組電池バッテリー仕様

項目	仕様	備考
単セル	Panasonic 社製 NCR18650B 定格容量 : 3400mAh 定格電圧 : 3.6V 充電電圧 : 4.1V	
組電池使用	電圧範囲 : 21.0V~28.7V (平均電圧 25.2V) 出力電流 : 10A (MAX) 定常 3~5A 電池容量 : 2.98Ah×3 並列×3 並列=26.82A 最大電圧 : 28.7V (4.1V×7 直列) 充電電流 : 3.7A (約 0.15C 相当)	電池容量は 数式(3.4-11)参照

CC-CV 充電結果を図 3.4-38 に示す。充電停止電圧は実験環境の電圧精度が十分に把握できていなかったため 28.5V で停止 CV 充電に移行させた。CC 充電時間は約 4h40m, CV 充電

時間は 1h40m、合計約 6h20m の時間を要した。CV 時の充電電流は平均して 0.15C の約半分とすると充電された容量は、

$$0.15C \times 4h40m + 0.075C \times 1h40m = 0.82C \quad (3.4-12)$$

となりやや満充電より低い値になっている。これは CC 充電停止電圧を安全の観点から少し低い電圧に設定したことや電圧測定の誤差、組電池の安全係数などが影響している可能性があるが、出力電圧が 28V 以上あるのでほぼ満充電に近い状態になっていると考えられる。

また CV 充電時に電圧が下がっているが、本システムでは DC/DC 電源の出力電圧を一定にする制御を実施しているのみで、電池電圧そのものを一定にするフィードバック制御を実施していないためである。基本的に充電時はバッテリーの内部インピーダンスの影響で充電を停止すると出力電圧が低下するので電圧を一定にしながら充電するためには、電圧が閾値に達したら徐々に出力電圧を低下させるような制御が必要である。

tuna-sand battery CC-CV 充電

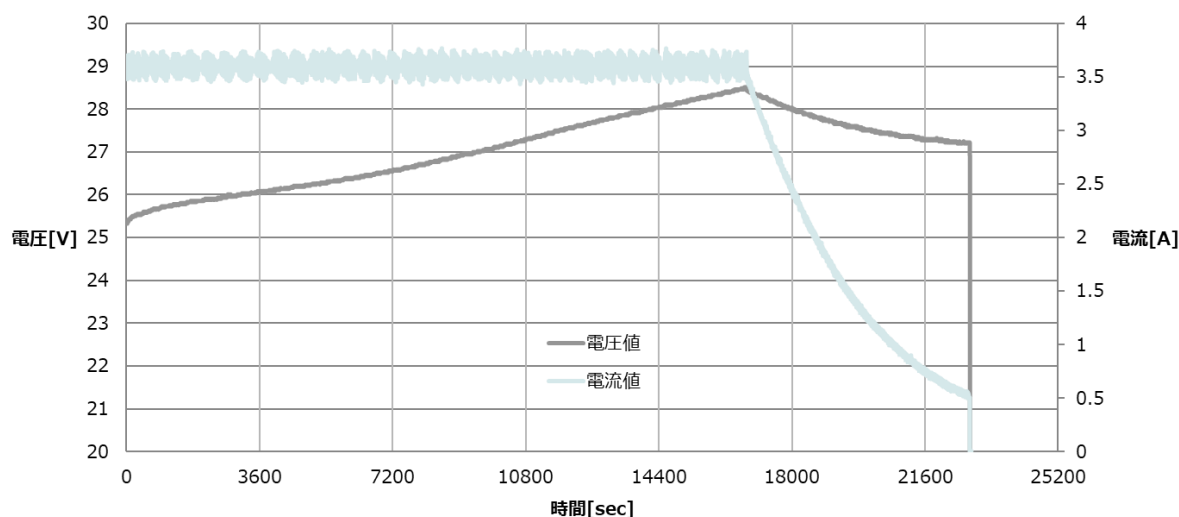


図 3.4-38 CC-CV 充電実測

D 1 次試作の課題と 2 次試作への対応

今後海中給電システムに本装置を組み込み、給電時・充電時に送電側から見たインピーダンスがどう見えてくるかという挙動を把握し、送受電の制御を最適化するために何が必要かなどの検証を行っていく。

充電装置に関しては図 3.4-35 に示すように各要素部品やボードがバラバラの状態ではジャンパー配線をしている試作レベルの状態なので、2 次試作以降は配線要素を極力少なくするため各ボードをスタッキングコネクタで接続するとともに、プリント基板化を進める。また CPU ボードも同等の機能で制御装置にあったサイズ・仕様に見直す。

今回リチウムイオン電池 7 直列のセル充電を実現できたが、最終的にはこれを 28 直列セルまで増やすためには、さらに多段接続された DC/DC 電源のより細かい制御が必要になるため制御アルゴリズムをさらに改善していく必要がある他、電圧・電流容量が大きくなるため実験系や装置の安全性の確保をさらに強化する対応をしながら検証を進めていく。

3.4.1.5. 送電装置（2 次試作・評価）

3.4.1.5.1. 送電装置

2 次試作以降、送電装置は環境影響試験時と同様には菊水電子の PCR6000WE2R を使用した。この機器は 1Hz~5KHz の周波数で最大 6KVA までの AC 出力が可能である。また機器重量は 42kg あるがキャスターが搭載されており取り扱いやすい。

当初は送電装置として東洋エレクトロの SiC インバータ装置も評価したが方形波出力機能しか持たないため力率を確保するためインバータの出力段で LPF を設置する必要があった。しかし使用周波数に応じて LPF の L 値を適切な値にするため大型のリアクトルを設置する必要があり運用に手間がかかる。またこの時パワー効率は論理的に 0.81 と計算されたが PCR6000WE2R では PWM を使用した方式で出力効率が Typ85%という仕様であり SiC インバータに LPF を設置して使用するより効率が良い。

以上の理由から 2 次試作以降は送電装置としては菊水電子の PCR6000WE2R のみ使用し評価を行った。

3.4.1.5.2. 整流器

昨年度製作した整流器では 3 KW の整流が可能であることは確認できたが、AUV 内では密閉空間に置かれるため整流器の放熱効果をさらに高める取り組みを行った。放熱に関しては昨年度までは放熱板を使用した自然冷却方式であったがこれを放熱板と FAN が一体になったヒートシンクに変更した。

A 温度上昇抑制効果確認

実寸モデルを使用し受電 1kW, 2kW の条件で室内の解放空間で整流器の温度上昇測定を実施した。測定写真を図 3.4-39 に、受信電力と温度上昇との関係を図 3.4-40 に示す。

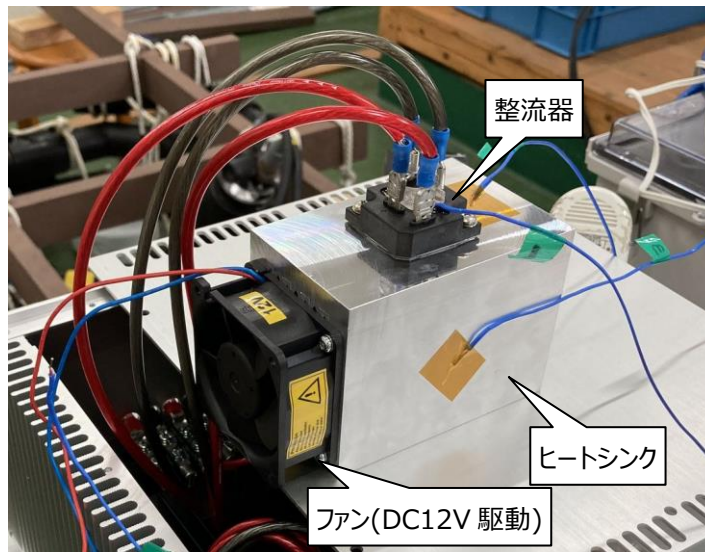


図 3.4-39 FAN 付きヒートシンク温度測定写真

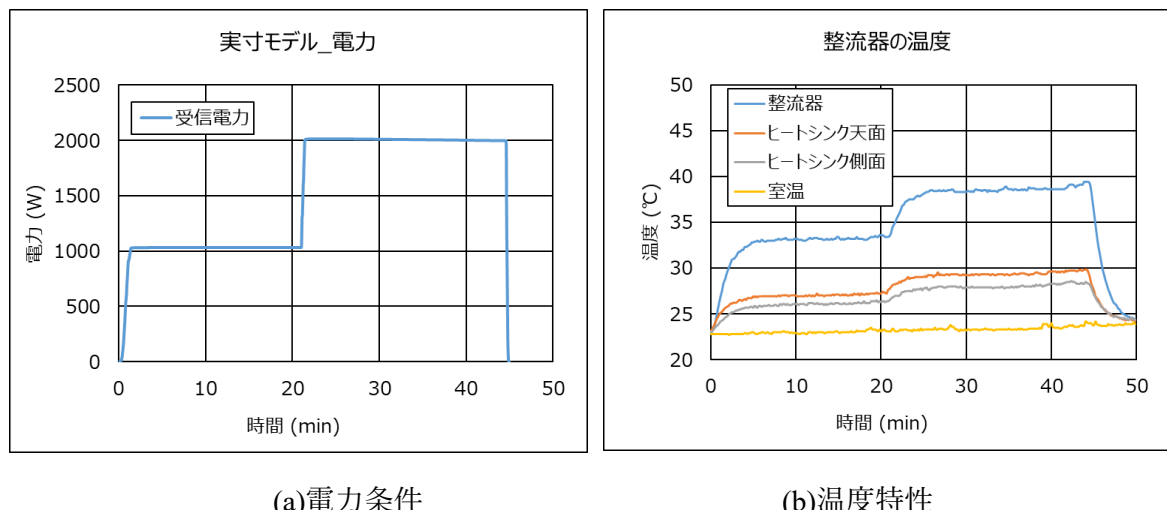


図 3.4-40 温度測定結果(a)電力条件(b)温度特性

図 3.4-40 の結果より受電 1kW、2kW の開放空間の条件でダイオードブリッジ S50VB80 の表面温度の上昇は室温約 23°C に対しそれぞれ約 $\Delta 10^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta 15^{\circ}\text{C}$ という結果が得られた。S50VB80 のデータシート Derating Curve からは 30A 条件でケース温度 120°C 以下を示しているのでデータマーシンのないといえる。開放空間の測定ではあるが、この FAN 付きヒートシンクは温度上昇抑制効果が非常に大きいことが確認できた。密閉空間である実際の AUV に適用した場合の予測に関しては後述する。

B ヒートシンク用電源の追加

FAN 付きヒートシンク用の電源として直流 12V が必要であるため PBA10F を使用して電

源の一体化と小型化を図った。装置写真を図 3.4-41 に、接続回路図を図 3.4-42 に示す。装置は 280×231×132.5 mm (外寸)の金属筐体に収めている。受電電圧が 90V 以上になると DC/DC 電源 ON されて FAN が回転する。なお FAN の消費電力は約 2.6W、同様に PBA10F の消費電力は AC100V 条件で約 4W であった。

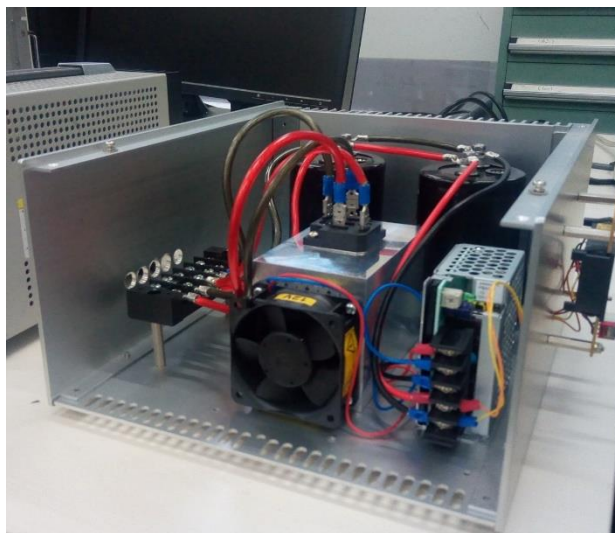


図 3.4-41 FAN 付き整流器装置写真

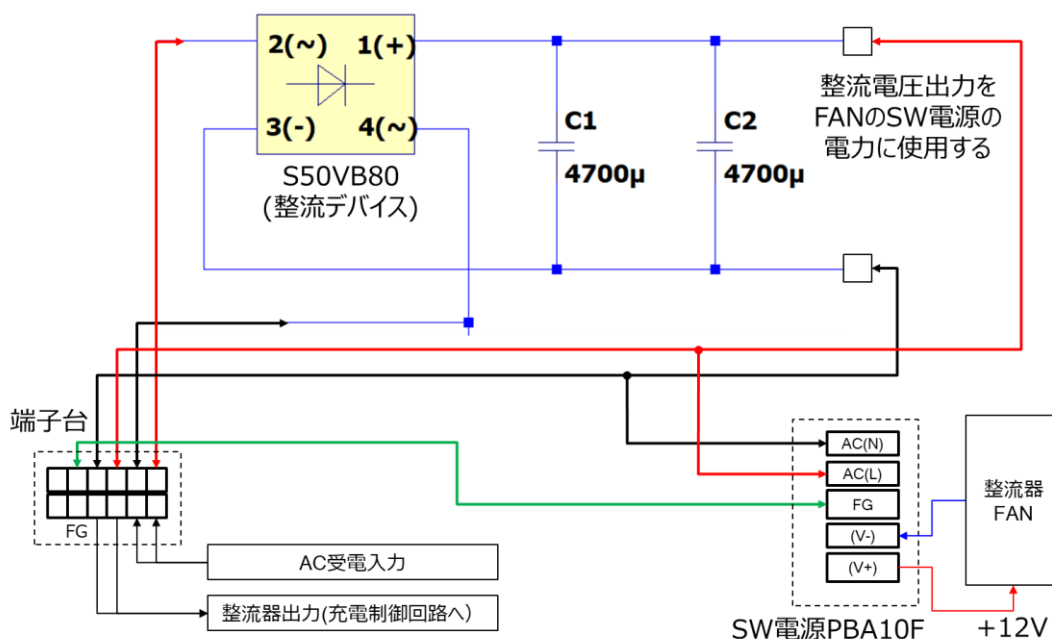


図 3.4-42 整流器接続回路図

3.4.1.5.3. 充電装置

昨年度は 1 台の絶縁型の DC/DC 電源をマイコン制御し Tuna-Sand バッテリー 7 セル (最大 28.7V) で約 3.7A の充電ができる充電制御装置を試作した。

本年度はさらに大電力化を図るため装置の試作改良を重ね、最終的に絶縁型の DC/DC 電

源を5台組み合わせマイコン制御することによりリチウムイオン電池28セル(約114.8V)の充電を可能とした。以下にその詳細を述べる。

A 仕様

充電装置の仕様を表 3.4-8 に示す。

表 3.4-8 充電装置仕様

項目	仕様	備考
DC/DC 電源	PCA600F-24P3 (Cosel 社製)	単体仕様： 出力：最大 28V 入力：DC：88-370V, AC：85-264V,
多段接続数	5 台	Master 電源 1 台、Slave 電源 4 台の 5 台直列接続
最大電力	600×5=3000W	電流最大：27A
充電可能セル数	28 セル	セル電圧最大 4.1V (28 セル=114.8V)
充電電流	最大 27A	設定可変(任意)
最大電圧	120V	定電流制御に依存し自動可変
充電方式	CC-CV 方式	電池安全性を考慮し CC 充電のみで対応 (CV は機能実装のみ)
CC 停止電圧	未定	設定可変(任意)
CV 停止電流	未定	設定可変(任意)
制御 I/F	USART :115200bps Ether : 100Mbps	Ether (100Mbps)I/F 基板： ETH-UA7(TCP/UDP 対応)
制御 CPU	STM32L053R8	Arm Cortex M0+ 16MHz
マイコンボード	Nucelo STM32L053R8	ST マイクロ社製 32 ビットマイコン

装置を 330×231×132.5mm(外寸)の金属性の筐体に収めた写真を図 3.4-43 に示す。この筐体は実験用に製作したものであり AVU にはこの装置を直接搭載するのではなく同等の部品構成で AUV 上に再構築して実装する。この装置の各パーツは AUV 上の実装制約にも耐えられるように十分小型化されるように考慮している。



図 3.4-43 充電装置写真

B 構成

装置の構成図を図 3.4-44 に示す。充電電流を精密抵抗でセンスして AD 変換したデータを逐次 Target 値と比較処理をしながら電流値を Target 値に近づけるように制御する。AD 変換は 10ms 周期で実施している。この 10ms を以下便宜的に 1 フレームとする。

5 台の DC/DC 電源は Master が 1 台、Slave が 4 台の構成で SMT32 マイコンは Master 電源を制御し Master 電源は他の 4 台の Slave 電源を制御する仕組みである。

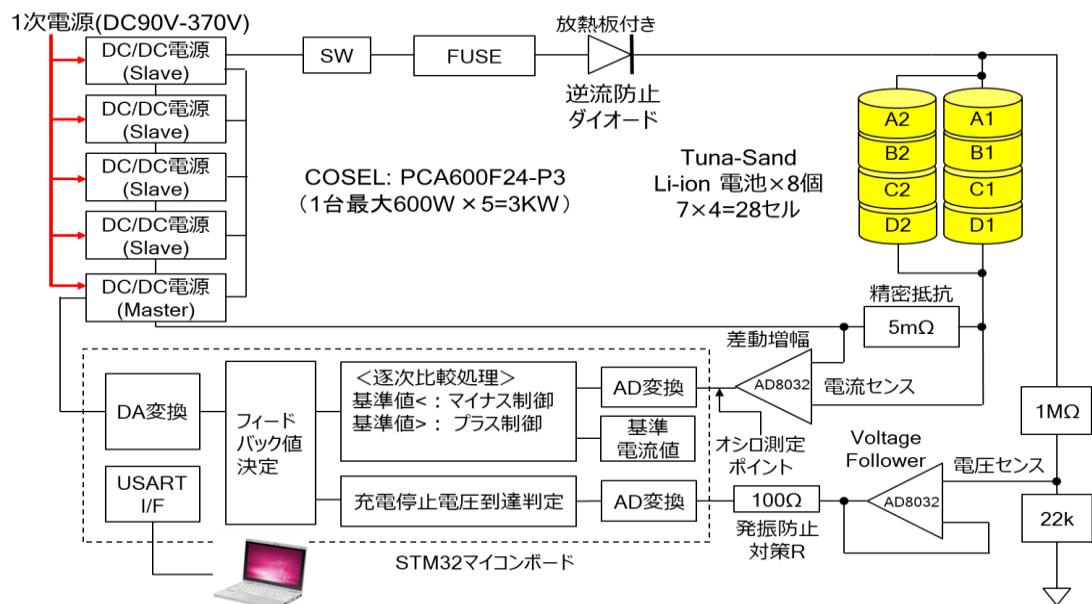


図 3.4-44 充電制御装置構成図

C 充電アルゴリズム

充電アルゴリズムの閾値判定の概要を図 3.4-45 に示す。本装置の場合定電流制御では 10ms 毎に電流の AD 変換値と電流 Target 値の差分を比較しその閾値範囲により、次フレームで設定する DC/DC 電源の出力電圧に相当する DA 変換値を制御する。

$$\text{出力電圧} = 5 \times (\text{VTRM 端子電圧}) \times \frac{24}{2.5} \quad [V] \quad (3.4-13)$$

本装置の場合上記関係があり VTRM 端子電圧に DA 変換値を適用することにより DC/DC 電源の電圧を調整する。

図 3.4-45 の例で説明すると Target 値に対して $\pm A$ の差分範囲では次フレームの DA 変換値を現在設定値のままとし、同様に Target 値に対して $\pm(B-A)$ の差分範囲では次フレームの DA 変換値を現在値から ± 1 増減し、また Target 値に対して $\pm B$ 以上の範囲では次フレームの DA 変換値を現在設定値から ± 5 増減する。本装置の場合 DA 変換の分解能は 4096 で DA 変換値 1 ビットあたり 37.5mV の電圧調整が可能である。

実際に充電電流を安定して動作させるために電池や送受電系などの条件および周囲環境により適切に閾値範囲や DA 変換時の変更幅(DA 変換値)や遅延値 (何フレーム後に設定を有効にするか) などのパラメータを調整する必要がある。安定動作に関しては今後とも継続して検討していく。

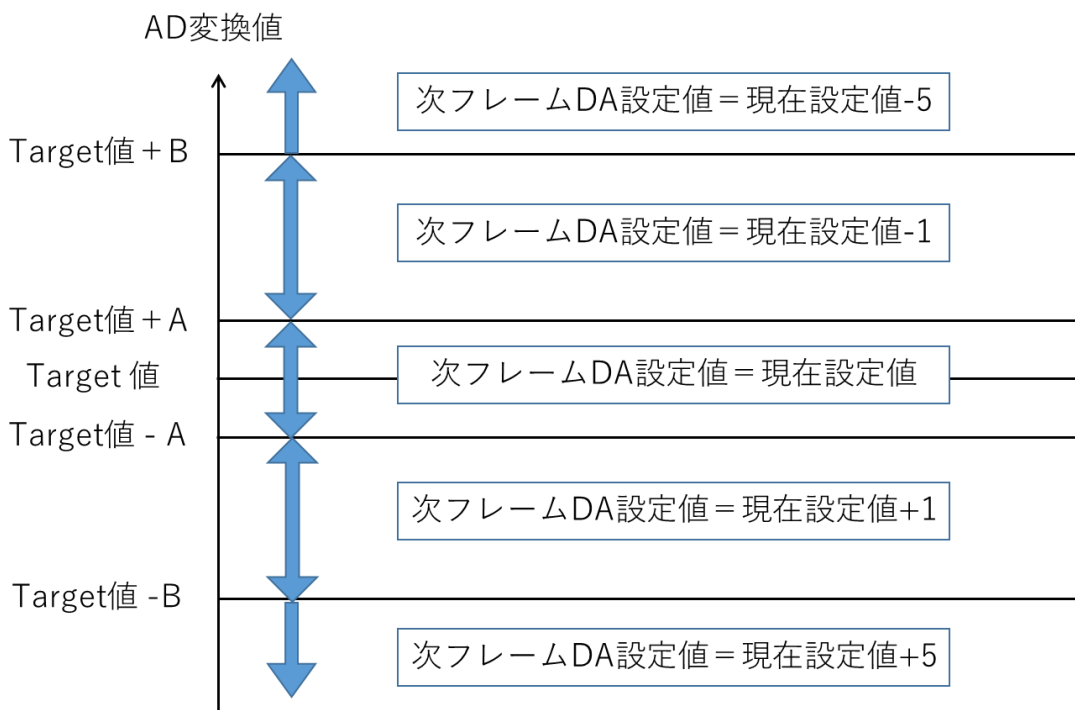


図 3.4-45 充電アルゴリズム閾値判定概要

D ADC および DAC 特性

充電制御装置の ADC 特性の実測値を図 3.4-46 に示す。av0 は充電電流に、av8 電池電圧に相当する。実測結果は線形性が良く保たれており電流センス抵抗の特性として正しく動作していることが確認できる。電流センス抵抗は $5\text{m}\Omega$ である。また AD 変換の特性としても線形性が保たれ良好であると判断できる。

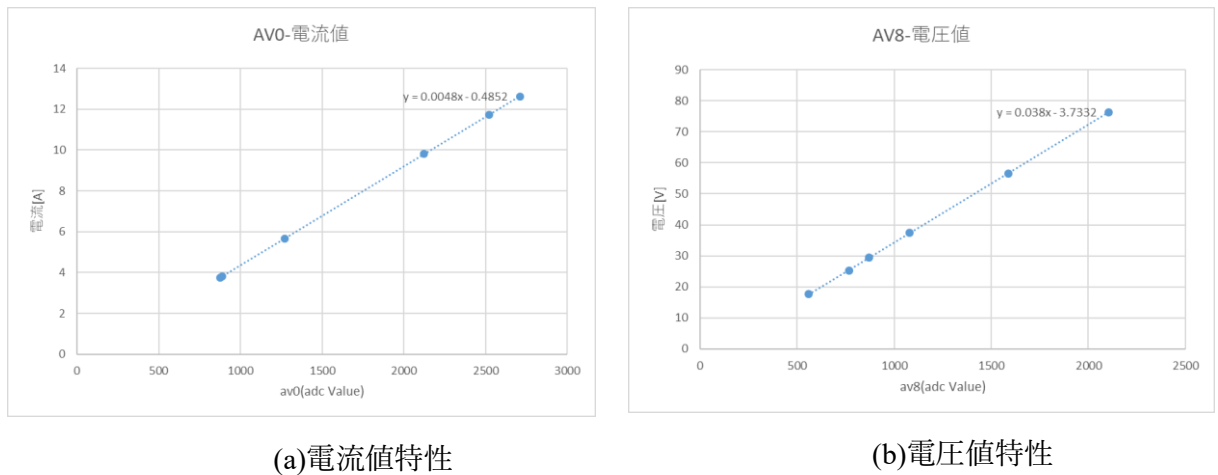


図 3.4-46 ADC 特性(a)電流値特性(b)電圧値特性

DAC の実測特性を図 3.4-47 に示す。これも線形性がよく保たれており良好な DA 変換特性と判断できる。

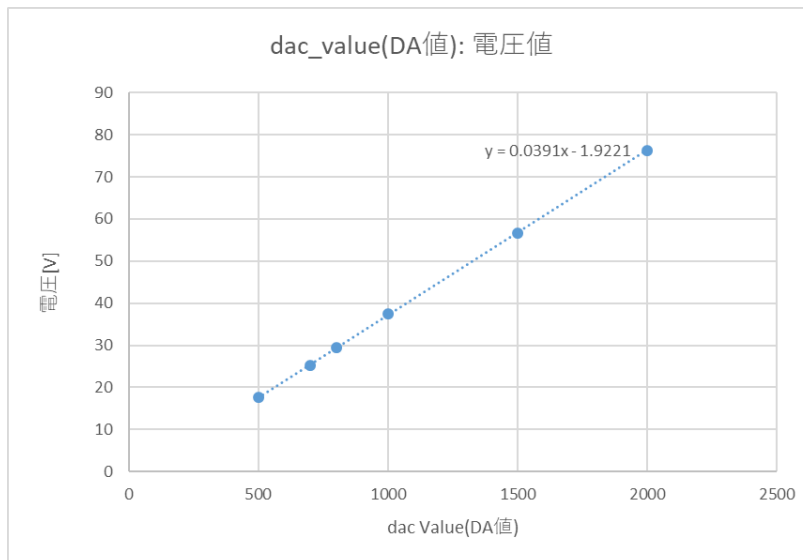


図 3.4-47 DA 変換特性

E シリアル制御の改善

充電制御装置は USART のシリアルポートを介して制御コマンドやセンサ出力データを受け付けているが、その際マイコン側で割り込みの優先順位や他の処理との関係でコンフリクトが発生しデータエラーやデータ抜けなどが発生することがある。

昨年度までは USART は非同期通信であるためデータ受信時は 1 バイト毎の割り込みを発生させ受信する仕組みとしていたが他の処理との関係で割り込み処理のオーバーヘッドによるデータエラーやデータ抜けの発生があった。特に連続文字送信をする場合にその傾向は顕著であり水温データなど他の割り込みがある場合、コマンド受信エラーの発生が頻発した。

これを改善するため USART の受信処理を DMA 制御に変更することにより CPU のフェッチサイクルに依存せずハードウェア転送でデータ受信が行えるように改善した。その結果、データエラーやデータ抜けなどが対策前に比べて大幅に改善した。

図 3.4-48 に従来の全体制御のフローチャートの概略、図 3.4-49 に改善後のフローチャートを示す。従来の方式では USART 系は 1byte 毎に割り込みを発生し受信処理を行っていたが、改善後の方式では受信処理は DMA の Circular モードを使用してデータ受信都度ハードウェア的にデータ転送を実施し、転送バイト数はレジスタのデータ転送数のカウンタからリングバッファの処理を構築し、これを常時実行することにより負荷の低減を実現した。

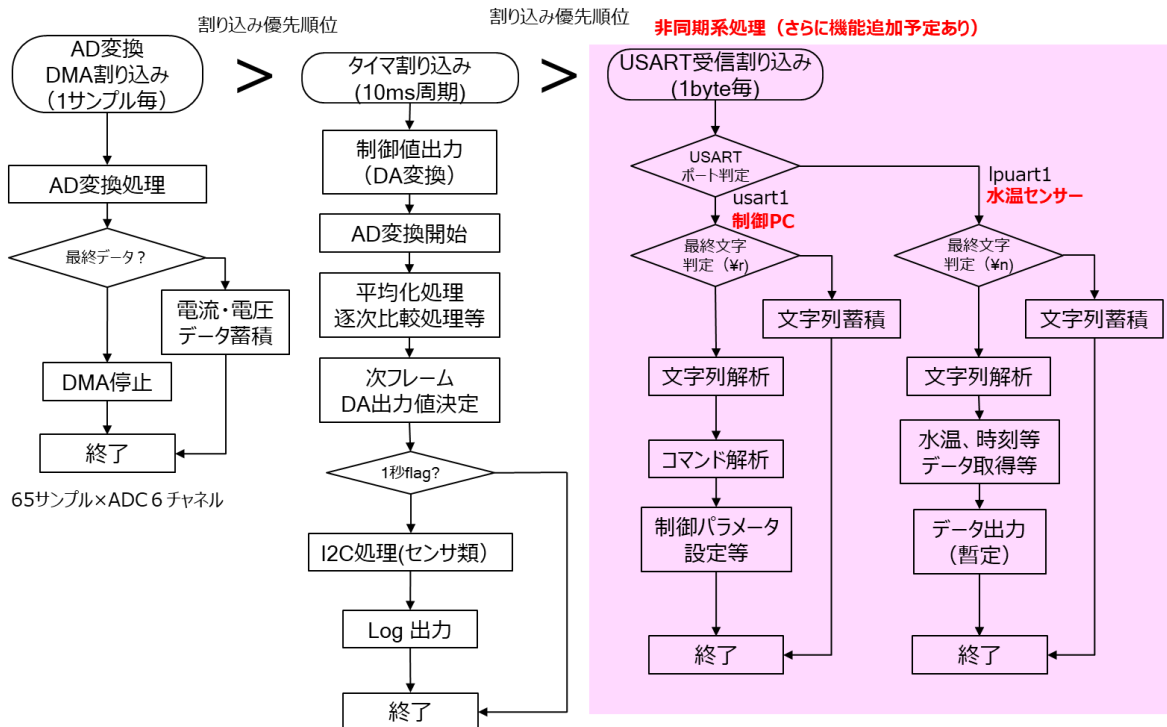


図 3.4-48 全体制御概要 (改善前)

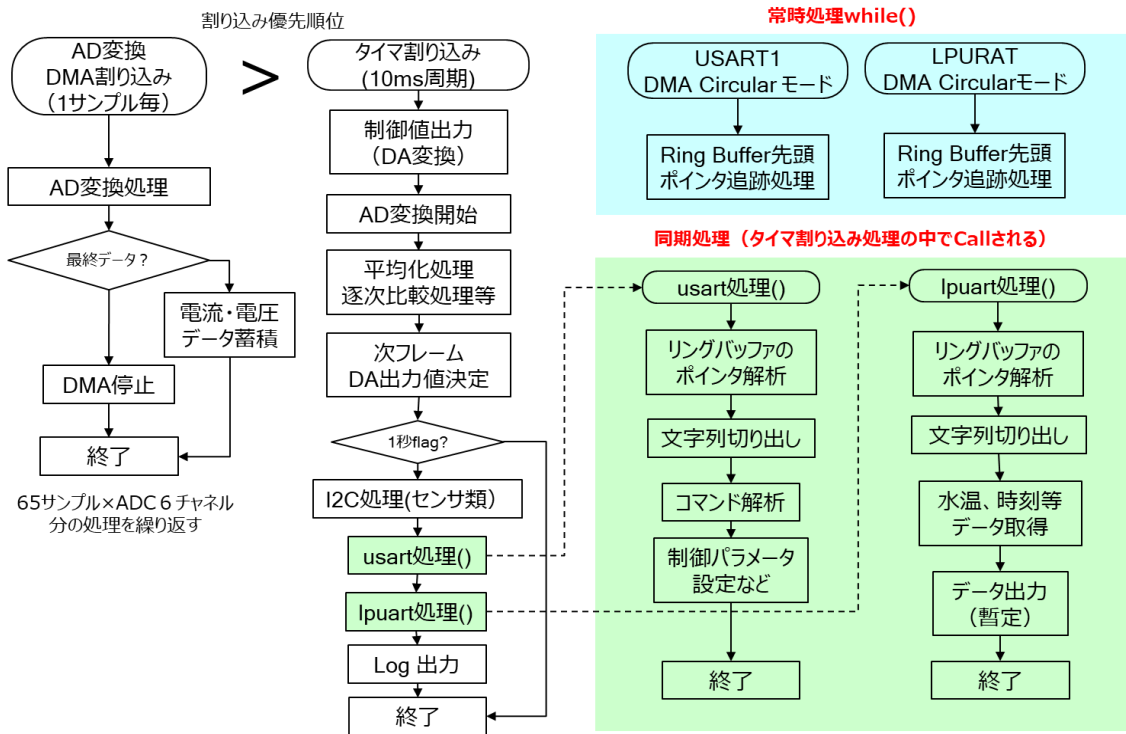


図 3.4-49 全体制御概要 (改善後)

3.4.1.5.4. 充電実験

充電装置を使用しての充電実験は様々な形態で実施してきたがここではφ2mの送電コイルおよび実寸モデルのφ1mの疑似筐体受電コイルを用いた充電試験について記載する。またこれらの試験ではバッテリーの代わりにバッテリーシミュレータを使用している。充電電力に関してはAUVに搭載する実電池の制約で最大約1~1.5kW前後となる見込みなのでその前後の充電電力で評価を行った。

A 空气中実寸モデル実験(1kHz 整合)

ここで図 3.4-50 に示す構成で充電装置実験を行った。使用周波数は1kHzとして整合回路を構成している。

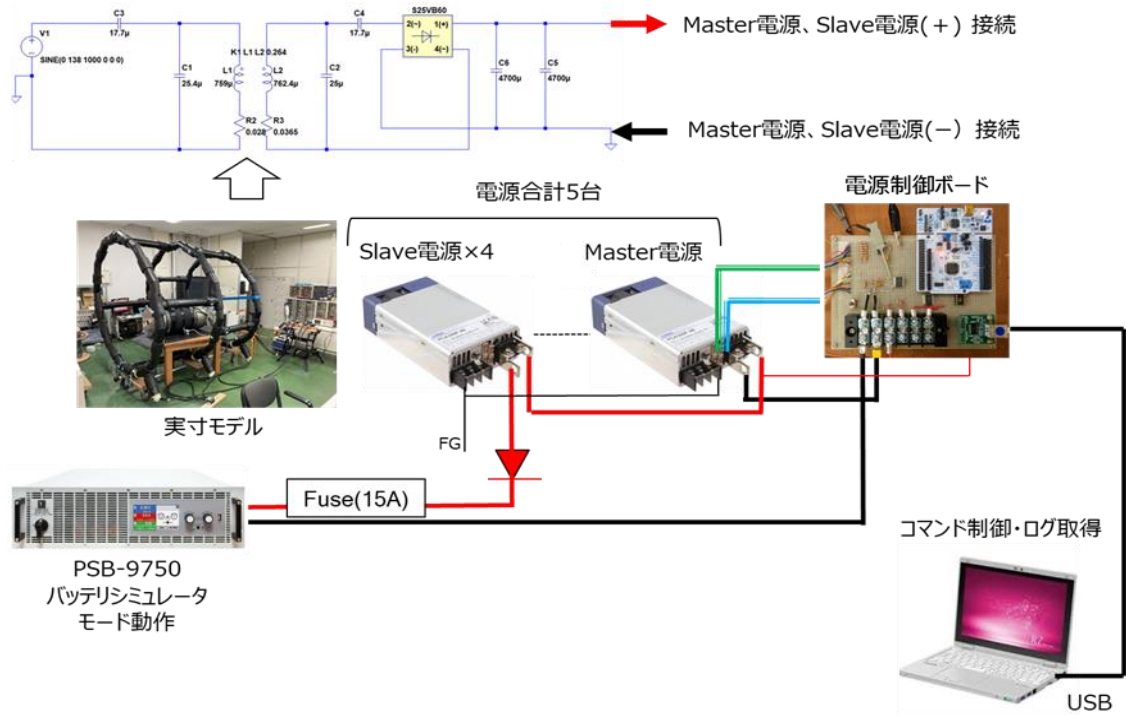


図 3.4-50 空气中実寸モデル充電実験構成(1kHz 整合)

この構成で実験した結果を以下に示す。まず送信電圧と整流電圧の関係については LT-Spice を使用して計算した負荷 OPEN 時と負荷 10Ω 時のシミュレーション結果を追記してから図 3.4-51 の関係が得られた

この結果から基本的に整流電圧は電流が 0 の時はほぼシミュレーションの負荷 OPEN に相当し、電流を増加させていくに従い整合条件の 10Ω に近い電圧になるという特性が確認できる。この特性は我々の想定にほぼ一致している。一般的に充電装置などの複雑な機器があるとシミュレーションや論理計算が困難である。しかしターゲット電流と整合条件の関係付けが得られれば今後はそれを元に設計にフィードバックが可能であると考えられるが、次節 B-2 のように実験当時説明が難しい現象があった。なお本実験では送信 120V で 8A 設定時は整流電圧が低下しすぎて DC/DC 電源が停止したので測定不可であった。

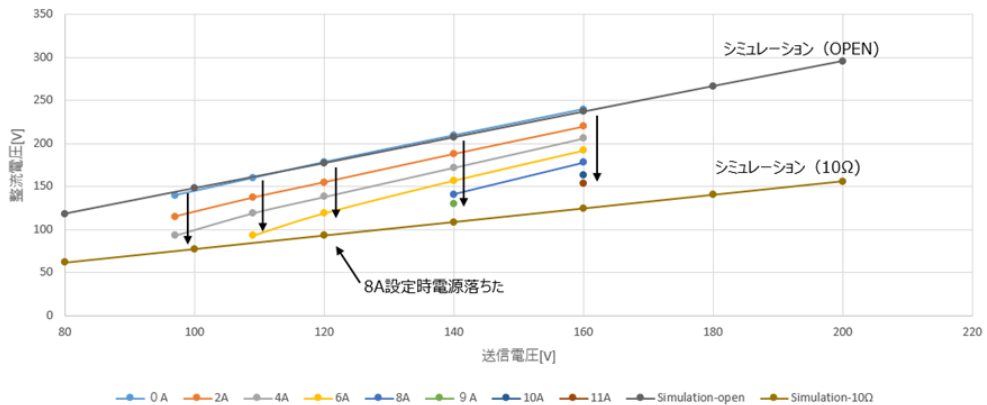


図 3.4-51 充電電流毎の送信電圧と整流電圧の関係

図 3.4-52 から図 3.4-54 は充電電流と電力および効率の関係を送電電圧ごとに示したも

のである。図中の効率はいずれも以下の定義である。効率 A は DC/DC 電源効率、効率 B は充電効率に相当する。すなわち

- 効率 A：充電電力/受電電力
- 効率 B：充電電力/送信電力

送信電圧が 120V の場合は電力を上げると整流電圧が低下し DC/DC 電源を駆動できないため充電電力が最大 900W 前後までしか確認できなかったが DC/DC 電源の性能に依存して効率 B は約 0.6 前後で頭打ちである。送信電圧 140V、160V の時は送信電力を上げても整流電圧の低下が抑制できるため充電電力をそれぞれ 1100W、1250W 前後まで確保することができ、効率 B が改善したがともに 0.7 前後で頭打ちとなった。DC/DC 電源の効率は現状 0.9 前後で頭打ちとなる見込みで伝送効率 0.8 としても END-END の充電効率は最大 0.72 前後となる。

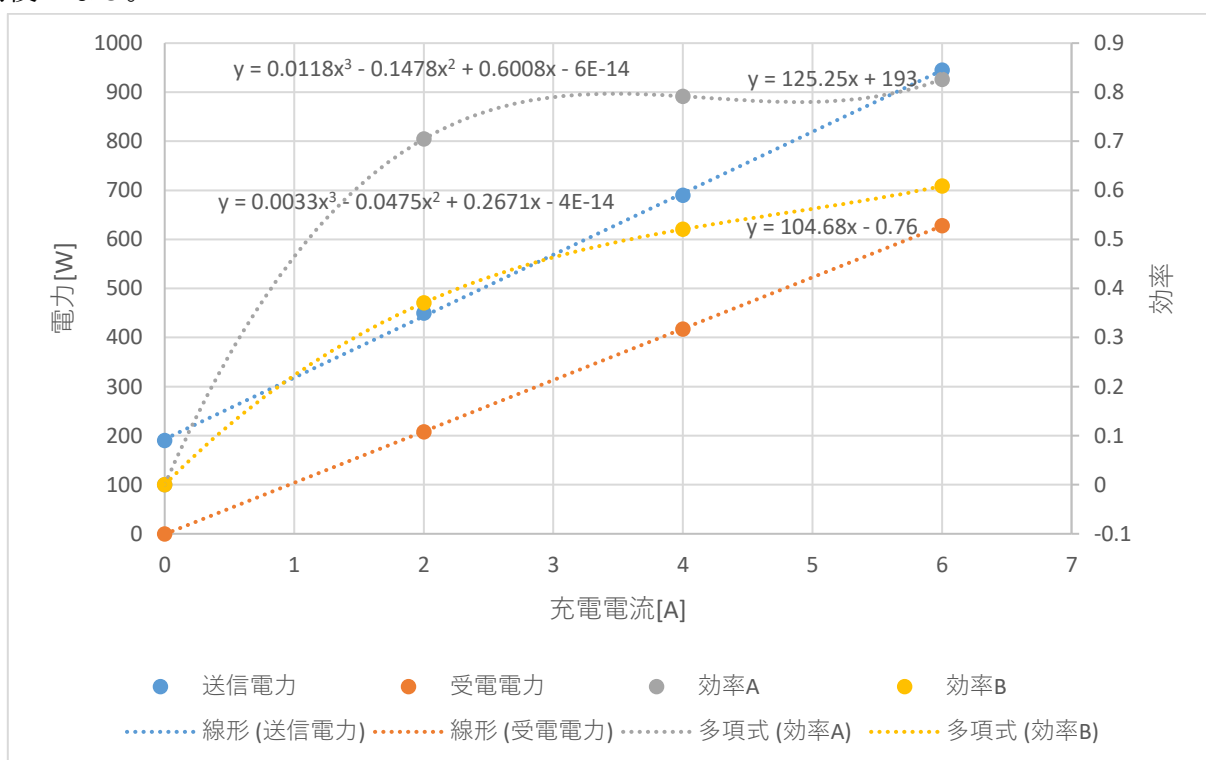


図 3.4-52 送信電圧 120V 時の充電特性

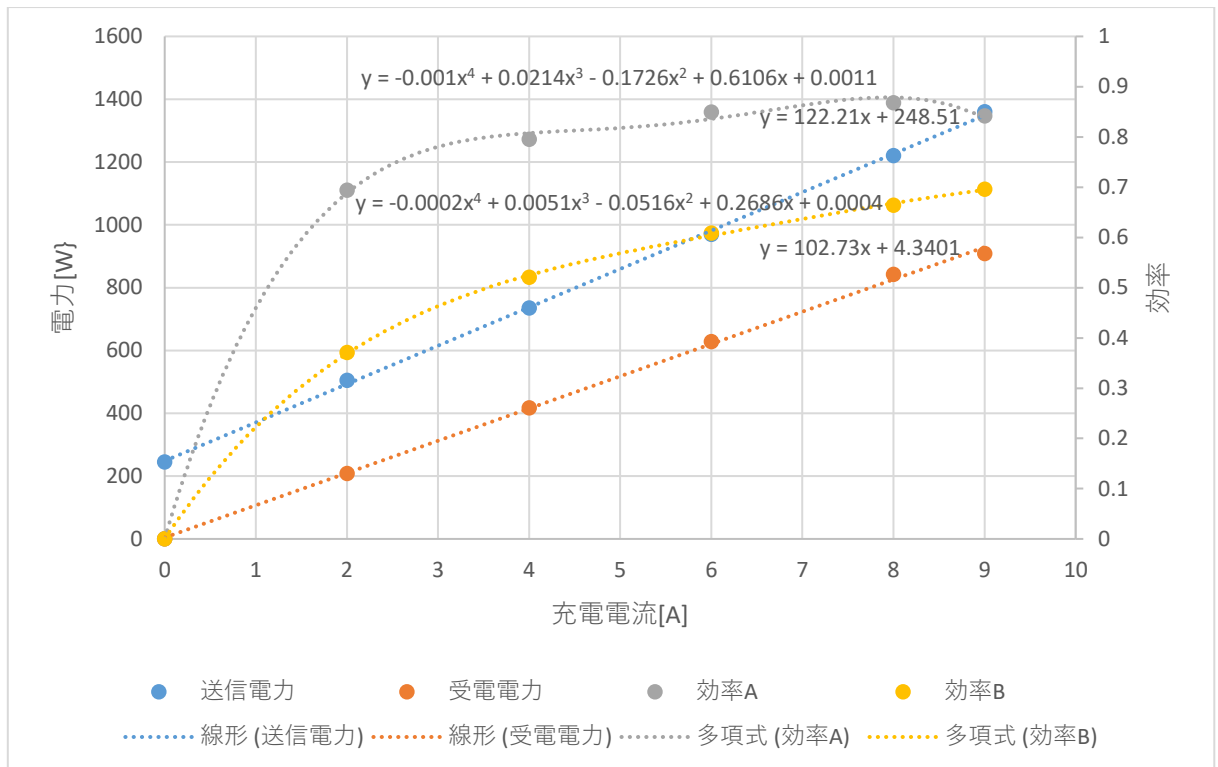


図 3.4-53 送信電圧 140V 時の充電特性

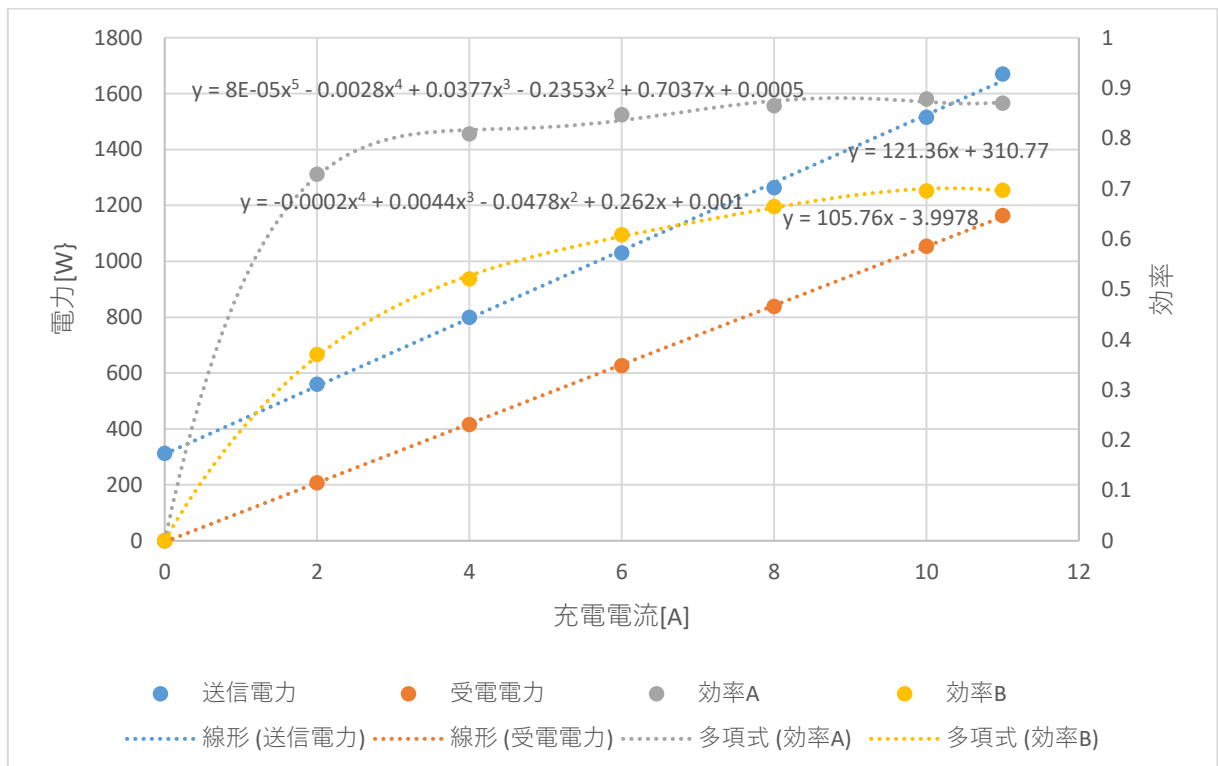


図 3.4-54 送電電圧 160V 時の充電特性

次に充電特性を図 3.4-55 に示す。充電電流は 11A に定電流設定している。充電時間経過とともに電池電圧が 105.8V 前後から 107.5V に直線的に上昇している。充電電流は 11A に

対し時間変動があるがこれはバッテリーシミュレータを使用しているため、内部インピーダンスが実際の電池より低く設定されているため電圧変動に対して電流変動が大きく表れるためと考えられる。実電池を使用した場合は内部インピーダンスが上昇するため電流変動特性が安定することは別途確認済である。

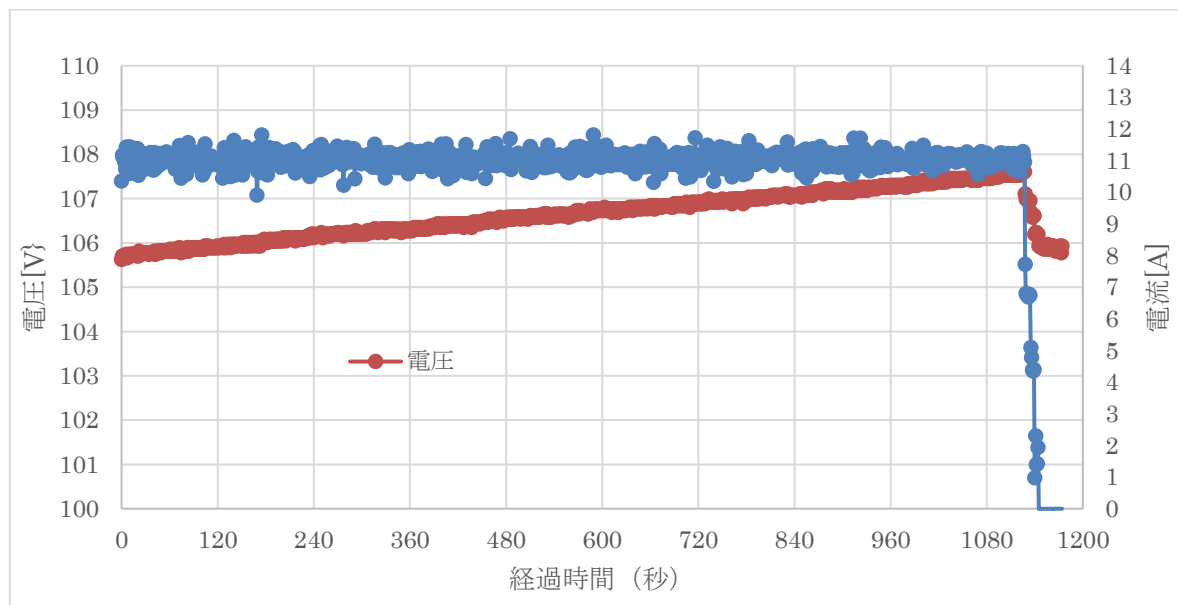


図 3.4-55 充電特性

B 海水実寸モデル実験(1.5kHz 整合)

B-1 実験系

門司港にある日本サルヴェージの海水(塩水)プールを使用しての充電実験を行った。実験系は図 3.4-56 に示す通りでφ2m コイルおよび実寸モデル疑似筐体を使用した試験である。なお周波数は 1.5kHz としている。これは受電 3kW 前後まで電力伝送試験を実施した場合に受電コイル側に流れる電流を抑制し磁気飽和の発生を抑えるためである。したがって整合回路など系の特性は空气中実寸モデルとは異なっている。本実験では受電 3kW までは実施していないが一連の実験計画の中で実施したため整合条件は上記環境を踏襲している。

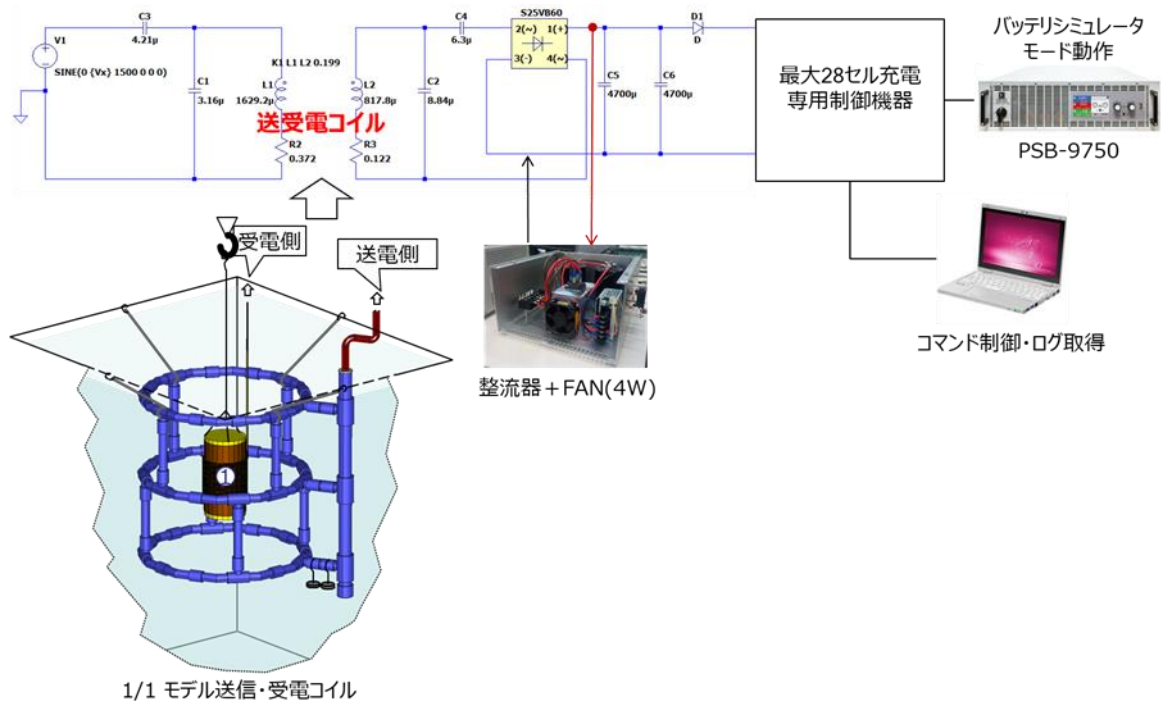


図 3.4-56 海中実寸モデル充電実験系

B-2 実験結果。

充電電流毎の送信電圧と整流電圧の関係を LT-Spice を使用して計算した負荷 OPEN 時と負荷 10Ω 時のシミュレーション結果を追記して図 3.4-57 に示す。また海中実験に先立ち同じ条件で、空气中で実験した同様の結果を図 3.4-58 に示す。

空气中の実験と比較して特性が異なるのは充電電流 $0A$ 時の特性であり、C-1 の実験条件では $0A$ 時の整流電圧はほぼ OPEN 時の特性に一致したが海中実験では負荷 60Ω 時の特性に一致している。

ただし実際に負荷 60Ω が接続されていたらシミュレーションでは受電電力が $1KW$ 近く発生する結果が得られるが実際には受電電流が流れておらず DC/DC 電源などの約 $50W$ 程度のアイドル電力のみが発生している状態に過ぎず、また同様に海中実験に先立ち空气中で同じ条件で実験した図 3.4-58 と比較しても C-1 の実験結果ほどではないがアイドル時の整流電圧は負荷 OPEN 時の特性に近いものがあり、これらの整合性が実験当時うまく説明ができなかった。

この系は単純に負荷抵抗の整合で評価するのではなく充電器の DC/DC 電源 1 次側に流れ込む電流と電圧の関係から等価抵抗値を算出して評価する必要がある、詳細は 3.4.1.8 の「AUV 送受電等価回路シミュレーションおよび考察」で説明する。

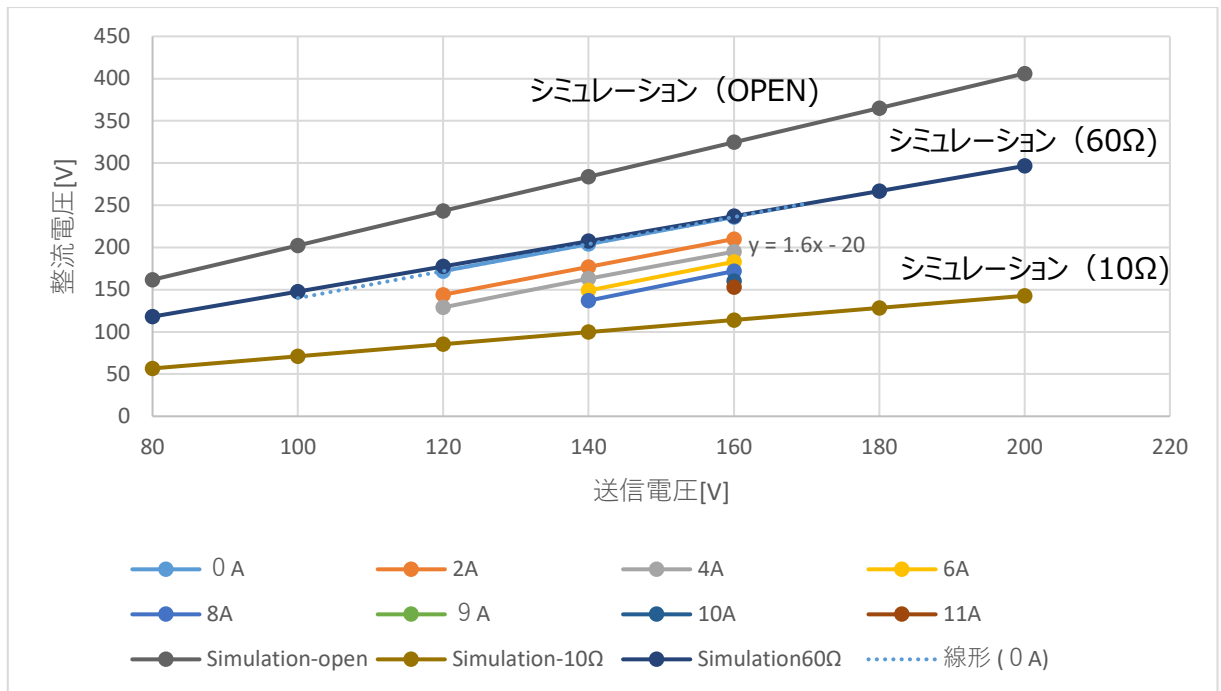


図 3.4-57 充電電流毎の送信電圧と整流電圧の関係(海水)

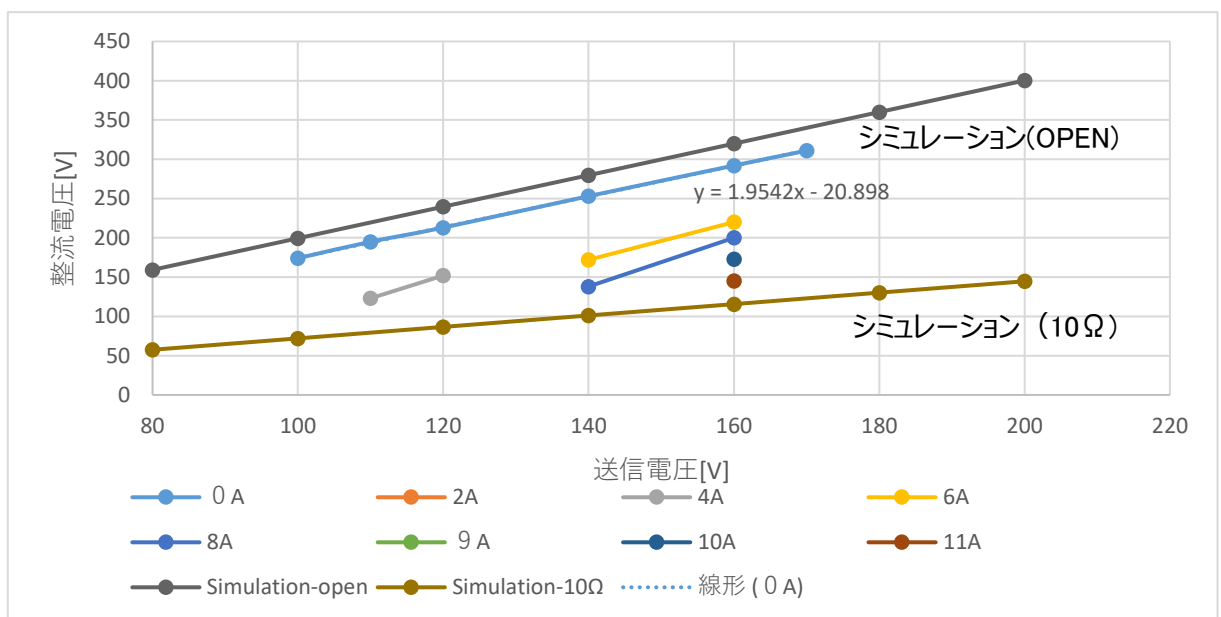
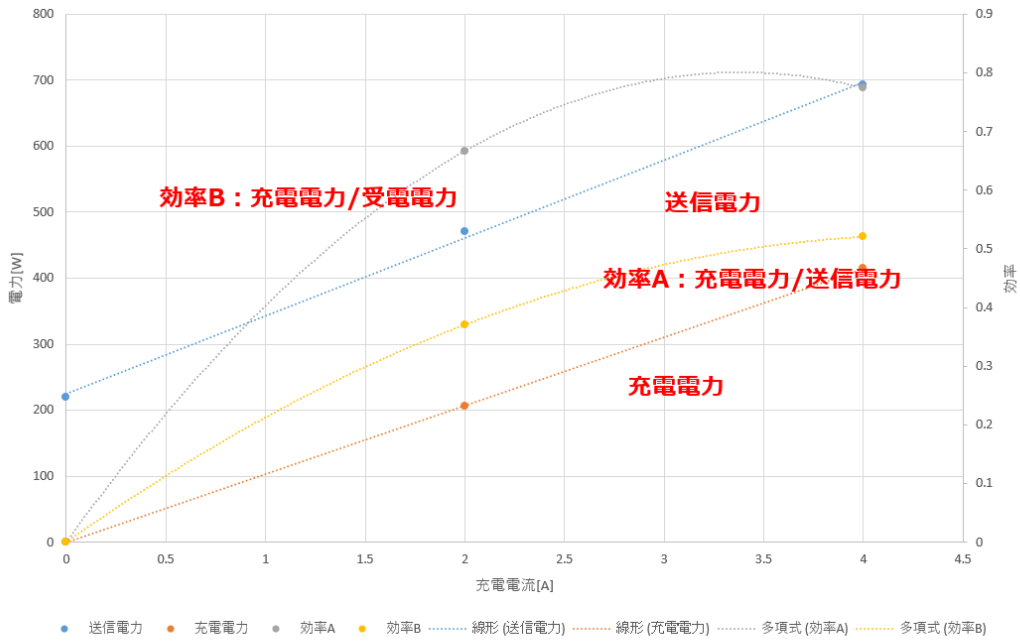


図 3.4-58 充電電流毎の送信電圧と整流電圧の関係(事前確認)

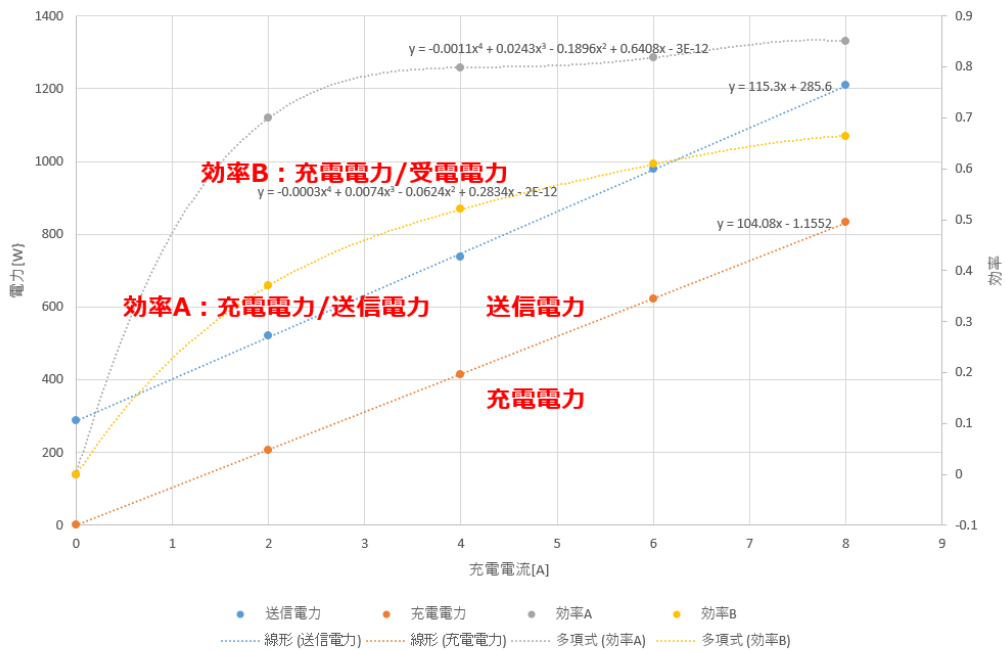
充電時の電力特性については図 3.4-59 から図 3.4-61 に示す。送信電圧ごとに充電電流、電力、効率の関係を図示した。送信電圧 160V の時に充電電流を最大 11A とした。

実験結果の特性についてはほぼ C-1 の結果と同様であり充電効率も最大 0.7 前後となっている。海中でも本受電装置により十分に充電が実現できることが今回の実験で明らかにできた。今後は実機 AUV に受電装置を実装し検証を進めていく予定である。



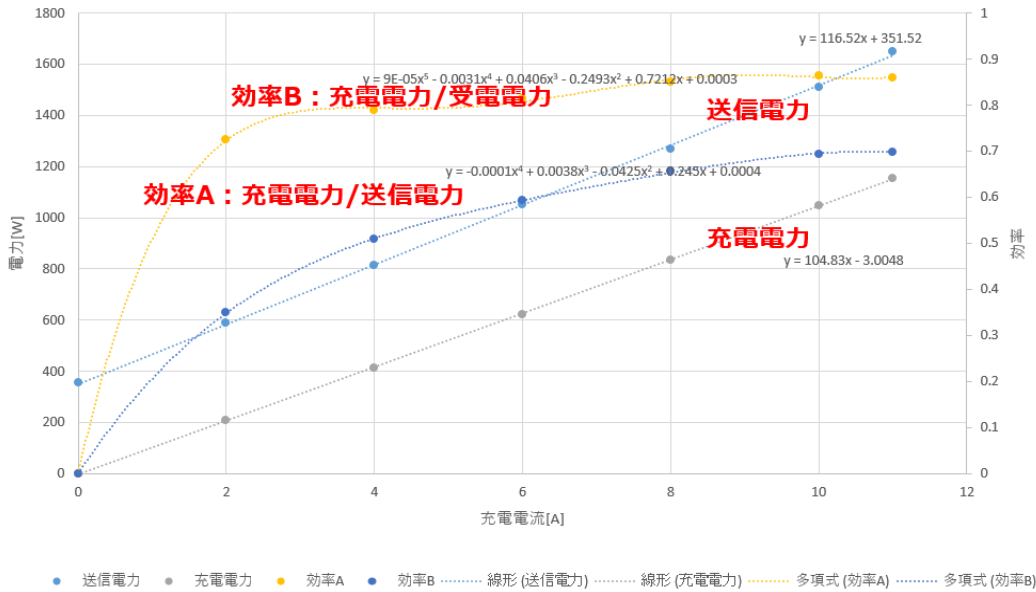
最大：受電0.41kW、充電効率(充電電力/送信電力)52%

図 3.4-59 送信電圧 120V 時特性(海水)



最大：受電0.83kW、充電効率(充電電力/送信電力)66%

図 3.4-60 送信電圧 140V 時特性(海水)



最大：受電1.15kW、充電効率(充電電力/送信電力)70%

図 3.4-61 送信電圧 160V 時特性(海水)

3.4.1.5.5. 充電時の発熱影響予測

充電時の発熱解析として熱解析シミュレーションを実施した。ここで採用したモデルは最終的な AUV の装置構成と多少異なる部分があるため、あくまで参考データとしての扱いであるが以下に概略を述べる。

A 損失および発熱条件

全体の損失条件は 1kW までは実験的に求めそれ以上は線形性が保たれていることを前提にした推定値で送受電のコイル間損失と発熱ロスとの関係を求めた。図 3.4-62 にその関係を示す。また各 부품の損失条件に関しては表 3.4-9 に示す。AUV 各部位の説明は図 3.4-63 に示す。これも基本的に受電 1kW まで各部位の条件を実験的に求め受電 2kW および 3kW に関しては損失が線形的に変化することを前提とした推定値を使用している。ただし DC/DC 電源内部に関しては部品データやサーモグラフィの実測データを使用して推測を行った。

これらのデータおよび機構 CAD データからモデルを移行し熱損失解析を実施した。なお海水温度およびスタート時の温度は 25°C と仮定している。

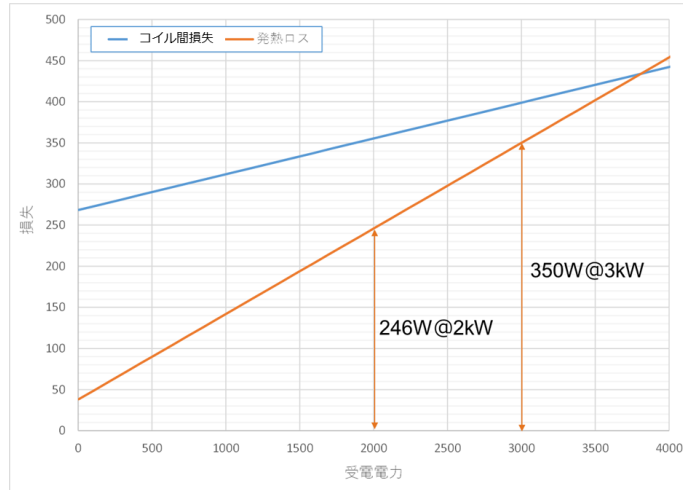


図 3.4-62 送受電コイル間損失および発熱ロスの関係

表 3.4-9 各部品の損失

部品	受電電力：1kW	受電電力：2kW	受電電力：3kW
part1(ノイズフィルタ等)	0	0	0
part2 (FET)	2.6	4.83	6.87
part3 (コンデンサ等)	0.99	1.84	2.62
part4 (ダイオード)	4.3	7.98	11.36
part5 (ダイオード)	3.91	7.26	10.33
part6 (トランス)	3.14	5.83	8.29
part7 (コンデンサ等)	0	0	0
part8 (コイル)	4.22	7.83	11.15
part9 (コンデンサ)	0.84	1.56	2.22
part10 (インバータ)	0	0	0
part11 (コンデンサ)	0	0	0
DCDC 1台あたりの発熱量 合計	20	37.1	52.8
DCDC 5台分発熱量 合計	100	186	264
整流回路+逆流阻止ダイオード	25	46.42	66.04
平滑回路①	2.5	4.64	6.6
平滑回路②	2.5	4.64	6.6
通信制御部	2	3.71	5.28
充電制御部	0.5	0.928	1.321
全部品発熱量 合計	132.5	246	350

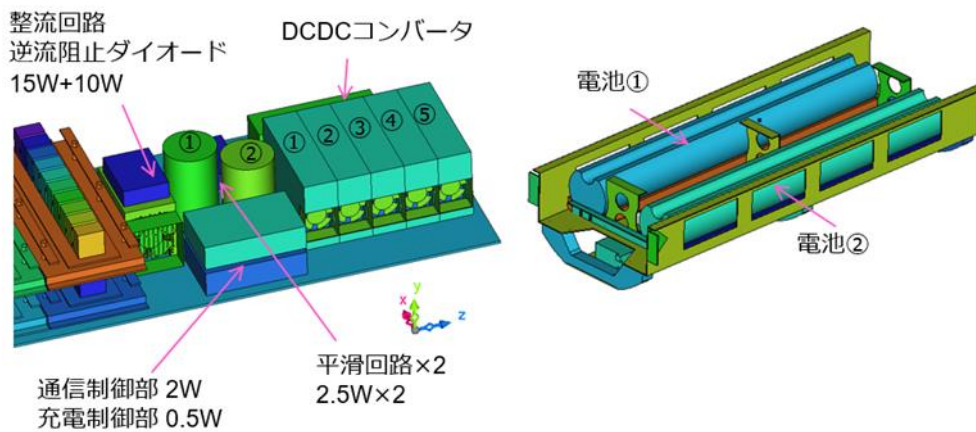


図 3.4-63 AUV 内の各部の説明

B 温度上昇シミュレーション結果

受電電力条件 1kW~3kW での温度上昇シミュレーション結果を表 3.4-10 に示す。温度上昇は定常状態になった時の値を表す。

現状問題になっているのは DC/DC 電源周辺の空気温度で出力条件 100% の場合 40°C 以下という指針が示されている。シミュレーション結果では受電電力 3kW まで上昇させて充電を働かせた場合に条件を若干オーバーしていると判明したが受電電力 1kW 前後では十分マージンが取れそうなことが判明した。

よって受電電力 1kW 前後での温度上昇データをこの条件と比較しながら実験を進め必要に応じて対策を講じていくものとする。

表 3.4-10 熱解析結果

	受電電力1kW条件	受電電力2kW条件	受電電力3kW条件
DC/DC周辺 空気温度	32°C	39°C	44°C
DC/DCファン通過 空気温度	34.9	43.3	51.2
整流回路ファン通過 空気温度	32.1	38.0	43.4
電池①固体温度レンジ	27.2~27.4°C	29.0~29.4°C	30.7~31.3°C
電池②固体温度レンジ	27.4~27.7°C	29.5~30.0°C	31.3~32.1°C
DCDC内部品 最大温度	57.2°C	84.8°C	110.2°C

3.4.1.6. 送受電装置全体のシステム設計 (3次試作・評価)

充電制御システム構成としては、有線系と無線系の2種類の接続に対応している。充電制御の海中通信方式の検討は3.4章に記載をしているが、同時に実証プロセスとして海中通信に依存しないで制御および動作できる仕組みを構築しておく必要がある。

3.4.1.6.1. 全体構成

A 有線 (光ケーブル) 系接続

AUVと充電装置間の通信を有線系(光ケーブル)経由で行うときの送受電装置のシステム構成を図3.4-64に示す。充電制御装置からステータス通知や、電流、電圧、温度などのログ情報が住専制御サーバーPCに送信されこれらは充電制御サーバーPC内のデータベースに蓄積されるとともにWebサーバー機能により、クライアントおよびサーバーPC上でその時々を表示することができる。また電力に応じた送信電力の制御も充電制御サーバーPCから自動的に行うことが可能である。なお送信電力制御は自動モードと手動モードの選択が可能である。

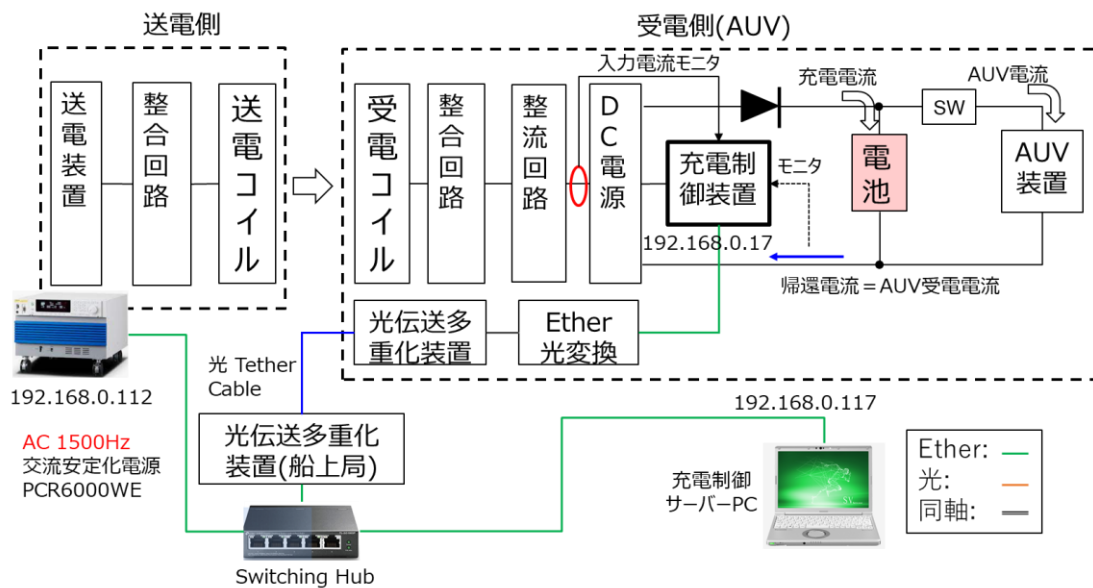


図 3.4-64 送電装置システム構成図(光ケーブル接続系)

B 海中通信接続系

AUVと充電装置間の通信を海中通信経由で行うときのシステム構成を図3.4-65に示す。

制御方法や IP アドレスの割り付けは光ケーブル接続系と同じであるが、系がグループすることを避けるために海中通信系を使用する場合は有線系の接続は外して使用する。この接続系は本研究の最終目的をターゲットとした構成である。

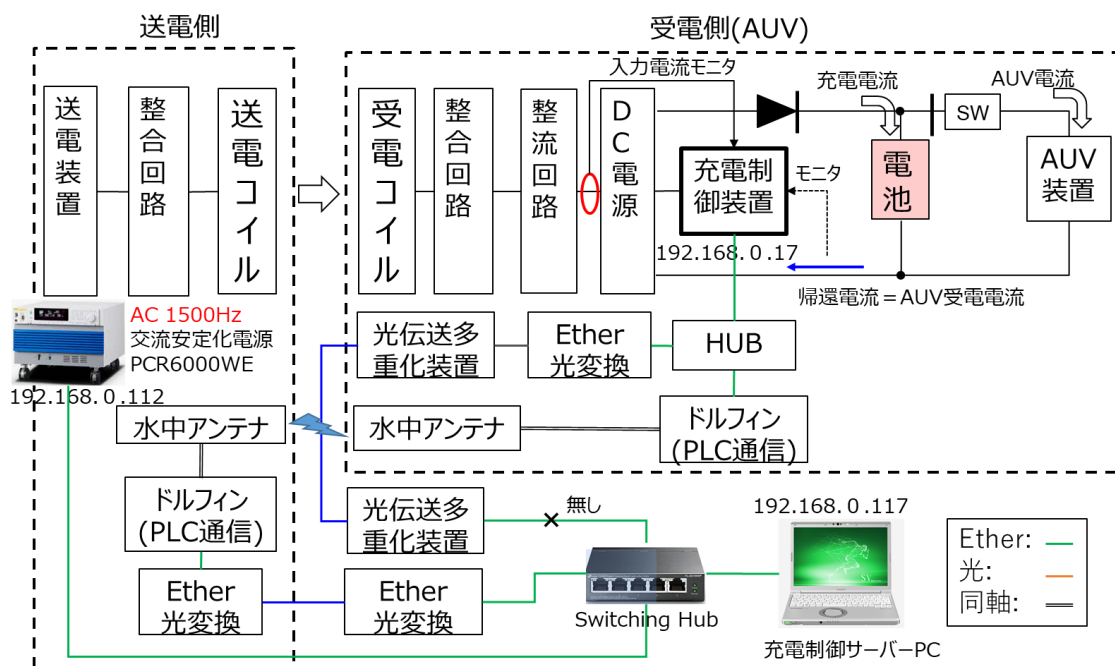
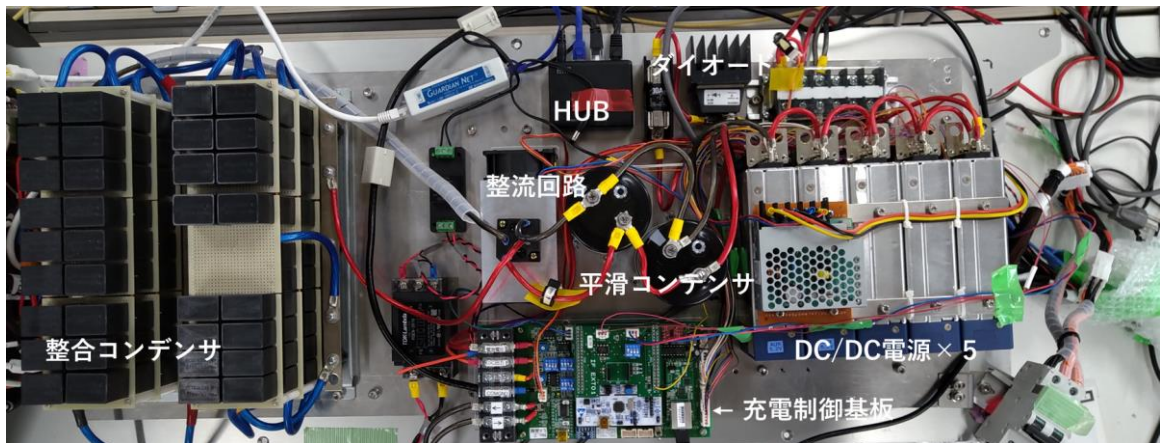


図 3.4-65 海中通信接続系

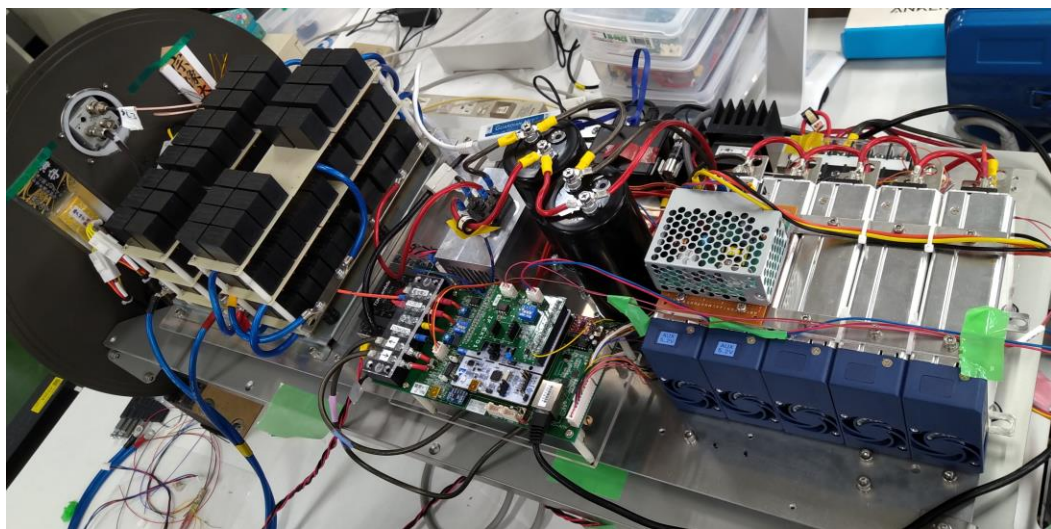
3.4.1.6.2. 受電装置

A 全体構成および写真

受電装置の構成写真を図 3.4-66 に示す。充電装置以外の整流回路などは 2 次試作以降、変更がないので省略する。



(a)受電装置上面写真



(b)受電装置部全体写真

図 3.4-66 受電装置構成写真

B メイン基板および拡張 I/F 基板の製作とプリント基板化

充電制御基板は昨年度まではユニバーサル基板を使用して部品実装や配線を手作りして行ってきたが、設計評価を進める中で回路構成も確定してきたことに加え、今年度は AUV に搭載するため小型化と信頼性の向上を両立させる必要があり、回路部のプリント基板化を実施した。またプリント基板化により基板の N 増しが容易になったため故障時のバックアップも容易に行えるようになり実験に対するリスクも低減できた。

なおこのプリント基板の製作後、機能追加が必要になった為、さらに拡張コネクタに装着できる基板を追加で作成した。よって以下、最初に作成した基板をメイン基板、のち作成したものを拡張 I/F 基板と記載することにする。

B-1 メイン基板

メイン基板の概略仕様は以下のように決定した。メイン基板外形図を図 3.4-67、メイン基板回路図を図 3.4-68 に示す。充電制御基板の機能面の仕様については B-1 の章で述べる。

- ・ 材質：ガラエポ
- ・ 厚さ： $t=1.6\text{mm}$
- ・ 層構成：2層
- ・ CR 実装：チップ部品(3216)を基本とする。
- ・ 基板サイズ：190mm×95mm

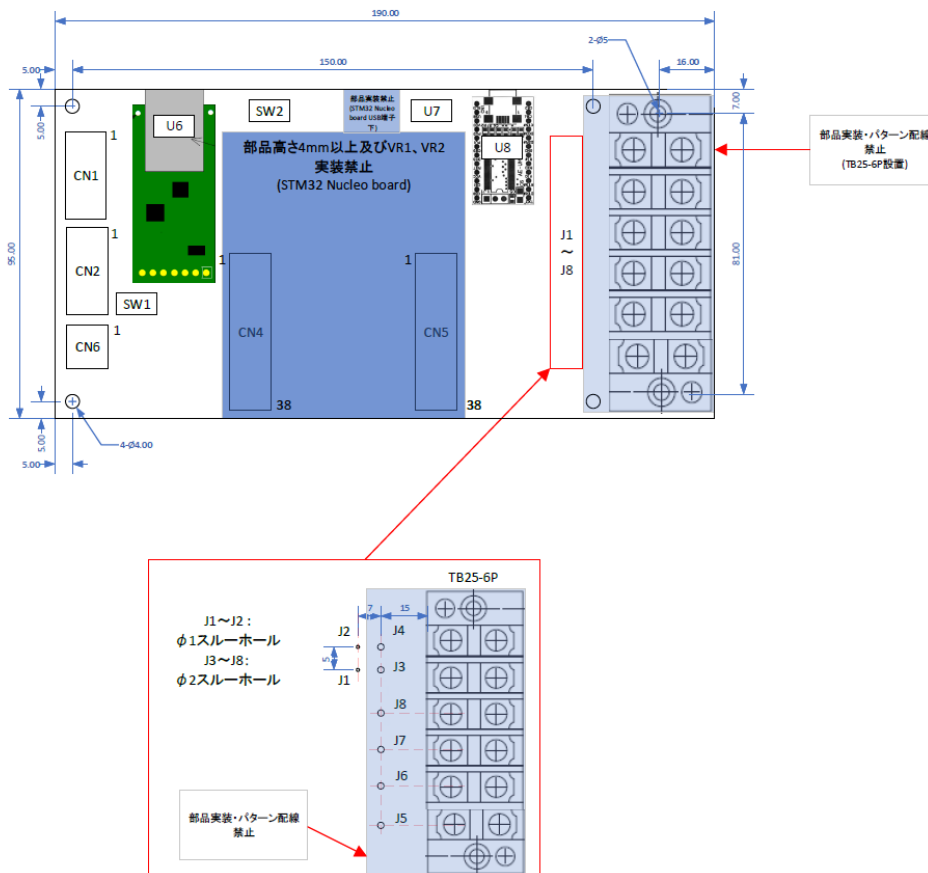
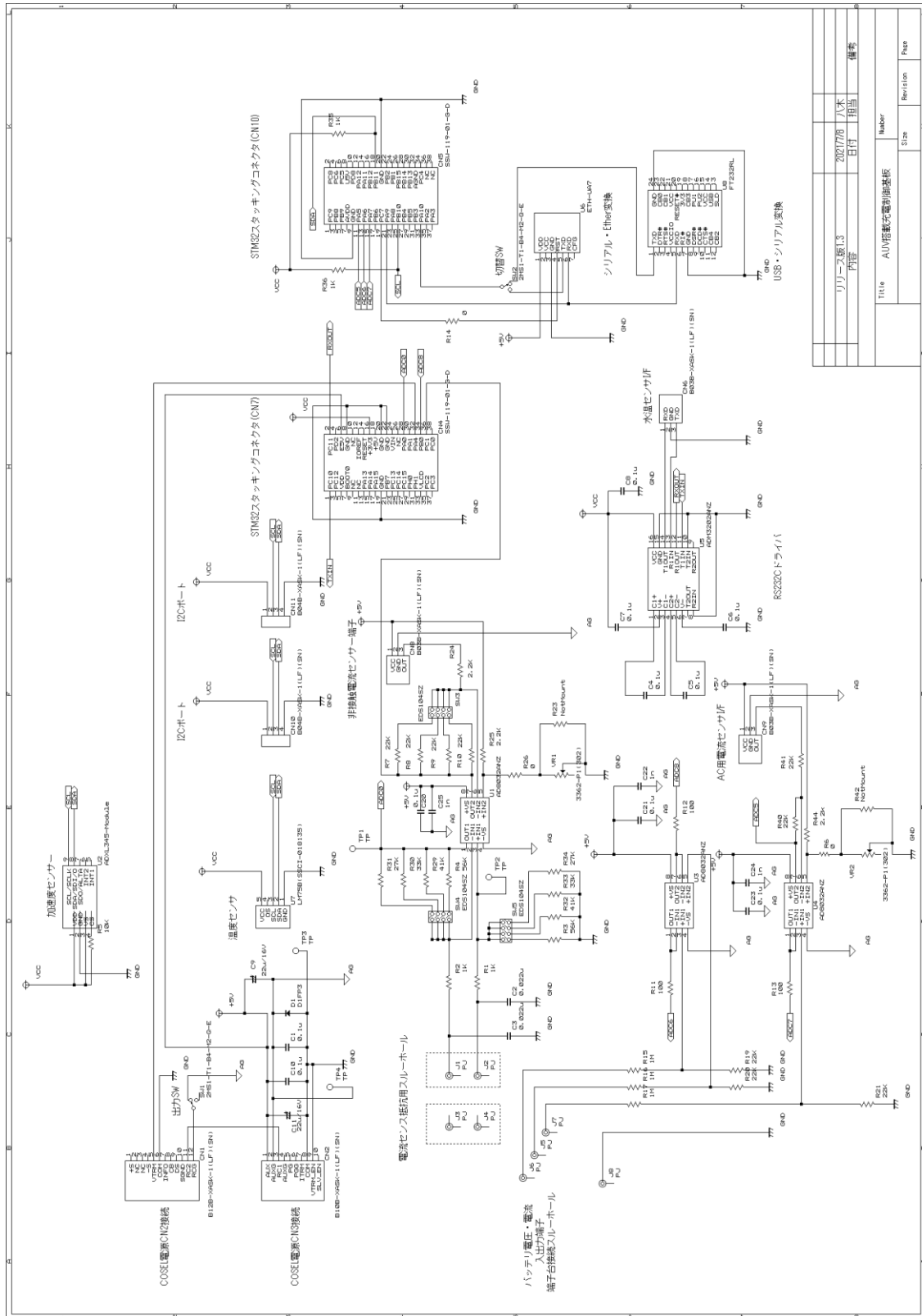


図 3.4-67 基板外形図



リリース新13 内容	2021/7/8 日付	八木 担当	備考
Title		Number	Revision
AUV搭載電制御基板		Size	Page

図 3.4-68 メイン基板回路図

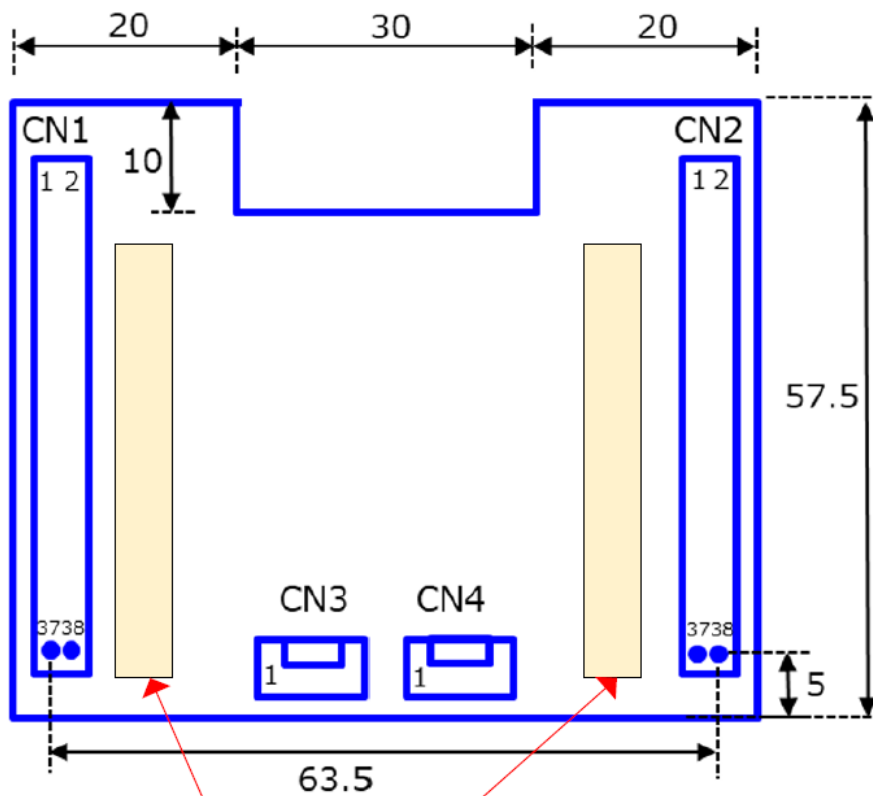
B-2 拡張 I/F 基板

拡張 I/F 基板は CPU の Nucleo 拡張 I/F コネクタに実装されるように設計した。
プリント基板の概略仕様は下記に示す。

- ・ 材質：ガラエポ
- ・ 厚さ： $t=1.6\text{mm}$
- ・ 層構成：2層
- ・ CR 実装：チップ部品(3216)
- ・ 基板サイズ： 63.5×57.5

機能としては ADXL345 加速度センサ(SPI)、CAN トランシーバ、および電源拡張
USARTI/F を実装している。

拡張 I/F 基板外形図を図 3.4-69 に、回路図を図 3.4-70 に示す



※DIP部品実装禁止 (位置情報ははんだ面参照)

図 3.4-69 拡張 I/F 基板外形図

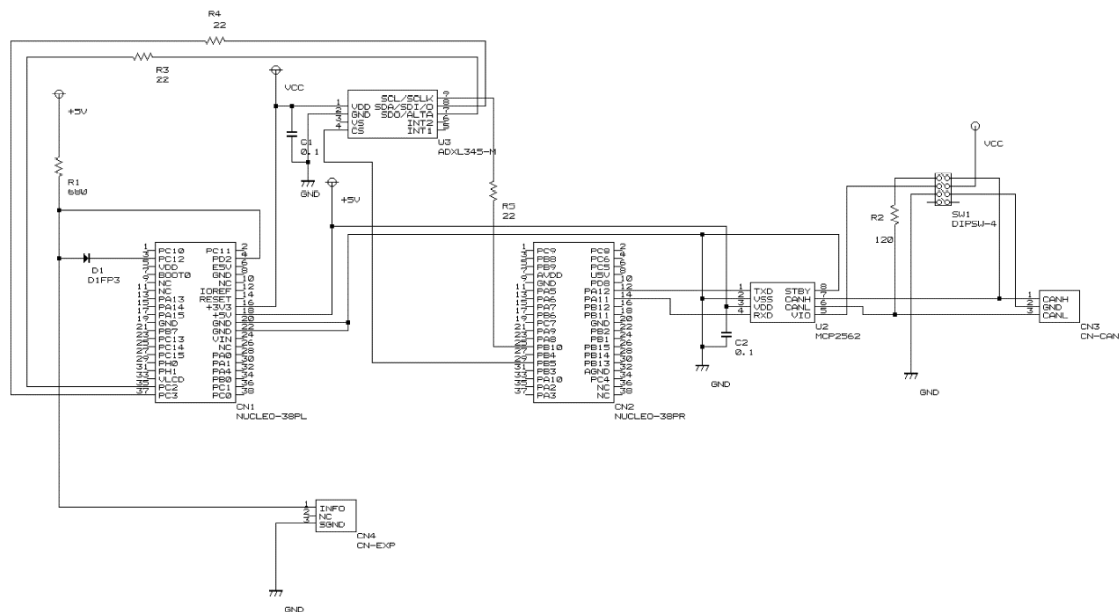


図 3.4-70 拡張 I/F 基板回路図

C マイコン(CPU)高性能化対応と I/F 拡張

充電制御基板の制御 CPU は受電ターゲット 1kW までの試験では STM32L053 を使用していたが、本研究を進める中で後述する急速充電用の CAN I/F の対応、受電電力のモニタ機能、その他受信データ処理の高速化など複数の課題に対応する必要が発生し処理能力の不足が懸念されてきた。このためメイン基板のハードウェア設計を変更せずにメイン基板に搭載する CPU ボードのみ STM32L476 に変更し CPU の高機能化を図った。ポート機能やピンアサインの不一致はソフトウェアの変更により吸収した。この取り組みにより受電ターゲット 3kW 試験ではマイコンの高機能化の対応が実現できた。

C-1 充電装置仕様

STM32L053 ベースと STM32L476 ベースの充電装置の仕様比較を表 3.4-11 に記載する。前者は受電ターゲット 1kW 試験に、後者は受電ターゲット 3kW 試験に使用した。

表 3.4-11 充電装置比較表

項目	1KWターゲット版	3KWターゲット版	備考
制御CPU	STM32L053(16MHz)	STM32L476(48MHz)	Arm Cortex-M4 STマイクロ社製32ビットマイコン
FLASH	64KB	1MB	プログラムサイズ拡張可能
SRAM	8KB	128KB	変数使用制約を拡張
DC/DC電源	PCA600F-24P3 (Cosel社製)		単体仕様： 出力：最大648W（電圧最大28V、電流最大27A） 入力：DC：88-370V, AC：85-264V,
多段接続数	5台		Master電源1台、Slave電源4台の5台直列接続
最大電力	648×5= 3240W		但し電流最大27Aとする
拡張電源I/F	N.A	UART 2400bps	半2重通信。電源状態、受電電力のモニタなどに使用
充電可能セル数	28セル		セル電圧最大4.1V（28セル=114.8V）
充電電流	0A~27A		設定可変(任意)、制御装置からのコマンドで対応
充電方式	CC（定電流）充電		電池安全性を考慮しCC充電のみ対応
CC停止電圧	116V		暫定値
CAN I/F	N.A	1ポート(500kBPS)	急速充電電池モニタ用
制御I/F	USART :115200bps Ether : 100Mbps		Ether (100Mbps)I/F基板：ETH-UA7(TCP/UDP対応) ※I/F基板の最大速度は460Kbps
温度センサI/F	I2C(100KHz)		LM75B、最大8台搭載可能
加速度センサI/F	I2C（最大400Kbps）	SPI(最大4Mbps)	ADXL345は単体評価のみ実施
水温センサI/F	RS232C 115200bps		AUV耐圧容器蓋の温度をモニタ

C-2 CPU ペリフェラル構成比較

STM32L053 ベースの充電制御装置と STM32L476 ベースの充電制御装置の CPU のペリフェラル構成の違いを以下に記載する。CPU 内部でのペリフェラルの機能割付けが両 CPU 間で異なるため、ピンアサインが同じになるように ADC、USART/UART/LPUART チャネルやポート番号の置き換えるようにファームウェアを書き換えた。また UART5、SPI、CAN I/F は STM32L476 から追加した機能で、A-2 で述べた拡張 I/F 基板経由でハードウェア接続されている。なお CAN I/F は STM32L476 のみに搭載されている機能であり STM32L053 では CAN コントローラが搭載されていない。

これらの取り組みにより CPU の性能向上およびメモリ拡張が出来たため ADC のサンプル数も 64 から 256 に増加させより精度の高い AD/DA 処理が実現できるようになった。CPU のペリフェラル機能比較表を表 3.4-12 に示す。

表 3.4-12 CPU ペリフェラル機能比較表

ピン名	STM32L053R8	STM32L476RG	機能
PA0	ADC_0	ADC_05	帰還電流監視
PA4	DAC_OUT1	DAC_OUT1	DC/DC 制御
PA5	ADC_05	ADC_10	一時側電流監視
PA5	ADC_06	ADC_11	DC/DC 電圧監視
PA6	ADC_07	ADC_12	Reserve
PB0	ADC_08	ADC_15	電池電圧監視
PB10	I2C_SCL	I2C_SCL	温度センサ I/F
PB11	I2C_SDA	I2C_SDA	
PC1	ADC_11	ADC_02	電池電流監視
PA10	USART1-RX	USART1-RX	サーバー通信用
PA11	USART1-TX	USART1-TX	
PC10	LPUSART_TX	USART3_RX	水温センサ
PC11	LPUSART_RX	USART3_RX	
PA2	USART2-TX	USART2-TX	デバッグ I/F
PA3	USART2-RX	USART2-RX	
PB5	GPIO OUT	GPIO OUT	汎用および SPI
PD2	N/A	UART5-RX	電源拡張 UART(電力モニタ)
PC12	N/A	UART5-TX	
PA11	N/A	CAN1_RX	急速充電電池 I/F
PA12	N/A	CAN1_TX	
PB13	N/A	SPI2_SCK	ADXL345 用
PC2	N/A	SPI2_MISO	
PC3	N/A	SPI2_MOSI	

C-3 充電装置構成

充電装置の内部構成を図 3.4-71 に示す。ここでは受電 3KW ターゲット版の STM32L476 の構成のみ記載する。加速度センサに関しては単体評価のみを実施しており、全体システムの中で加速度情報をどのように処理するかは未定である。図中の内部それぞれの機能については以降の章で説明する。

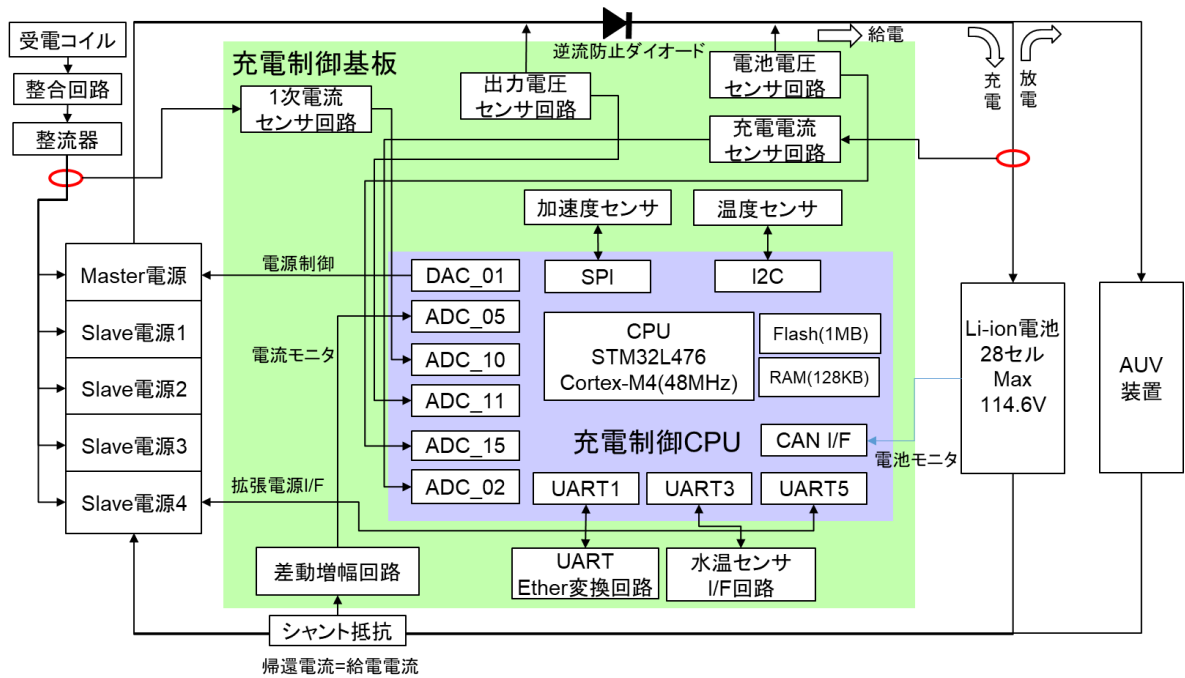


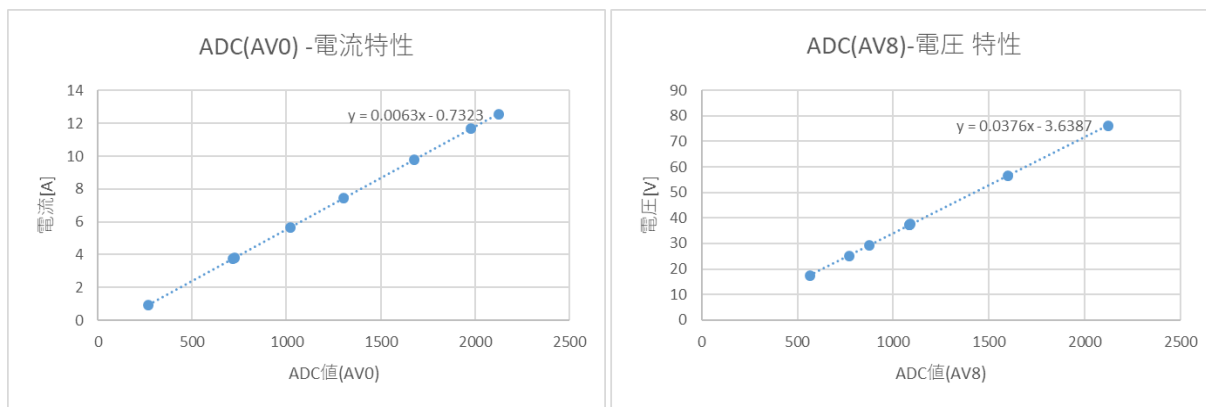
図 3.4-71 充電装置内部構成

C-4 AD/DA 変換特性

AD 変換特性として、受電 1kW 対応版(STM32L053 版)および受電 3kW 対応版(STM32L476 版)の帰還電流特性(a)、電池電圧検出特性(b)をそれぞれ図 3.4-72、図 3.4-73 に示す。電流検出抵抗は受電 1kW 対応版では 5mΩ、受電 3kW 対応版では 4mΩ としている。抵抗値の最大電力は 3W で規定されているので、流せる最大電流は式(3.4-14)より、5mΩ で 24.5A、4mΩ で 27.4A となる。(R 抵抗値、W 電力)

$$i = \sqrt{\frac{R}{W}} \quad (3.4-14)$$

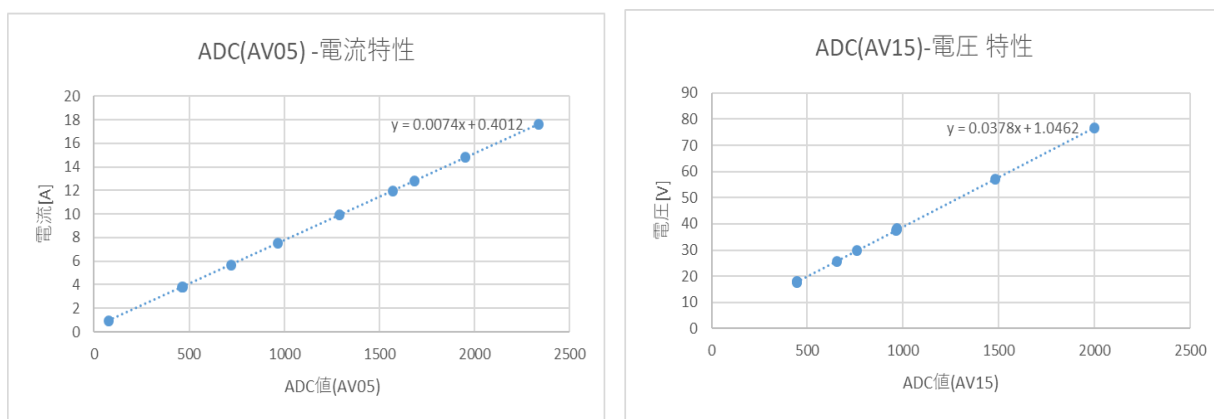
図 3.4-72、図 3.4-73 の AD 変換特性はきれいな線形性を有しており AD 変換がほぼ理想的に動作していることが分かる。電流検出抵抗の抵抗値は受電 1kW 対応の図 3.4-72 (a)、受電 3kW 対応の図 3.4-73 (a)でそれぞれ 5mΩ、4mΩ と異なるが電流検出部の差動増幅ゲインは 27dB で変わらないため、この差異は電流-ADC 特性の傾きの違いで表されている。また電圧特性に関しては抵抗分圧して検出しているものなので、図 3.4-72(b)、図 3.4-73(b)それぞれほぼ同じ特性であることも分かる。



(a)

(b)

図 3.4-72 STM32L053 の ADC 特性

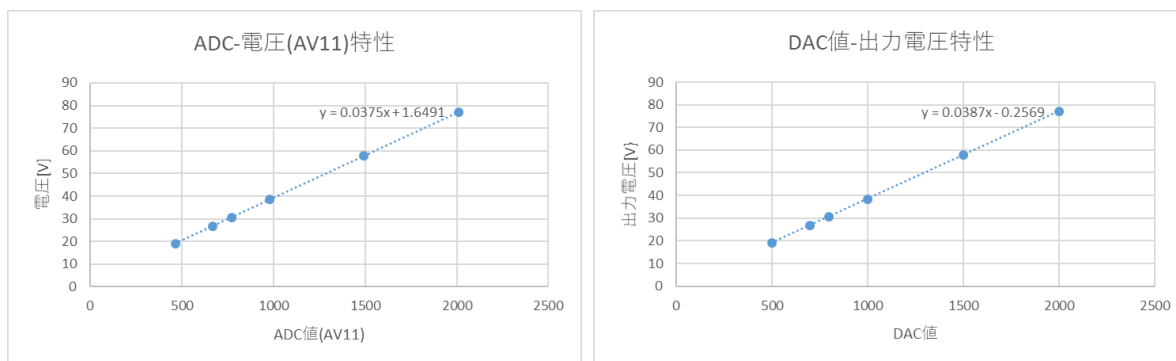


(a)

(b)

図 3.4-73 STM32L476 の ADC 特性

その他 STM32L476 版の DA 変換特性および DC/DC コンバータ出力電圧検出特性を図 3.4-74 に示す。図 3.4-74 の(a)、(b)はそれぞれ DC/DC 電源の出力監視電圧、DC/DC 電源の制御電圧であるがここにおいても ADC/DAC 特性は線形性がよく保たれ、好ましい特性が得られていることが分かる。



(a)

(b)

図 3.4-74 STM32L476 の ADC/DAC 特性

C-5 充電アルゴリズムの改善

充電制御装置は1次試作では10msを1フレームとして制御を行っていたが、開発を進める中でCPUペリフェラルの増加や1次側のAC電流を測定して受電電力を監視することを検討していたため1フレーム内で実行する処理負荷が増大してきた。そのためフレーム間隔を20msに変更し割り込みの処理のオーバーヘッドを軽減する対応を行った。

その後CPUを変更し処理負荷の増大に耐えられるようにしたので、フレーム間隔は10msに戻す選択もあったが、変更による変化点評価の工数負荷や将来の負荷増大を見越してCPU変更後もフレーム処理間隔は20msのままとし現状に至っている。

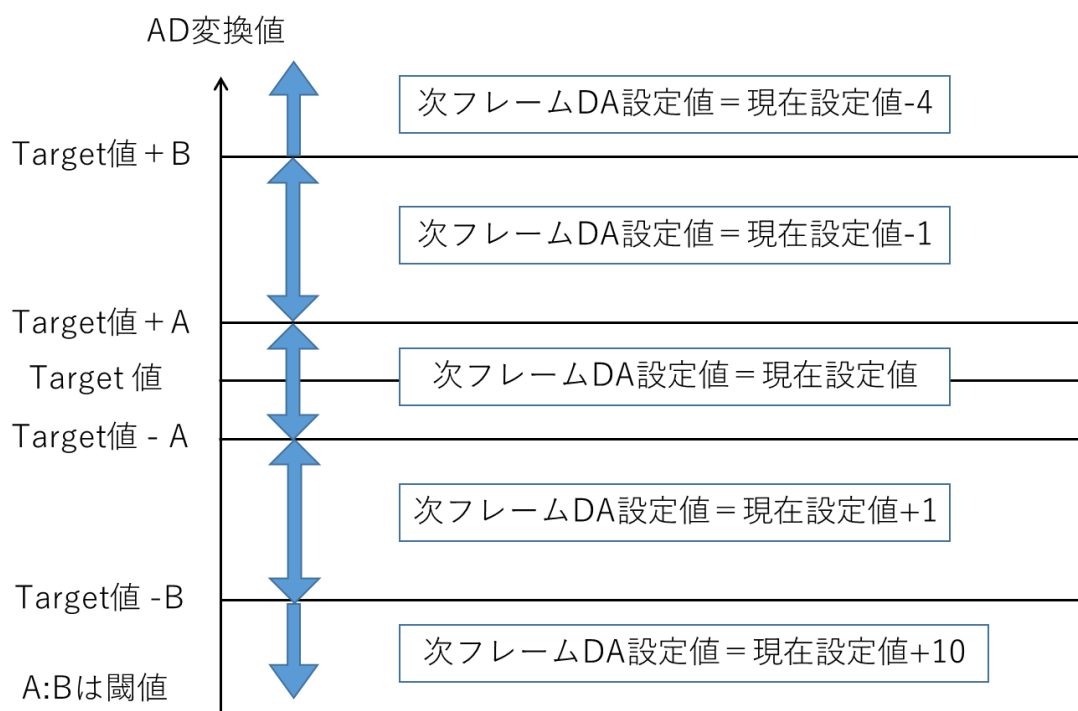


図 3.4-75 受電制御アルゴリズム閾値制御

現状の充電アルゴリズムの閾値制御の概要を図 3.4-75 示す。基本的に昨年度のアルゴリズムを踏襲しているがターゲット値に近づくまでの加速処理とターゲットに近づいた後細かく動作させるように変数や閾値を変更して定めている。

C-6 LAN I/F 対応(TCP/IP)と充電制御サーバーPC

1次試作までは充電装置と制御PCはUSB接続でシリアル通信を行い、充電装置のログ情報もTerminalソフトのログ機能を使用して蓄積していたが、実際のAUVと充電装置間の通信は海中通信も含めて基本的にEtherネットで構成されるため、IPベースのシステムに対応する改造を行った。

ハードウェア的には充電制御基板にUSARTとTCP/IPの変換基板を実装し、ソフトウェ

ア的には制御 PC を Node.js ベースでサーバー化し TCP/IP 通信ができるようにした。

また充電制御の電流・電圧などのログ情報もサーバー上に構築した MariaDB のデータベース MySQL に蓄積し利用できるようにした。

USART と TCP/IP の変換は eth-UA7 を使用して図 3.4-76 のような接続構成で実現している。Node.js 側は Net モジュールを使用し TCP のサーバーモードでポート 20108 を常時 listen する Call Back 関数を使用する。変換ボード eth-UA7 側は TCP クライアントモードとし、リモートサーバーの IP アドレスの通信先を指定しデータを転送する。

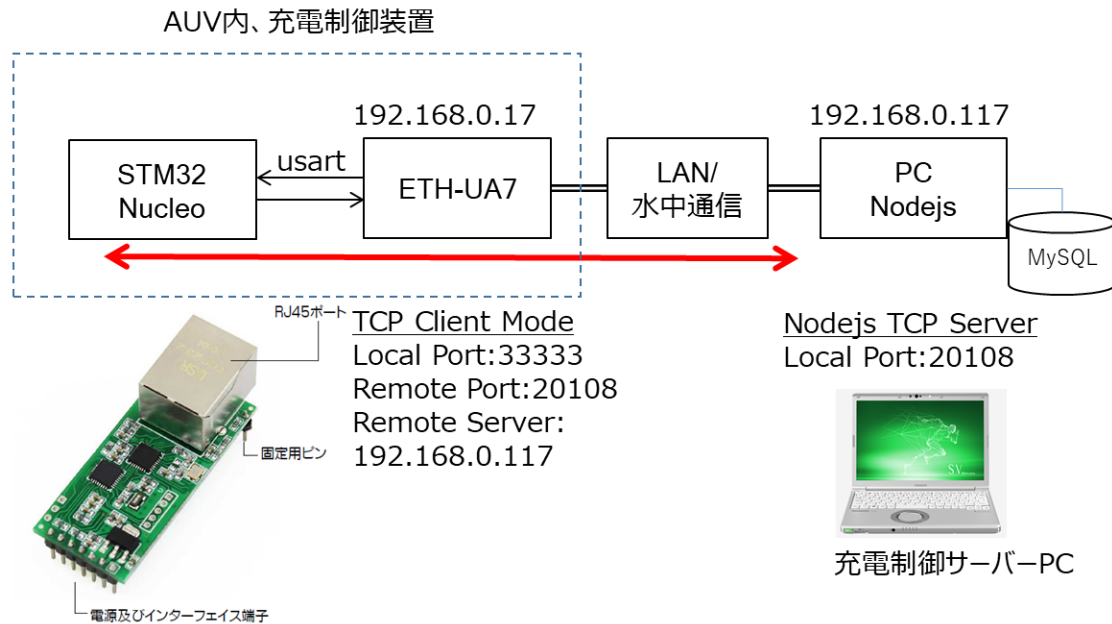


図 3.4-76 USART-TCP/IP 変換

C-7 受電電力モニタ I/F(拡張 UART)

受電コイル側の電力は従来パワーアナライザを使用して測定していたが、AUV に受電コイルが搭載されている運用状態では AUV 内部にパワーアナライザを設置かつリモートでその情報を取得することは不可能なので、別途手段を考える必要があった。

当初差動プローブを購入し受電コイルの電流検出から電力を計算することを検討したが、適当な差動プローブが存在せずまたプローブ測定する受け側の測定器も必要で AUV 内に適用することは不可能であった。また差動プローブの自作も検討し試作も行ったが高耐電圧かつノイズ耐性の高い仕様に短期間で対応することは困難で実際にうまくいかなかった。

その後の調査で DC/DC コンバータの拡張 USART の I/F に対応することで 1 次側の電圧がモニタ出来ることが判明したため、この電圧と 1 次側に流入する電流の積により電力を求め受電コイルの電力を測定することで対応するようになった。またこの部分の電流および電圧は整流器を通した後で直流化されているため基本的に電流と電圧の位相差を考慮する必要がないことも好都合である。

C-7-1 電圧モニタ機能

拡張 UART の構成を図 3.4-77 に示す。通信速度は 2400bps の半 2 重通信である。電源は 5 台接続されているが、それぞれ固有のアドレスを持っておりホスト側で指定されたアドレスの電源だけ応答する。電源の 1 次側は並列接続されているため、電源の一つだけ応答するように固有のアドレスを設定して電圧をモニタしている。

なお最大接続数は 4 台の仕様であるが実測の結果 5 台接続時 680Ω プルアップ条件でも、STM32 の H/L 規定レベルを確保できており一応この構成で使用しても問題ないことを確認している。

(実測値 H=2.6V、L=0.72V： 規定値 $H > VIO \times 0.7 = 2.2V$ 、 $L < VIO \times 0.3 = 0.99V$)

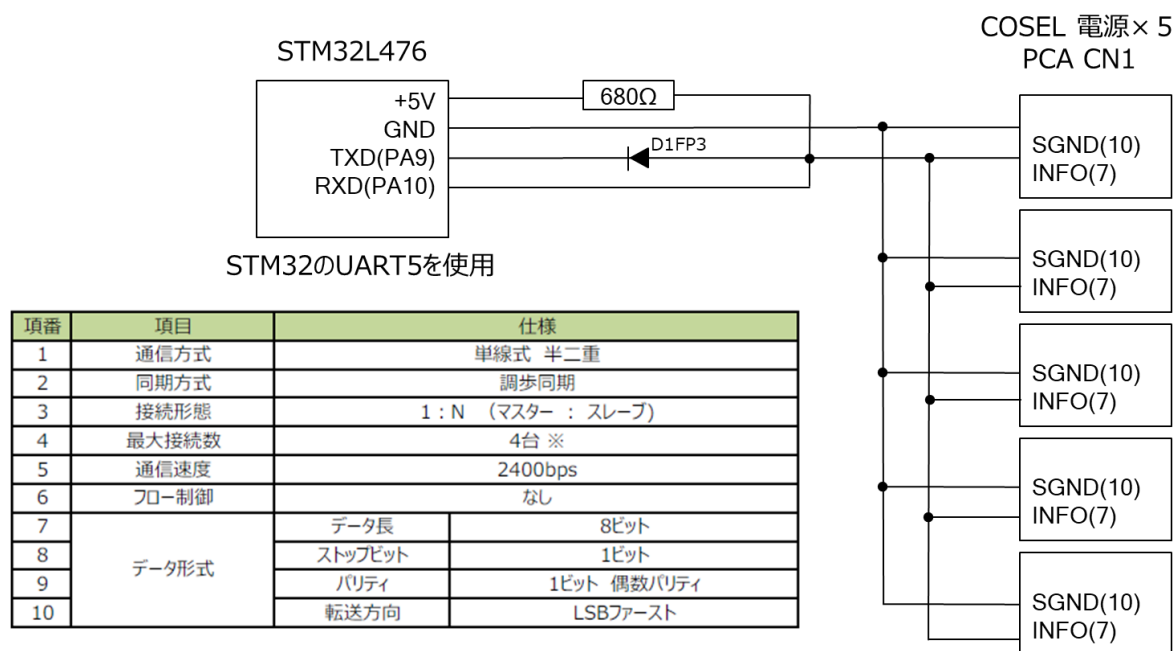


図 3.4-77 拡張 UART 構成図

C-7-2 電流モニタ

1 次側の電流は整流器に流入する直流電流を検出する。電流センサは mlabo 製 MD5023 を使用し後段に反転増幅器を接続して感度を確保した。電流はセンサ出力のセンター電圧値からの土の大きさが電流値が決まる。今回の条件では基本的に正側の出力しかないので反転増幅器を使用し、電流 0 の時の出力が ADC の最大値 4096(約 3.2V)に近づくように、バイアス点を調整する。

電流センス部の回路構成図を図 3.4-78 に示す。バイアス点はこの図の R1 の可変抵抗で調整する。

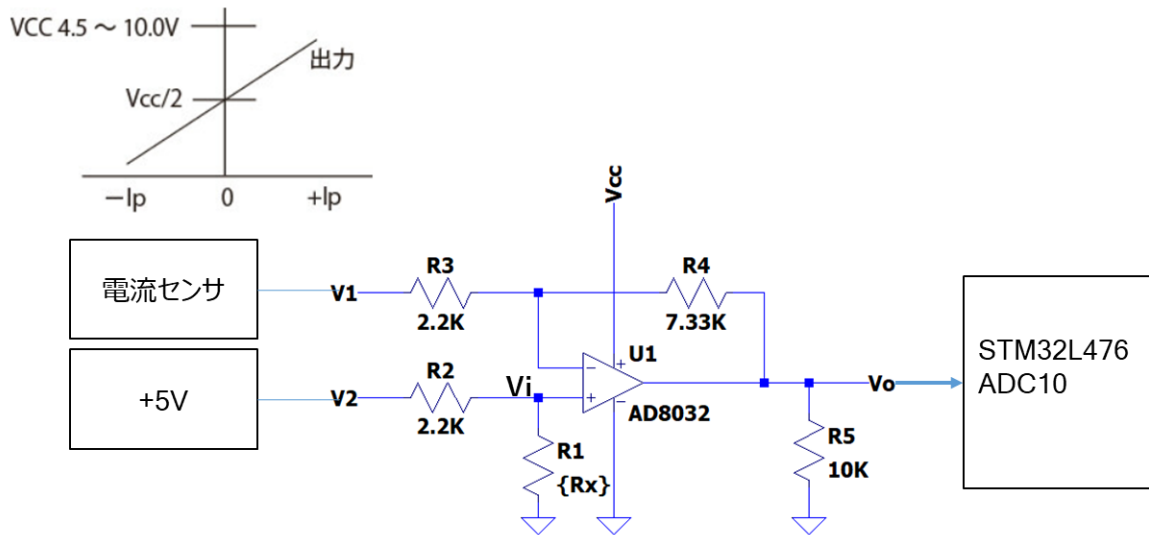


図 3.4-78 1次電流センス構成図

図 3.4-78 でオペアンプの差動入力電圧を v_i とすると

$$v_i = v_1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2}(v_1 - v_o) - v_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (3.4-15)$$

したがって

$$v_i - v_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} = v_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} - v_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (3.4-16)$$

オペアンプの差動ゲイン A とすると $v_i = -v_o/A \rightarrow 0$ に収束なので

$$v_o = -v_1 \frac{R_2}{R_1} + v_2 \frac{R_4 R_1 + R_2}{R_1 R_3 + R_4} \quad (3.4-17)$$

ここで(3.4-17)の右辺

$$v_2 \frac{R_4 R_1 + R_2}{R_1 R_3 + R_4} \quad (3.4-18)$$

これが固定値であれば v_o は反転差動増幅 + オフセット定数となる。 v_2 は $1/2V_{cc}$ で固定化すれば図 3.4-79 のようにゲインは傾きで決まる。よってバイアス点は①の $1/2v_{cc}$ 点よりダイナミックレンジが最大になるように②を決定する。ここでは直流電流の流れる向きは決まっているので ADC 検出の最大値に近い値、すなわち②を 3.3V に近づけるように R_4 を可変して調整した。

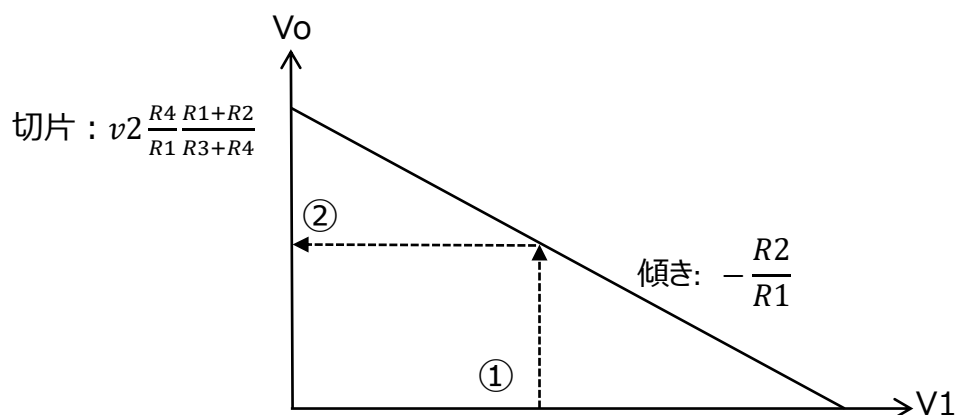


図 3.4-79 V1-Vo 直線

以上の検討・考察によりバイアス点調整後の実測評価した ADC の特性図を図 3.4-80 に示す。

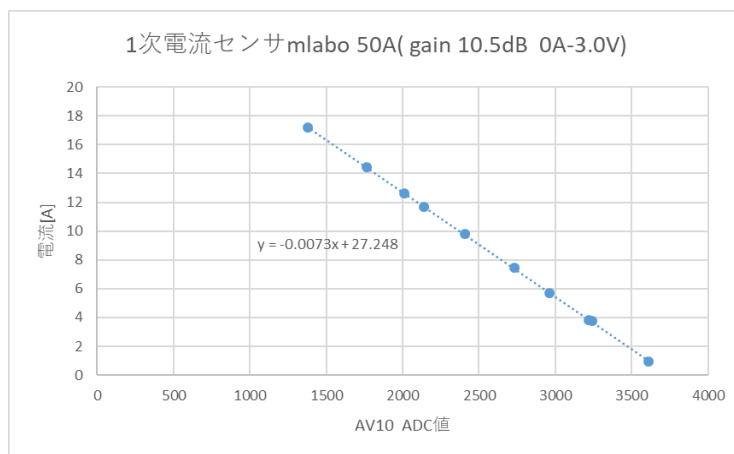


図 3.4-80 1次電流センサ ADC 特性

C-7-3 拡張 UART による処理負荷の影響

拡張 UART のコマンドはコマンド種別により送受信の長さ(バイト数)が異なるが 1 次電圧のモニタコマンドは送信 5 バイト受信 5 バイトである。また半 2 重通信であるため送信パッケージが送出されている間は受信側に同じデータが折り返される。したがって今回受信割り込みは 10 バイト毎に発生させる CPU で受信する仕様とした。

拡張 UART の評価結果を図 3.4-81 に示す。割り込み処理の優先度は ADC 処理>拡張 UART 処理としており、この図からも 20ms 毎に定期的が発生する ADC の処理が拡張 UART の処理によりコンフリクトされていることは見られない。また同様に受信割り込み処理が ADC 処理にコンフリクトしていることも無いことが分かる。ただしコマンド送信からその応答処理に 58.8ms を要している。

この評価結果からは拡張 UART 処理が少なくとも ADC に及ぼす影響は無いと判断できるが、処理時間が 58.8ms と長く、また想定外の条件や後述する CAN I/F などの追加要因のコンフリクト評価などが十分にできなかったのでリスク回避のため今回は 1 次電圧のモニタは定期処理にせず、コマンド要求が発生したときのみ応答するという仕様にした。定期処理の可否は運用実績を積んで判断する。

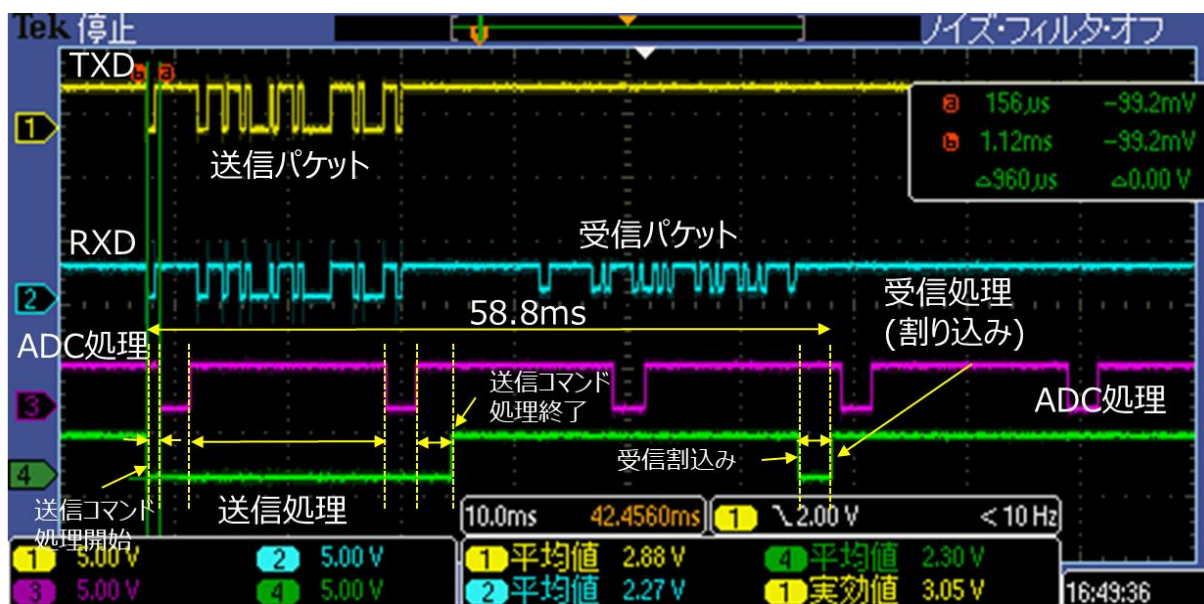
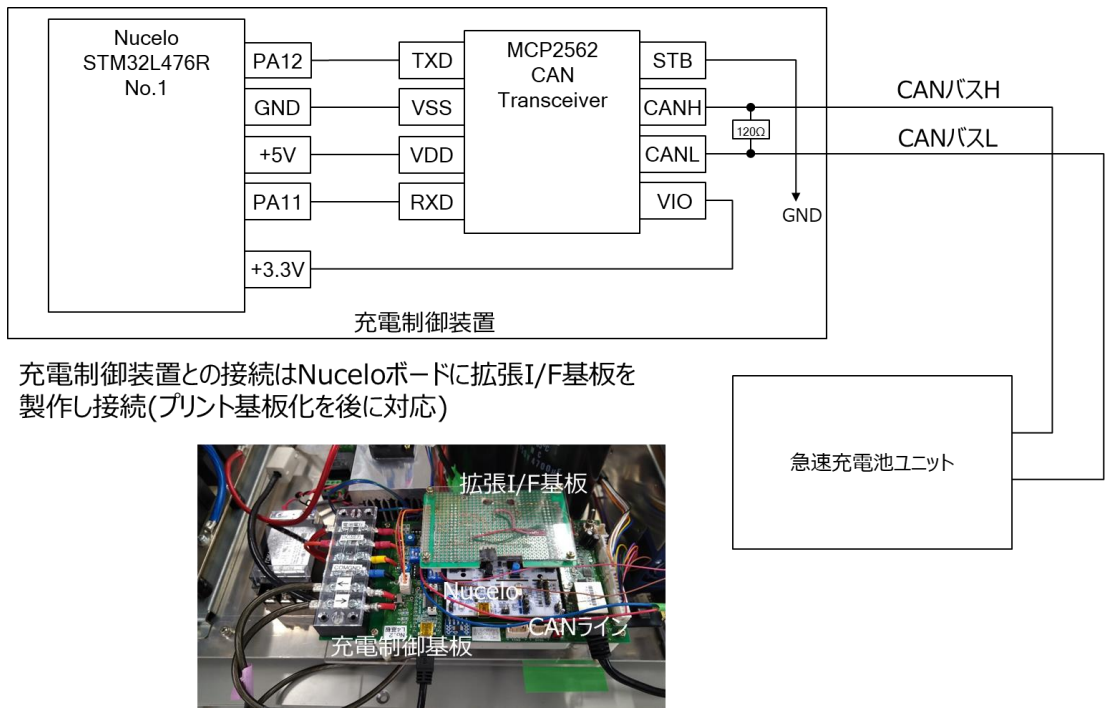


図 3.4-81 拡張 UART 処理負荷評価

C-8 電池 I/F 機能(CAN)

従来の Tuna-sand の電池では電池内の電圧や電流、保護回路条件などの管理情報が隠匿されていたが、急速充電対応の電池は CAN I/F 経由で電池内の各セルおよび最大、平均、最小値の条件で電圧、電流、温度などがリアルタイムで通知されるため、これに対応すべく CAN I/F を実装した。STM32L476 は CAN I/F に対応したコントローラを内蔵しているため、これに CAN の物理層に対応する CAN トランシーバ MCP2562 を拡張 I/F 基板を介して実装・接続した。

CAN I/F 接続構成を図 3.4-82 に示す。CAN は 2 線 I/F で MCP2562 を介して STM32L476 と通信する。CAN は差動信号を検出する方式なので基本的に GND 電位は接続しない。なおこの図の写真では A-2 で記述した拡張 I/F 基板の試作版を搭載している。



充電制御装置との接続はNuceloボードに拡張I/F基板を製作し接続(プリント基板化を後に対応)

図 3.4-82 CAN IF 接続構成

2線式のCAN I/Fの信号および差動信号の実測図を図 3.4-83 に示す。CANH、CANLのそれぞれの信号はノイジーだが差動信号からは綺麗にデジタル信号波形が抽出・出力されているのが分かる。

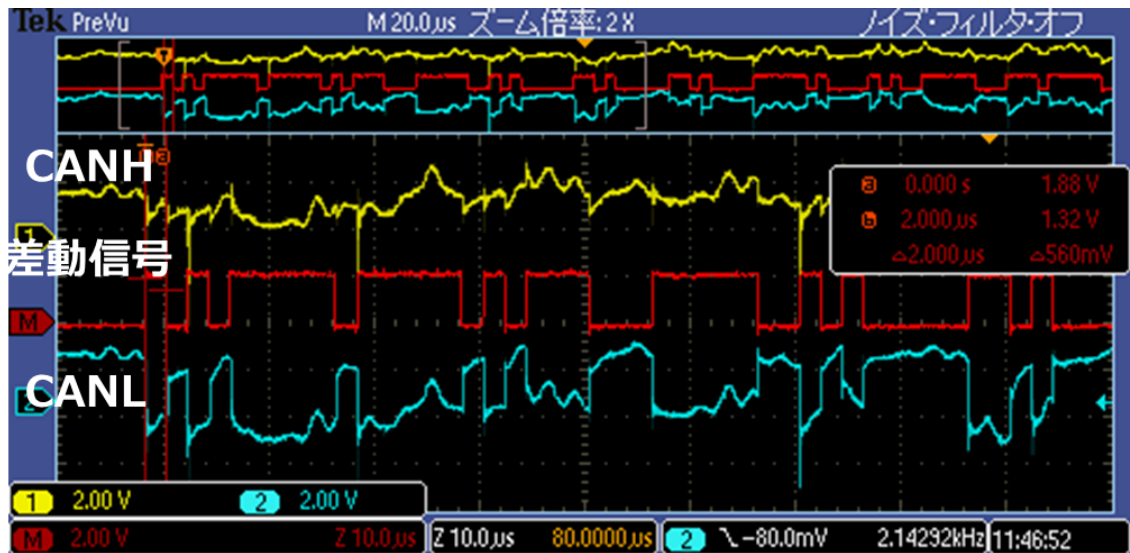


図 3.4-83 CAN 差動信号

急速充電電池のコントローラ側のCAN I/Fは500kBPSで標準フォーマットのみ対応としている。電池側の送信データは8Byte×7種類で電池セル内の状況通知を1秒単位行っている。

る。このデータを STM32L476 では CAN I/F の受信割り込みにより取得するが、電池データは時間により大きな変動が少ないため、今回データ取得周期を 10 秒とした。

電池からの CAN 送信データ一覧を表 3.4-13 に示す。ID は CAN のアドレスに相当する。なお STM32L476 の CAN I/F で受信マスク設定を行い該当する ID のデータのみ通知する処理を実施している。

表 3.4-13 CAN 送信データ

名称	ID	データ(各 8 byte)	周期
駆動情報①	500h	SOC、セル電圧(最大、最小、平均) 総電圧、ステータス情報	1sec
駆動情報②	510h	温度(最大、最小、平均)、積算電流	① +10ms
駆動情報③	501h	温度データ(4 か所)	② +10ms
駆動情報④	511h	セル 1~8 電池電圧	③ +10ms
駆動情報⑤	512h	セル 9~16 電池電圧	④ +10ms
駆動情報⑥	513h	セル 17~24 電池電圧	⑤ +10ms
駆動情報⑦	514h	セル 24~28 電池電圧	⑥ +10ms

3.4.1.6.3. 急速充電対応電池

AUV 既存電池として、Tuna-Sand バッテリの使用を前提として設計を行っていたが電池単体仕様では充電電流は最大 3.7A であり、これを 4 直列 2 並列の形で使用すると最大で 7.4A の充電までしか保証されず、KW 級の充電を実現するにはリスク負って保証範囲より大きな電流を充電して試験を行う必要があった。

しかし電池の内部構造に関してはブラックボックスであり、リスクを負って充電電流を増加させるにも限界がある。1kW 程度であれば保証電流との差異がそれほど大きくないのでリスクは少ないかもしれないが、3kW の充電を実現するには 27A の充電電流が必要で、保証電流とは大きく乖離し、安全面を含め充電時の電池動作は予測ができない。したがって急速充電が可能なセルを使用し別途組電池を製作し評価する取り組みを行うこととした。

A-1 急速充電電池全体構成および仕様

既存電池と急速充電対応電池の仕様の比較を表 3.4-14 に示す。既存電池では充電は C 換算で 0.138C までしか充電できなかったが、新規に製作する急速充電電池はセルの条件が異なり 2C までの充電が可能で、計算では最大 3444W までの充電対応が可能である。

表 3.4-14 電池仕様の比較

項目	Tuna-Sand Battery:1個	Tuna-Sand Battery: 4直2並列の場合			急速充電バッテリー
電池容量[Ah]	26.82	53.64	53.64	53.64	15
直列セル数	7	28	28	28	28
充電電流[A]	3.7	7.4	10	27	30
C換算	0.138	0.138	0.186	0.503	2.000
電力[W]※1	95.83	766.64	1036	2797.2	3108
電力[W](max)※2	106.19	849.52	1148	3099.6	3444
満充電までの時間※3	7.25	7.25	5.36	1.99	0.50
備考	規格最大	規格最大	実測2h 確認済	3KW条件	最大条件

※1：セル電圧3.7V

※2：セル電圧4.1V

※3：電圧上昇が直線（線形）と仮定。実際には満充電近くなると線形ではなくなるので実際の充電時間はこの時間より多くなる。

急速充電電池の内部構成図を図 3.4-84 に示す。BMS は Battery Monitor System の略である。図中の説明は以下の通りである。

- ①DC リレー：ギガバック社の GX14BAB 12V 駆動、（補助接点付き）
 - ②電流センサ：ホール素子型とシャント抵抗の 2 系統を設置し BMS 側ではホール素子の値を使用。シャント抵抗はデータロガーで計測できるように設置
 - ③絶縁劣化センサ：プロトラッド社の絶縁センサ
 - ④ノイズフィルタ：TDK ラムダ RSAN 2050
- ヒューズ：50A の速断ヒューズ

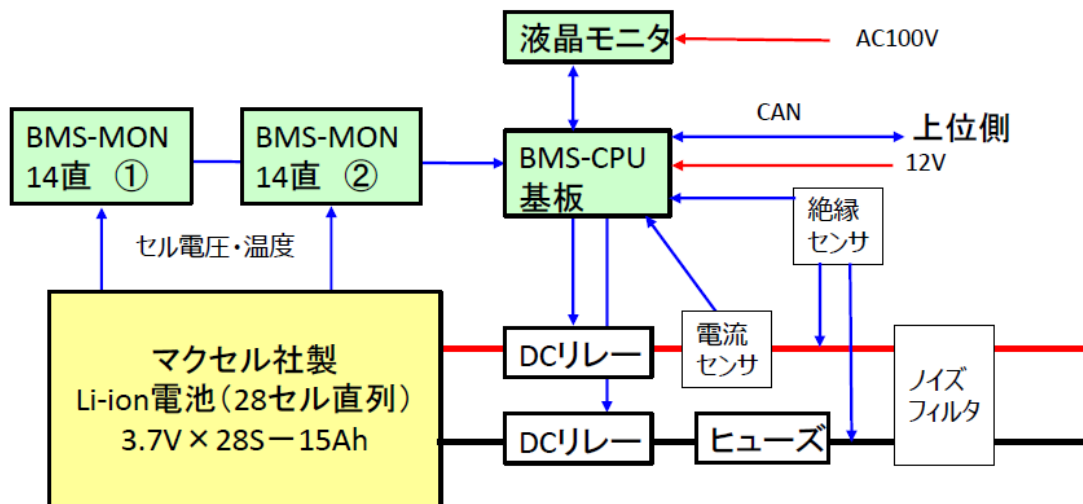


図 3.4-84 急速充電電池構成図

急速充電電池筐体の写真を図 3.4-85 に示す。筐体のサイズは 540×320×160mm である。

この電池開発を進めていた時点では AUV 内部の配線や構造の最終形態が不明確で、AUV 内部に搭載できる形態での電池設計を行うことが困難であった。よってまず筐体に収めた形で単体評価を実施し AUV 搭載の検討を行うことにした。

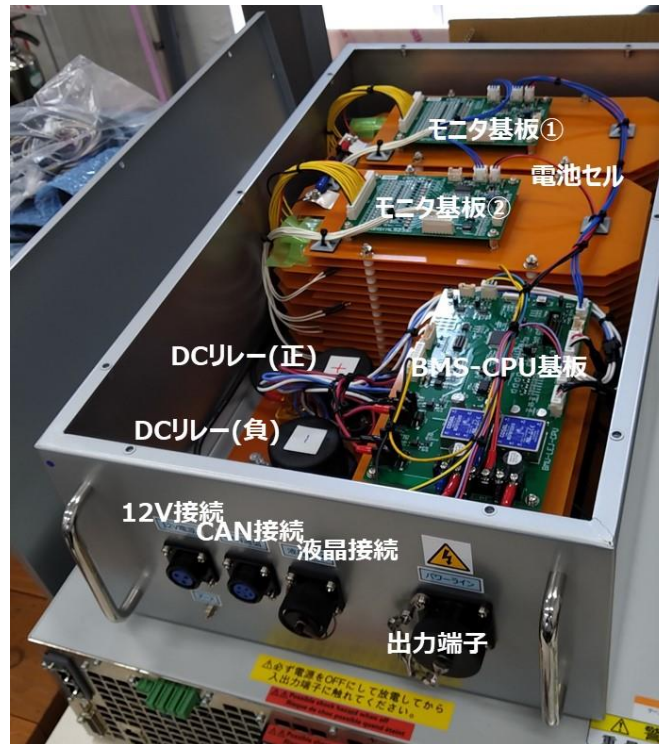


図 3.4-85 急速充電対応電池

A-2 充電実測単体評価

急速充電電池の充電試験を AUV に接続される形ではなく電池単体での構成で評価を実施した。接続構成を図 3.4-86 に示す。充電回路は AUV に搭載されているものと同じの回路構成の基板を使用した。

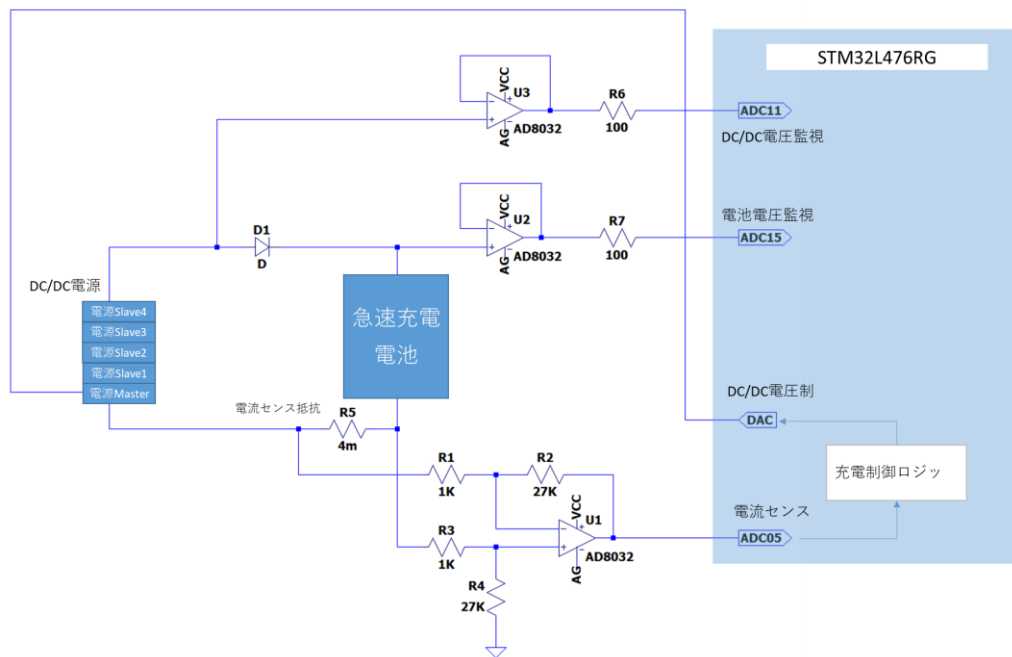


図 3.4-86 急速充電評価回路

実測結果を図 3.4-87 に示す。ここでは 20A の定電流 (CC) 充電で、電圧 116V で充電停止するものとした。充電電流を停止すると電池内部抵抗分の電圧降下の影響で約 4V 電位が低下しているが、20A の CC 充電なので約 0.2Ω の直流抵抗となる。セルの ACR が $2m\Omega$ 、DCR を $4m\Omega$ と考えると 28 直列なので $112m\Omega$ 、ヒューズおよびリレーや配線抵抗を考えると、約 0.2Ω の内部抵抗は妥当な値と考えられる。

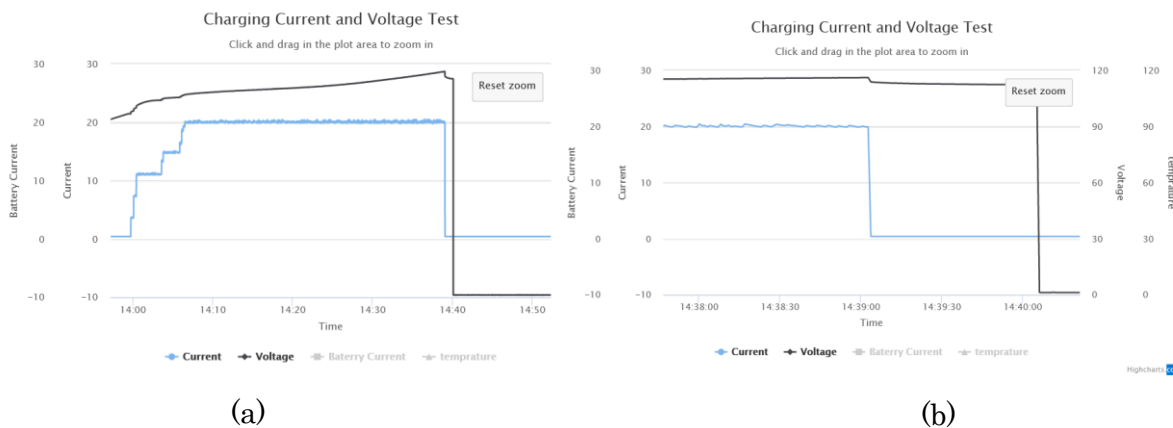


図 3.4-87 (a)急速充電電池充電特性、(b)充電停止部拡大

充電開始時と充電停止時の電池液晶モニタの電池ステータス表示を図 3.4-88 に示す。充電後の SOC の値は 91.8%となっているがこれをさらに 100%近づけるためには、CC-CV 充電のような仕組みが必要である。しかし近年満充電に近い充電を行うと発火などの事故につながるリスクが高まることが分かってきたので、満充電の手前で充電を停止することが

推奨されており、CC 充電で規定の電圧（116V）で停止する制御方式とした。

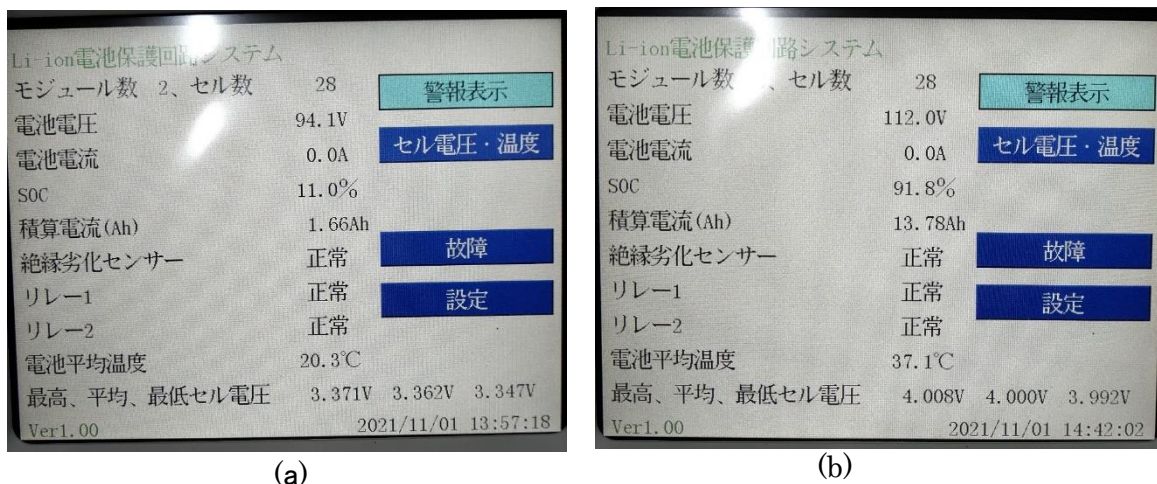


図 3.4-88 充電ステータス (a)充電開始時、(b)充電停止

以上のように単体評価では問題なく最大で $20 \times 116 = 2.32\text{kW}$ で充電制御装置が機能して充電できることが確認できた。

A-3 AUV 搭載改造

AUV が完成し筐体構造の詳細が把握できるようになったため、AUV に搭載できるように電池の組み換え(再構成)を行った。

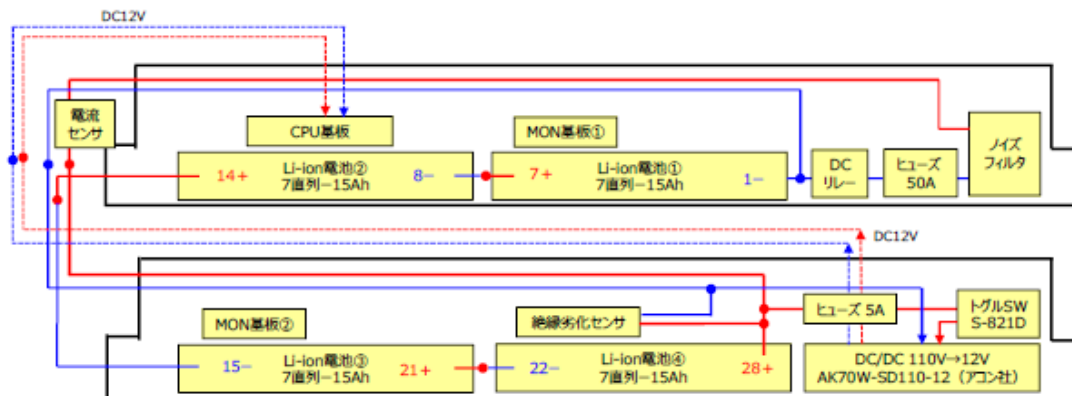
構成要素の変更点としては 1)~3) の通りである。

- 1)BMS 用の 12V 電源を外部供給でなく電池から DC/DC を介して内部供給とした
- 2)DC リレーを両極(2 個)から片極(1 個)に削減した
- 3)トグルスイッチによる電池の ON/OFF 機能を搭載した

急速充電電池の仕様を表 3.4-15 に、内部接続構成および起動方法を図 3.4-89 に示す。

表 3.4-15 急速充電電池仕様

項目	内容	備考
電池構成	28 直列-1 並列	セル：3.7V-15Ah エネート型 蓄電用、マクセル社製
公称電圧	103.6V	3.7V×28 直
電池容量	103.6V×15Ah=1.5kWh	
充電条件	114.8V で 30A 以下の CC 充電 又は CC-CV 充電	4.1V×28 直 (4.15V でも可能)
出力電流	連続：30A ピーク：45A	環境温度 0~40℃ 使用ケーブル AWG #10 (5.5SQ)
外形寸法	818×109×87h mm 2 個	アルミレールまでの形状
重量	未計測	
冷却	特に考慮せず	
防水	防水仕様では無い	必要に応じて、テープ等でシールを お願いします。
耐震性能	評価せず	
絶縁セパ	あり	IR155-3204 (BENDER 社)
平準化機能	あり	MON 基板に放電抵抗 150Ωを搭載
ノイズフィルタ	あり	NBH-30-432 (コーセル社製)
保護回路	BMS 搭載	詳細は表 1-2 に記載
外部通信	CAN	詳細は CAN 通信に記載
制御電源	DC12V (消費電流は 1.0A)	総電圧から DC/DC により 12V を提供 AK70W-SD110-12 (アコン社製)
遮断回路	DC コタカタ (一側)	G9EA-1-B (オムロン製)
	溶断 (速断) ヒューズ	350GH-50UL (日の出電機製作所)



パワーライン：KIV 3.5SQ (AWG #12)
 DC12Vライン：UL1015 0.75SQ (AWG #18)
 DCリレー：DCパワーリレー-G9EA-1-B DC12 (オムロン社製)
 ヒューズ：350GH-50UL (日の出電機社製)
 ノイズフィルタ：NBH-30-432 (コーセル社製)

- 起動方法**
- 1) トグルSWをONすると、Li-ion電池のDC100VがDC/DCに流れて、DC12Vを出力し、CPU基板へ
 - 2) CPU基板で各セル電圧に異常がなければDCリレーがONされて、充電や放電が可能となる。
 - 3) 各セル電圧に異常があればDCリレーがOFF
 - 4) 終了はトグルSWをOFF

図 3.4-89 急速充電電池内部接続図および起動方法

また電池の幅が従来の電池に比べ幅広になったため、AUV 内部の樹脂製の電池ガイドレールを再製作した。電池ガイドレールの図面は図 3.4-90 に示す。

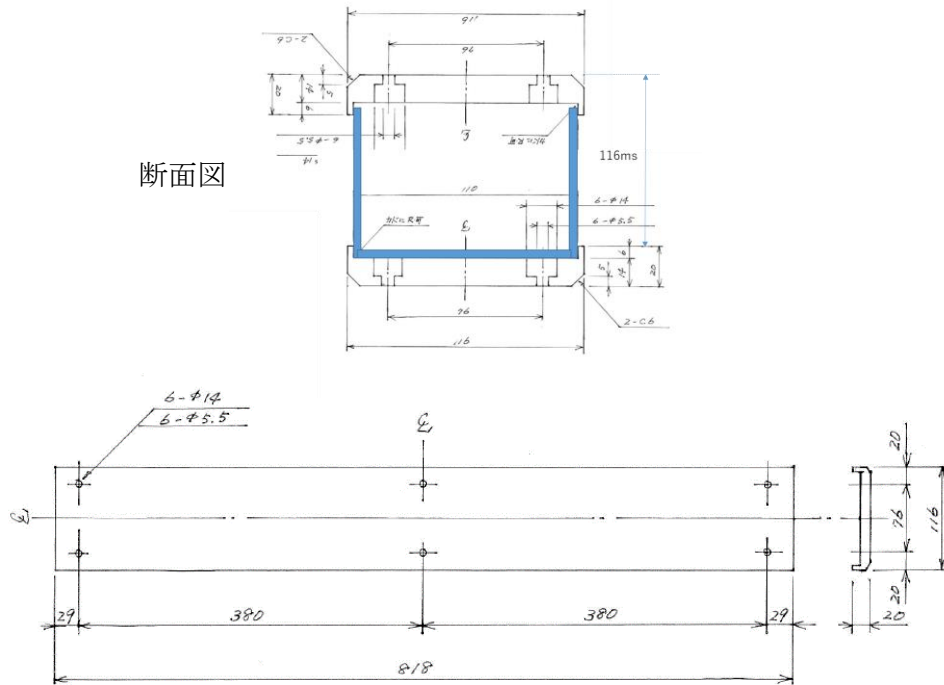


図 3.4-90 電池ガイドレール部図面

急速充電電池を実際の AUV に組み入れた写真を図 3.4-91 に示す。



図 3.4-91 急速充電電池 AUV 搭載写真

3.4.1.6.4. 送電制御システム

AUV の電池充電を行うに際して効率の良いシステムを実現するには受電電力に応じた送電側の電力制御を行う必要がある。送電器の電圧を上げて受電側で電力を抑えてしまっただけでは効率の良い電力の使い方ではないことは言うまでもないが、本電力伝送システムの場合充電電流が停止した状態では受電側のインピーダンスが増大し、大きな送信電圧がかかった状態では受電側のコイル電圧が上昇し、DC/DC 電源の許容最大電圧 370V を超えて破壊されてしまうという問題がある。こういった問題に対処することからも電力を段階的に調整する送電制御の仕組みが必要である。

基本的に充電時は充電電流を段階的に上昇させるのに同期しながら送信電圧を上昇させ、充電停止の時は充電電流を段階的に下降させるのに同期しながら送信電圧を下降させる。

また意図しない電流停止発生時にも先に述べた理由で受電側の急激な電圧上昇が発生するため、電流停止を検出した場合速やかに送電側の出力を低下させる仕組みも必要である。

A 送電制御システム

A-1 構成図

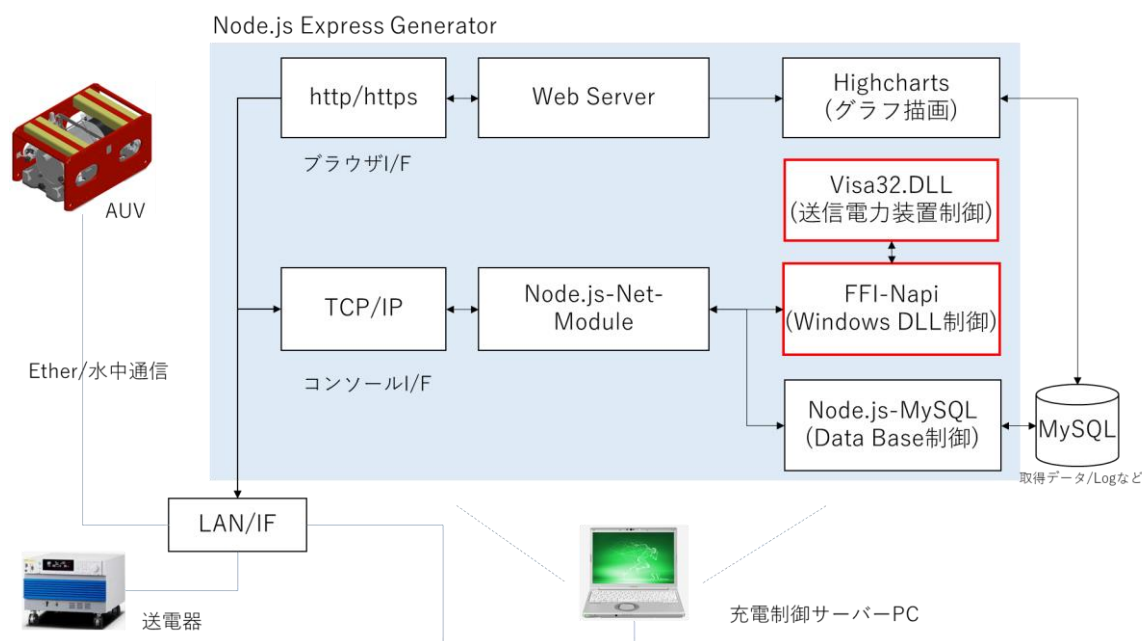


図 3.4-92 送電制御システム構成図

送電制御システムの構成図を図 3.4-92 に示す。AUV と充電制御サーバーPC との通信は、図 3.4-64、図 3.4-65 で示すように有線または無線の Ether ベースの通信で構成されている。

充電制御サーバーPCはNode.jsベースで構築しており、Webサーバー機能とネットサーバー機能を有している。Webサーバー機能でクライアント端末からのアクセスとデータベースに蓄積されたデータの描画等を行い、他方ネットサーバー機能でAUV内の充電装置との通信、データベースへのデータアクセスなどを行う。

送電制御は通信機を制御する標準的なI/FであるVISAを使用している。ただしNode.jsからVISAを直接動作させるスキームが無いのでVisa32.DLLというVisaのダイナミックライブラリをFFI-napiを介して動作させることにより実現している。FFI-napiはC++など作成されたダイナミックリンクライブラリを実行させることができるNode.jsのモジュールである。

A-2 通信速度条件

eth-ua7の通信速度は最大460kbpsであるが、UART側の速度は115.2kbpsとしている。したがって通信速度条件は充電制御サーバーPCの通信が維持される最低条件として115.2kbps以上の帯域を確保することとする。

A-3 送電制御処理の概要

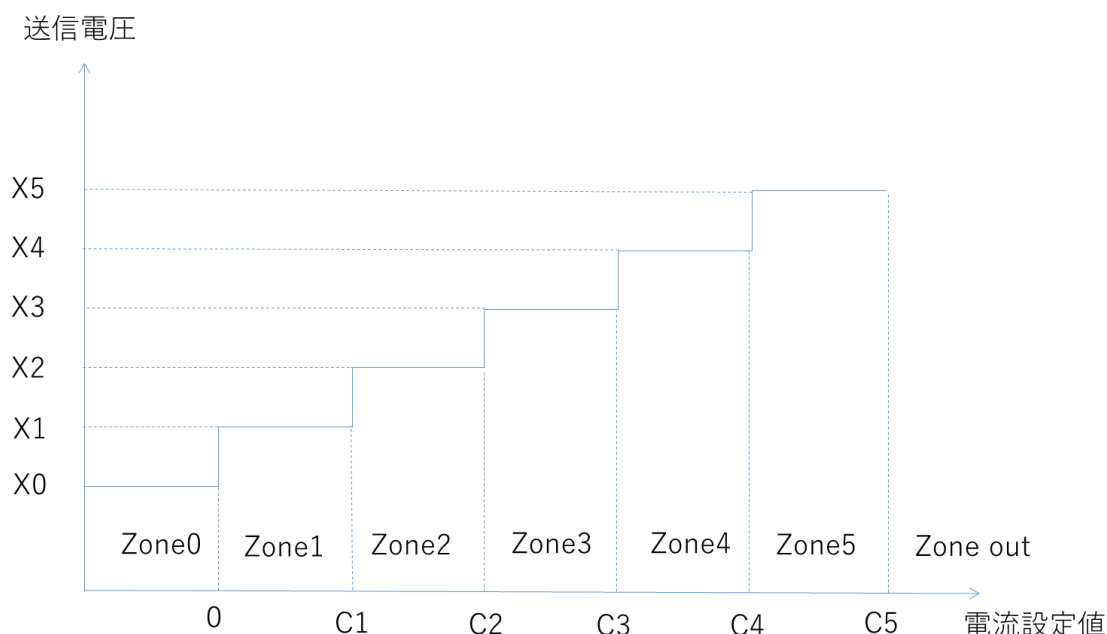


図 3.4-93 電流設定値と送信電圧の関係

今回の送電制御は充電電流設定値に応じて送信電圧を変更するシステムである。電流設定値と送信電圧値の関係を図 3.4-93 に示す。Zone0 は電流設定値 0、Zone1 は電流設定値 0～C1 (Zone2 以降も同様) を表す。

基本的に電流設定値により Zone が設定され、それに応じた送信電圧 (X0～X5) が決定

される。電流設定の変更により Zone を遷移するとき電圧設定値が変更される仕組みであるが Zone を跨ぐ遷移 (Zone1 から Zone3 に遷移するなど) は電圧変位が大きくなるため安全上許可しない作りとしている。ただし Zone0 に遷移する場合は電流停止条件なので Zone を跨ぐ遷移を許可しているが、正常系では基本的に Zone を連続的 (段階的に) に変化させることを前提としている。

次に電流・電圧の制御方法であるが、電流が増加方向に遷移する場合は送信電圧を先に増加してから電流値を変更設定し、電流が減少方向に遷移する場合は電流値を先に変更してから送信電圧を変更設定する。

電流が増加方向に遷移する場合、電圧を増加する前に電流を増加してしまうと所定の送信パワーに電圧が足りず電源が落ちてしまう。同様に電流が減少方向に遷移する場合、電流減少前に電圧を減少させてしまうと同様に送信側のパワーが足りず電源が落ちてしまう。よってこれらの挙動が発生しないようにする必要がある。

次に充電装置、充電制御サーバー、送電器 (ここでは交流安定化電源) とのあいだでどのような通信のやりとりで送電制御が行われるかを述べる。

図 3.4-94 は電流を増加し電力が上昇方向に遷移する時の送電制御ダイアグラムである。

充電制御サーバーから充電設定値 (電流値) が入力されると充電装置側にその情報が送信され、その時の target_value を更新したのちの状態遷移表から送信電圧を変更するかどうか判断し、電圧変更コマンドを充電制御サーバーに送信する。状態遷移表など詳細の処理については C 章で述べる。

充電制御サーバーは電圧変更コマンドを受信後 VISA コマンドに変換して送電器側コマンドを送付しクエリーとコマンド応答の一致の可否を充電装置側に送付し、設定 OK の場合指定時間 (x 秒) 経過後 target_value を更新し、充電電流を更新する。



図 3.4-94 送電制御ダイアグラム(上昇方向)

図 3.4-95 は電流を減少し電力が下降方向に遷移するときの送電制御ダイアグラムである。この場合は充電電流設定値(電流値)が入力されると充電装置側では先に状態遷移表の判断処理を行ってから target_value を new_target_value に更新する。その後 x 秒経過したかを判断してから電圧変更コマンド通知を充電制御サーバー側に送信する。

充電制御サーバーは電圧変更コマンドを受けて Visa のコマンドに変換し送信器側に電圧変更の Visa コマンドを送信する。

なお赤枠内のクエリーが NG の場合の再送処理は現状実装していない。



図 3.4-95 送電制御ダイアグラム(下降方向)

A-4 送電制御処理の詳細

全体処理の中での送電制御部のフローチャートを図 3.4-96 に示す。充電制御処理は基本的にタイマ処理の中で行われるが、この処理の最初の部分で電流の target_value を設定する処理があり、この値の更新処理の中で送電制御を実現している。なお図中の逐次比較処理は電流を一定にするための充電制御の処理で図 3.4-75 に記載した処理である。

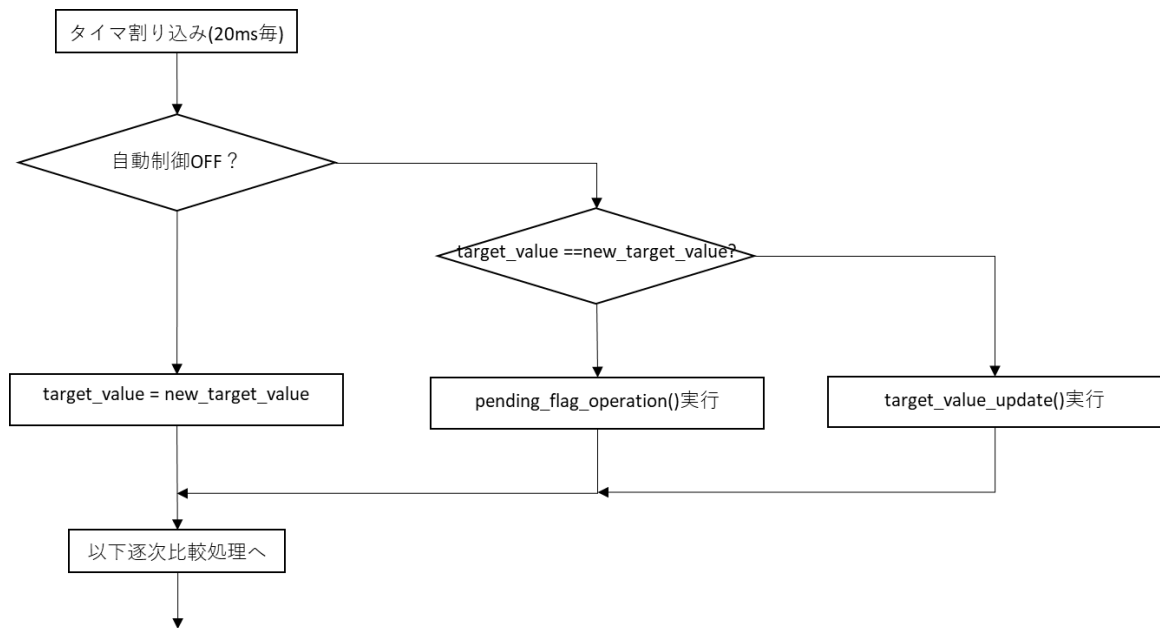


図 3.4-96 送電制御部フローチャート

自動制御が有効な場合は `target_value`、すなわち電流値が更新されたか否かで処理を分岐している。`target_value` が更新されている場合は、`target_value_update` 処理を実行し `target_value` が更新されていない場合は `pending_flag_operation` を実行する。それぞれの処理の説明図として `target_value_update` は図 3.4-97、`pending_flag_operation` は図 3.4-98 に示す。基本的に電流値が更新された場合は `target_value_update` 処理の中で状態遷移表に従った処理が動く。

ここで電流が下降方向に遷移した場合は電圧の変更は電流設定から一定時間経過後に実行される必要があるため `pending_flag` をセットし電圧の変更処理を保留する。次回以降の割り込み処理では `target_value` が更新されているため、基本的に `target_value_update` の処理は行われず `pending_flag_operation` の処理の中で電圧が変更されることになる。

他方電流が情報方向に遷移した場合 `pending_flag` はセットされず `target_value_update` 処理のなかで直ちに電圧が変更され `target_value` 値は一定時間経過しないと更新されない作りとしている。なお `target_value` の更新処理は `target_value_update` 処理の中で行われ割り込みカウンタを管理することにより判断している。

target_value	new_target_value						
	Zone 0	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	Zone5	Zone out
Zone 0 target_value = 0	target_value = new_target_value	target_value = new_target_value	target_value = new_target_value	target_value = new_target_value	target_value = new_target_value	target_value = new_target_value	無効操作 new_target_value = target_value
Zone1 C1 ≧ target_value > 0	送電機器電圧X0設定 送電機器電圧X0確認 target_value=0dacc_value = 0;	target_value = new_target_value	送電機器電圧X2設定 送電機器電圧X2確認 x秒間維持 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value
Zone2 C2 ≧ target_value > C1	送電機器電圧X0設定 送電機器電圧X0確認 target_value=0dacc_value = 0;	target_value = new_target_value pending_flag = 1 set	target_value = new_target_value	送電機器電圧X3設定 送電機器電圧X3確認 x秒間維持 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value
Zone3 C3 ≧ target_value > C2	送電機器電圧X0設定 送電機器電圧X0確認 target_value=0dacc_value = 0;	無効操作 new_target_value = target_value	target_value = new_target_value pending_flag = 2 set	target_value = new_target_value	送電機器電圧X4設定 送電機器電圧X4確認 x秒間維持 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value
Zone4 C4 ≧ target_value > C3	送電機器電圧X0設定 送電機器電圧X0確認 target_value=0dacc_value = 0;	無効操作 new_target_value = target_value	無効操作 target_value = new_target_value	target_value = new_target_value pending_flag = 3 set	target_value = new_target_value	送電機器電圧X5設定 送電機器電圧X5確認 x秒間維持 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value
Zone5 C5 ≧ target_value > C4	送電機器電圧X0設定 送電機器電圧X0確認 target_value=0dacc_value = 0;	無効操作 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value	無効操作 new_target_value = target_value	target_value = new_target_value pending_flag = 4 set	target_value = new_target_value	無効操作 new_target_value = target_value

図 3.4-97 状態遷移図(target_value_update 処理)

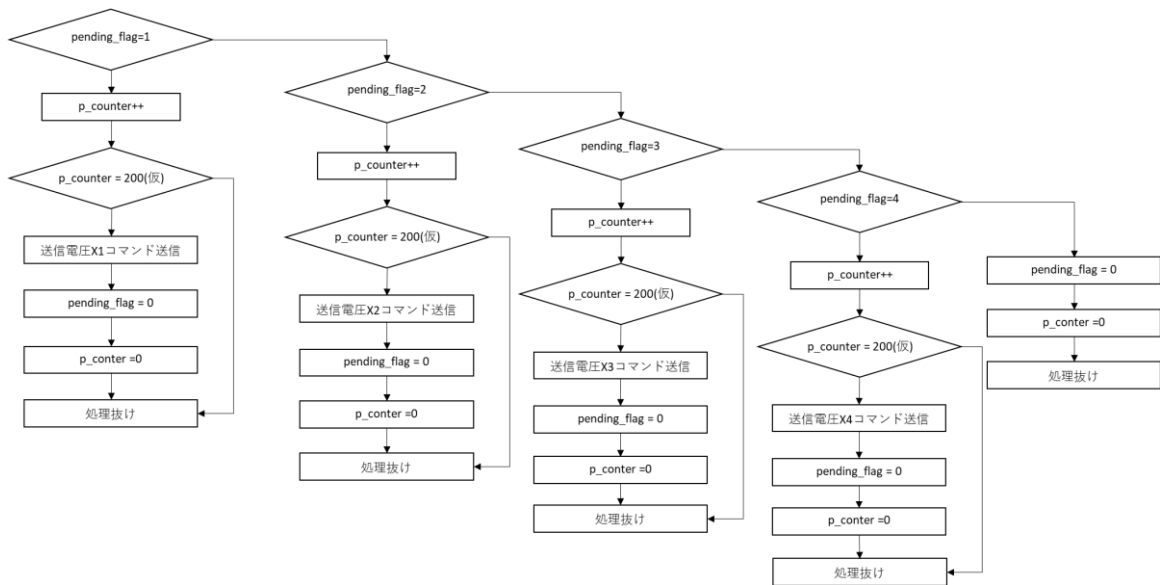


図 3.4-98 pending_flag_operation 処理フローチャート

A-5 送信電圧低下制御（異常処理系）

電流が停止した時の処理は図 3.4-97 の状態遷移図で new_target_value が Zone0 に遷移した時の処理となるが、この時は送信電圧を X0 に設定する。今回 X0 は 60V で設定しているが、DC/DC 電源を完全に落としてしまうと充電制御装置に電源が供給されず全く何も動作できないため、その電源を確保するための電圧を設定している。

またこの電流停止時の処理は、送信自動制御を働かせていない場合も安全のため動作す

A 受電 1kW ターゲット予備実験

A-1 実験構成

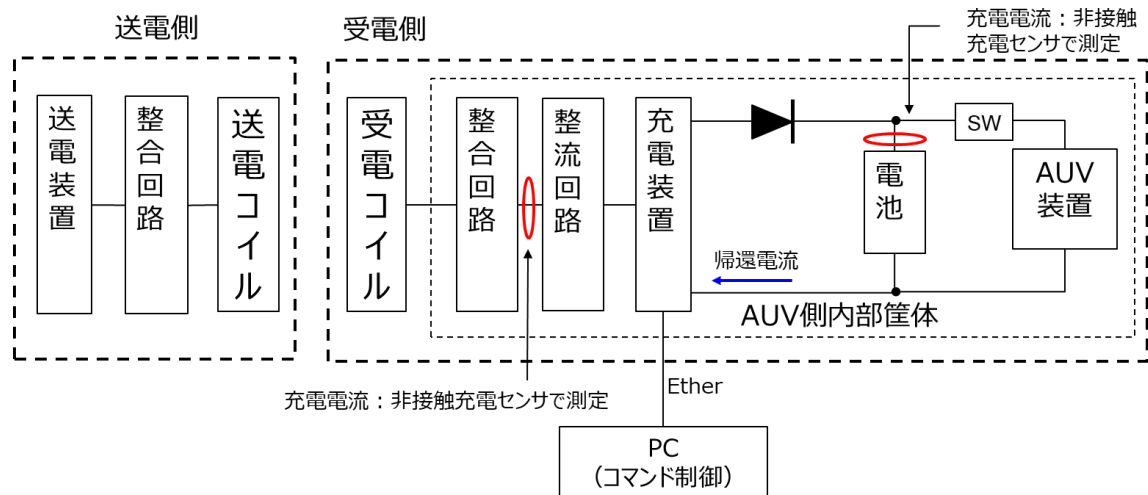


図 3.4-100 受電 1kW ターゲット予備実験構成

受電 1kW ターゲット実験の実験系の構成図を図 3.4-100 に示す。給電系の構成は基本的にはコイル間の結合が海水か空間の違いだけで、その他の条件は海中実験と同じ条件で実施した。ただし Ether を介した制御は実施しているが船上局を経由しての Ether 通信に関してはここでは対応していない。

充電時も基本的に AUV 装置のオペレーションが必要なので AUV が ON の状態で充電は行われるが、この時は AUV 側の消費電力が発生し、その分供給した電力が電池側に充電されないことになる。AUV 側の消費電力は充電器の挙動に無関係なので、充電器側の電力は基本的に (充電電力) + (AUV アイドル電力) として受電電力を評価する。

なお整合条件は 3.3.7.3.1 で述べたものと同じである。

A-2 充電特性

送信電圧 120V の時の AUV ON および OFF 時の充電特性を図 3.4-101 に送信電圧 100V および 140V の時の充電特性を図 3.4-102 に示す。AUV ON の場合約 800mA のアイドル電流が流れるため、この分電池に充電される電流が減少するが、全体の電流は一定に保たれる制御がなされ、充電装置が正しく機能していることが分かる。

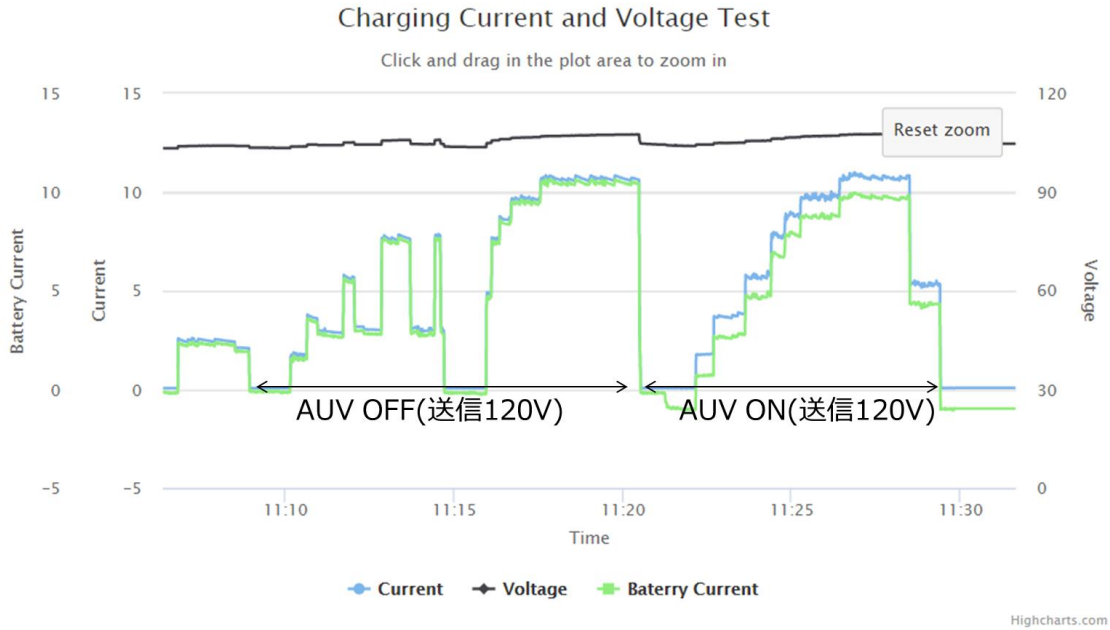


図 3.4-101 充電特性 1(AUV ON/OFF)

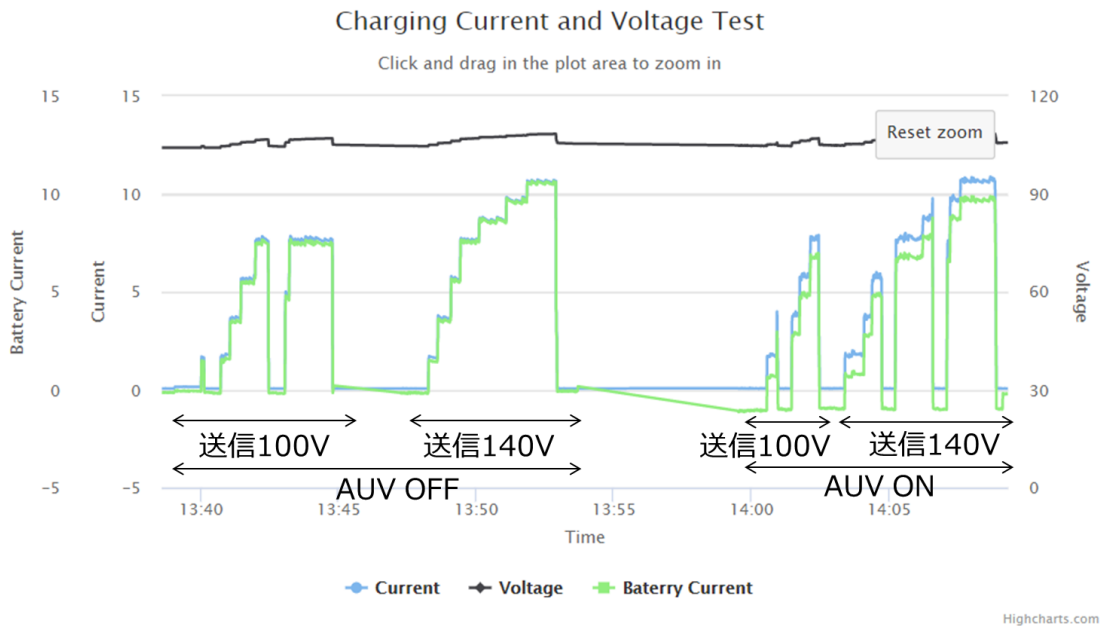


図 3.4-102 充電特性 2 (AUV ON/OFF)

A-3 送受電特性

送信電圧が 100V、120V、および 140V の特性をそれぞれ図 3.4-103、図 3.4-104、および図 3.4-105 に示す。ここでの実験結果は AUV 装置を ON にした状態で実施したものである。このグラフの効率 A は充電装置の 1 次側/2 次側間の伝送効率、効率 B は送電器から充電装置までの end-end の効率、効率 C はコイル伝送間の効率を示す。

1kW をターゲットとした場合送信電圧が 100V では電流を 8A 程度までしか引けないが

ここで特性把握のために測定を実施している。

送信電圧 120V と 140V の時を比較すると伝送効率は送信電圧 120V の時の方が若干良い。これはターゲットとする電力が 140V の時は 1kW よりも大きいところで伝送効率が最大になるためなので、1kW ターゲット試験では送信電圧 120V の方が適当であると言える。

但しどの条件の試験でも効率 A に相当する充電装置の 1 次側/2 次側間の伝送効率が高く 1 に近い値を示しているケースもある。DC/DC コンバータのスペックでは入力電圧条件にもよるが最大効率 91-93% となっているため、このときは実際以上に高く計測されている可能性もある。

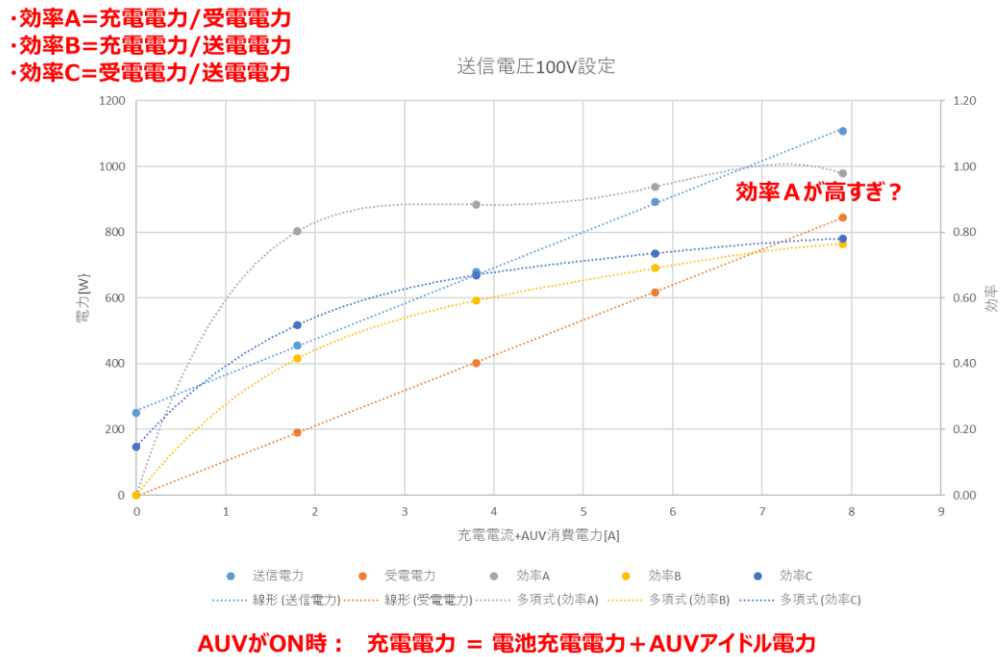


図 3.4-103 送信電圧 100V 送受電特性

- ・効率A=充電電力/受電電力
- ・効率B=充電電力/送電電力
- ・効率C=受電電力/送電電力

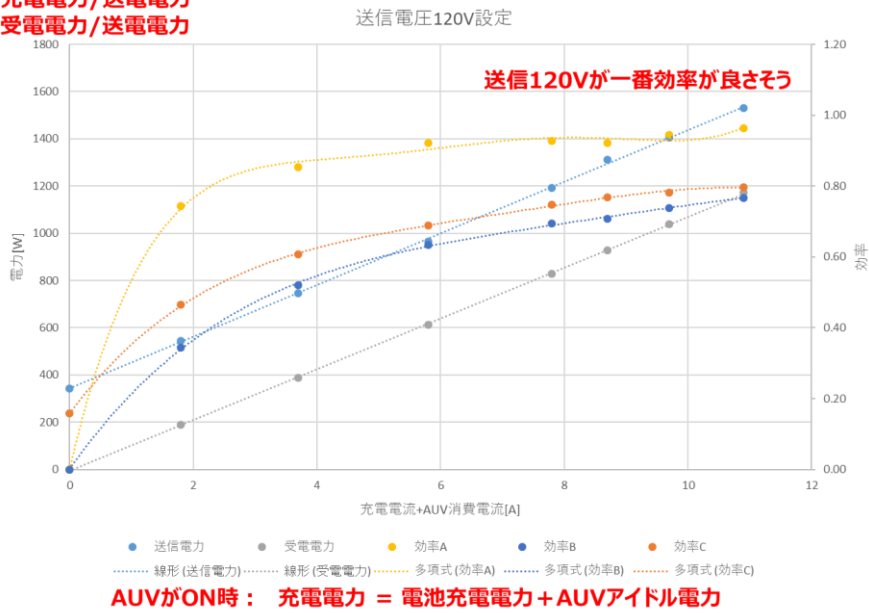


図 3.4-104 送信電圧 120V 送受電特性

- ・効率A=充電電力/受電電力
- ・効率B=充電電力/送電電力
- ・効率C=受電電力/送電電力

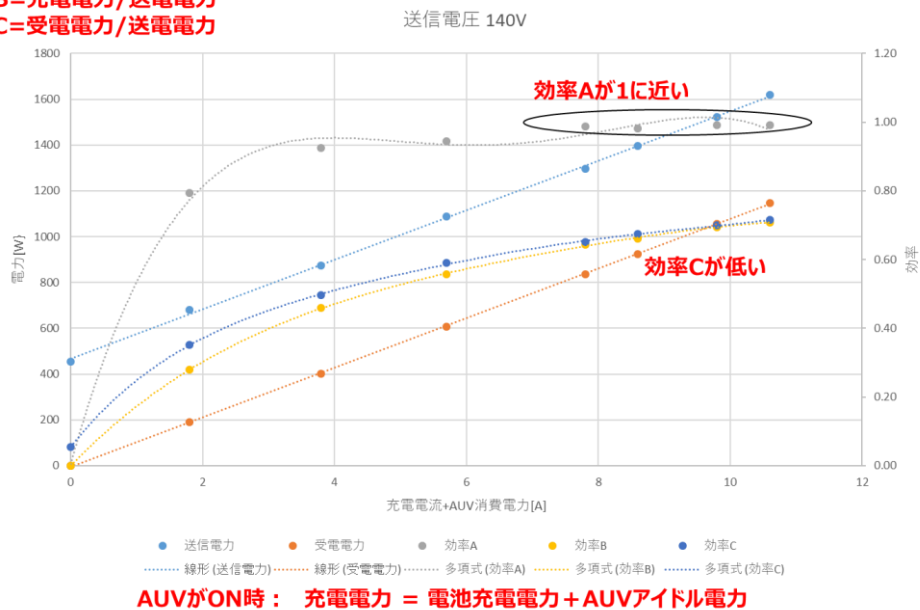


図 3.4-105 送信電圧 140V 送受電特性

A-4 整流電圧について

整流電圧については充電装置の1次側に印加される電圧になるため、装置の制約で370V以下に抑える必要がある。図 3.4-106 に整合回路を反映したシミュレーション回路図、図 3.4-107 に整流電圧の検討図を示す。

基本的に充電回路に電流が流れていないときは負荷側のインピーダンスが高くなるため負荷オープンに近い条件となり、他方電流が流れだすとインピーダンスが下がり整合条件に近い条件に近づく。

図 3.4-107 に示す検討図では電流 0 A の時の整流電圧が負荷オープンのシミュレーション結果より 50V 以上低い。また電流増加に伴い電圧低下し整合条件に近づいているが、変化量が小さいという結果になっている。傾向としてはシミュレーションに近づいているが実際の現象とはやや乖離があるので、シミュレーションモデルは海中での実験結果を踏まえより現実に近いモデルに近づけていく必要があると考えられる。

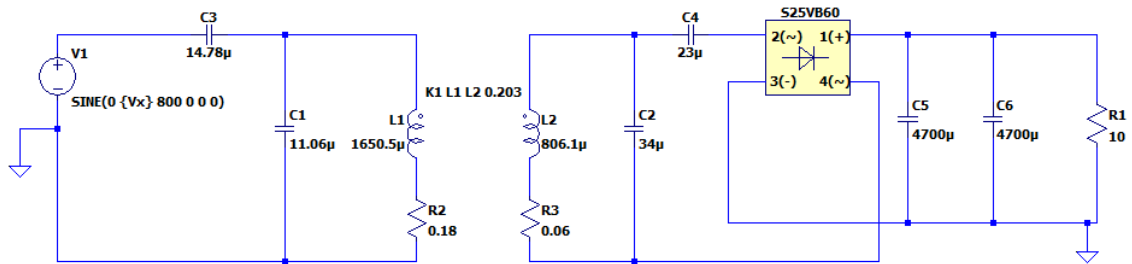


図 3.4-106 シミュレーション回路

送信電圧—整流電圧 (測定およびシミュレーション)

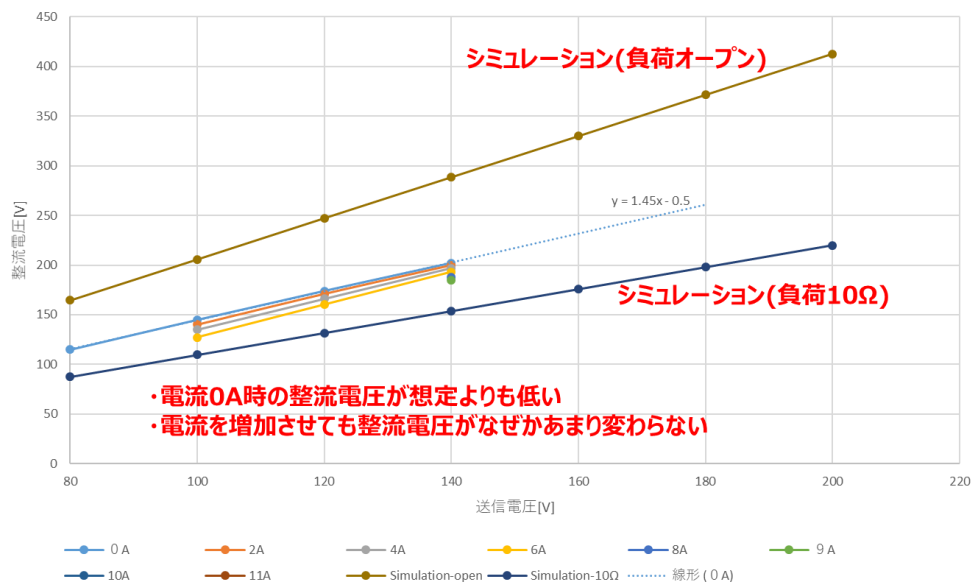


図 3.4-107 整流電圧検討図

B 受電 3kW ターゲット予備実験

B-1 実験構成

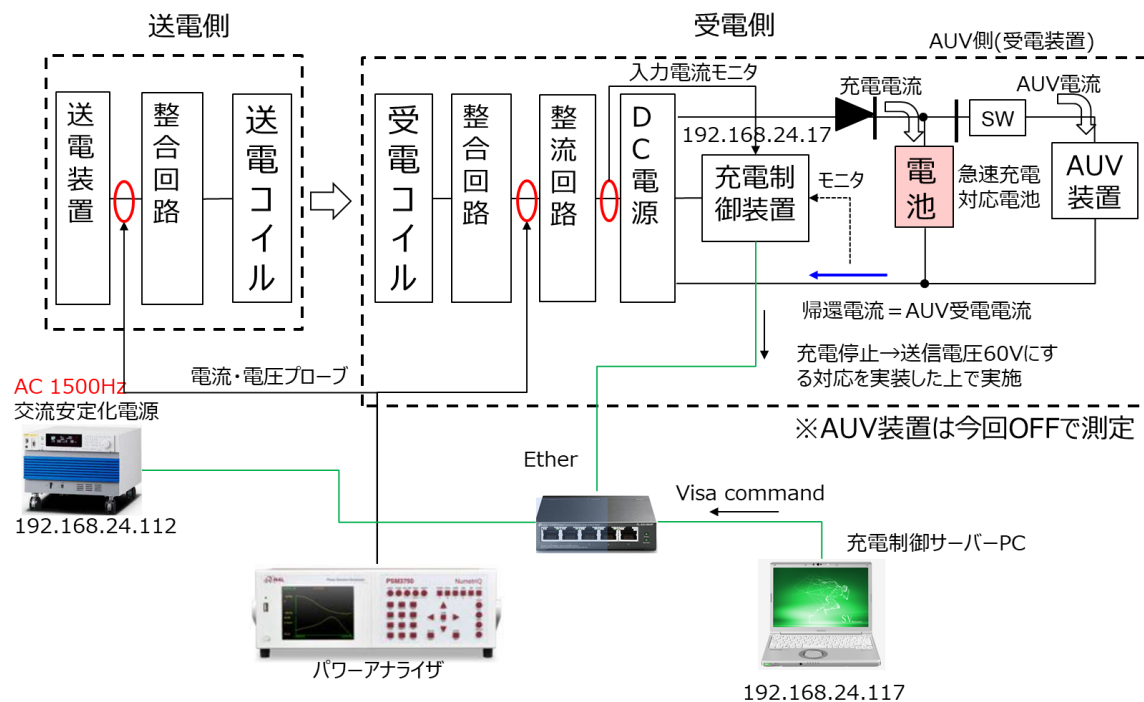


図 3.4-108 受電 3kW ターゲット予備実験構成

実験構成を図 3.4-108 に示す。受電 3kW ターゲット予備試験では電池に急速充電電池を使用し、交流安定化電源も充電制御サーバーPC に接続し異常発生時に送信電圧を下げる仕組みも対応している。電池に関してはこの時はまだ AUV への組み入れが完成しておらず、AUV の外側に置いた状態で実験を行った。またここでは送受電特性や充電装置、電池などの機能を把握することを主眼とするため、AUV 装置は OFF で測定を行った。

B-2 充電特性

充電特性を図 3.4-109 に示す。電流は段階的に上昇および下降させている。また AVU は OFF なので電池への充電電流と全体の電流が一致している。電力は電流設定切り替え時にコマンド送信データを更新しているので、切り替えの境界での電力変化は無視してよい。このデータをもとに送受電特性としてまとめたものを次章に示す。

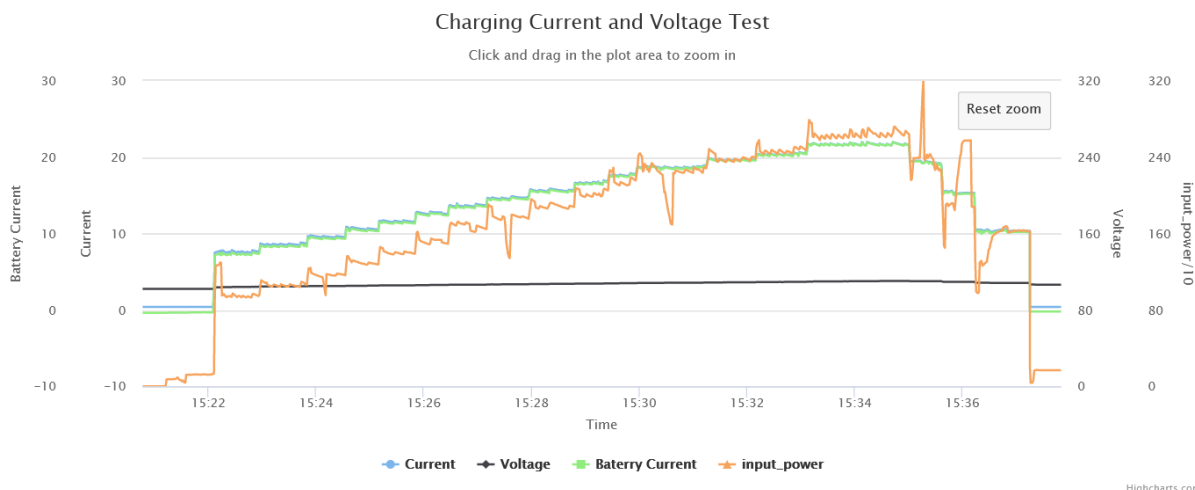


図 3.4-109 充電特性(受電 3kW ターゲット予備試験)

B-3 送受電特性

前章に記載したように送信電圧を 160V、180V、200V、220V と段階的に上昇させながら電流を増加させ 2.5kW までの充電確認を行った。図 3.4-110 に送受電特性の結果を記載する。

実験ではコイル間の伝送特性に相当する効率 C は 0.85~0.88 と比較的高い実測値となった。受電 1kW ターゲット時とは使用周波数、整合条件等異なるが、空間でこの程度の実測値が得られれば海中では 0.8 程度のコイル間伝送効率は期待できる。

また受電電力を従来のパワーアナライザでの測定と今回対応した受電電力モニタ I/F (拡張 UART) を使用した測定結果を比較すると、線形的な相関関係が得られた。今回の結果からは受電電力モニタ I/F を使用した場合パワーアナライザの実測に比較して+50W 程度のオフセットがある関係と考えて差し支えないと考えられる。ただしパワーアナライザのデータも効率計算で 1 を超えるなど原因のはっきりしない問題もあるため、実験結果は両者の値の考慮しながら考察することしたい。

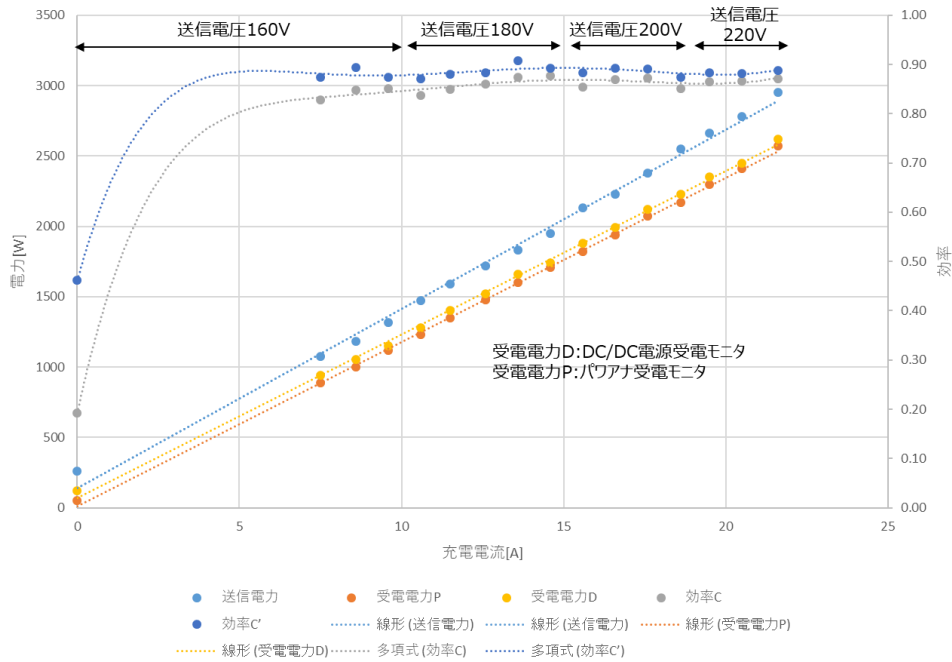


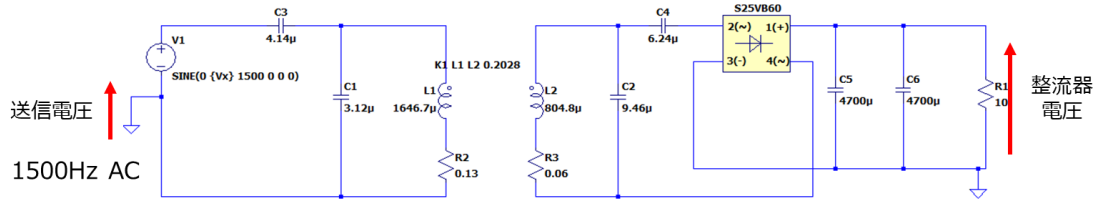
図 3.4-110 送受電特性(受電 3kW ターゲット予備試験)

B-4 整流電圧について考察・検討

整流電圧とそのシミュレーション結果は、図 3.4-111 に示す通りである。負荷 Open のシミュレーション結果と充電電流 0 A の実測値はほぼ平行直線の関係となっており、受電 1kW ターゲット試験のシミュレーション結果よりも実測に近い関係を示している。受電 1kW ターゲット試験とは使用周波数と整合回路が異なるが、この条件でのシミュレーションの方が実測に近い値を示している理由はまだはっきりしていない。

線形予測して受電 3kW をターゲットとして送信電圧 240V とすると、整流電圧は 480V に達する。充電により電流が流れるとインピーダンスが下がり整合条件に近づき電圧は下がるが、送信電圧を印加したまま充電電流が停止すると、充電器の耐圧(370V)を超えて破壊されるため、電流が停止した場合に自動的に送信電圧を低下させる処理の必要性がこの図からも明らかである。

充電電流と整流電圧の関係の実測値をプロットしたものが図 3.4-112 となる。充電時は電流が増加するごとに整合条件に近づくため整流電圧は低下する。特性としては予測通りではあるが、300V 近い電圧が発生しておりその制御には細心の注意が必要である。



送信電圧—整流器電圧

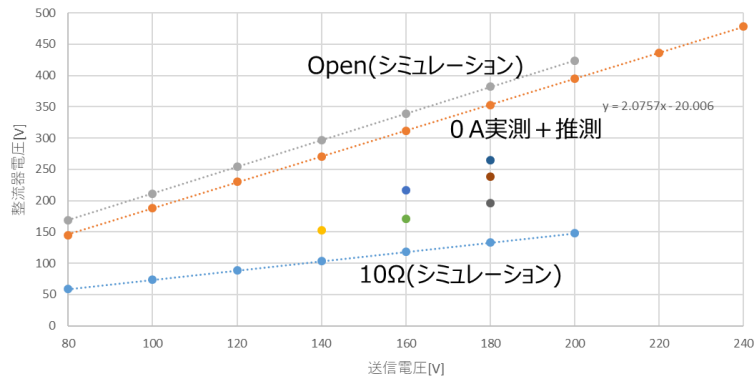


図 3.4-111 整流電圧回路図およびシミュレーション結果

送信電圧/充電電流毎の整流電圧

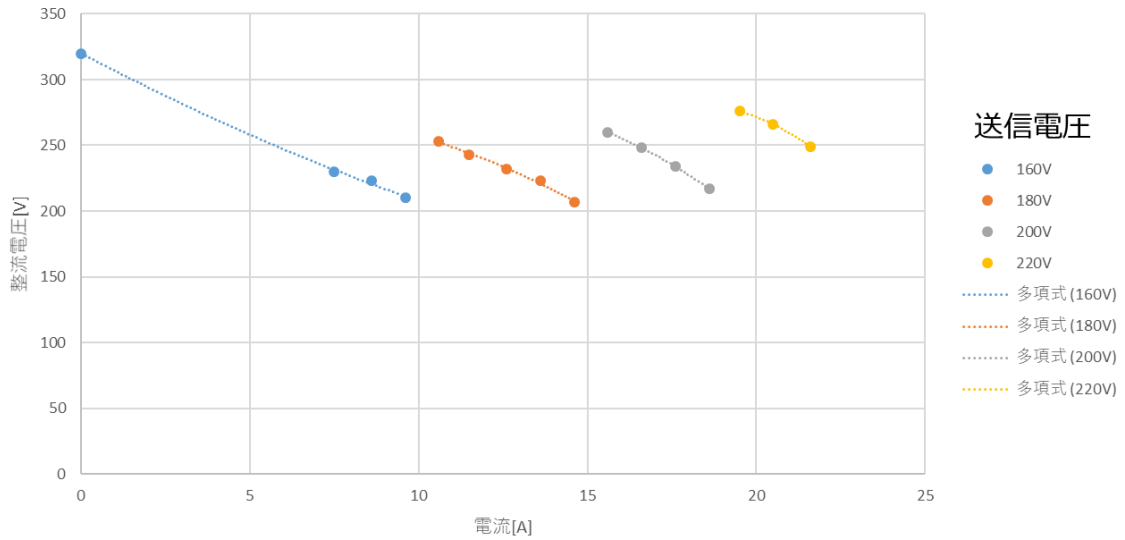


図 3.4-112 充電電流と整流電圧の関係

3.4.1.7. 送受電装置(最終形)

3.4.1.7.1. システム構成

全体システム構成の最終形を図 3.4-113 に示す。最終形では 3 次試作からパワーアナライザも含めた制御システムとなっており、送信電力と受電電力を同時にデータ処理することにより送受電の伝送効率をリアルタイムでモニタ出来るシステムとなっている。

なお使用機器の I/F 上の仕様からパワーアナライザと充電制御 PC との通信は Ether ではなく USB を使用している。また制御系の通信を水中アンテナ経由系と光ケーブル経由系とで切り替えることが可能な構成となっている。

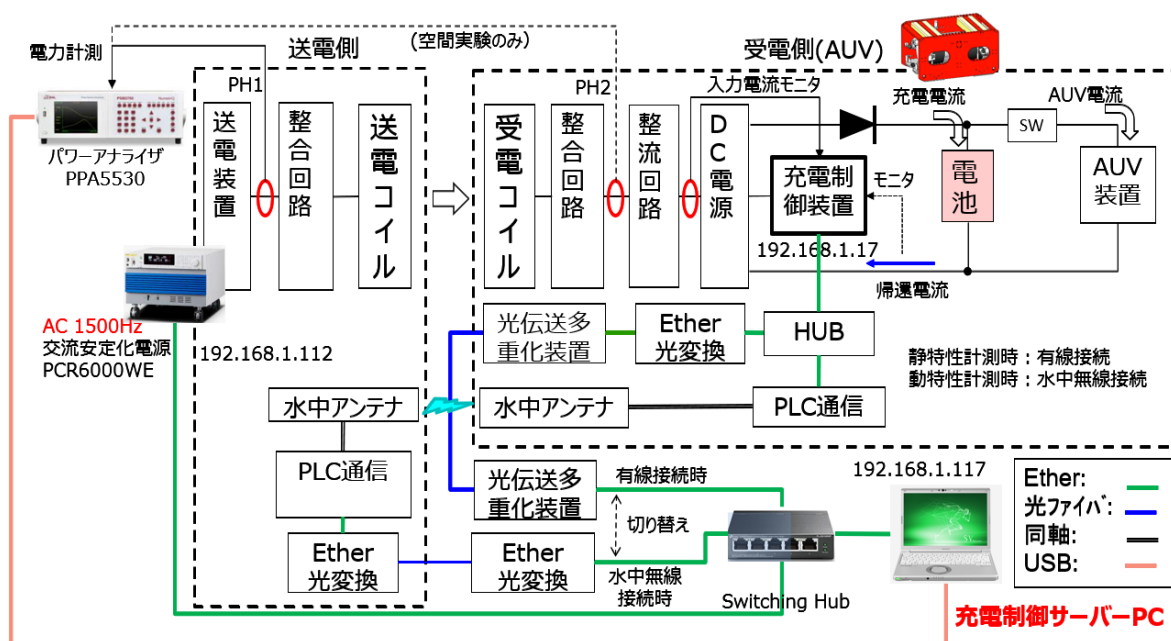


図 3.4-113 システム構成 (最終形)

3.4.1.7.2. 空間での予備実験

上記システムを利用して、実験室環境 (空間結合) で給電(充電)実験した結果を以下に示す。なお充電制御系の通信は光ケーブル経由系としている。

実験は充電電力に合わせて段階的に送信電圧を上昇させ受電電力が 3kW 付近に到達し一定時間経過後、段階的に送信電圧および充電電力を下降させながら実行した。図 3.4-114 は実測データ送信電力・受電電力の時刻遷移を表している。受電電力の最大値は約 3kW である。ここでの Receiving Power はコイルの受電電力で、充電制御システムの受電電力モニタ機能で測定した値である。Charging Power は充電電力であるが、実際に電池に充電される充電電力は Actual Power として示しておりスラスタなどの駆動系は動作させていないが

AUV のシステムが起動しているため、それらを駆動する電力が消費される分、充電電力が減少している。

図 3.4-115 は充電時それぞれの効率の時刻遷移をプロットしている。それぞれの Efficiency の定義は以下の通りである。

Efficiency 1 は (コイル受電電力/コイル送信電力)

Efficiency 2 は (充電電力/コイル送信電力)

Efficiency3 は (実際の充電電力/コイル送信電力)

また Power Factor は PPA5530 のパワーアナライザで計測された値である。ここでの Efficiency1 は海中ではなく空間の条件なので最大電力時約 89%と効率が非常に良い。

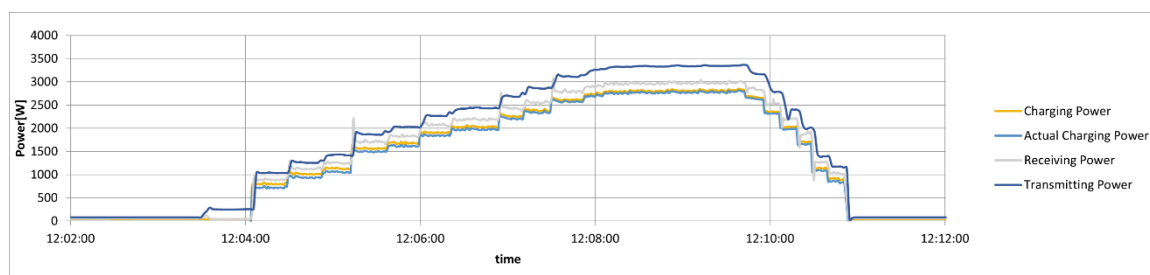


図 3.4-114 充電特性空間 (送受信電力)

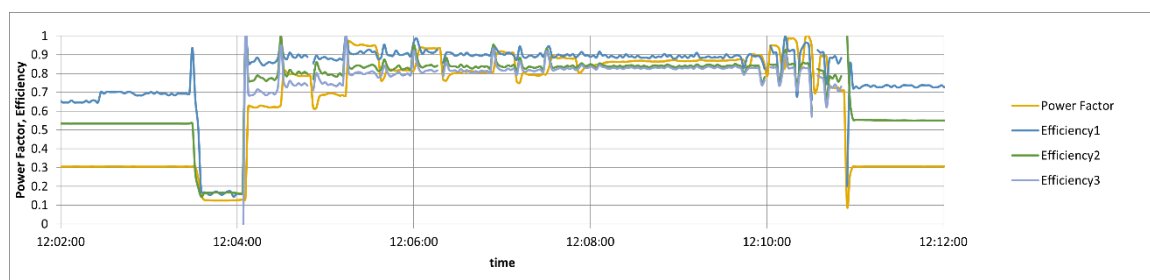


図 3.4-115 充電特性空間 (力率、効率)

次に充電電流ごとの特性を時間平均してプロットしたものを、図 3.4-116 に示す。(a)は充電電流と送受電電力の関係を示したもので、送信電圧を充電電流設定ごとに 160V から 250V に段階的に増加させている。ここでは送信電力・受電電力の関係はほぼ線形的な関係にあることが分かる。(b)は充電電流ごとの効率をプロットしているが、ここでは効率自体は電力の大小にかかわらずあまり変化はしていない。

表 3.4-16 は上記データ電力最大時の各電力、効率をまとめた結果一覧である。

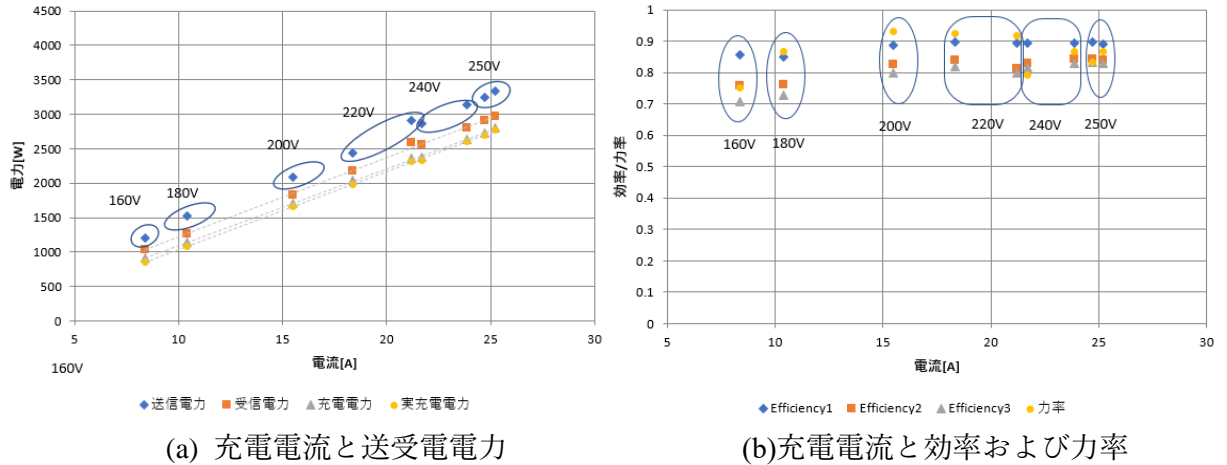


図 3.4-116 充電電流と電力・効率・力率の関係

表 3.4-16 最大電力測定時の各平均値

充電電流[A]	送信電力[W]	受信電力[W]	充電電力[W]	実際の充電電力[W]	Efficiency 1	Efficiency2	Efficiency3	力率
25.2	3336	2970	2804	2768	0.890	0.841	0.830	0.866

次に受電側の等価抵抗値の観点からデータを解析してみる。ここでの受電回路の等価抵抗値は図 3.4-117 の等価回路図において式(3.4-19)で表される。

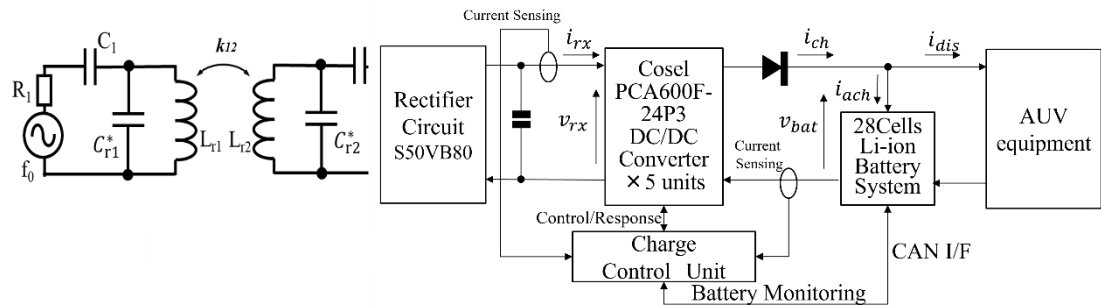


図 3.4-117 等価回路図

$$R_{eq} = \frac{v_{rx}}{i_{rx}} \quad (3.4-19)$$

測定結果をプロットしたものを図 3.4-118 に示す。測定される等価抵抗値は電力最大時に約 30Ω であるが、基本的に等価抵抗値が共振回路のターゲット抵抗値に近づくと力率が向上し効率も上昇することがこの測定結果からも示されている。

海中・実海域での結果については 3.4.3 章以降で述べるが、等価抵抗値は DC/DC 電源の 1 次側に流入する電流と電圧で定義され、2 次側の充電電流を制御することで変化する。したがってこれを共振回路のターゲット抵抗値に近づくように適切に制御し、送信電力側で力率の指標として表すことにより電力伝送を効率よく行うことが可能となる。

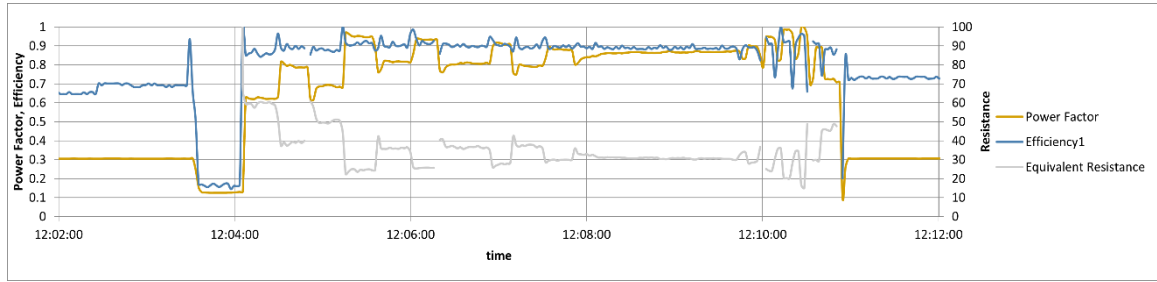


図 3.4-118 充電特性空間（力率、伝送効率、等価抵抗値）

3.4.1.7.3. 3次試作からの変更点

A パワーアナライザとの同期処理

3次試作以前は送信電力を計測するパワーアナライザと受電側の充電制御システム側のログデータはそれぞれ別々に取得していたため、データ取得後手作業でタイムスタンプの同期処理を実施していた。しかしながらそれぞれのログデータのタイムスタンプ抜けや揺らぎがあり細かい補正作業が必要で非常に労力を要するとともに、実験中にリアルタイムで送受信の正確な同期ができず伝送効率は測定器の値を目視で確認しながら概略値を把握することが限界であった。したがって実験のデモンストレーションを実施する際にも伝送効率の現在値をリアルタイムに正確に表示できないという課題を残していた。

最終形ではパワーアナライザを充電制御サーバーから visa コマンドで制御しデータベースにリアルタイムにデータを蓄積するように充電制御サーバーの内部構成を変更した。内部構成は、図 3.4-119 に示すような形とした。

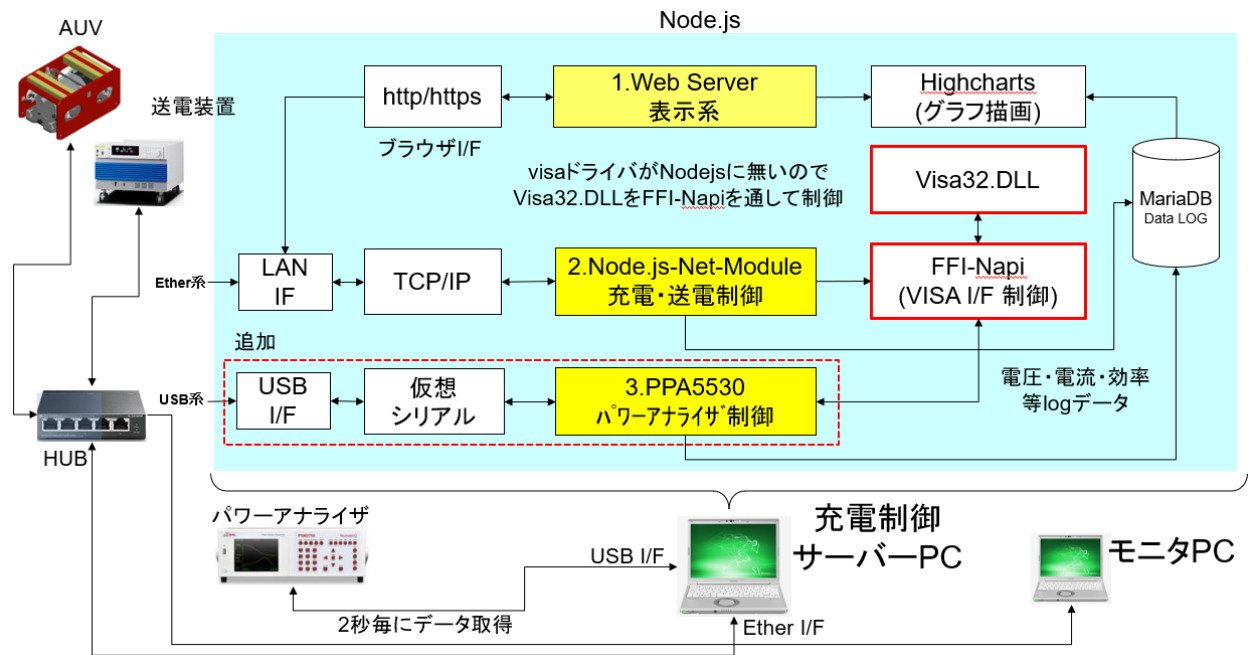


図 3.4-119 充電制御サーバー内部構成

Node.js 内部の変更点は、以下の通りである。

- 1) パワーアナライザを制御するため「3.PPA5530 パワーアナライザ制御」処理を追加し独立したスレッド処理とした。
- 2) 「1.Web Server」、「2.Node.js-Net-Module 充電・送電制御」はいままで一つのスレッド処理としていたが、表示系の大幅な改修を行うのに伴い、それぞれ別のスレッド処理に分割した。

上記の2点の取り組みを行うことにより3つの処理をそれぞれ別々のスレッドで実行できるようになり処理分散と内部構造の最適化を実現した。

B 受電電力レベルキャリブレーション機能

受電電力を把握する機能は3次試作で対応したが、非接触電流センサの出力用プリアンプのオフセット値を半固定 VR で調整していたため、機械接点が温度・湿度などの影響を受けオフセット点の変動し、その結果 AD 変換値の再現性が安定性に問題があることが実験を繰り返している中で分かってきた。

そのため、実験開始時に受電電流のキャリブレーションを行い、AD 変換値を補正する機能を実装した。

B-1 キャリブレーション方法

キャリブレーションの仕組みを ADC 値と電流値の関係式である図 3.4-120 を使って説明

する。

抵抗値の変動によりプリアンプのオフセット値は変動するが基本的にゲイン値は変動がない。よって、オフセット変動がある場合は基本的に式の切片 b が b' に変動するだけで a の傾き条件は変更しないと考える。

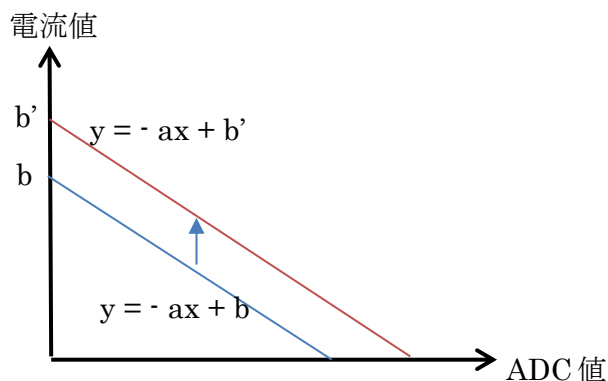


図 3.4-120 ADC-電流値特性と電流キャリブレーション

電流計測値の実測値は図 3.4-80 より数式(3.4-20)になる。

運用方法としては実験開始時の充電開始前のアイドル条件を基準として、切片の b 値を補正する。電流が全く流れていない状態で補正するのが理想ではあるが、AUV を動作させている中で運用する必要があるので、アイドル時の平均電力 53.4W と入力電圧 99.6V から現在の電流値 y および ADC 読み値から(3.4-21)のように補正 b 値を算出する。

なお実際の実装はアイドル中に専用コマンドを入力することにより、補正 b 値は自動的に計算され装置の ADC 変換値に反映される。

$$y = -ax + b = -0.0073x + 27.248 \quad (3.4-20)$$

$$b = y + ax = \frac{53.4}{99.6} + 0.0073 \times (\text{ADC 値}) \quad (3.4-21)$$

B-2 キャリブレーション後の実測結果例

受電電力キャリブレーション実行後の結果を示す。パワーアナライザで計測した受電電力値と充電制御装置の側で計測・計算した値を比較してプロットしているが、結果が良く一致していることが分かり補正処理が妥当であることが明示されている。

反面 3 次試作のデータはこの補正処理が反映されていないので、受電電力にやや誤差が含まれていることが考えられ実験データ結果としては、最終形のデータのほうが実態に即していると考えられる。

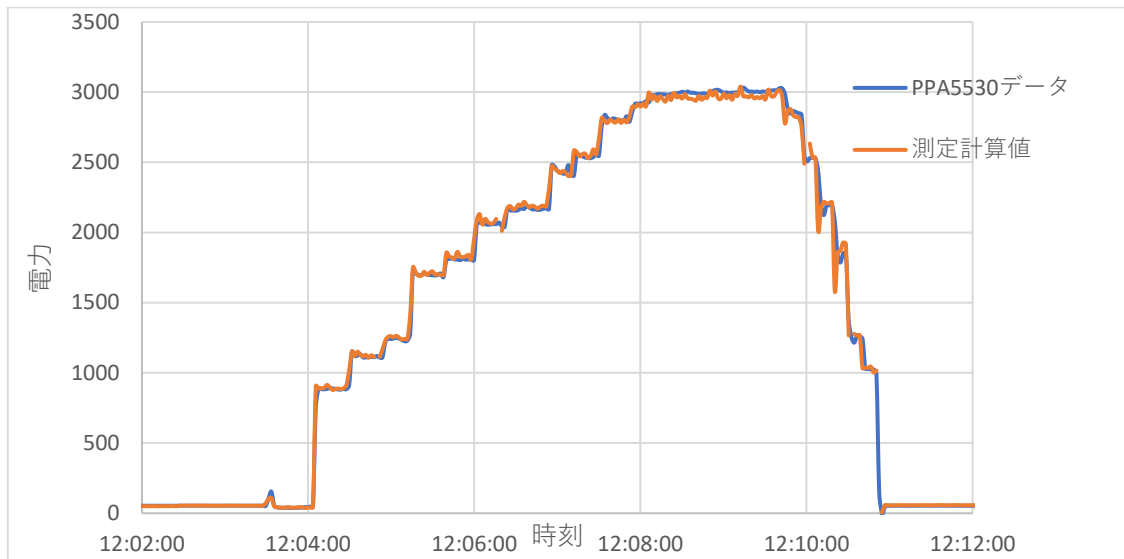


図 3.4-121 キャリブレーション後の受電電力実測結果比較

C リアルタイムモニタ表示機能

実験時に各種データをリアルタイムでグラフィカルに把握できるように Web サーバーの各機能を独立して動作させる仕組みを構築した。以下に表示例を記載する。

C-1 概要表示

電力の概要表示例を図 3.4-122 に示す。表示は 2.5 秒に一度更新される。表示は基本的に瞬時値表示で効率計算時は送信電力と受電電力は時刻の 1 秒以内のタイムスタンプデータは同じ時刻のデータとみなして計算される。そのため電力大きく変化するときには誤差も生じる。

海中給電システム電力表示

日時	時刻	送信電力[W]	受電電力[W]	効率[%]
Wed Jul 06 2022	13:52:01	4150	3010	71.43

[詳細表示](#)

図 3.4-122 電力リアルタイムモニタ (概要表示)

C-2 詳細表示

詳細表示の例を図 3.4-123 に示す。以下の 9 項目を同時にリアルタイムでグラフ表示することが可能である。基本的にデータ間隔は 1 秒でデータ表示更新間隔は 10 秒としている。

- Charging Current (充電電流)
- Total Battery Voltage (充電電圧)
- Transmit/Receipt Power (送受電電力)
- Efficiency (伝送効率)
- PA5530 data1 (送信電力)
- PA5530 data2 (力率)
- Temperatures (基板内温度)
- Battery Cell Voltage (電池単セル電圧)
- Receiving Power Comparison (受電電力比較：AUV 運用時は比較なし)

なおグラフ表示は JavaScript で記述された Highcharts のライブラリを使用している。

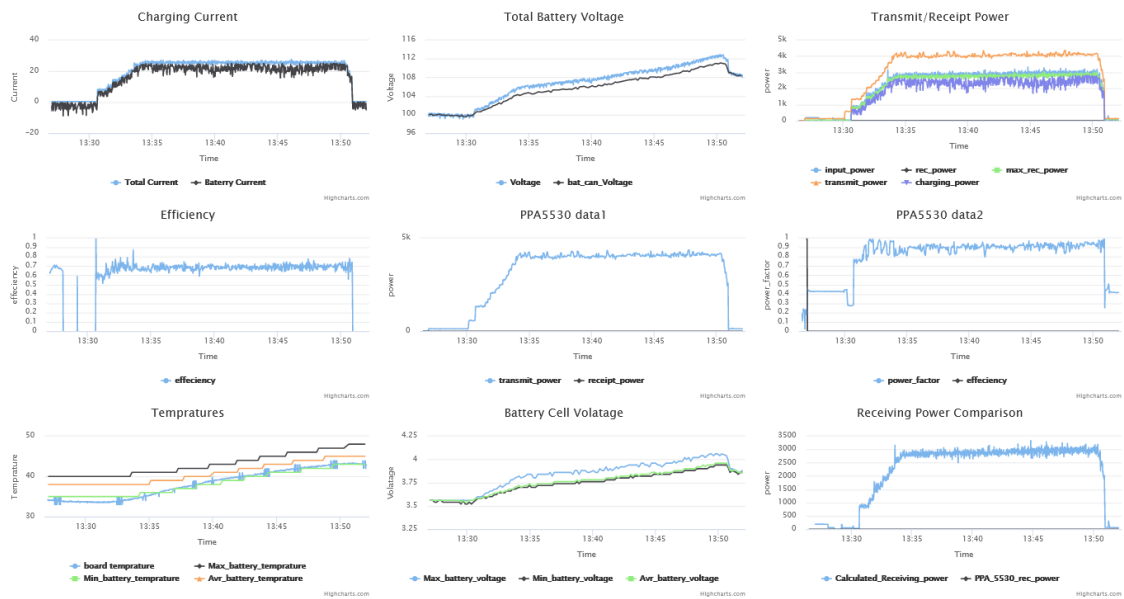


図 3.4-123 リアルタイムモニタ画面 (詳細)

3.4.1.8. AUV 送受電等価回路シミュレーションおよび考察

ここでは AUV の負荷の部分に充電装置に置き換えた場合のシミュレーションおよびその動作現象の考察を行う。

3.4.1.8.1. 海中での AUV 送受電等価回路の考察

海中での AUV 送受電等価回路について考察する。

AUV 受電コイルの海中での Q 値は AUV 内部にプローブを設置して測定することができないため実測データはないが、3.2.13 のシミュレーション結果および 3.3.6.5 の日本サルヴェージの海水プールで測定した 1/1 モデルの実測値などから 1500Hz では、およそ表 3.4-17 のように考えられる。

表 3.4-17 送受電コイルの Q 値等

コイル	Q 値
受電コイル	40
送電コイル	60

これを基に 1500Hz での回路で送信コイル 1640uH、受信コイル 853uH の実測値で等価抵抗値に置き換えると送電側 0.4Ω、受電側 0.14Ωとなる。

結合係数は海中、空气中ほとんど差がないのでその差異は無視して 0.21 とする。

上記の結果を反映して LTSpice での等価回路を描くと図 3.4-124 のようになる。

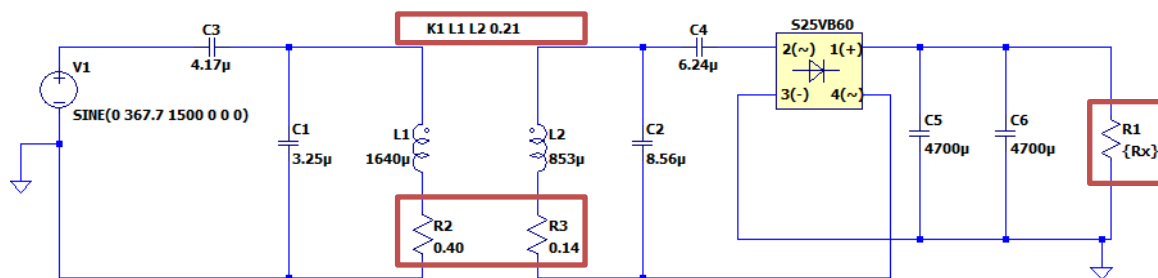


図 3.4-124 海中での送受電等価回路

この条件で抵抗値が可変されたとき、すなわち充電電流が変化したときのシミュレーションを行ってみる。シミュレーションは LTSpice (Ver17.0.35)を使用する。

3.4.1.8.2. シミュレーション

3.4.5.3 で示す実海域試験での実測実験と同じく送信電圧 260V として、等価抵抗値を 5～50Ω に可変した場合のシミュレーション結果を図 3.4-125 に示す。

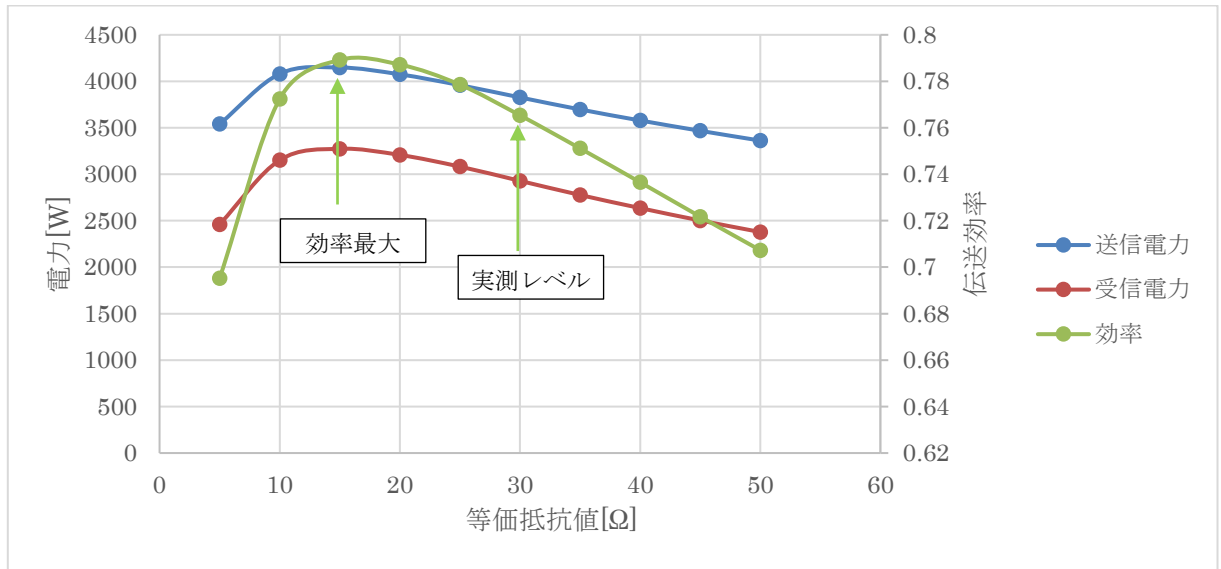


図 3.4-125 送信電圧 260V 条件での送受信電力および効率シミュレーション結果

等価抵抗値が実測値と同等の 30Ω 前後では受電電力 3 kW、効率が 76% であり実測結果に近い結果が出ているが、効率は実測値より少し高くなっている。また効率が最大値になるのは約 79% でありその時の等価抵抗値は 15Ω 前後となる。

同じ条件で、送信電圧を 250V、240V にした場合のシミュレーションを図 3.4-126 および図 3.4-127 に示す。

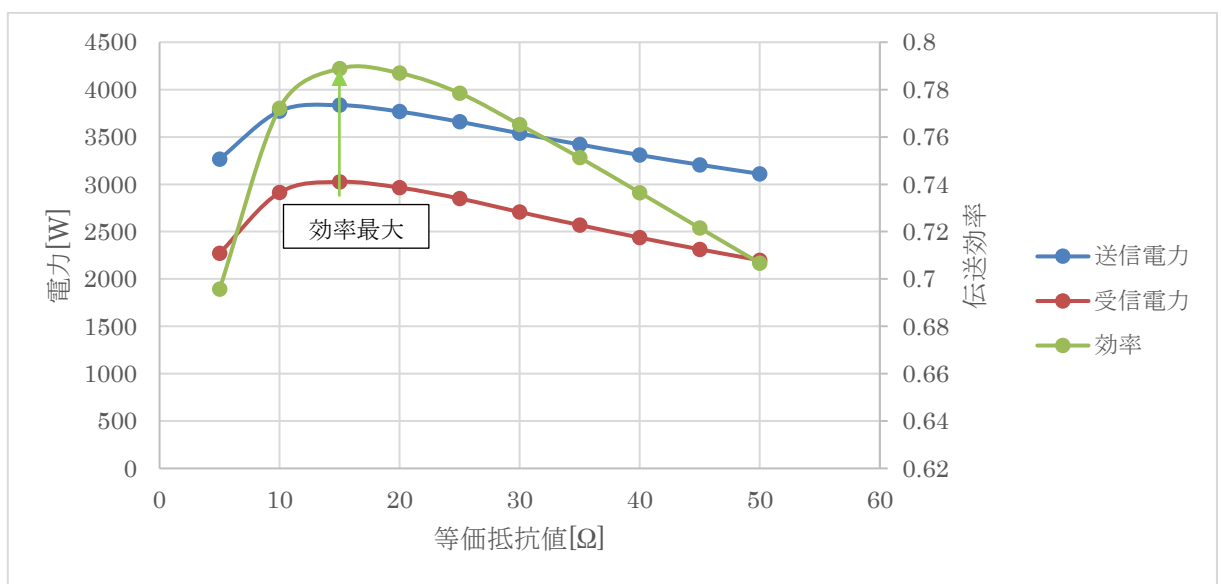


図 3.4-126 送信電圧 250V 条件での送受信電力および効率シミュレーション結果

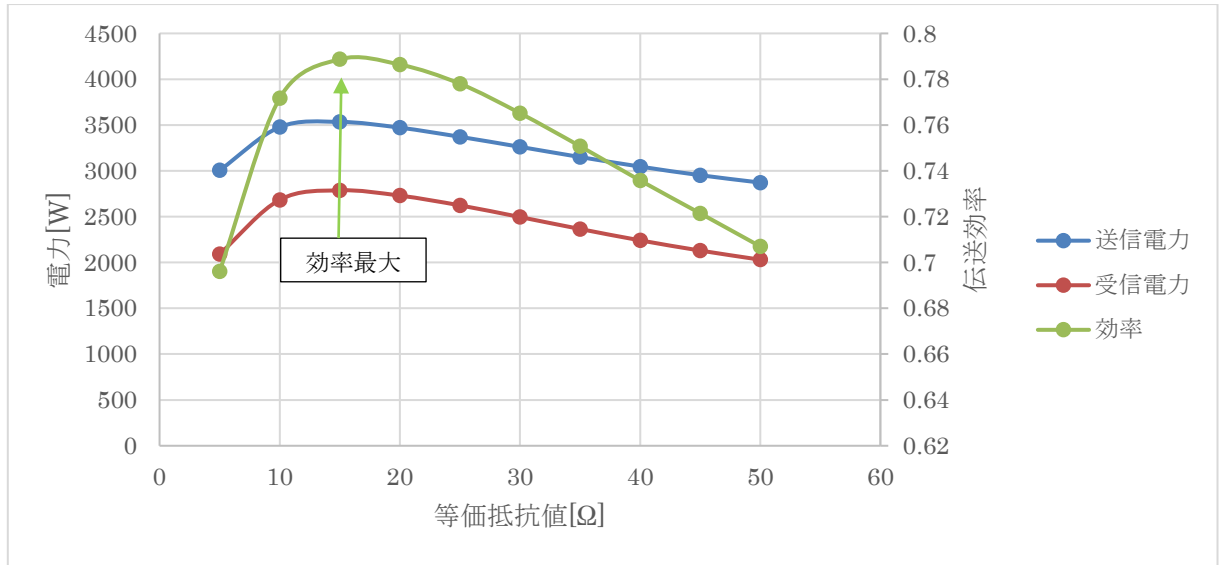


図 3.4-127 送信電圧 240V 条件での送受信電力および効率シミュレーション結果

いずれの場合も傾向は送信電圧 260V の時と同じく、等価抵抗値 15Ω前後で伝送効率が最大値 78~79%、30Ωでは 76~77%と 2~3%低くなる。

3.4.1.8.3. 実測値との比較考察

実海域での実測データの詳細については 3.3.6.5 で述べるが、図 3.4-128 に AUV 位置中央での静特性の実測データをあげる。

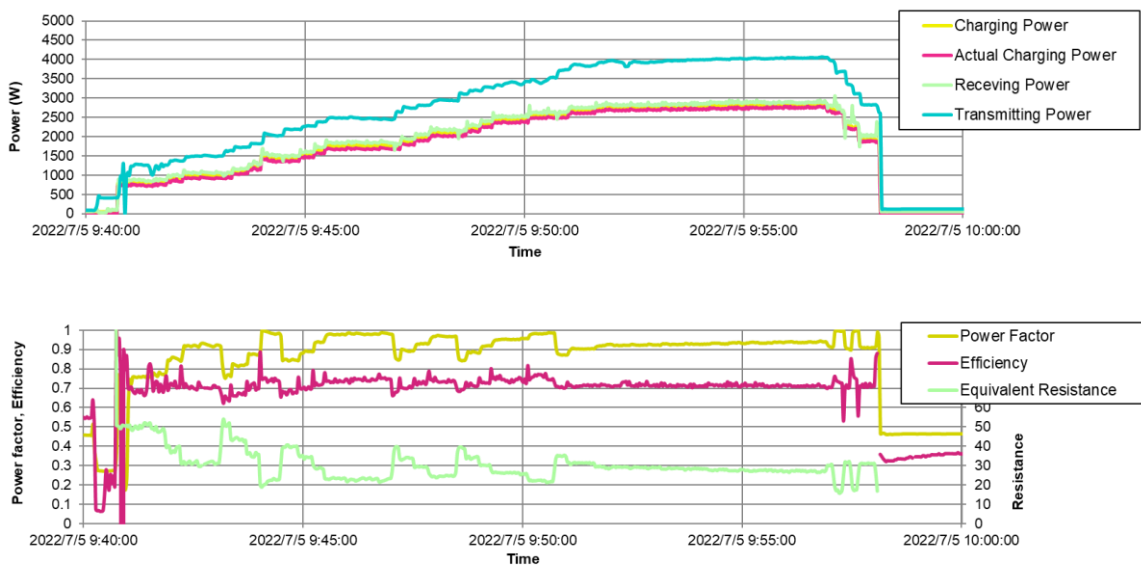


図 3.4-128 実海域実測データ(静特性中央)

AUV の受電側終端抵抗値は充電電流によって変化し電流一定であれば抵抗値も基本的に変化しない。また基本的に、伝送効率が高くなると充電電流が大きくな等価抵抗値は低下し、3KW 受電時は 28-30Ω前後の値となった。

シミュレーションでは伝送効率が実測よりやや高い原因の一つとして表 3.4-17 で示した Q 値が実際にはもう少し低い可能性がある。ここでの Q 値は前述したように AUV 内部に VNA のプローブが設置できないため耐圧容器+コイルのみの条件で実測した値と同等とみなしているが、実際の AUV は様々な機器が実装されており形状も複雑である全く同等ではなく、ある程度の損失が発生している可能性がある。

但しそれ以外の現象についてはほぼ実測値と同等の傾向となっていることが明らかになった。

3.4.1.8.4. 伝送効率と DC/DC 電源条件

実測では 3kW 受電時の等価抵抗値が約 30Ωであったが、仮にこの系でこれを約 15Ω程度まで下げることができれば電力効率が最大化できるものと予測されるが、実際にはそれを行うように充電電流を上げると DC/DC 電源がダウンしてしまう。

今回の DC/DC 電源は絶縁型のダウンコンバータであることは分かっているが、買い入れ品なので内部回路等の情報がなく厳密な考察は難しいが DC/DC 電源の制約がどのようなものか以下のように考察した。

A DC/DC 電源を含めた等価回路とアイドル条件

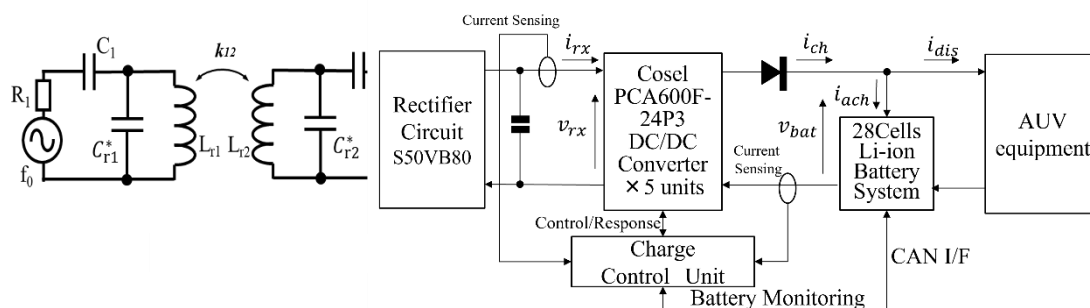


図 3.4-129 DC/DC 電源含めた等価回路

この図は DC/DC 電源含めた等価回路である。実際の運用系では i_{ch} が 0 (充電電流 0) の時をアイドル時としているが、このときも DC/DC 電源の FAN や I/O 電源などが起動しているため、DC/DC の 1 次側では電力が発生している。実測では送信電圧 AC60V 前後で DC/DC 電源の 1 次側電圧 v_{rx} が 100V となり、その時電力は約 53W となっている。

まずこの状態をシミュレーションで確認するため、送信電圧を 60V とした時の等価抵抗

値を 5 から 200Ωまで可変してみる。 図 3.4-130 にその結果を記す。

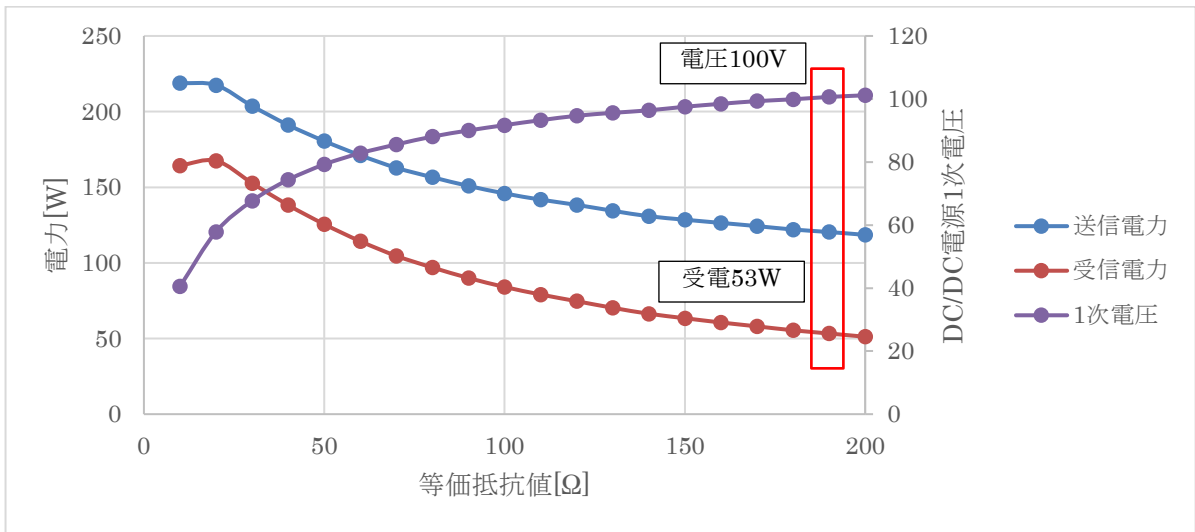


図 3.4-130 送信電圧 60V 時の送受電電力および DC/DC 電源 1 次電圧

この図から等価抵抗 190Ωの時が受電 53W、DC/DC 電源出力 100V となり実測に非常に近い結果が得られた。

B 充電電流増加時の DC/DC 電源動作

以上のことから実際の充電動作の中では充電を行うことにより等価抵抗値がアイドル時の 190Ωから送信電圧一定とすると電力を増加することで 25Ω前後まで低下する。

送信電圧 260V の時の電流、電圧(DC/DC 電源 1 次側)、電力のシミュレーション結果を図 3.4-131 に示す。

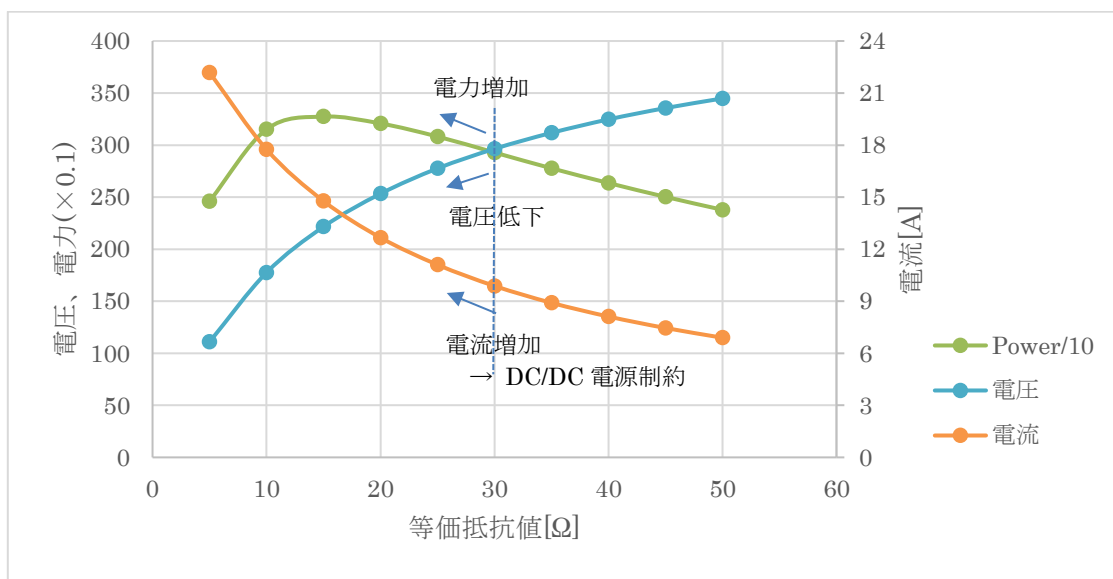


図 3.4-131 送信電圧 260V での電流、電圧、電力のシミュレーション結果

図 3.4-129 で DC/DC 電源の 1 次側の電力を P_1 、2 次側の電力を P_2 、電源の変換効率を η とした時の条件は式(3.4-22)、(3.4-23) のようになる。

$$\eta P_1 = P_2 \quad (3.4-22)$$

$$\eta \times v_{rx} \times i_{rx} = v_{bat} \times i_{ch} \quad (3.4-23)$$

充電動作時は電流により式(3.4-23)の右辺の条件を満たすように、左辺の v_{rx} 、 i_{rx} が変化する。送信電圧 260V の図 3.4-131 の例で見れば、等価抵抗値が低下する場合は電流が上昇し電圧が下降するように変化することが分かるが、ここで DC/DC 電源に依存する問題が 2 つある。

- ① 式を満たす電流値 i_{rx} を DC/DC 電源が引き込めるかどうか？
- ② η は電源の変換効率で最大 90~95% 程度であるが、 v_{rx} や負荷などの条件に依存して変化し、本電源システムの場合 1 次電源電圧 v_{rx} が下がると η は低下する傾向がある。

従って充電電流を増加させようと等価抵抗値が下がる過程で①または②の条件を満たせない場合 DC/DC 電源の効率限界を超えてシステムが停止する。

また②のように電源の変換効率が η_0 となり、式(3.4-24)、(3.4-25)

$$\eta_0 \leq \eta \quad (3.4-24)$$

$$\eta_0 \times v_{rx} \times i_{rx} \leq v_{bat} \times i_{ch} \quad (3.4-25)$$

となってもやはり、DC/DC 電源の効率限界を超えてシステムが停止する。

実際のシステムでは運用上動作マージンが必要なので、式(3.4-25)の限界まで等価抵抗値を下げることは難しく、運用上の効率が 70~75% となることは妥当であると考ええる。

また設計的に考えると本システムの場合 DC/DC 電源の運用条件に合わせて整合設計時の負荷抵抗を 10Ω でなく、 $20\sim 25\Omega$ 程度にすれば最大効率が得られたかもしれないが、今後同様のシステムでさらに検証を進めていきたい。

C 考察まとめ

AUV に DC/DC 電源の充電装置を搭載した場合の動作については以下のようにまとめられる。

- ① 充電装置は等価抵抗値に置き換えて机上計算・シミュレーションが可能
- ② 充電開始時は DC/DC 電源のアイドル動作で等価抵抗値がターゲット抵抗値より高くなり、充電開始～電力を増大していくにつれ等価抵抗値が低下する。
- ③ DC/DC 電源装置の制約により等価抵抗値の電流条件が保てなくなるところがシステムの限界点

- ④ 運用上は動作マージンが必要であるためシステムの限界点より数%低いところで制御動作する

今後は上記①～④を踏まえて整合条件および DC/DC 電源をさらに最適化しさらに効率の良いシステム構築が可能であると考えられる。

3.4.2. UV や海中充電スタンドの構造設計・製作

3.4.2.1. 受電用 AUV の基本計画

3.4.2.1.1. 受電用 AUV のミッション

本研究開発の第一の目標は、海中に設置したポジションフリーワイヤレス給電システム及び海中充電スタンドから、kW 級の電力を高伝送効率で自律型海中移動体 (AUV) へ給電出来ることを実証するものである。

その実証のための“受電用 AUV” (以下、r-AUV と呼ぶ) の第一のミッションは、本研究開発で製作される受電コイルや小型化された受電装置、同じく小型化された海中通信アンテナ等を搭載して、海中充電スタンドからワイヤレス給電を受けて、エネルギー源として搭載している二次電池に充電することである。

本研究開発にあたり費用低減のために、r-AUV は、この受電・充電機能を中心に装備するものとする。即ち、AUV としてのエネルギー源である二次電池は搭載しているが、その自律航行機能は最低限のものとし、光ファイバーケーブルを介しての遠隔操縦が可能な ROV モードも有するものとした。

このため、自己位置・機体姿勢・障害物などの検知センサを装備して、基本的な自律航行機能は有するが、海中充電スタンドへの接近や海中充電スタンド内への進入・滞留・離脱などの複雑な航行は、ROV モードによる遠隔操縦で行うことを基本とする。

海中給電実験での r-AUV の運用イメージは図 3.4-132 に示すものであり、おおよそ以下の手順を想定した。

- ① 着水：バージからクレーンで r-AUV を着水させる。
- ② 潜航：自律あるいは遠隔操縦で所定の深度・位置まで潜航する。
- ③ 進入：遠隔操縦により、バージのムーンプールから懸吊されている海中充電スタンドへ接近し、その中に進入する。
- ④ 給電・充電：海中充電スタンド内に滞留し、給電コイルから給電を受けて、r-AUV に搭載している二次電池に充電する。
- ⑤ 離脱：充電が完了したら、海中充電スタンドから後進して離脱する。

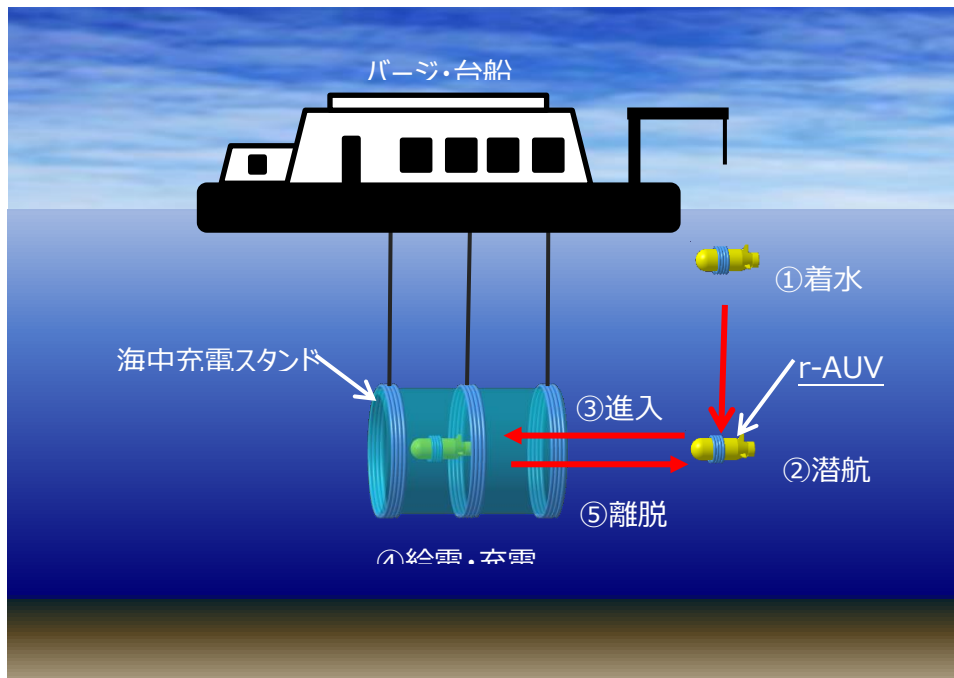


図 3.4-132 海中給電実験の運用イメージ

3.4.2.1.2. 環境条件

r-AUV を運用する環境条件は、表 3.4-18 に示すものとした。



表 3.4-18 r-AUV の環境条件

項目	条件	備考
保管温度 (非動作時)	-5 ~ 50℃	外気温
保管湿度 (非動作時)	100%Rh 以下	
動作温度	-1 ~ 40℃	
動作湿度	100%Rh 以下	海水中で動作すること
振動	車上および船上輸送に耐えられること	
衝撃	クレーン吊上げ時の衝撃に耐えられること	

3.4.2.1.3. r-AUV の形式

一般に、AUV の形式は大きく航行型とホバリング型の 2 つに分類される。表 3.4-19 にそれぞれの形状・特徴や利点および代表的な例を示す。

表 3.4-19 AUV 形式の比較

	航行型	ホバリング型
形状・特徴	魚雷型のもが多く、細長い胴体で後部に主推進器を持ち、主に前進航行性能に力点を置いている。	種々の形状のものが有り、前進のみではなく上下や横方向にも推進装置を装備している。
利点	推進効率に優れ、広範囲の調査・観測等に適している。	複雑な動きができ、海底や構造物近傍での調査・観測等に適している。
適用分野例	海底地形測量、資源探査、水質調査	海底生物調査、人工物調査
Vehicleの例	AE2000、r2D4、うらしま、Remus	Tuna-Sand、BOSS-A、Tri-TON、H-ROV
		

A-1 ホバリング型の採用

ワイヤレス給電システムは、AUV に電力を給電するものであり、対象とする AUV の形式には本来制約は無いものである。しかし、受電実験をするための r-AUV としては、給電コイルと AUV の相対位置による電力伝送効率への影響を調査するなどのために、AUV 位置を細かく調整する必要がある。このため、r-AUV の形式は、複雑な動きができるホバリング型を採用する。

ホバリング型 AUV の例として、図 3.4-133 に Tuna-Sand の形状と搭載機器の位置などを示す。r-AUV が Tuna-Sand と全く同じ形状となる訳ではないが、機体中心に配置される耐圧容器の周囲に種々のセンサ類や機体アクチュエータであるスラストが装備され、機体上部に浮力材が搭載される配置構造となる。

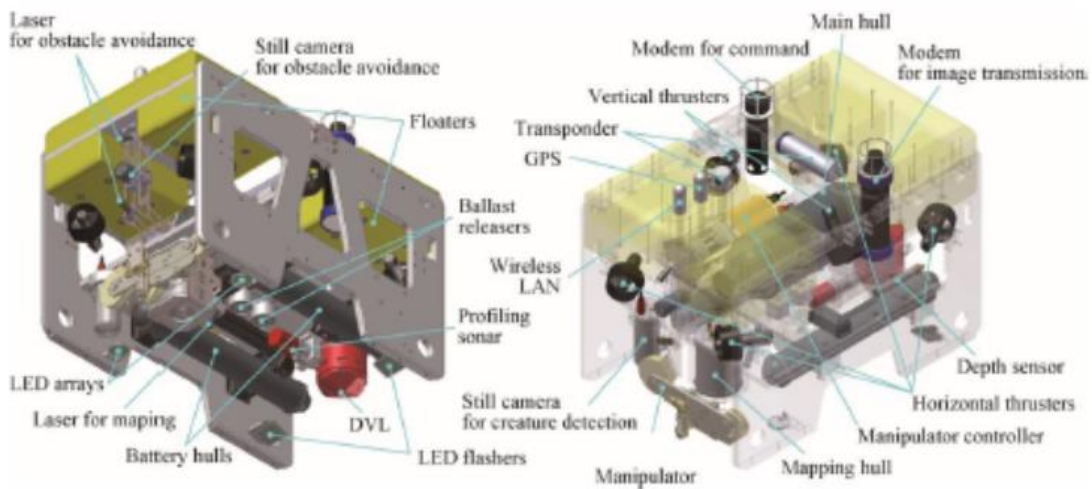


図 3.4-133 Tuna-Sand の形状・装備例

なお、後述の様に、海中充電スタンドの給電コイルは、コイル中心径が2mの12角形のもの3個を1m間隔で縦に並べたもので、r-AUVは、この給電コイルに進入することになる。

このため、機体は、多少長さが長くなったとしても、直径あるいは高さ・幅は出来るだけ細いあるいは狭い形状とする必要がある。また、突起物も出来るだけ無いものとする必要がある。

3.4.2.1.4. r-AUV の性能仕様

r-AUVのミッションは3.4.2.1.1に示したものであり、海中給電実験では、図3.4-132に示したように、ごく狭い範囲で行動するものであるため、稼働時間はそれほど長時間である必要はなく、航行速度も高速は必要せず、稼働深度も浅深度となるが、狭い給電コイルに進入・滞留するため、複雑・微細な動きが可能な運動性能が要求される。

これら要求条件に基づき、r-AUVの性能仕様は表3.4-20に示すものとした。

航行可能時間に関しては、海中給電実験の1ケースが1時間程度を要するものと考え、これが5ケース実験出来る航行可能時間を想定する。遠隔操縦をする際の操縦性を考慮して、航行速度0.25m/s(0.5kts)、最大速度は0.5m/s(1.0kts)とする。海中給電実験を予定している試験海域の水深は約30mであり、充電スタンドの懸吊深度は10m程度を想定されることから、稼働深度を10m、耐圧容器等の設計強度基準となる最大稼働深度は50mとする。ビークルの運動に関しては、3次元運動をするために、前後(Surge)・上下(Heave)・左右(Sway)の併進運動と、垂直軸周りの回転運動(Heading)を可能とする4自由度を制御するものとし、水平軸周りの回転運動(RollとPitch)は制御しないものとする。

表 3.4-20 AUV の性能仕様

項目	仕様
航行可能時間	5時間
航行速度／最高速度	0.25m/s／0.5m/s (0.5kts／1.0kts)
稼働深度／最大潜航深度	10m／50m
運動自由度	Surge／Heave／Sway／Yaw(Heading) (Roll／Pitch 制御はしない)

3.4.2.1.5. r-AUV の航行制御・機能

A 自律航行制御・機能

r-AUVはプリプログラム方式による自律航行(AUVモード航行)を行うもので、以下の

機能を有し、予め設定した航行シナリオに従って自動的に航行し、そのための自己位置・機体姿勢・障害物などの検知センサを装備する。

制御ソフトウェアは、ホバリング型 AUV/ROV の基である Tuna-Sand の系統を踏襲する YOUZAN のものを移植し、r-AUV 用に改造する。

- (a) Waypoint 航行：予め設定された地球座標と深度または海底からの高度で規定される複数の Waypoint を順次通過航行する。
- (b) 深度保持：制御可能高度：海面～50m
- (c) 高度保持：制御可能深度：0.2m～50m
- (d) 方位保持：制御可能方位： $\pm 180^\circ$

B 遠隔操縦機能（ROV モード）

r-AUV は、前述のように基本的な自律航行機能を有するが、海中充電スタンドの給電コイルシステムへの接近・進入・滞留・離脱などの低速での複雑な 3 次元航行は、ROV モードによる遠隔操作で行う方式とする。

このため、遠隔操作に必要な ROV ユニットとして、TV カメラ装置、照明装置、船上への画像伝送や制御信号通信を行う光ファイバケーブルシステム、船上側モニタ・操縦装置等を装備する。

C 安全機能（緊急浮上）

以下の状態となった場合、バラスト投下により緊急浮上するものとする。

- ・ビークルの自己診断により浮上しなければならないレベルの機体異常を検知した場合。
- ・オペレータの判断により、緊急浮上が必要と判断した場合。

バラスト投下装置は、電磁石にてバラストを保持する方式とし、バラスト投下はビークル制御系から実施できるものとする。

3.4.2.1.6. r-AUV 搭載機器の設計・製作

AUV の機器・装置は大略以下の 5 項目に分類でき、これら項目について、r-AUV としての機能・性能達成に必要な機器・装置を設計・製作した。

- ① 受電・充電装置
- ② エネルギー源（電池）
- ③ 航行装置・センサ
- ④ 運動制御アクチュエータ
- ⑤ 周辺補助機器

3.4.2.1.7. 受電・充電装置

r-AUV の第一のミッションである海中充電スタンドの給電コイルから非接触で電力を受電し、搭載した二次電池に充電するための装置のブロックダイアグラムを

図 3.4-134 に示す。この受電・充電装置は、後述の航法機器・センサなどと一緒の耐圧容器に収納される。

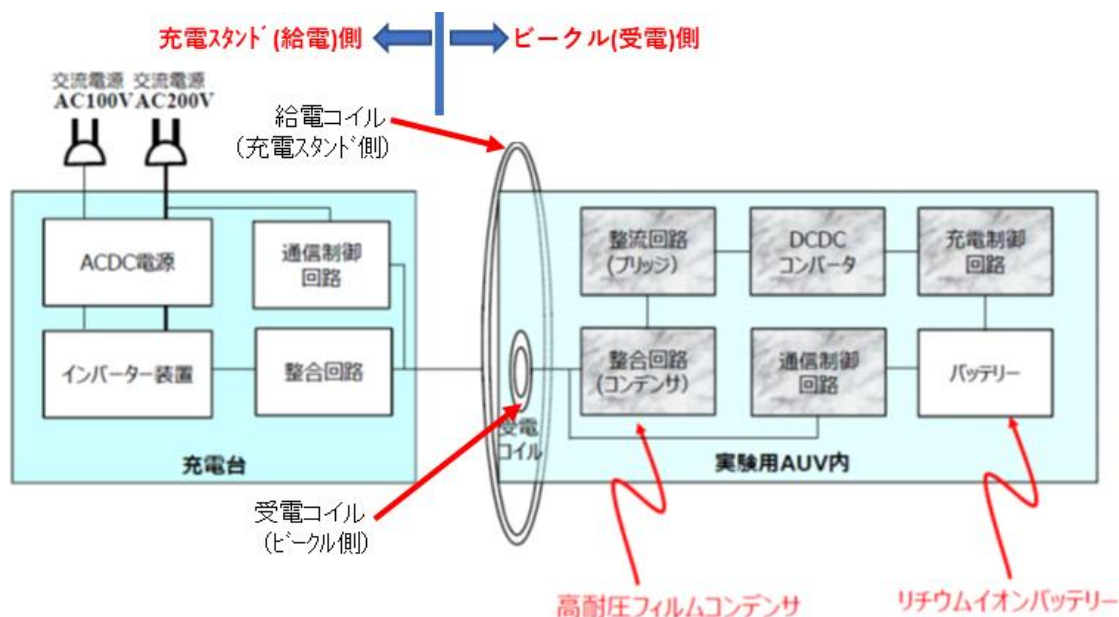


図 3.4-134 受電・充電システムブロックダイアグラム

3.4.2.1.8. エネルギー源 (電池)

r-AUV のエネルギー源である電池は、コンパクトな組電池として種々の AUV で豊富な使用実績・信頼性があるリチウムイオン二次電池の 18650 タイプ組電池を採用した。

A リチウムイオン電池パック仕様

18650 タイプの単セルをセルモジュールに組み、そのモジュールを 7 直列のセルブロックとして組合せ、セルブロックを 3 並列に組み合わせた構造とする。また、充放電時の安全のため各ブロック単位に保護回路を取り付ける。

これにより電池 1 パックは定格電圧が 25.2V、定格容量は 26.8Ah となる。後述のように一番消費電力が大きいスラストへの供給電圧を高くして電流を小さくすることにより電線径を細くして、スラストの配線系のコンパクト化・軽量化を図った。

このため、電池パック 4 個を直列接続して定格電圧を 100.8V とし、これを並列接続することにより必要電池容量を得るものとした。

(1)単セル仕様

- 1) MODEL : NCR18650B
- 2) 定格容量 : 3400mAh
(容量は $3.4\text{Ah} \times 0.94$ (組電池時安全係数) = 3.20Ah
 $3.20\text{Ah} \times 0.93$ (4.1V 充電時の容量ダウン分換算) = 2.98Ah)
- 3) 定格電圧 : 3.6V
- 4) 充電電圧 : 4.1V
- 5) 重量 : 約 45g

(2)組電池の外形 : 円筒形 (耐圧容器に収納可能な形状)
: L 204mm × D (直径) 113mm 公差±2mm 以内

(3) 組電池の放電条件 (1 パックあたり)

- 1) 電圧範囲 : 21.0V~28.7V (平均電圧 25.2V)
- 2) 電流 : 10A (MAX) 定常 3~5A
- 3) 電池容量 : $2.98\text{Ah} \times 3$ 並列 $\times 3$ 並列 = 26.82Ah

(4) 組電池の充電条件 (1 パックあたり)

- 1) 最大電圧 : 28.7V ($4.1\text{V} \times 7$ 直列)
- 2) 電流 : 3.7A (約 0.15C 相当)

(5) 重量 (1 パックあたり)

- 1) 重量 : 3.4kg 公差±0.3kg 以内
- 2) 使用セル数 : 63 本

図 3.4-135 に組電池の外観を示す。



図 3.4-135 組電池

3.4.2.1.9. 航行装置・センサ

r-AUV が航行するために必要な航行装置とセンサを選定・製作した。

AUV では軽量化・コンパクト化のために、その AUV に合致するように装置やセンサを新たに開発して搭載することがあるが、r-AUV では費用低減のためにも、装置やセンサは、基本的には市販で入手可能なものを採用することとした。r-AUV 用として市販品が直接適用できない場合でも、全くの開発品とはせずに、市販品をベースに一部を r-AUV に適合するように改造して搭載する方法を取ることとした。

A 制御コンピュータ

制御コンピュータおよび制御基板類は、多くの AUV で使用されて実績がある PC104 規格を採用した。PC104 のボードはスタックすることができてボード同士が固定されていて、市販量産品で丈夫なシステム構築が可能である。

- ◆Advantech の PC/104 CPU モジュールから選択した。
- ◆OS は、各種 AUV で採用されている Linux とした。
- ◆データコム、I/O、電源等の各モジュールも Advantech の PC/104 モジュールから選択。

制御コンピュータは他の電子機器類・基板類などと一緒に耐圧容器に収納するものとする。

表 3.4-21 に制御基板類を、図 3.4-136 に各基板を組上げた状態の制御コンピュータシステムを示す。

表 3.4-21 制御基板類

航法システムを採用する。

B-1 慣性航法装置：INS（Inertial Navigation System）

r-AUVのINSとしては、軽量・コンパクトで、高精度のFOG（Fiber Optic Gyro）式IMU（慣性計測装置）を内蔵したiXblue社のPHINSとし、さらに、PHINSシリーズの中で、FOG部と処理部が分割されていて耐圧容器内での設置の自由度が高い、OEM仕様のPHINS COMPACT C3（以下PHINS C3と呼ぶ）を採用した。図 3.4-137にPHINS C3の外観を、

図 3.4-138に耐圧容器組込用シャーシに搭載した状態の外観を、表 3.4-22に機器仕様を示す。INSも、制御コンピュータなどと一緒に耐圧容器に収納している。



図 3.4-137 PHINS C3

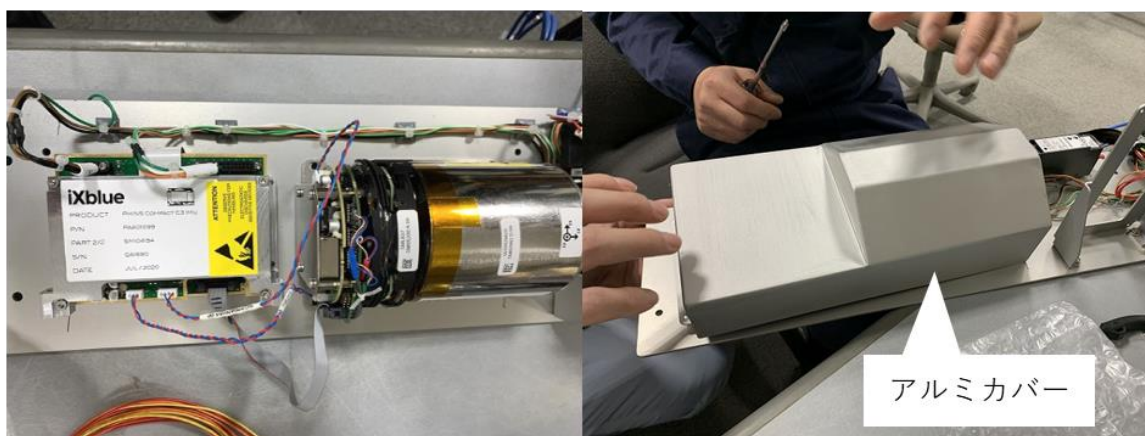


図 3.4-138 PHINS C3 搭載状態の外観およびアルミカバー装着状態の外観

B-2 DVL : Doppler Velocity Logs

AUVで慣性航法を採用する場合、INSの加速度積分での誤差蓄積により生じる位置ドリフトの補正の一つとしてDVLにより得られる対地速度でダンピングして位置補正が行われている。

表 3.4-23 に r-AUV の DVL として採用した NORTEC 社 DVL1000,300m の機器仕様を、図 3.4-139 に外観を示す。DVL1000,300m は比較的新しいものであるが、r-AUV 用としては現状では一番軽量・コンパクトなものである。

本研究開発で予定している海中給電試験海域は水深約 30m であり、75m の高度探知性能であれば、ビークルが海面にいるときから DVL は対地速度を測定可能なので、INS のダンピングが常時可能となり、AUV にとって重要な位置精度を保つことができる。

DVL は海底に向けて真っすぐに超音波を発信する必要があるため、他の機器が超音波を遮ることが無いように DVL 下方空間が開いた状態となるようにして機体下部の位置に搭載する。

B-3 高度計

高度計は DVL の高度検知機能を使用し、専用の高度計は装備しない。

B-4 深度計

深度計は、他の AUV で使用実績がある Micron Instrument 社の MP402 圧力センサを採用した。海中給電実験を予定している海域の水深は約 30m なので、圧力センサは、圧力レンジが 0-200kPa、リファレンス圧力は絶対圧とした。

表 3.4-24 に MP402 の機器仕様、図 3.4-140 に外形図、図 3.4-141 に外観を示す。

表 3.4-22 PHINS COMPACT C3 機器仕様

性能	
位置精度 GPS, USBL 使用	約2~3倍程度スムーズ
位置精度 DVL 使用	0,3% × 移動直線距離 (CEP50%)
方位精度 GPS, USBL 使用	0,15 ° Secant Latitude (RMS)
方位精度 DVL 使用	0,2° Secant Latitude (RMS)
ロール/ピッチ GPS, USBL, DVL 使用	0,05° (RMS)
アライメント時間(ラフ/ファイン)	5分/~25分
オプション	
PHINS COMPACT C3 /IMU50 ⇒ IMU生データをリアルタイムで出力	
運用レンジ/環境条件	
運用/保管温度	-15°C~60°C/-40~80°C
方位/ロール/ピッチ	0~360°/±180/±90°
振動	5~40Hz 0,51 simus max ISO 8728:2014(E), ISO1638:2014 (E)
電磁環境	1 Gauss
MTBF	10万時間(定期メンテナンス不要)
機械的特性	
サイズ/重量(慣性計測ユニット)	<145(L) × 100(W) × 85(H) mm <1300 g
サイズ/重量(エレクトロニクス)	<130(L) × 90(W) × 85(H) mm <1300 g
キャリブレーション	起動時自動スタート
インターフェース	
イーサネット(UDP,TCP client &server)	入力7/出力5/制御1
シリアル(RS232C)	入力5/出力5
パルス (5V TTL level)	入力2 (TTL1)
外部センサー	GPS、LBL、USBL、EM LOG、DVL、 深度計、CTD、SVP
入出力フォーマット	NMEA/ASCII/BINARY
出力レート	~200Hz
電源/消費電力	24VDC (20~32VDC) <18W
輸出ライセンスに制限	
分解能:角速度 3.6° /h、加速度 1mg、方位姿勢 0.001° 飽和: 速度 80 knot、高度 4000m、加速度 5g、角速度 750° /s	

表 3.4-23 DVL1000,300m 機器仕様



Technical specifications
DVL1000, 300 m

→ Bottom velocity		
Single ping std @ 3 m/s	0.5 cm/s	
Long-term accuracy ¹⁾	±0.1% / ±0.1 cm/s	
Minimum altitude	0.2 m	
Maximum altitude	75 m	
Velocity resolution	0.01 mm/s	
Maximum ping rate ²⁾	8 Hz max	
→ Water tracking		
Minimum accuracy	0.3% of measured value ± 0.3 cm/s	
Minimum range	2.0 m	
→ Current profiling		
Minimum accuracy	0.3% of measured value ± 0.3 cm/s	
Velocity resolution	0.1 cm/s	
Interval	User-specified N th ping	
Maximum range	30 m	
Blanking	0.1 m	
Cell size	0.2-2.0 m	
Max # cells	150	
→ Environmental		
Operating temperature	-4 to +40 °C	
Storage temperature	-20 to +60 °C	
→ Mechanical		
	Head & electronics	Complete DVL
Depth rating	300 m	300 m
Weight	0.84 kg	1.30 kg
Weight in water	-	0.15 kg
Height	(contact Nortek)	158 mm
Diameter	(contact Nortek)	ø 114 mm

¹⁾ Following standard calibration procedures, ²⁾ Inquire for more options

→ Hardware	
Frequency of operation	1 MHz
Configuration	4-beam Janus array convex transducer, 25° beam angle
Internal memory	16 GB / 64 GB optional
→ Interfaces	
Serial (either serial or Ethernet)	Configurable RS232 or RS422 Subconn connector, 8-pin male
Ethernet	10/100 Mbps Auto MDI-X. TCP/IP, UDP/IP, HTTP protocols. Fixed IP / DHCP client/Auto IP address assignment. UPnP and Nortek proprietary instrument discovery over Ethernet. IEEE1588/PTP and NTP for absolute time stamping. Multiple simultaneous data format transmission possible.
Data formats	Nortek proprietary w/ 1 ms time stamp accuracy NMEA0183 Variants of PDx
Trigger	Internal 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 or 8 Hz or Trigger In. Trigger option through command (Ethernet or serial) External TTL or 485 lines: (configurable Rising/Falling/Edges)
→ Sensors	
Pressure	0.1% FS /precision better than 0.002% of full scale per sample
Temperature	-4° to +40 °C ± 0.1 °C
→ Power	
DC input	12-48 V
Maximum peak current	1.5 A
Average power	1.3 W
→ Materials	
Standard models	POM housing



図 3.4-139 NORTEK 社製 DVL1000,3000m

表 3.4-24 Micron Instrument 社製 MP402 機器仕様



**MP402
PRESSURE TRANSMITTER**

Micron's Model MP402 is a miniature, low cost, general use pressure sensor that automatically compensates for line resistance and power supply changes. This transducer is made of corrosive resistant titanium (6AL4V) and utilizes high reliability bulk type semiconductor strain gages bonded directly to the inside surface of the machined diaphragm.

Absolute or sealed reference sensors are available as an option. The hermetic header is located just behind the strain gage diaphragm section of the sensor, sealing the sensitive gages to an inert environment which dramatically increases stability and reliability. Consult the factory for special temperature or pressure ranges and high-vibration resistant options. Long term stability versions are available.



Pressure Transmitter MP402

APPLICATIONS

- TEST & MEASUREMENT EQUIPMENT
- PRODUCTION EQUIPMENT & CONTROLS
- ENERGY CONTROLS
- LABORATORY INSTRUMENTS & EQUIPMENT
- LIQUID LEVEL
- CALIBRATION EQUIPMENT

PERFORMANCE OPTIONS (ALL VALUES MAXIMUM)					
	A	B	C	D	Units
Balance (Zero)	4.00±0.50	4.00±0.30	4.00±0.20	4.00±0.20	mA
Full Scale Sensitivity	16.00±0.50	16.00±0.30	16.00±0.20	16.00±0.20	mA
Static Error Band	±0.50	±0.25	±0.25	±0.25	%FS *BFSL
Thermal Balance (Zero) Shift	±0.02	±0.01	±0.01	±0.005	%FS/°F
Thermal Sensitivity Shift	±0.02	±0.01	±0.01	±0.005	%FS/°F
Long Term Stability	±2.00	±2.00	±2.00	±2.00	%FS/year

*BFSL=Best Fit Straight Line

MECHANICAL	
Standard Pressure Ranges	200, 300, 500, 1K, 2K, 3K, 5K, PSI
Non Standard Pressure Ranges	5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100, 150, 250, 10K PSI
Other ranges possible	Consult Factory
Over Pressure (No change out of spec.)	2.0x Range
Usable Pressure (Small change in balance)	3.0x Range
Burst Pressure	6.0x Range

4509 Runway Street • Simi Valley, California 93063 • Phone:(805) 522-4676 • Fax: (805) 522-4982

sensors@microninstruments.com • www.microninstruments.com

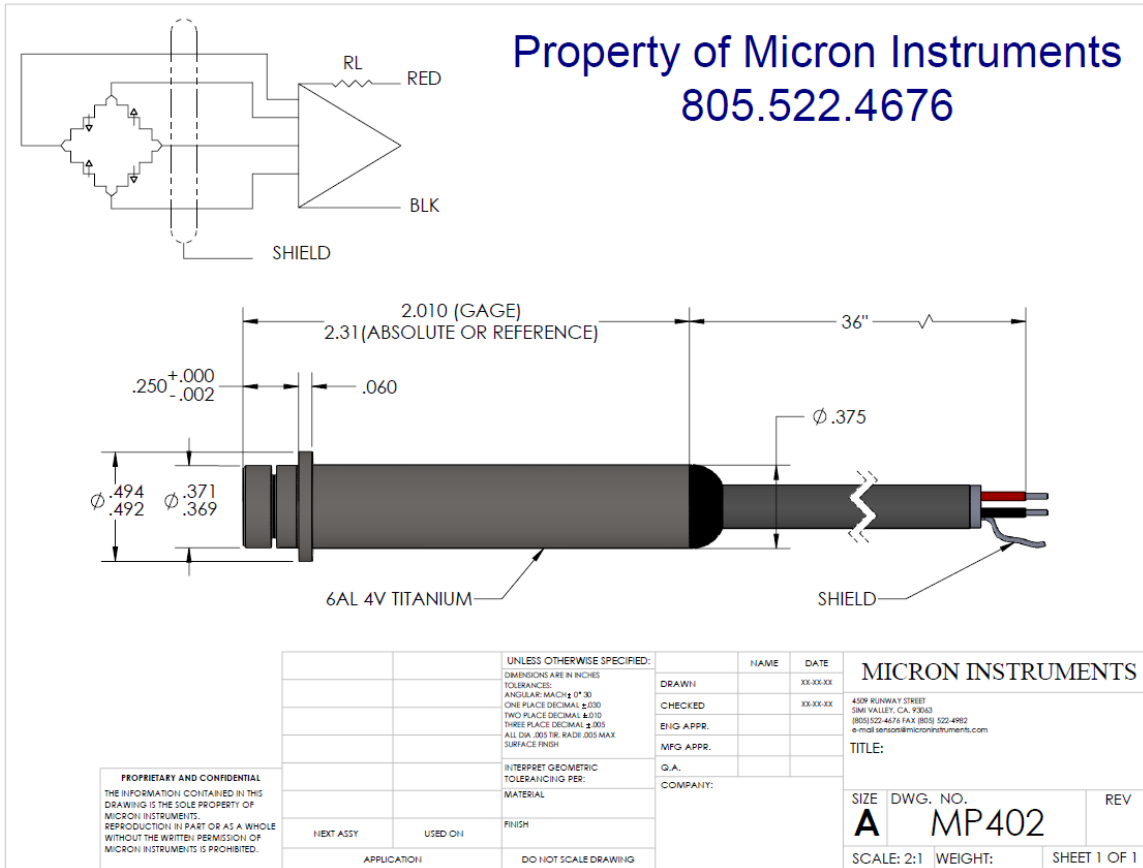


図 3.4-140 Micron Instrument 社製 MP402 外形図



図 3.4-141 Micron Instrument 社製 MP402 外観

B-5 前方探査ソナー

海中が濁っていたり、距離が離れていたたりして TV カメラで障害物などを検知・視認が困難な場合のために、超音波を利用して探査をする前方探査ソナーとして、AUV や ROV で使用実績がある小型のイメージングソナーとして、TRITECH 社の Micron Sonar を採用した。

表 3.4-25 に Micron Sonar の主要仕様、図 3.4-142 に Micron Sonar の外観および付属ケーブルを示す。図 3.4-143 に付属ソフトウェアによるソナー画面の例を示す。

表 3.4-25 Traiteck 社製 Micron Sonar 機器仕様

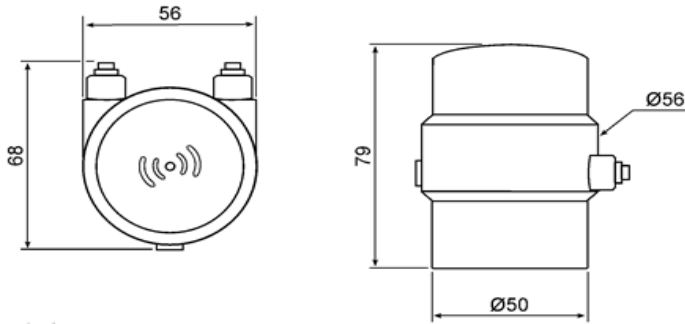

Specification	
	
Not to scale, dimensions in mm.	
Acoustic	
Operating frequency	CHIRP centred on 700kHz
Beamwidth	35° vertical, 3° horizontal
Maximum range	75m
Minimum range	0.3m
Range resolution	approximately 7.5mm (minimum)
Mechanical resolution	0.45°, 0.9°, 1.8°, 3.6°
Scanned sector	Variable up to 360°
Continuous 360° scan?	Yes
Sector offset mode?	Yes
Electrical, Communications and Software	
Power requirement	12 - 48V DC at 4VA (average)
Maximum cable length	1000m using RS485
Communication protocols	RS485 (twisted pair), RS232
Surface control	Computer using standard serial port, SeaHub or USB-RS232/RS485 converter
Control software	Tritech Seaneet Pro, Micron software or low-level command protocol
Software features	True acoustic zoom, instant reversal, image measurement, inverted head operations
Physical	
Weight in air	324g
Weight in water	180g
Depth rating	750m standard, 3000m optional
Temperature range	-10 to 35°C (-20 to 50°C in storage)
Specifications subject to change according to a policy of continual development.	
Document: 0650-SOM-00004, Issue: 04	
Marketed by:	Tritech International Ltd Peregrine Road, Westhill Business Park Westhill, Aberdeenshire, AB32 6JL United Kingdom sales @tritech.co.uk +44(0)1224 744 111
	



図 3.4-142 Trittech 社製 Miron Sonar および付属ケーブル外観

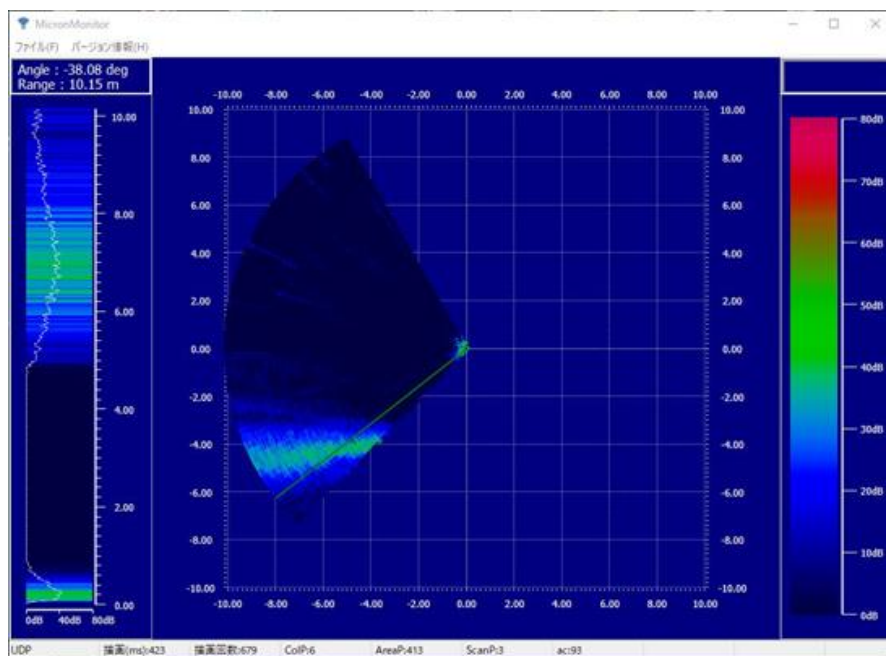


図 3.4-143 マイクロンソナー画面

C TV カメラおよびライト

海中充電スタンドへの接近、進入、離脱は、基本的には TV カメラ画像を見ながらオペレータが遠隔操縦で行うものとする。このため、前方監視用、後方監視用として機体前部と後部に計 2 台の TV カメラ、およびそれぞれの TV カメラのためのライトを計 2 台装備する。

機体後部に TV カメラを設けるのは、有索の ROV モードで遠隔操縦をするので、海中充電スタンドの給電コイルを通り抜けることは出来ないため、給電コイルからの離脱は後進で行う必要があり、その際の後方およびケーブルの状態を監視するためである。

C-1 TV カメラ

前方監視用、後方監視用とも HD カメラとし、ホバリング型 AUV で実績のある日立国際電気社 KP-HD20A を採用した。

図 3.4-144 に TV カメラを TV カメラ耐圧容器に収納した状態の組立断面図を、図 3.4-145 に TV カメラ耐圧容器外観およびその耐圧容器に TV カメラを収納した状態を、表 3.4-26 に TV カメラ仕様を示す。

TV カメラ耐圧容器は、主耐圧容器前部蓋および後部蓋上部側に設けた貫通孔に取り付ける。画像データ伝送のための合波器、Ethernet 光変換器は、主耐圧容器内に収納する。

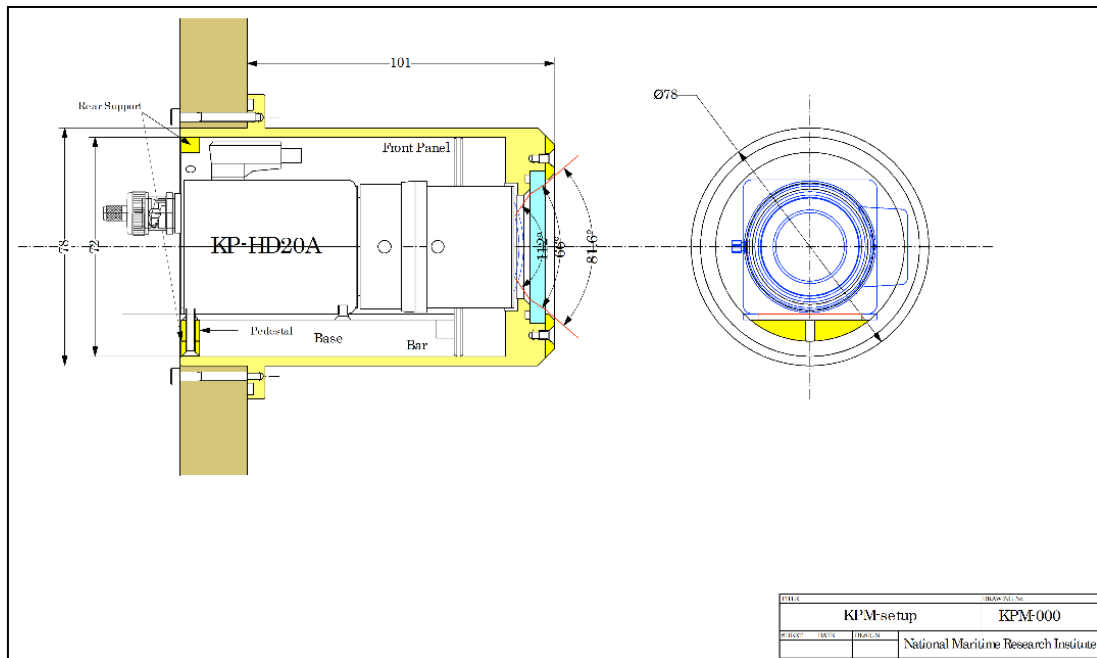
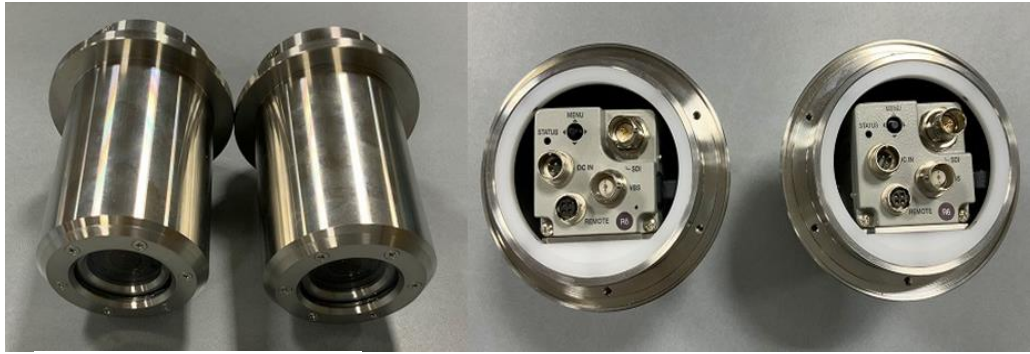


図 3.4-144 TV カメラ及び TV カメラ耐圧容器



(a)TV カメラ耐圧容器

(b) TV カメラ耐圧容器に TV カメラ収納

図 3.4-145 TV カメラ耐圧容器外観と耐圧容器に TV カメラを収納した状態

表 3.4-26 TV カメラ (KP-HD20A) 仕様

主な仕様

(1) 撮像素子	1/3" プログレッシブ方式 MOS
総画素数	2010(H)×1108(V) 220万画素
有効画素数	1944(H)×1092(V) 210万画素
(2) 同期方式	内部同期
(3) 出力信号	HD-SDI 出力/ アナログ CVBS 出力
(4) 出力フォーマット	HD-SDI 出力: 1080i 59.94/ 50, 1080p 29.97/ 25 CVBS 出力: NTSC, PAL
(5) 伝送距離	HD-SDI 標準モード: 最大 100m (5C-FB 75Ω) HD-VLC モード: 最大 300m (5C-2V 75Ω/ オプションの MU-HD101 使用時) *モード選択可能
(6) 最低被写体照度	カラー: 0.2lx(F1.2/ AGC 48dB)
(7) S/N 比	50dB (AGC: OFF/WeightON の条件で測定)
(8) 水平解像度	800TV 本以上
(9) レンズマウント	C/ CS *C: Cマウントアダプター (別売品) 使用
(10) 電源/消費電力	DC+12V または MU-HD101 からの同軸電圧 約 5.8W
(11) 動作周囲温度	-10~ +45℃
(12) 寸法	44(W)×44(H)×59(D)mm
(13) 重量	約 200g
(14) 感度設定(AGC)	OFF/ 自動(最大 48dB)/ 手動(0dB~+48dB) +1dB ステップで調整可能
(15) 電子シャッター	OFF/ 自動(AES)/ 手動 (1/30(1/25)~1/50000 秒)
(16) 逆光補正(BLC)	OFF/ ON (測光エリア設定可能)
(17) ホワイトバランス制御	自動: ATW/ AWC 手動: Manual (2500K~10000K)
(18) ワイドダイナミックレンジ機能	OFF/ ON/ AUTO *WDR: ダブルシャッターサンプリング 画像レベル調整/ガンマ補正/色レベル調整/黒レベル調整/輪郭補正量調整
(19) 画質調整	DC/VIDEO
(20) オートアイリス制御	RS-232C
(21) リモートコントロール	RS-232C
(22) アクセサリ(別売品)	レンズプラグ: E4-191J100 Cマウントアダプター: LA-D20AB 電源プラグ: R03-P3F リモートプラグ: HR10A-7P-4P(O1) マルチユニット: MU-HD101

C-2 TV カメラ用照明装置

TVカメラの照明用として、前方監視 TV カメラ用に機体フレーム下部前方部、後方監視 TV カメラ用に機体フレーム下部後方に LED ライト各 2 台を設置した。

光源は複数高輝度 LED 素子で構成し、採用した LED は日亜化学工業株式会社の NVSW119B、発光は白色連続点灯方式で、光量は 8,000lm-s /台程度とした。電源電圧は DC24V、消費電力は 65W 以下とした。

図 3.4-146 に LED ライトの外形図、図 3.4-147 に LED ライトの外観を示す。LED ライト前面はアクリルとし、耐圧水深は 100m である。

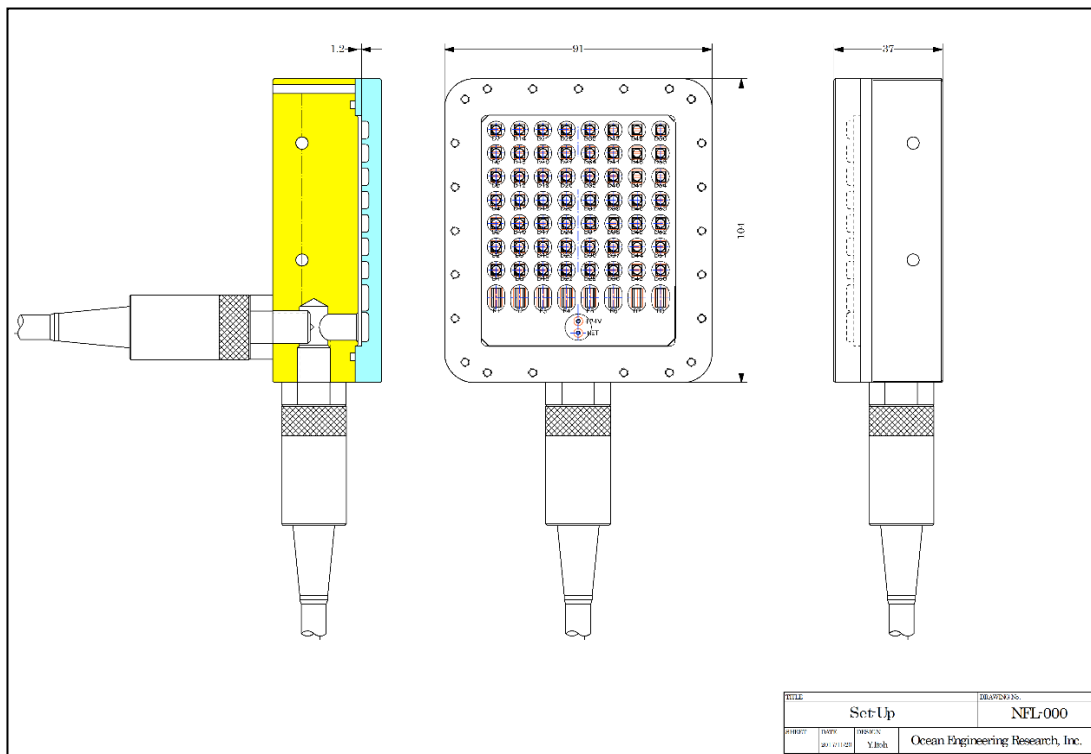


図 3.4-146 LED ライト外形図

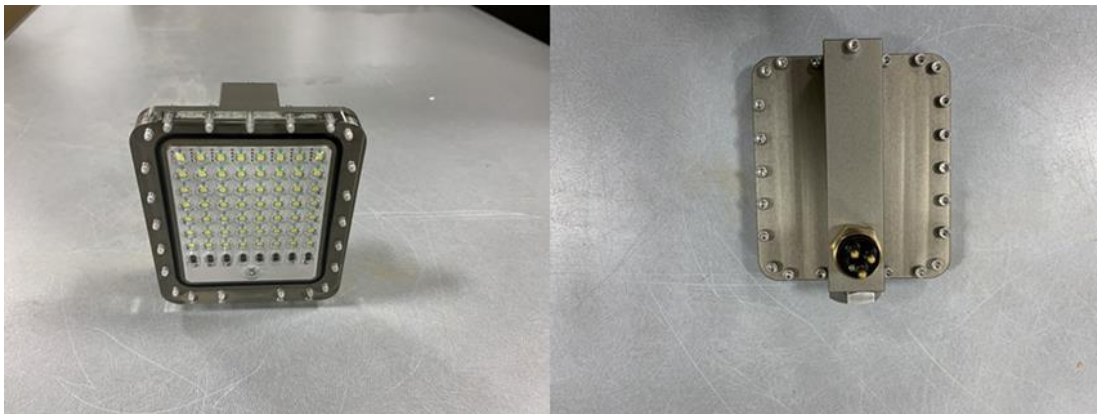


図 3.4-147 LED ライト外観

D アクチュエータ

D-1 スラスト

r-AUV は、海中充電スタンドへの接近、海中充電スタンドの給電コイルへの進入・滞留・離脱と言った複雑な 3 次元運動を低速で行う必要がある。低速の場合、十分な揚力が得られないため翼による機体制御は困難であり、自身で推力を発生するスラストによる機体制御を行うものとした。

3次元運動をするために、前後 (Surge)・上下 (Heave)・左右 (Sway) の併進運動と、垂直軸周りの回転運動 (Heading) を可能とする 4 自由度を制御するものとし、水平軸周りの回転運動 (Roll と Pitch) は制御しないものとする。

3次元運動のためのスラストは水平 4 台 (L1~L4)、垂直 2 台 (V1,V2) とし、図 3.4-148 に示す配置とした。

スラストは、各種 AUV で多くの使用実績がある Tecnadyne 社の MODEL521 を採用した。表 3.4-27 に MODEL521 スラストの機器仕様を、図 3.4-149 に外観を示す。

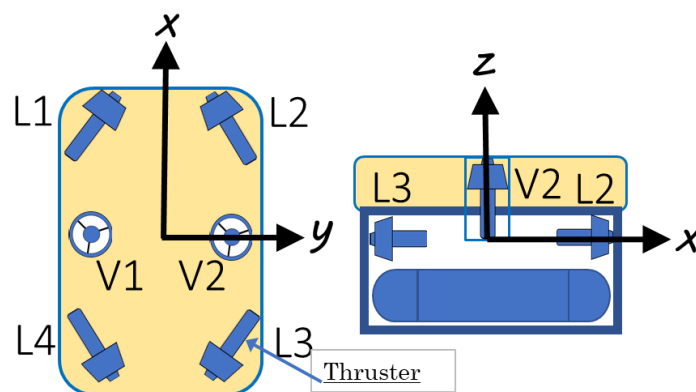


図 3.4-148 スラスト配置

D-2 バラスト投下装置

バラストリリーサは、航行型 AUV やホバリング型 AUV で多数使用され実績がある電磁石で保持する方式とした。

図 3.4-150 にバラスト投下装置の外観、図 3.4-151 にバラスト投下装置の外形・断面図を示す。

バラスト投下装置の吸着力はバラストウエイト 8.1kg に対して安全率 3 とし 24.3kg 以上とした。電源電圧は 5V で、消費電力は 1.5W 以下とした。バラストウエイトとの接合面は、海中での使用を考慮し無電解ニッケルめっきであるカニゼンめっき処理を施してある。バラスト投下装置は r-AUV の艇体中央下部に装備する 1 台と予備機 1 台の計 2 台製作している。



図 3.4-150 バラスト投下装置外観

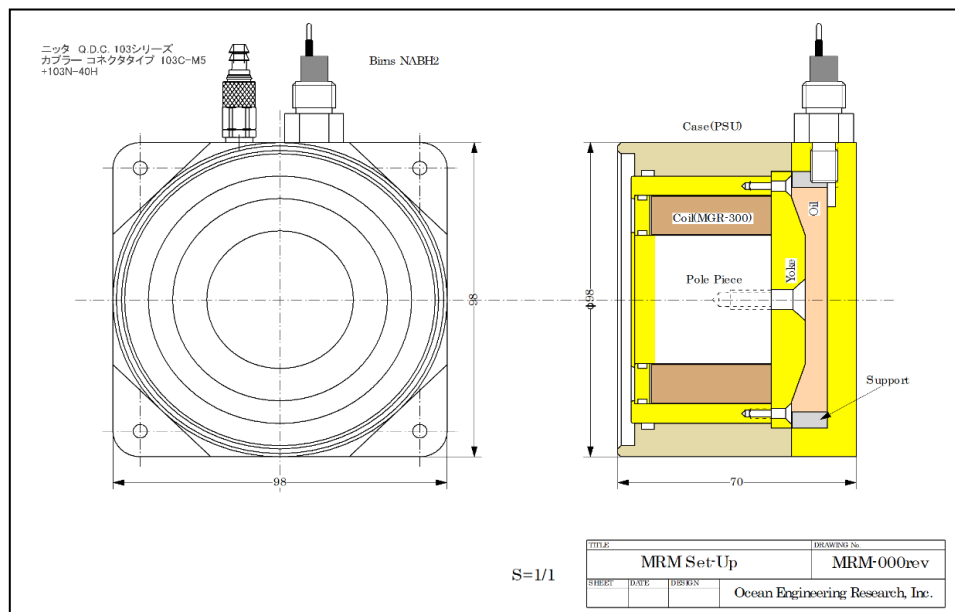


図 3.4-151 バラスト投下装置外形・断面図

E 通信装置

E-1 近距離無線装置

r-AUV の海面浮上時に、船上とデータ通信を行い、コースデータのダウンロードやビークルのログなどの各種データをアップロードするための無線 LAN による近距離無線装置を装備した。

E-1-1 近距離無線装置（無線 LAN 水中部）

図 3.4-152 に近距離無線装置(無線 LAN 水中部)を示す。Tuna-Sand 級ホバリング型 AUV で採用されている近距離無線装置と同じものとした。市販の無線 LAN 装置を改造して、耐圧深度 100m の PMMA(アクリル樹脂)製耐圧容器に水中コネクタを取り付けて収納している。

E-1-2 近距離無線装置（無線 LAN 親機）

近距離無線装置の船上部(無線 LAN 親機)に設置する親機は、i-com 社の SE-900WF を採用した。図 3.4-153 に近距離無線装置（無線 LAN 親機）の外観を、表 3.4-28 に機器仕様を示す。



図 3.4-152 近距離無線装置（無線 LAN 水中部）



図 3.4-153 近距離無線装置（無線 LAN 親機：SE-900WF）

表 3.4-28 無線 LAN 親機：SE-900WF 機器仕様

■ 一般仕様

電源：PoE (IEEE802.3af 準拠 最大 12W)
 使用環境：温度 -20 ~ +55℃ (0℃ 以下では常時通電時)*、湿度 5 ~ 95% (結露状態を除く)
 ★ -20℃ ~ 0℃ の環境では、電源投入して 1 時間以上経過してから、本製品をリセット (再起動) して通信を開始してください。
 外形寸法：約 140 (W) × 120 (H) × 53.5 (D) mm (本体のみ、突起物を除く)
 重量：約 1.2kg (本体接続 LAN ケーブル/取り付け金具を含む)
 適合規格：クラス B 情報技術装置 (VCCI)
 インターフェース：状態表示ランプ (PWR (緑)、MODE (緑)、LAN (赤)、無線 (赤))、〈MODE〉ボタン
 防水関係：IP54

■ 有線部

通信速度：10/100/1000Mbps (自動切り替え/全二重)
 インターフェース：RJ-45 型コネクタ × 1 (プラグ：5m ケーブル付：Auto MDI/MDI-X)
 ● IEEE802.3/10BASE-T 準拠
 ● IEEE802.3u/100BASE-TX 準拠
 ● IEEE802.3ab/1000BASE-T 準拠
 ● IEEE802.3af 準拠
 透過プロトコル：マルチクライアント使用時は IPv4 のみ

■ 無線部

無線設備区分：証明規則第二条第一項第十九号の九
 使用周波数：40MHz 帯域幅時 4920/4960MHz
 20MHz 帯域幅時 4920/4940/4960/4980MHz
 10MHz 帯域幅時 4915/4920/4925/4935/4940/4945MHz
 アンテナ：内部アンテナ × 2
 外部アンテナ用コネクタ SMA-J 型 × 2

E-2 GPS 装置（水中部）

図 3.4-154 に GPS 装置 (水中部) を示す。近距離無線装置と同様に、Tuna-Sand 型ホバリング型 AUV で採用されている GPS 装置と同じものとした。市販の GPS 装置を改造して、

耐圧深度 100m の PMMA(アクリル樹脂)製の耐圧容器に水中コネクタを取り付けて収納している。



図 3.4-154 GPS 装置(水中部)

E-3 光ファイバーケーブルシステム

E-3-1 光ファイバーケーブル

r-AUV の ROV モードでの操縦用ケーブルは、遠隔操縦用として使用実績がある FALMAT 社の細径ポリウレタン外装光ファイバーケーブル FALMAT 社 Xtreme Light FM011402MM12 ϕ 2.3mm を採用した。

表 3.4-29 に光ファイバーケーブルの仕様および構造、図 3.4-155 にドラムに巻いた状態の光ファイバー外観を示す。ケーブル長は 80m とし、2 式調達した。

ビークルとの接続に使用するケーブルコネクタは、Glenair 社 Aquamouse 802-009-06AB 6-1AA (コネクタ) 802-011-07AB-6-1BA (レセ) を採用した。

海中給電実験は「3.4.2.1.1 受電用 AUV のミッション」で示したように、バージのごく近傍で行うものであり、r-AUV も低速であるため、光ファイバーの繰り出しや巻取りは、オペレーション担当者の手によるハンドリングで対応するものとし、光ファイバー用ウインチ等は装備しない。

表 3.4-29 光ファイバーケーブルの仕様および構造

項目		仕様	備考	
光ファイバケーブル	材質	石英系SM型(低OHピーク型)		
	モードフィールド径	8.6±0.4 μm		
	クラッド径	125±0.7 μm		
	モードフィールド偏心量	0.5 μm以下		
	クラッド非円率	0.7%以下		
	スクリーニングレベル	1.5%以上		
	曲げ特性 (30mm φ×10ターン)	損失変動0.5dB以下 (λ=1550nm)		
	被覆	材質	ノンハロゲン樹脂	
		外径	0.9±0.1mm	
	抗張力体	PBO繊維	縦添え	
内部シース	材質	ポリエステル	色:橙	
	材質	ポリオレフィン	色:黄	
外部シース	外径	約2.8mm		
	概算質量	空中	5.8kg/km	
海中		-0.4kg/km	最大0kg/km以下	

(注) 表中の構造寸法は標準値を示す。(但し、約のついた数値は参考値を示す。)

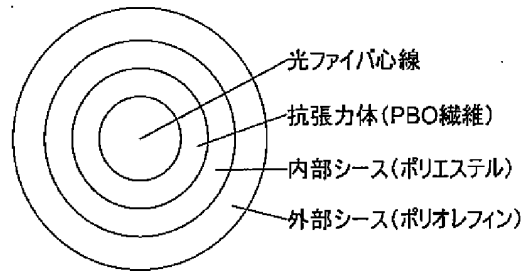


図 3.4-155 光ファイバーケーブル外観

E-3-2 光通信装置

ROV モードで光ファイバーケーブルを介したデータの光伝送は、粗波長分割多重 (CWDM : Coarse Wavelength Division Multiplexing) 通信方式によるものとした。

図 3.4-156 に水中部と船上部の光通信装置 (粗波長分割多重 (CWDM) 通信装置) の外観を、に CWDM 構成図を示す。

光通信装置は、図中に型名を示す CANARE 社製 CWDM 用の、1000BASE-T 信号の電気・光コンバータ : TRM-300A、受信用光・電気コンバータ、送信用電気・光コンバータ : EO3G-100A、8ch-光合分波装置 : FCWDM-8B で構成されている。



図 3.4-156 光通信装置 (粗波長分割多重 (CWDM) 通信装置)

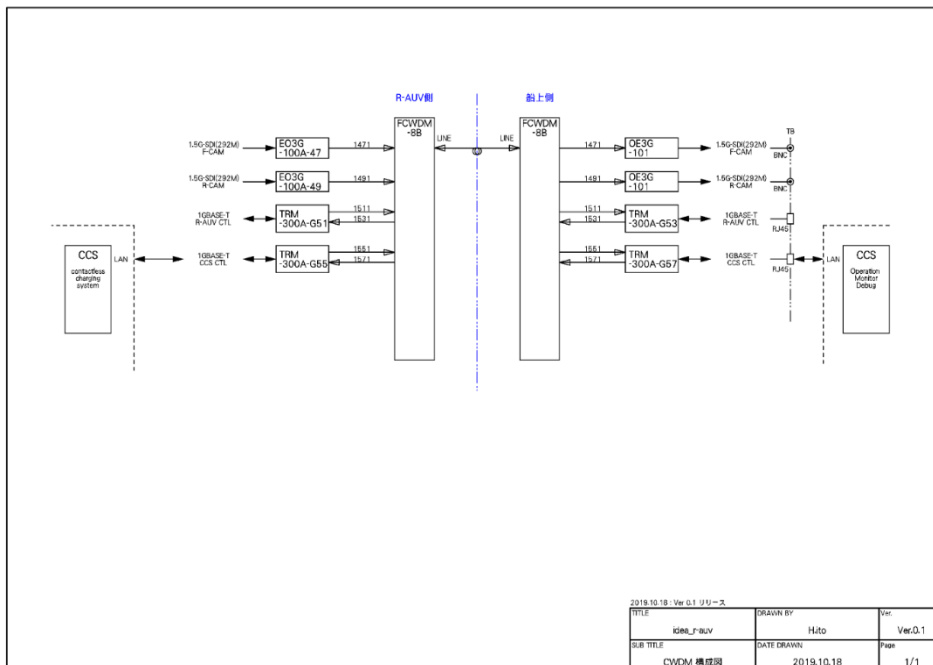


図 3.4-157 粗波長分割多重 (CWDM) 構成図

F 電装系

F-1 装置間接続

図 3.4-158 に搭載機器・装置と主耐圧容器間の電氣的接続を示した機器・主耐圧容器間接続図を示す。表 3.4-30、表 3.4-31、表 3.4-32 に各機器と主耐圧容器の接続に必要な水中コネクタ表、水中ケーブル表、水中コネクタ用ダミーキャップ表を示す。

F-2 主耐圧容器内電装系総合・結線

図 3.4-159 に主耐圧容器内機器の電氣的総合接続図を示す。電装系を、図 3.4-160 に通信・制御システム結線図、図 3.4-161 に電源結線図、図 3.4-162 にスラスト電源制御結線図、図 3.4-163 に LED 照明電源制御結線図を示す。

表 3.4-30 水中コネクタ表

No.	型名	メーカー	仕様	使用数	予備	手配数 (使用+予備)
1	TCBH3FSS	BIRNS		2	2	4個
2	TCBH3MSS	BIRNS		2	2	4個
3	TCBH4FSS	BIRNS		1	1	2個
4	TCBH4MSS	BIRNS		1	1	2個
5	TCBH7FSS	BIRNS		1	1	2個
6	TCBH7MSS	BIRNS		1	1	2個
7	MCBH3F	BIRNS		4	4	8個
8	MCBH3M	BIRNS		4	4	8個
9	MCBH4F	BIRNS		2	2	4個
10	MCBH6F	BIRNS		7	7	14個
11	MCBH8F	BIRNS		3	3	6個
12	MCBH8M	BIRNS		1	1	2個

表 3.4-31 水中ケーブル表

No.	C-No.	自プラグ	長さ(m)	相手プラグ	メーカー	仕様補足	使用数	予備	手配数 (使用+予備)
1	A1	TCIL4F + FLS-TC	1.0	TCIL4M + FLS-TC	Birns		1	1	2本
2	A2	TCIL7F + FLS-TC	1.0	TCIL7M + FLS-TC	Birns		1	1	2本
3	A3	MCIL3F + FLS-MC	1.0	MCIL3M + FLS-MC	Birns		1	1	2本
4	A4	MCIL3F + FLS-MC	1.0	MCIL3M + FLS-MC	Birns		1	1	2本
5	A5	TCIL3F + FLS-TC	1.0	TCIL3M + FLS-TC	Birns		1	1	2本
6	A6	TCIL3F + FLS-TC	1.0	TCIL3M + FLS-TC	Birns		1	1	2本
7	A91A	MCIL4M + FLS-MC	0.0	-	Birns	Pin1-2間ショート結線	1	1	2本
8	A92A	MCIL8M + FLS-MC	3.0	-	Birns	3m ビグテール	1	1	2本
9	A93A	MCIL8F + FLS-MC	3.0	-	Birns	3m ビグテール	1	1	2本
10	A11	MCIL8M + FLS-MC	1.0	MCIL8F + FLS-MC	Birns		1	1	2本
11	A12	MCIL3F + FLS-MC	1.0	MCIL3M + FLS-MC	Birns		1	1	2本
12	A13	MCIL3F + FLS-MC	1.0	MCIL3M + FLS-MC	Birns		1	1	2本
13	A19A	MCIL4M + FLS-MC	0.0	-	Birns	Pin1-2間ショート結線	1	1	2本
14	A19C	MCIL4M + FLS-MC	3.0	-	Birns	3m ビグテール	1	1	2本

表 3.4-32 水中コネクタ用ダミーキャップ表

No.	C-No.	自プラグ	長さ(m)	相手プラグ	メーカー	仕様補足	使用数	予備	手配数 (使用+予備)
101	-	TCBH4F用ダミーキャップ	-		Birns	TCBH4F用ダミーキャップ FLS-TC付き	1	1	2本
102	-	TCBH4M用ダミーキャップ	-		Birns	TCBH4M用ダミーキャップ FLS-TC付き	1	1	2本
103	-	TCBH7F用ダミーキャップ	-		Birns	TCBH7F用ダミーキャップ FLS-TC付き	1	1	2本
104	-	TCBH7M用ダミーキャップ	-		Birns	TCBH7M用ダミーキャップ FLS-TC付き	1	1	2本
105	-	TCBH3F用ダミーキャップ	-		Birns	TCBH3F用ダミーキャップ FLS-TC付き	2	2	4本
106	-	TCBH3M用ダミーキャップ	-		Birns	TCBH3M用ダミーキャップ FLS-TC付き	2	2	4本
107	-	MCDC3F + FLS-MC	-		Birns	MCBH3M/IL3M用ダミーキャップ	4	4	8本
108	-	MCDC3M + FLS-MC	-		Birns	MCIL3F用ダミーキャップ	4	4	8本
109	-	MCDC4F + FLS-MC	-		Birns	MCBH4M用ダミーキャップ	0	2	2本
110	-	MCDC4M + FLS-MC	-		Birns	MCBH4F用ダミーキャップ	2	2	4本
111	-	MCDC6F + FLS-MC	-		Birns	MCIL6M用ダミーキャップ	0	7	7本
112	-	MCDC6M + FLS-MC	-		Birns	MCIL6M用ダミーキャップ	7	7	14本
113	-	MCDC8F + FLS-MC	-		Birns	MCBH8M用ダミーキャップ	1	1	2本
114	-	MCDC8M + FLS-MC	-		Birns	MCBH8F用ダミーキャップ	3	3	6本

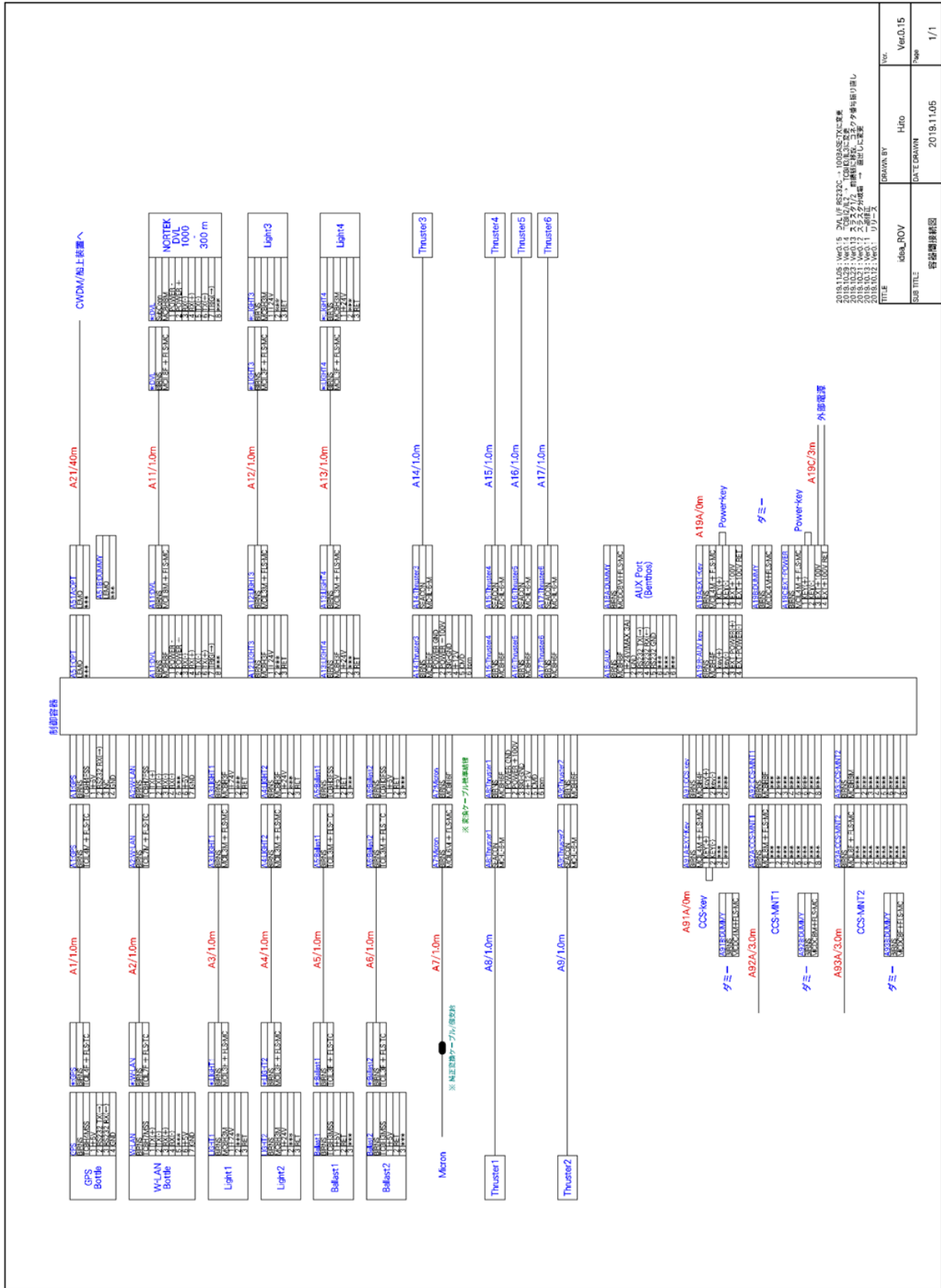


図 3.4-158 機器・主耐圧容器間接続図

2018.1.05: Ver.015 2xL/F/8222C → 100BASE-TXに準拠
 2018.10.23: Ver.016 2xL/F/8222C → 100BASE-TXに準拠
 2018.10.21: Ver.017 2xL/F/8222C → 100BASE-TXに準拠
 2018.10.12: Ver.018 2xL/F/8222C → 100BASE-TXに準拠
 2018.10.12: Ver.019 2xL/F/8222C → 100BASE-TXに準拠

TITLE	idea_ROV	DRAWN BY	Hiro	Ver.	Ver.0.15
SUB TITLE	船室設備接続図	DATE DRAWN	2019.11.05	Scale	1/1

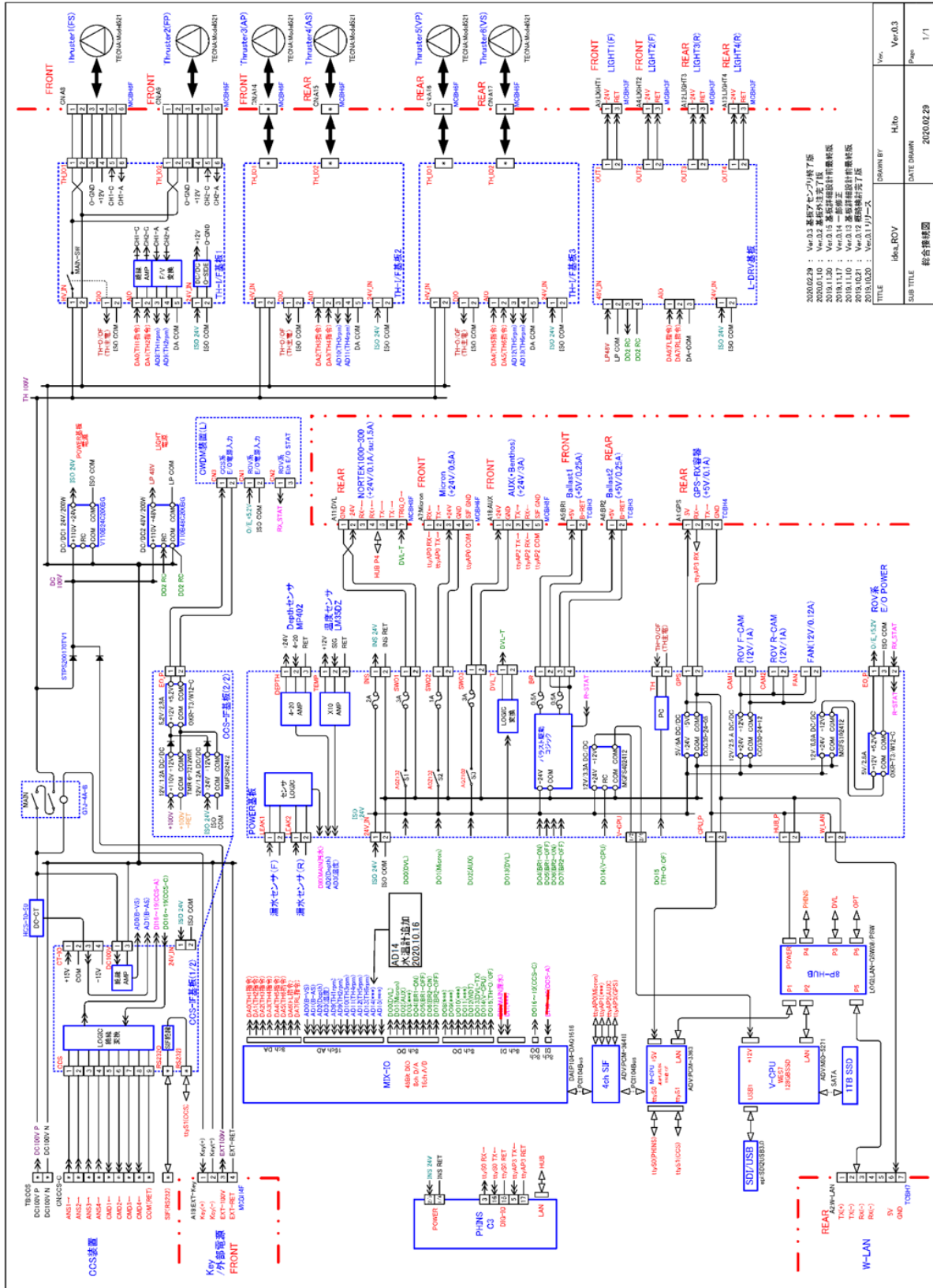


图 3.4-159 耐圧容器内機器電気の総合接続図

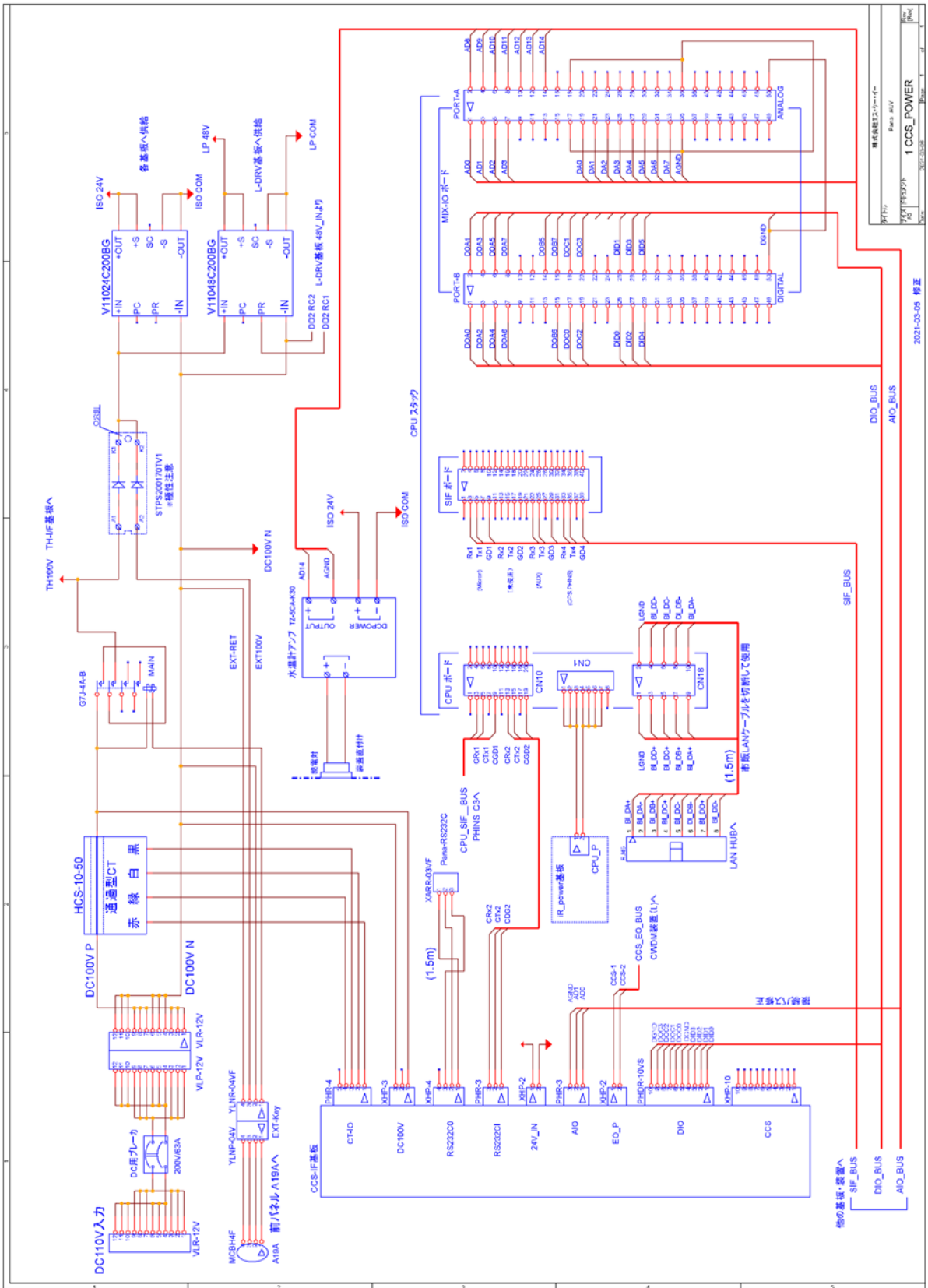
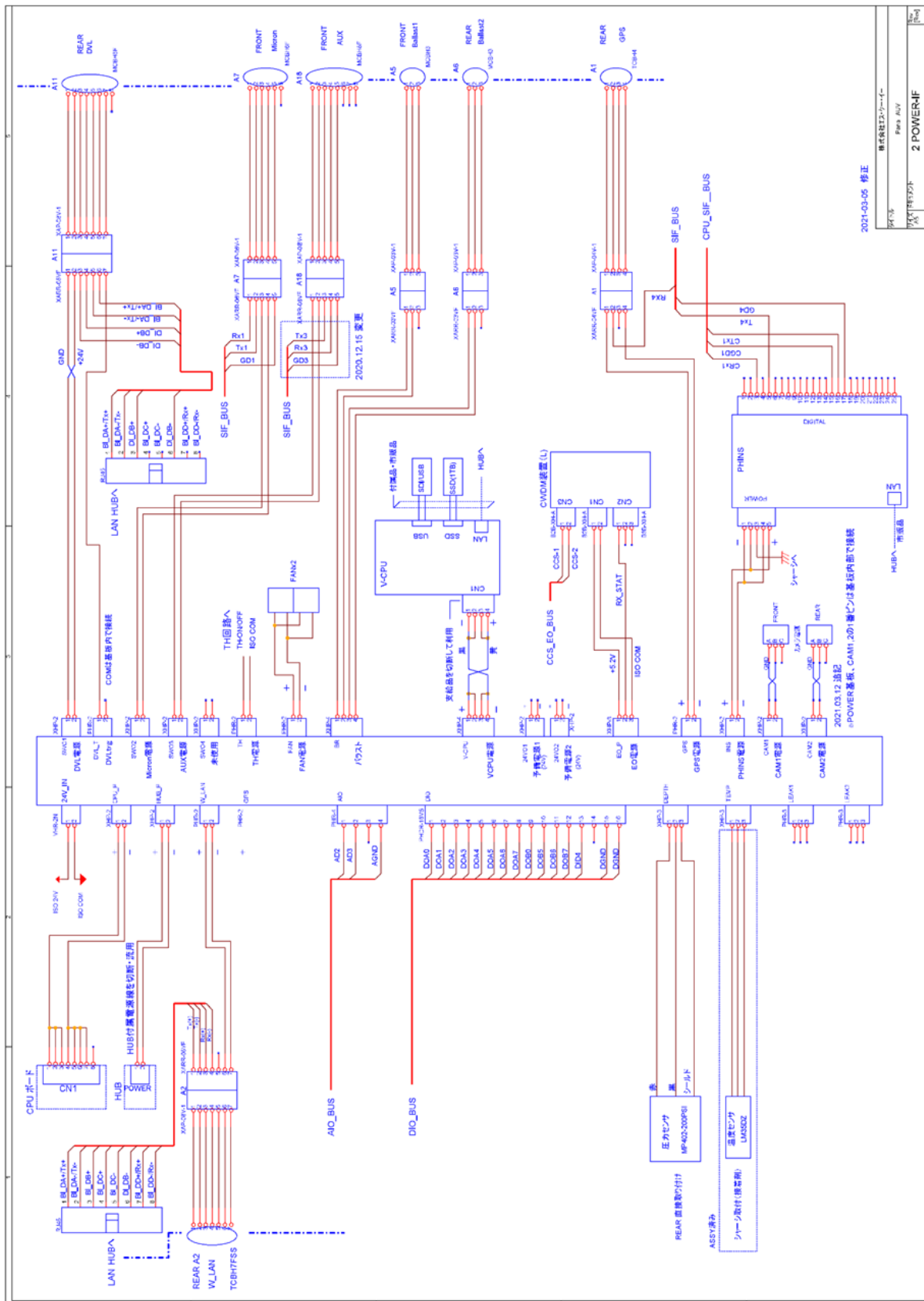


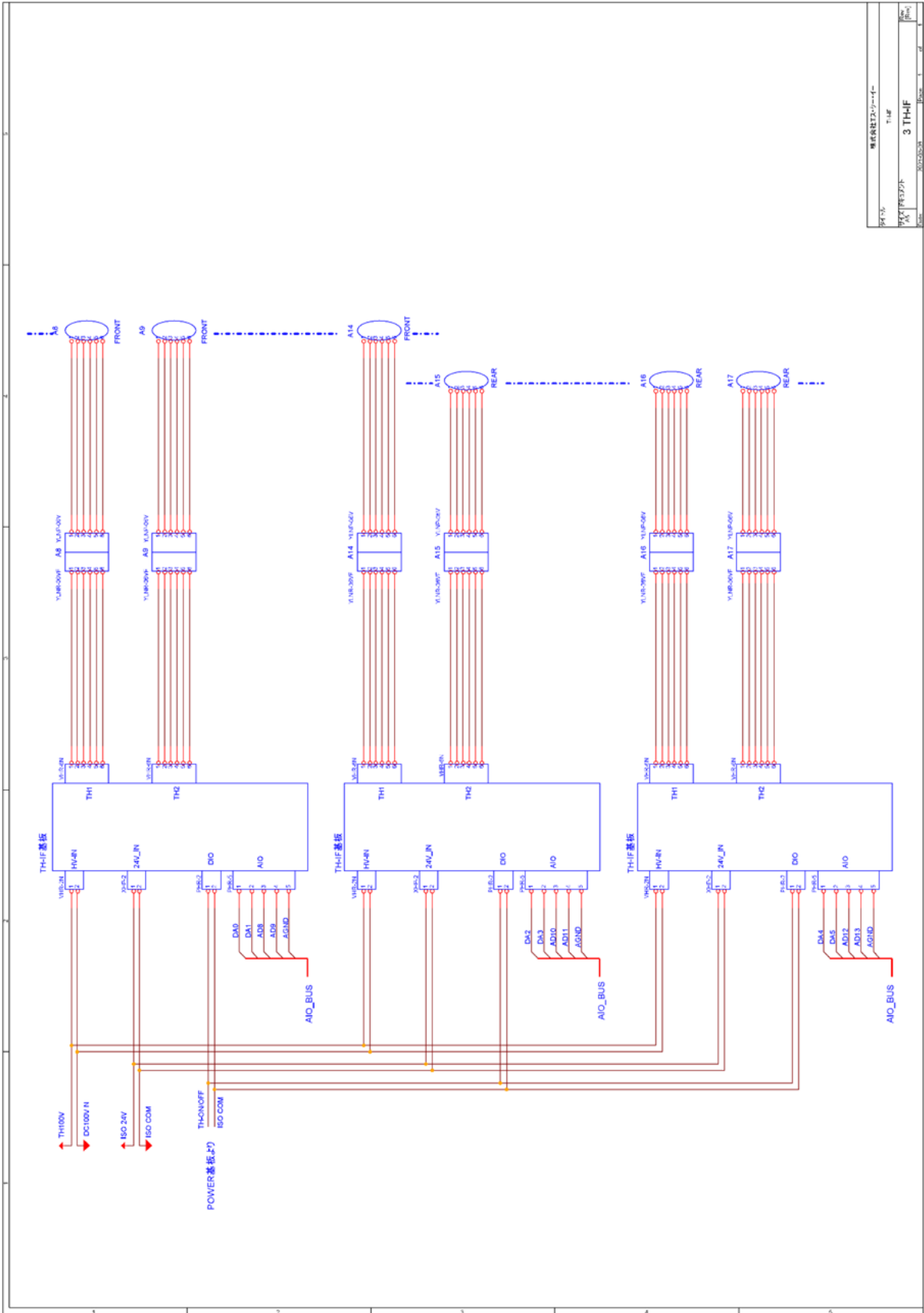
図 3.4-160 通信・制御システム結線図



2021-03-05 修正

機种名	機种名: 2011-11-11
部品名	部品名: 2 POWER-JF
図番	図番: 20210305
製	製: 2021.03.05

図 3.4-161 電源結線図



図名	機軸制御2-スラスト
図番	THIF
図名	3 THIF
図番	30752528
図尺	1/2

図 3.4-162 スラスト電源制御結線図

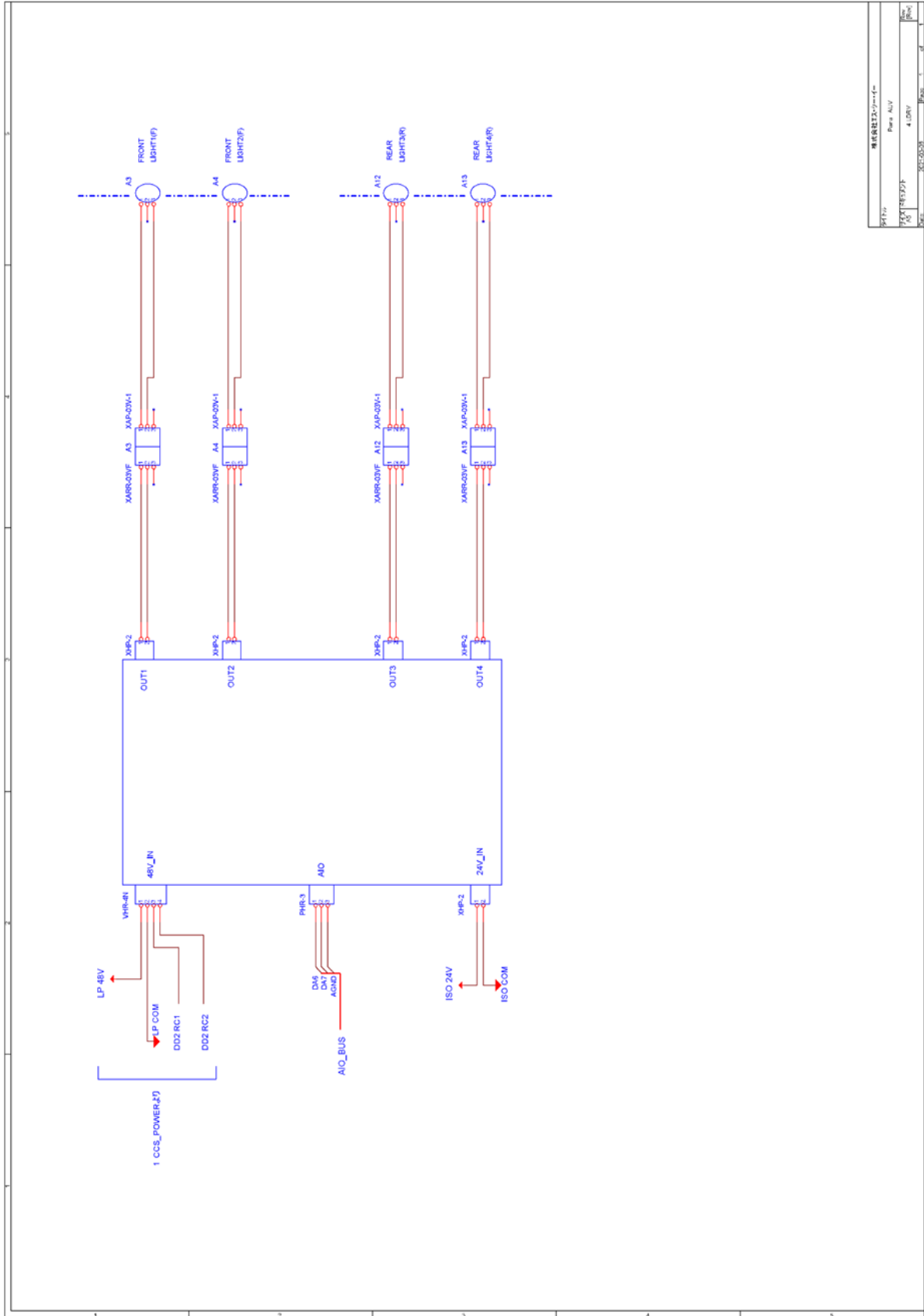


图 3.4-163 LED 照明电源控制接线图

3.4.2.2. r-AUV 構造の設計・製作

前述の「3.4.2.1.3r-AUV の形式」で述べたように、r-AUV はホバリング型を採用するため、基本的には図 3.4-133 の Tuna-Sand と同様な形状とした。

3.4.2.2.1. 耐圧容器

電子機器を収納する耐圧容器は金属材料で製作することになるが、その場合、給電コイル内での受電中に強電磁界の影響により耐圧容器筐体に渦電流が発生し、伝送効率の低下を招く恐れがある。また、電子機器類への受電中の磁気影響を避ける必要がある。その対策として、耐圧容器の表面を磁性材料で覆って渦電流を抑制する方法を採用した。

r-AUV では、磁気シールドがし易いようにするため、各機器を出来るだけまとめて一つの耐圧容器に収納し、その表面を磁性体であるフェライトで覆う方法を採用することとした。

A 耐圧容器材料の選定

再三述べるように、AUV のような水中機器では、軽量・コンパクトが必須であり、出来るだけ軽量となる材料が採用され、強度・重量や費用等を勘案して、大深度用ではチタン合金、比較的浅深度ではアルミニウム合金が採用されることが多い。r-AUV は 50m 以浅の深度で使用されるので、耐圧容器はアルミニウム合金を採用することとしたが、海水中で使用することから、防食のために TUFRAM 処理などの酸化被膜で被覆するものとした。また、コネクタ取付け等のための座などを溶接する必要がある。このため、r-AUV では、各種水中機器で多数の使用実績があるアルミニウム合金で、耐食性が良く、溶接性が良好で、表面処理性が非常に良い A6061-T6 を採用した。

B 主耐圧容器の設計

主耐圧容器には、r-AUV を航行制御するために必要な各種電子機器類、エネルギー源である電池、および r-AUV 研究開発の主目的である受電・充電システムを収納する。水中機器では軽量・コンパクトが必須であるため、主耐圧容器も必要最小限の大きさとする。

表 3.4-33 に主耐圧容器の必要板厚を算出・判定した基礎式を示す。

主耐圧容器は円筒殻で、両端は多数のコネクタが取付け可能とするために平板蓋とした。容器外周に受電コイルを巻き付ける形となることから、受電コイル目標径約 500mm を得るために、コイル線径 22.6mm、フェライト厚さ 5mm ~10mm、収納機器形状等を考慮して、主耐圧容器は内径 446mm、胴部長 1004mm とし、最大深度 50m、安全率 1.5、材質 A6061-T6 として、主耐圧容器胴部の必要板厚を検討した。

表 3.4-33 耐圧強度算出基礎式

耐圧強度算出基礎式

外圧円筒
弾性座屈
S.Timoshenko 圧力容器 野原 石松

$$P = \frac{2E\left(\frac{t}{D}\right)}{n^2 + 2\left(\frac{\pi D}{2L}\right)^2} \left[\frac{1}{3} \left\{ n^2 + \left(\frac{\pi D}{2L}\right)^2 \right\}^2 \frac{1}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D}\right)^2 + \frac{1}{\left\{ n^2 \left(\frac{2L}{\pi D}\right)^2 + 1 \right\}^2} \right]$$

機械工学ハンドブック 海中ロボット総覧

$$P = E \left(\frac{t}{r}\right) \left\{ \frac{\pi^4}{n^4(n^2-1)} \left(\frac{t}{L}\right)^4 + \frac{(n^2-1)}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{r}\right)^2 \right\}$$

D.F.Widenburg 圧力容器 野原 石松

$$P = \frac{2.42E}{(1-\nu^2)^{3/4}} \left[\frac{L}{D} - 0.45 \left(\frac{t}{D}\right)^{1/2} \right] \left(\frac{t}{D}\right)^{3/2}$$

周方向応力 機械工学便覧

$$\sigma_\theta = -2P \frac{k^2}{(k^2-1)}$$

$$\square k = \frac{D+2t}{D}$$

<i>P</i>	Pressure	MPa
<i>E</i>	Young's Modulus	MPa
<i>t</i>	Wall Thickness	mm
<i>D</i>	Inner Diameter	mm
<i>n</i>	Buckling Mode	2,3,...
<i>ν</i>	Poisson's Ratio	-
<i>r</i>	Average Radius	$r = (D+t)/2$
<i>L</i>	Length	mm
<i>Dc</i>	Conn. Hole Dia.	mm

球 機械工学便覧

$$P_r = \left[\frac{2E}{\sqrt{3}(1-\nu^2)} \right] \left(\frac{t}{r}\right)^2$$

$$\sigma_r = \frac{P(D+t)}{4t}$$

Connector Hole 補強 海中ロボット総覧

$$t_p = \sqrt{\frac{P}{\sigma} \times \frac{2.1 \times D^2 + 2.2 \times D^2}{4}}$$

耐圧強度計算結果を表 3.4-34 に示す。胴部必要板厚は、表 3.4-33 耐圧強度算出基礎式に示したいずれの基礎式に於いても、弾性座屈圧力と最大周方向応力が共に許容範囲の板厚を採用することとした。

表 3.4-34 から分かるように、胴部板厚は 4.5mm あればいずれの基礎式でも採用可の判定となった。この値を基に、過去の実績を参考に、容器製作での機械加工性や給電コイル取出し座の取付け加工性等を考慮して、実際の直胴部板厚は、7mm とした。

容器両端の平板蓋は必要板厚 17mm に対し、コネクタ等取付けのねじ深さ等を考慮して、実際の板厚は 22mm とした。

図 3.4-164 に主耐圧容器直胴部、図 3.4-165 に主耐圧容器前部蓋、図 3.4-166 に主耐圧容器後部蓋を示す。前部蓋、後部蓋は、直胴部両端に V バンドで締結する方式とした主耐圧容器の直胴部、前部蓋、後部蓋の表面は、防食や耐摩耗性向上の為に TUFAM 処理による硬質アルマイトとフッ素樹脂の複合被膜で被覆している。

直胴部には、受電コイルの取り込み孔があり、前部蓋、後部蓋には、それぞれ上部側に TV カメラ装置用、下部側に各種水中コネクタ用の取付け孔を設けている。

表 3.4-34 主耐圧容器強度表計算

基本条件	使用深度	m	50		
	使用圧力	MPa	0.50225		
	胴部安全率		1.5		
	胴部設計圧力	MPa	0.75		
	容器内径	mm	446		
	胴部全長	mm	1,004		
	座屈モード	n	2		
			採用板厚 ↓		
	材料		A6061-T6	A6061-T6	A6061-T6
材料特性	ヤング率	kg/mm ²	7,100	7,100	7,100
		GPa	69.6	69.6	69.6
	ポアソン比	-	0.33	0.33	0.33
	耐力	kg/mm ²	25	25	25
		MPa	265	265	265
	密度	kg/little	2.69	2.69	2.69
	K1		2.029	2.029	2.029
	K2		0.281	0.281	0.281
	r		225.150	225.250	226.500
機械工学 ハンド ブック	胴部肉厚	mm	4.3	4.5	7.0
	弾性座屈圧力	MPa	6.96	7.30	11.88
		判定	OK	OK	OK
	最大周方向応力	MPa	40.20	38.47	25.14
		判定	OK	OK	OK
	$k^{**2}=(D+2*t)/D)^{**2}$		1.04	1.04	1.06
S.Timo shenko	胴部肉厚	mm	4.3	4.5	7.0
	弾性座屈圧力	MPa	3.94	4.15	7.02
		判定	OK	OK	OK
	$(\pi D/2l)^2$		0.48690	0.48690	0.48690
	t/D		0.00964	0.01009	0.01570
	最大周方向応力	MPa	40.20	38.47	25.14
		判定	OK	OK	OK
	$k^{**2}=(D+2*t)/D)^{**2}$		1.04	1.04	1.06
D.F. Windenburg	胴部肉厚	mm	4.3	4.5	7.0
	弾性座屈圧力	MPa	0.74	0.83	2.47
		判定	NO	OK	OK
	$2.42/(1-\nu^2)^{(3/4)}$		2.64	2.64	2.64
	Do		454.60	455.00	460.00
	最大周方向応力	MPa	40.20	38.47	25.14
		判定	OK	OK	OK
	$k^{**2}=(D+2*t)/D)^{**2}$		1.04	1.04	1.06
結果	胴部重量	kg	16.43	17.20	26.90
	胴部浮力	kg	167.03	167.33	171.03
	水中重量	kg	-150.61	-150.13	-144.12
	平板蓋(固定)	mm	10	10	10
	平板蓋(支持)	mm	13	13	13
		$k^{**2}=(D+2*t)/D)^{**2}$		1.04	1.04
	$t/r=2*t/(D+t)$		0.02	0.02	0.03
		圧縮強度	MPa		
半径減少	HDBK	$dr=r^2*p/tE$	0.083	0.080	0.051
	Timoshenko		0.083	0.080	0.051
蓋の撓み	t	mm	11.000	11.000	11.000
	$\delta l=3(1-\nu^2)Pr^4/(16Et^3)$		2.241	2.241	2.241
	蓋板厚:必要最小	mm	17	17	17
	蓋板厚:採用	mm	22	22	22

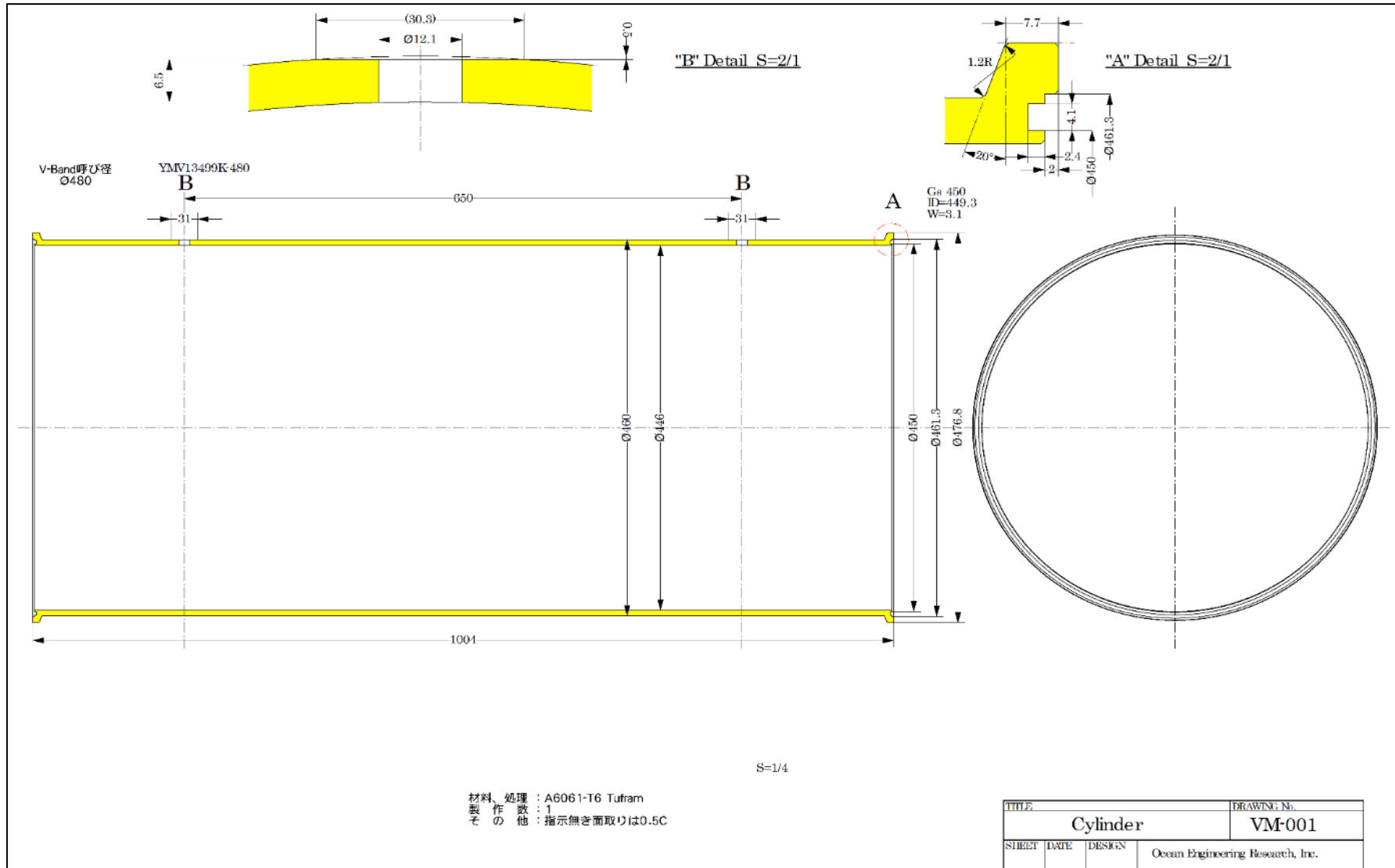


図 3.4-164 主耐圧容器直胴部

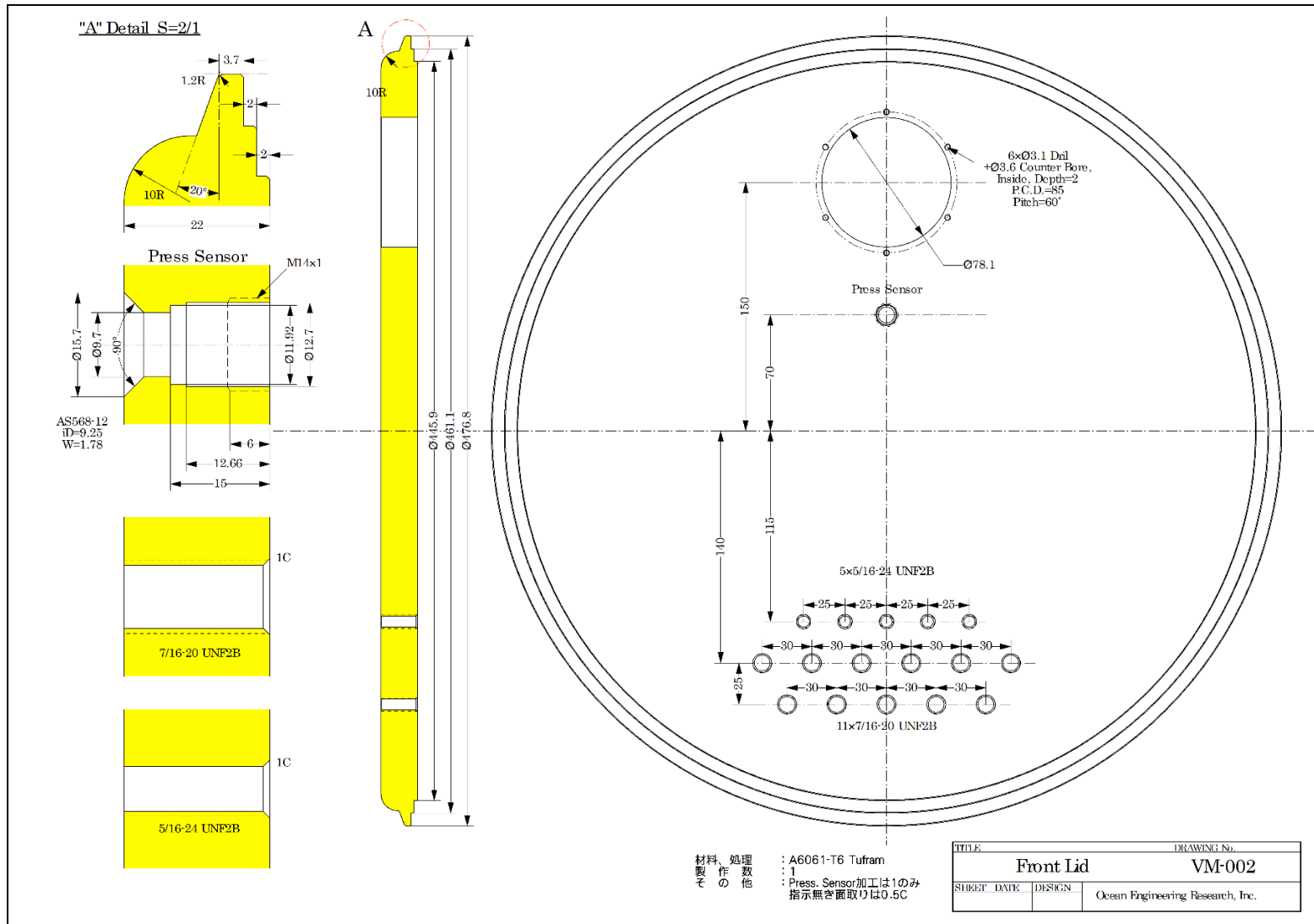


図 3.4-165 主耐圧容器前部蓋

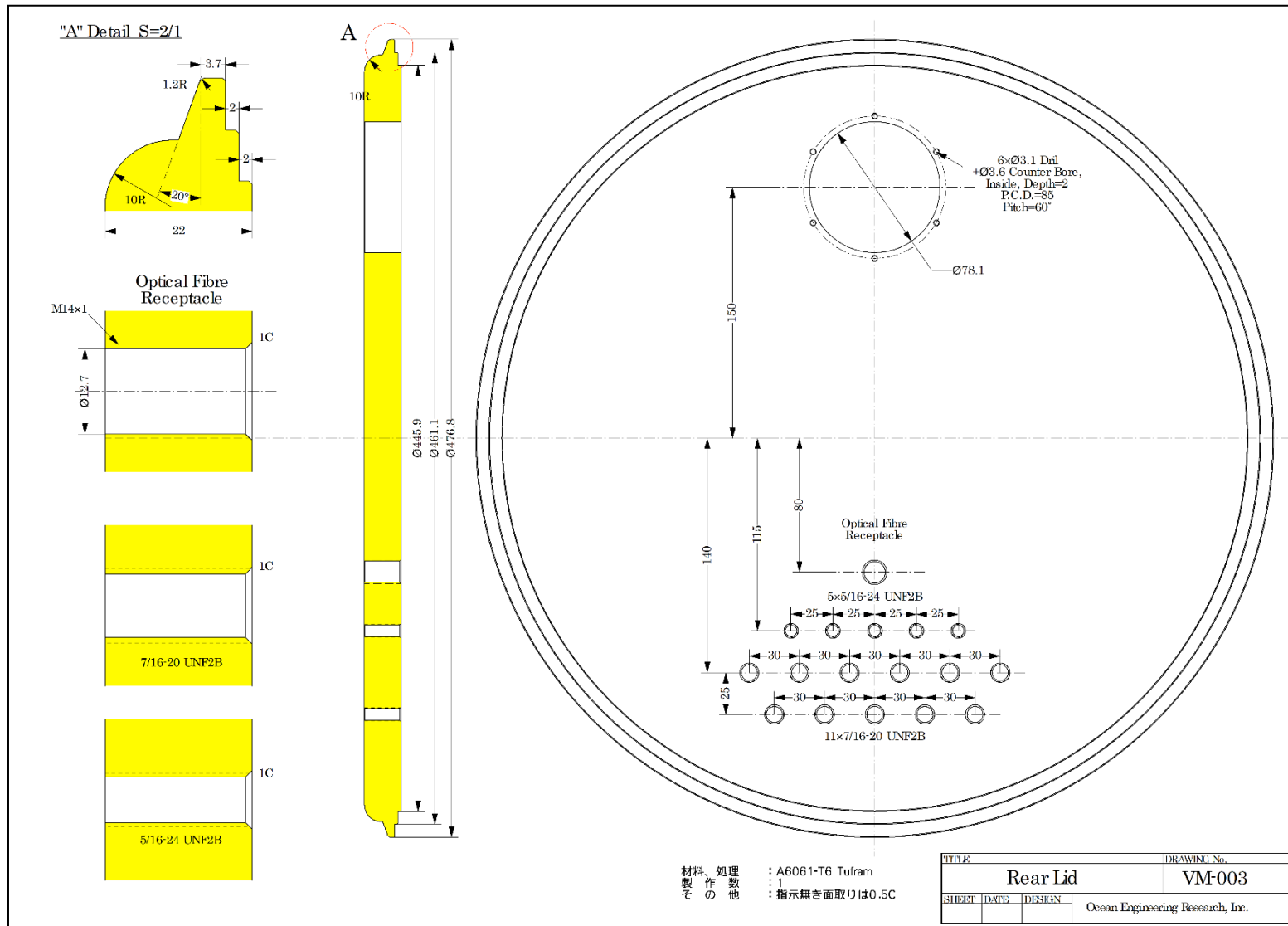


図 3.4-166 主耐圧容器後部蓋

B-1 強電磁界の影響防止：フェライトによる被覆方式の採用

給電コイル内での受電中の強磁界影響の対策として、耐圧容器の表面を磁性材料であるフェライトで覆って渦電流を抑制する方法を採用した。

図 3.4-167 に主耐圧容器へのフェライト貼り付けと受電コイル巻き付けの検討図を示す。また、図 3.4-168 に示すように 1/2 モデル耐圧容器を製作し、フェライト貼り付けを検討した。

これら検討を参考に、以下のフェライトを採用した。

- ・材質名 : JFE フェライト(株)製 Mn-Zn 系 MBT1
- ・寸法 : 29.5mm×120mm×5mm/枚
- ・貼付枚数 : 384 枚=1 周 48 枚/段×8 段
- ・貼付接着剤 : セメダイン株式会社 スーパー X クリア No.8008

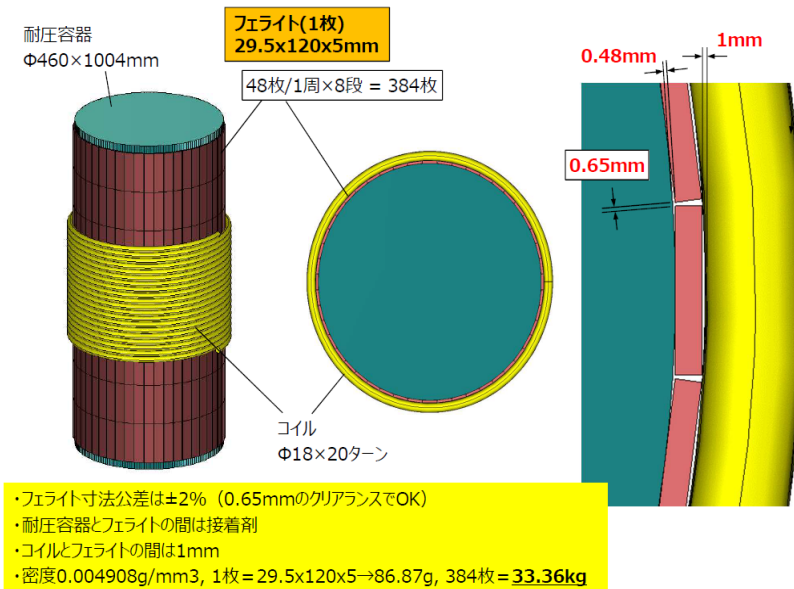
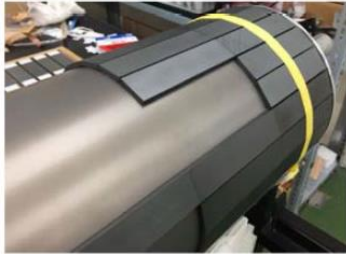


図 3.4-167 主耐圧容器へのフェライト貼り付け検討

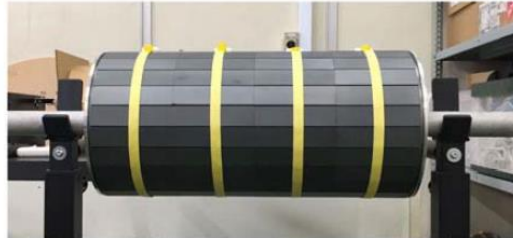
【フェライト仕様】
 メーカー：JFEフェライト
 サイズ：123x30.5x5mm
 重量：93g/枚
 枚数：96枚（フェライト総重量：8.93kg）



貼り換えることを考慮し、貼付けには
 一般用両面テープを使用



落下防止の為PPテープで結束



全体に張り付け状態。受電コイルは38sqケーブル使用予定。

図 3.4-168 1/2 モデルの耐圧容器でのフェライト貼り付けの検討

B-2 受電コイルの主耐圧容器への取り込み構造

主耐圧容器の受電コイルの取り込み固定は、図 3.4-169 に示す構造とした。コイル導線を半田溶接で差し込み固定した銅製キャップを、エンジニアリングプラスチックの POM（ポリアセタール樹脂）製ケースに差し込み、この POM ケースと銅製キャップを、耐圧容器内側からボルトで固定し、耐圧容器内の電線はこの固定ボルトに接続する。これにより、受電コイルの主耐圧容器との絶縁、海水シールドが出来ることになる。

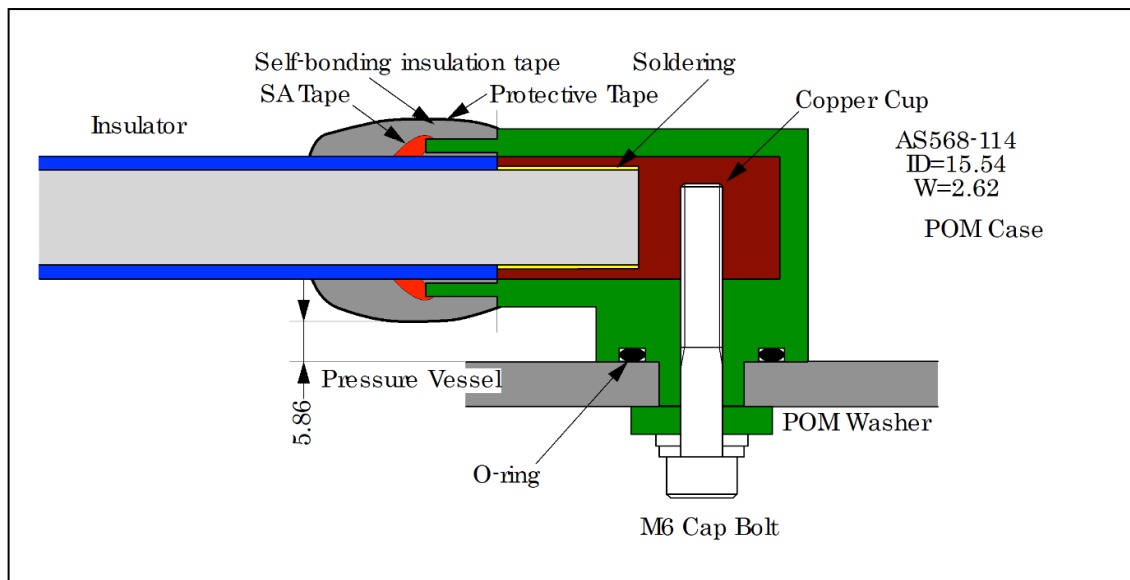


図 3.4-169 受電コイル取込固定構造

C 主耐圧容器の製作

図 3.4-170 に製作したフェライト貼り付け前の主耐圧容器胴部を示す。

C-1 主耐圧容器へのフェライトの貼り付けと受電コイルの巻き付け、取り込み固定の施工

図 3.4-171 に、前項までの検討などを基に、POM ケースを取り付けて受電コイルを耐圧容器内に取り込み固定した状態の主耐圧容器を示す。図 3.4-171 中に示したように黒い結束バンドで固縛処置している。受電コイルの主耐圧容器への固定に、接着剤等ではなく結束バンドを採用したのは、受電・充電試験結果により受電コイルの変更が必要になった場合に、コイルケーブルの交換が容易なものとするためである。また、図 3.4-171 中に POM ケース装着箇所の主耐圧容器内部の導線配置状況も示す。



図 3.4-170 主耐圧容器胴部（フェライト貼り付け前）



図 3.4-171 主耐圧容器 POM ケース取付け・受電コイル取り込み固定状態

3.4.2.2.2. 機体構造

A 機体フレームの設計・製作

r-AUV は、給電コイル内での受電中に強電磁界に曝され、受電実験により電力伝送効率等を調査するためのものである。このため、r-AUV 自体の構造が実験因子となるような影響を出来るだけ与えないようにするため、金属部は可能な限り少なくするものとし、Tuna-Sand 等での実績も踏まえて、機体フレームは HDPE(高密度ポリエチレン:High Density Polyethylene) を採用した。

組立てた機体フレームの外観、機体フレーム組立図(1/2)、機体フレーム組立図(2/2)を、それぞれ図 3.4-172、図 3.4-173、図 3.4-174 に示す。

表 3.4-35 に一般的な HDPE の基本物性を参考値として示す。HDPE は比重が 1 より小さく、吸水率が 0.01%以下と非常に低く、エンジニアリングプラスチックの中で機械的強度・電気特性・耐水性・耐薬品性に優れており、その特性を生かした使い方をすることにより、軽量化が重要なポイントである水中機器の材料として優れた特長を有している。

機体形状としては、全長：1,400mm、全幅：機体幅 880mm/スキッド幅 890mm、全高：760mm で、各種搭載機器類を取り付けていない状態での機体フレームの空中重量は約 106kg、機体下部には木製スキッドを装備している。

スラスト、LED ライト等々の機器を機体フレームに取り付けるホルダやブラケット等はエンジニアリングプラスチックの POM (ポリアセタール樹脂) を採用し、ホルダに機器を固定するための U 字金具類は SUS316 を用いている。



図 3.4-172 r-AUV 機体フレーム組立

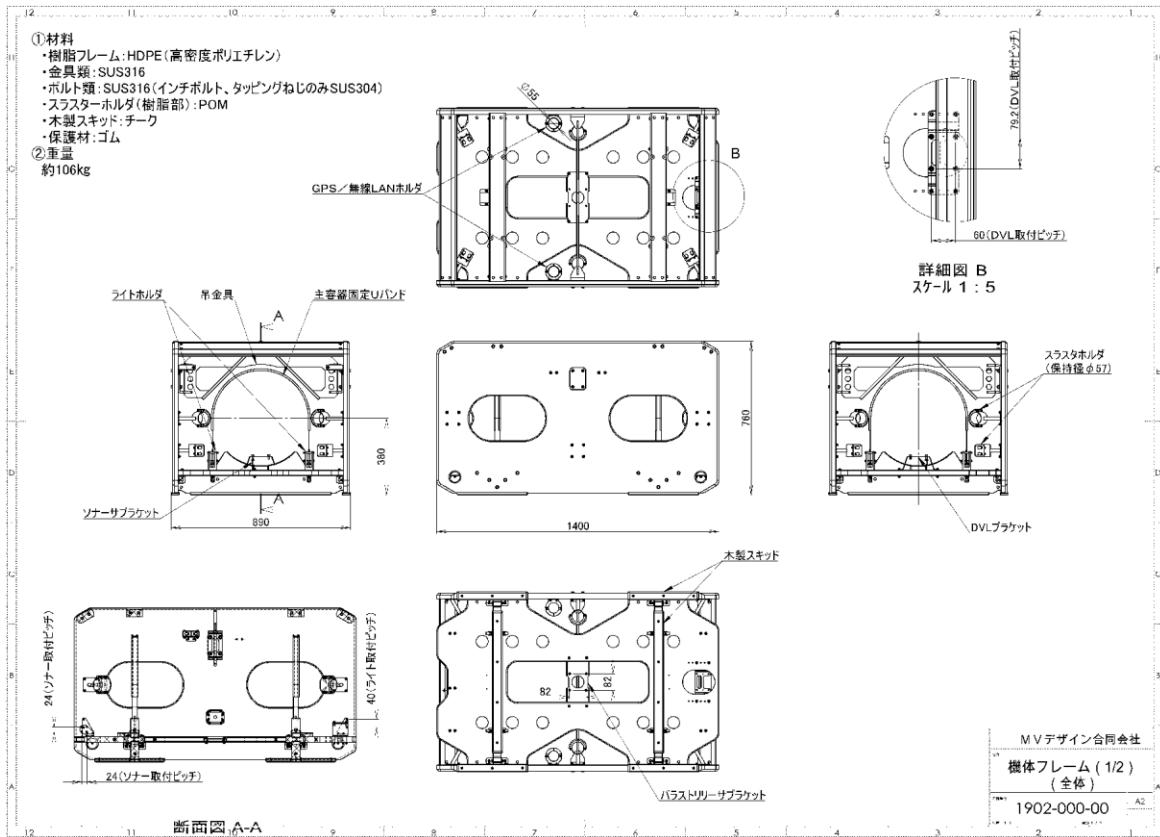


図 3.4-173 機体フレーム組立図 (1/2)

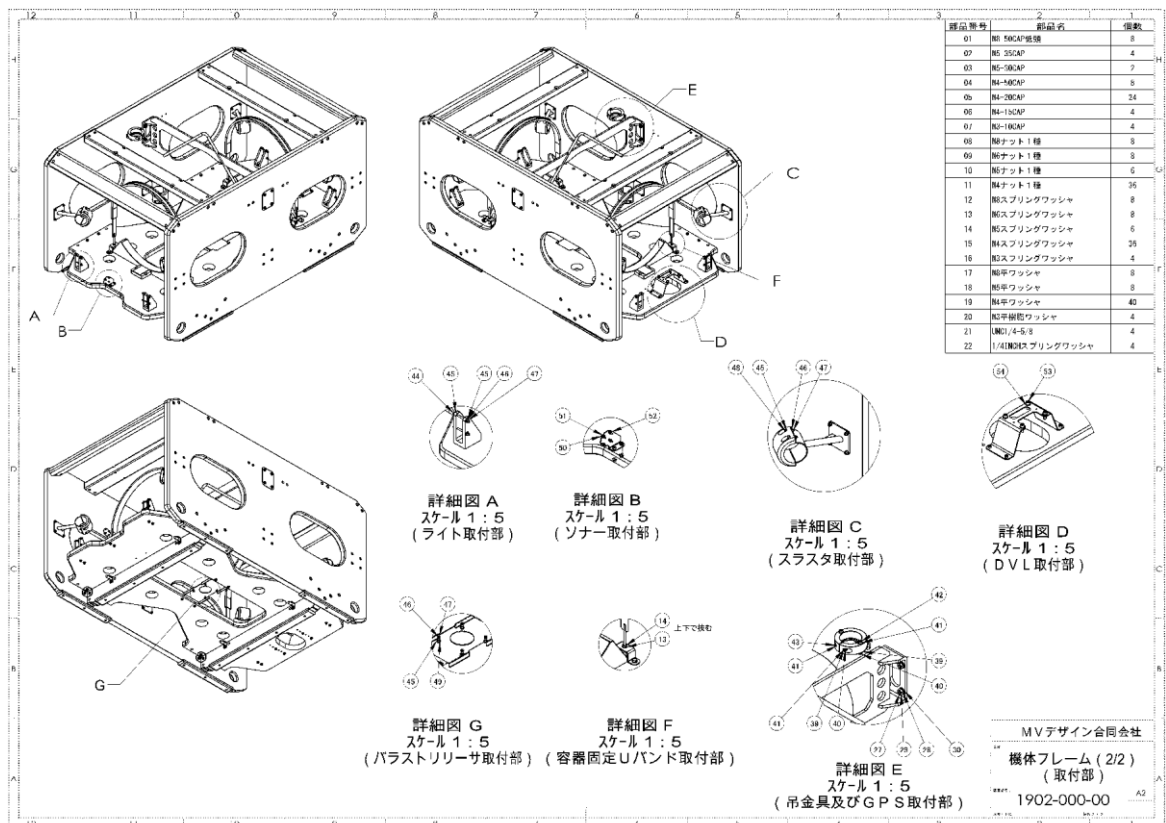


図 3.4-174 機体フレーム組立図 (2/2)

表 3.4-35 HDPE：高密度ポリエチレンの基本物性表（参考値）

物理的性質		
項目	単位	値
比重	—	0.94～0.97
ロックウェル硬度（D785法）	—	60～70（シヨアド）
吸水率	%	<0.01
機械的性質		
項目	単位	値
引張り強さ（D638/651法）	Kg/cm ²	220～390
曲げ強さ（D790法）	Kg/cm ²	70
引張弾性率（D638法）	104kg/cm ²	0.42～1.1
圧縮強さ（D695法）	Kg/cm ²	230
衝撃強さ アイゾット	Kg・cm/cm	8.2～10.9
熱的性質		
項目	単位	値
荷重たわみ温度	°C	—
線膨脹係数（D696法）	10 ⁻⁵ /°C	11～13
熱伝導度（C177法）	10 ⁻⁴ cal/sec・cm/°C・cm	11～12.4
連続耐熱温度	°C	121
燃焼性	—	可燃性
電気的性質		
項目	単位	値
絶縁破壊強さ（D149法）	kV/mm	17.7～19.7
体積固有抵抗	Ω/cm	10 ¹⁶ 以上
誘電率（D150法）	—	2.3～2.35

出典：<http://www.jushiplastic.com/high-density-polyethylene>

B 搭載機器の最適配置・収納の検討

B-1 主耐圧容器への機器収納

主耐圧容器内への機器収納は、ビークルの安定性のために出来るだけ重心が低くなる配

置と点検・整備性の確保を考慮して、フレーム搭載方式を採用した。

内機用フレームへの機器配置は、各機器の寸法、重量、発熱/放熱性を考慮して、図 3.4-175 に示す様に、受電・充電機器用、電池用、AUV 制御機器用の 3 つのスペースに分けることとした。

図 3.4-176 に内機器を搭載するフレームを示す。フレームは主耐圧容器の艇尾側の後蓋に取り付ける構造とし、フレーム底部にはスライダーを取り付けて、耐圧容器内壁をスライドさせて出し入れができる構造とした。

電池に関しては、充電所要時間や試験条件によっては電池交換する場合があるなど、他の内機器と比べて、主耐圧容器からの出し入れの頻度が高いと考えられるため、

図 3.4-177 に示すように、内機器フレームは主耐圧容器内に搭載したままで、電池だけを艇首側の前蓋側に取り出すことができる構造としている。

図 3.4-178、図 3.4-179 に主耐圧容器内フレームに内機を搭載した状況を示す。

図 3.4-178 はフレームを右側から見た状況、図 3.4-179 は左側から見た状況である。

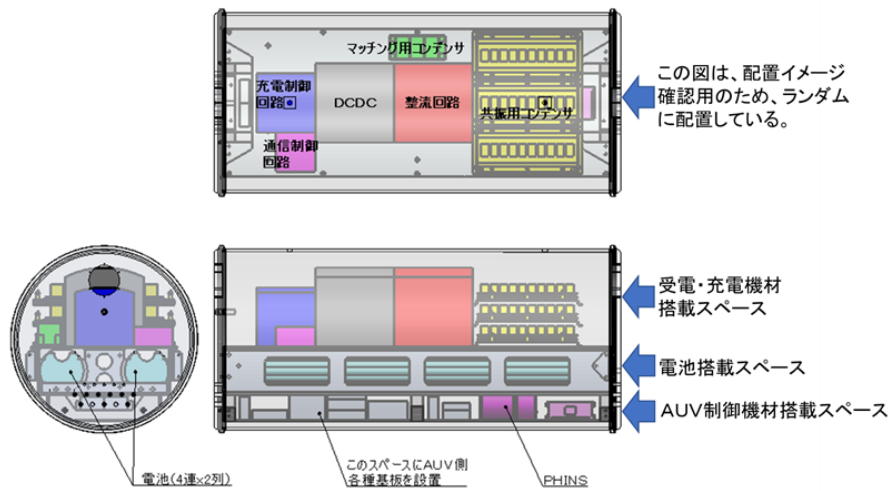


図 3.4-175 主耐圧容器内機器の配置検討 (内機器のグループ分け)

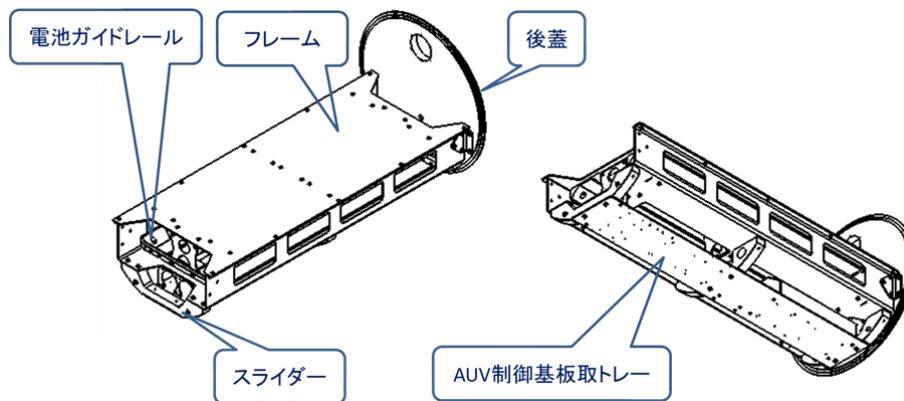


図 3.4-176 内機器用フレーム

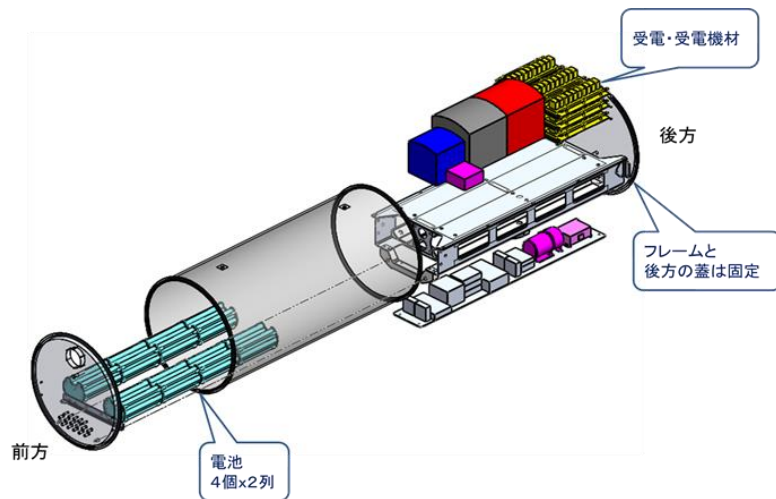


図 3.4-177 主耐圧容器と内機器フレームの構成図

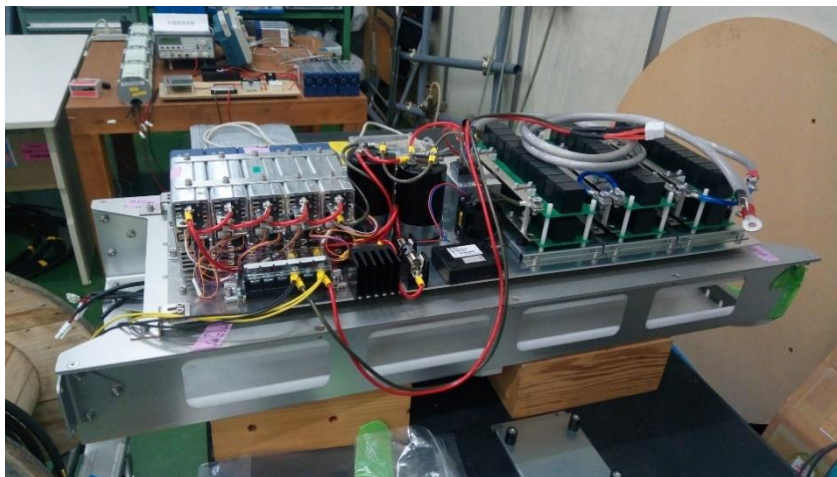


図 3.4-178 主耐圧容器内機器組立状況（右舷側）

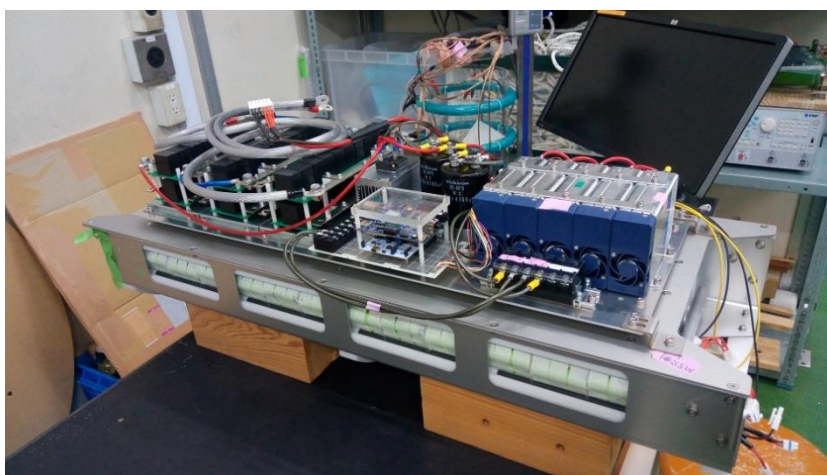


図 3.4-179 主耐圧容器内機器組立状況（左舷側）

B-2 搭載機器の最適配置

r-AUV の重量重心・浮量浮心計算を行い、各搭載機器の配置の検討、必要浮力材量と調整用バラスト重量の検討、ビークルとしての安定性の確認を行った。

B-2-1 重量重心・浮量浮心

表 3.4-36 に浮力/バラスト量調整後の、重量重心・浮量浮心計算表を示す。計算の座標原点は主耐圧容器の幾何中心、即ち機体の幾何中心で、右手座標系としている。

表 3.4-36 重量重心・浮量浮心計算表

No.	区分(機器名称)	主要材質	材料比重 [-]	重量W [kg]	水中重量 [kg]	浮量B [kg]	X軸(船首-船尾方向)船首方向+				Y軸(左舷-右舷方向)右舷方向+				Z軸(下-上方向)上方向+							
							GX(m) [m]	BX(m) [m]	GXM [kg·m]	BXM [kg·m]	GY(m) [m]	BY(m) [m]	GYM [kg·m]	BYM [kg·m]	GZ(m) [m]	BZ(m) [m]	GZM [kg·m]	BZM [kg·m]				
	主容器一式			181.760	-11.222	192.982			0.000	0.000			0.000	0.000					-3.747	0.178		
1	1 主容器			117.100	-60.934	178.034	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.032	0.001			-3.747	0.178	
	7 フェライト		4.91	33.360	26.393	6.967	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			0.000	0.000	
	8 受電ケーブル		4.02	31.300	23.319	7.981	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			0.000	0.000	
2	機体フレーム			107.000	6.550	100.450	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.032	-0.049			-3.424	-4.922	
3	浮力体			5.957	-23.363	29.320	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.328	0.328			1.954	9.617		
	航法装置			1.624	0.330	1.294			-0.595	-0.619			0.000	0.000						-0.421	-0.341	
4	1 DVL			1.300	0.150	1.150	-0.620	-0.620	-0.806	-0.713	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.269	-0.269				-0.350	-0.309	
	2 前方探知ソナー			0.324	0.180	0.144	0.650	0.650	0.211	0.094	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.220	-0.220				-0.071	-0.032	
	アクチュエータ			11.400	8.400	3.000			0.000	0.000			0.000	0.000						-0.790	-0.208	
	1 水平スタスタ左舷前方			1.900	1.400	0.500	0.530	0.530	1.007	0.265	-0.319	-0.319	-0.606	-0.160	0.000	0.000	0.000	0.000			0.000	0.000
	2 水平スタスタ左舷後方			1.900	1.400	0.500	-0.530	-0.530	-1.007	-0.265	-0.319	-0.319	-0.606	-0.160	0.000	0.000	0.000	0.000			0.000	0.000
	3 水平スタスタ右舷前方			1.900	1.400	0.500	0.530	0.530	1.007	0.265	0.319	0.319	0.606	0.160	0.000	0.000	0.000	0.000			0.000	0.000
	4 水平スタスタ右舷後方			1.900	1.400	0.500	-0.530	-0.530	-1.007	-0.265	0.319	0.319	0.606	0.160	0.000	0.000	0.000	0.000			0.000	0.000
	5 垂直スタスタ左舷			1.900	1.400	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.325	-0.325	-0.618	-0.163	-0.208	-0.208				-0.395	-0.104	
	6 垂直スタスタ右舷			1.900	1.400	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.325	0.325	0.618	0.163	-0.208	-0.208				-0.395	-0.104	
	観測装置			1.800	1.068	0.732			0.000	0.000			0.000	0.000						-0.324	-0.132	
	1 LEDライト左舷前方			0.450	0.267	0.183	0.666	0.666	0.300	0.122	-0.240	-0.240	-0.108	-0.044	-0.180	-0.180				-0.081	-0.033	
	2 LEDライト左舷後方			0.450	0.267	0.183	-0.666	-0.666	-0.300	-0.122	-0.240	-0.240	-0.108	-0.044	-0.180	-0.180				-0.081	-0.033	
	3 LEDライト右舷前方			0.450	0.267	0.183	0.666	0.666	0.300	0.122	0.240	0.240	0.108	0.044	-0.180	-0.180				-0.081	-0.033	
	4 LEDライト右舷後方			0.450	0.267	0.183	-0.666	-0.666	-0.300	-0.122	0.240	0.240	0.108	0.044	-0.180	-0.180				-0.081	-0.033	
	通信装置			0.700	0.110	0.590			0.084	0.071			0.000	0.000						0.214	0.180	
	1 無線LAN			0.350	0.055	0.295	0.120	0.120	0.042	0.035	0.366	0.366	0.128	0.108	0.305	0.305				0.107	0.090	
	2 GPS			0.350	0.055	0.295	0.120	0.120	0.042	0.035	-0.366	-0.366	-0.128	-0.108	0.305	0.305				0.107	0.090	
	その他			3.205	1.763	1.442			0.000	0.000			0.000	0.000						0.000	0.000	
	1 水中ケーブル			3.205	1.763	1.442	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000				0.000	0.000	
	2																					
	浮力調整			18.000	15.424	2.576			0.000	0.000			0.000	0.000						-6.064	-0.860	
	1 バラストリリーサ			2.000	1.500	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.304	-0.304				-0.608	-0.152	
	2 バラスト	Fe	7.80	8.000	6.949	1.051	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.357	-0.357				-2.856	-0.375	
	3 調整バラスト	SUS	8.00	8.000	6.975	1.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.325	-0.325				-2.600	-0.333	
10	総合			331.446	-0.940	332.386	-0.002	-0.002	-0.511	-0.549	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.038	0.011				-12.603	3.512	
								BGX=	0.000				BGY=	0.000					BGZ=	0.049		

計算の結果、表中の No.10 総合の値での各軸の浮心と重心は、X 軸（船首-船尾方向）では $BX=2\text{mm}$ 、 $Gx=2\text{mm}$ で、それぞれ原点より船尾方向に 2mm 寄った位置であるが、互いの距離は $BGX=0\text{mm}$ なので同じ座標点にあることになる。Y 軸（左舷-右舷方向）では $BY=0\text{mm}$ 、 $GY=0\text{mm}$ で、互いの距離 $BGY=0\text{mm}$ なのでそれぞれ Y 軸の原点位置にある。Z 軸（上-下方向）では $BZ=11\text{mm}$ 、 $GZ=-38\text{mm}$ で $BGZ=49\text{mm}$ となり、浮心と重心はそれぞれ Z 軸上にあり、浮心は重心より 49mm 高い位置にあって、安定性に問題無いことが確認できた。

B-2-2 浮力材

前述の重量重心・浮量浮心の検討結果より、必要浮量が得られる浮力材を製作した。

浮力材は硬質ウレタンフォームで、水中ビークルに使用実績がある日清紡ケミカル社の FL140H を採用し、表面保護のため GFRP でコーティングをしている。に浮力材の物性を示す。

重量重心・浮量浮心計算により、初期の検討段階より浮力材は少なくとも浮量は確保できることが判明した。

表 3.4-37 浮力物性表

項目	単位	FL30FA	FL50FA	FL60FA	FL80FA	FL100H	FL140H
密度	kg/m ³	≥25	≥45	≥53	≥72	≥90	≥120
圧縮強さ(//)	N/cm ²	≥10	≥30	≥35	≥60	≥80	≥147
曲げ強さ(//)	N/cm ²	≥15	≥40	≥45	≥80	≥120	≥196
熱伝導率	W/m・K	≤0.025	≤0.024	≤0.024	≤0.026	≤0.030	≤0.034
吸水量	g/100cm ²	≤3.0	≤3.0	≤3.0	≤3.0	≤3.0	≤3.0
原反高さ	mm	500	500	300	300	300	200
主用途	-	芯材・断熱材等		芯材・断熱材・モデル・木型等			

B-2-3 調整用バラスト

重量重心・浮量浮心計算結果に基づき、機体重量重心の調整用バラスト（空中重量 8kg）を装着することとした。調整用バラストは、160×78×5 の SUS プレート(空中重量 0.5kg/枚)を必要枚数装着する。

図 3.4-180 に整用バラスト搭載図を、図 3.4-181 に調整用バラスト外観を示す。

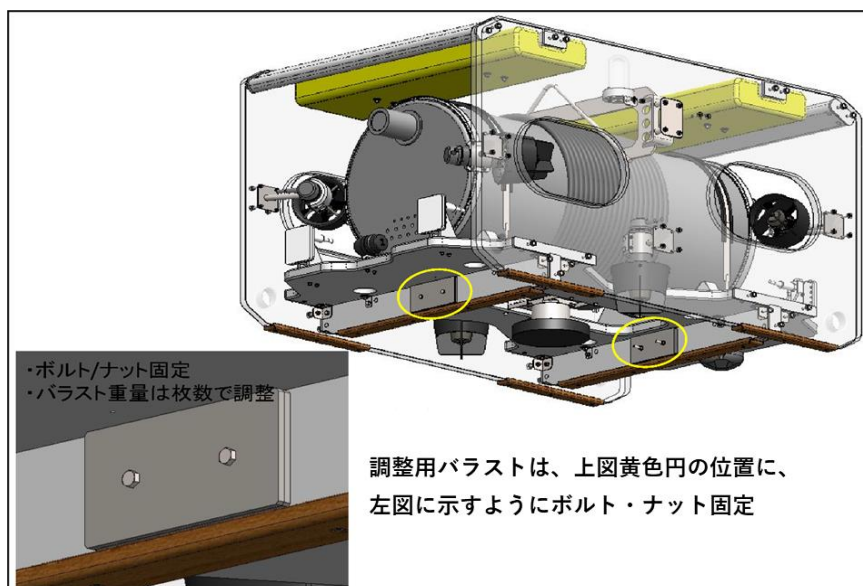


図 3.4-180 調整用バラスト搭載



図 3.4-181 調整用バラスト外観

C 機器配置

前述の検討・設計に従い、主耐圧容器、スラスタ、ソナー等々の各種機器を、機体フレームに搭載・配置した r-AUV の 3D イメージを図 3.4-182 に、機器搭載配置を図 3.4-183 に示す。機体上部の黄色い物体は浮力材である。



図 3.4-182 r-AUV の 3D イメージ図

AUV配置図

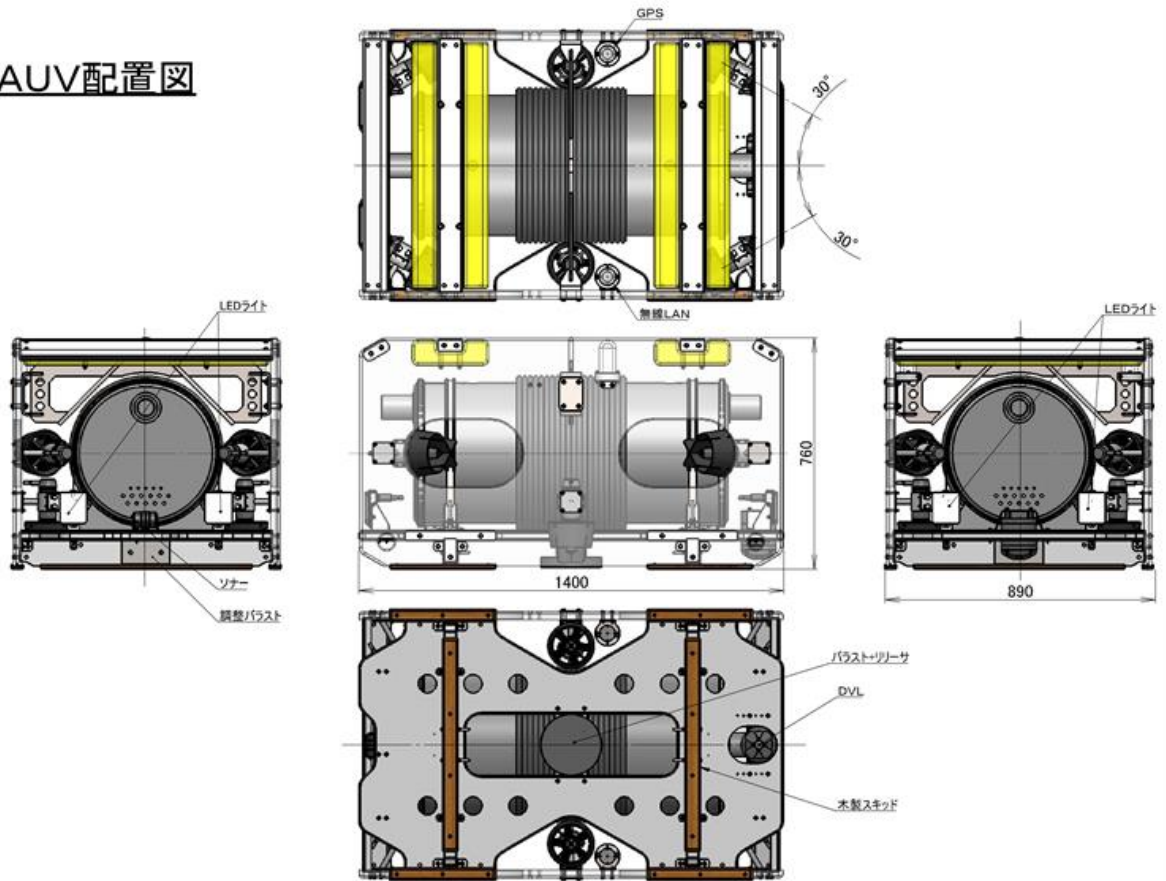


図 3.4-183 r-AUV 機器搭載配置図

3.4.2.3. r-AUV の組立

前述図 3.4-172 に示した機体フレームに、「3.4.2.1.6 r-AUV 搭載機器の設計・製作」、
「3.4.2.2 r-AUV 構造の設計・製作」で製作・調達した機器・装置を搭載し、r-AUV を組
み立てた。

3.4.2.3.1. 主耐圧容器内機器の組み込み・搭載

図 3.4-184 に内機器用フレームに内機器を組み込み・搭載し、内機器用フレームを主耐
圧容器後蓋に取り付けた状態の内機器を示す。図 3.4-185 に内機器用フレームを主耐圧容
器に収納した状態及び主耐圧容器を機体フレームに搭載した状態での内機器配線作業の状
況を示す。

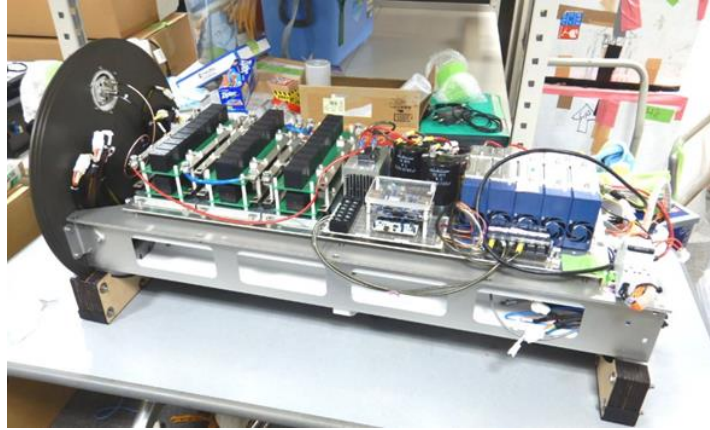


図 3.4-184 内機器用フレームへの内機器の組み込み・搭載

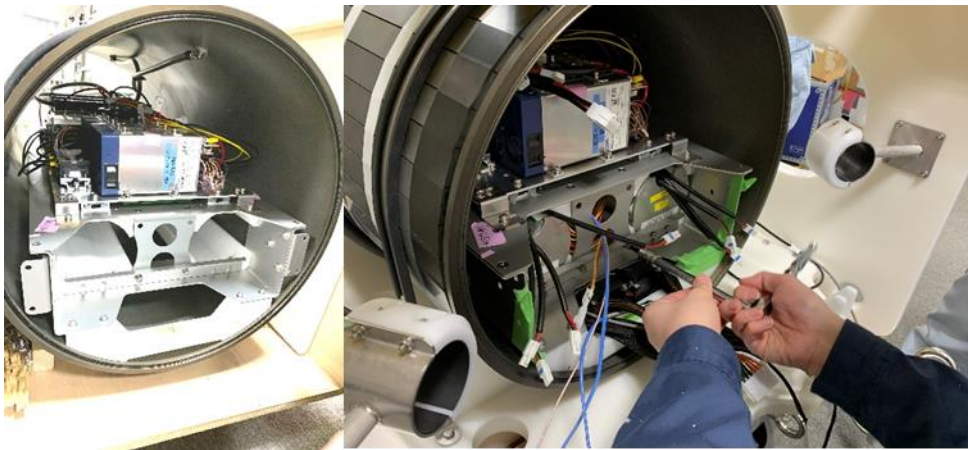


図 3.4-185 (左)主耐圧容器への内機器の収納、(右)内機器の配線作業航行装置の搭載

A ドップラー速度計 (DVL)

図 3.4-186 に DVL の搭載状況を示す。DVL は艇体中心線上の後部の下部プレートに孔をあけて DVL 送受波面を下面に突き出した形で搭載している。

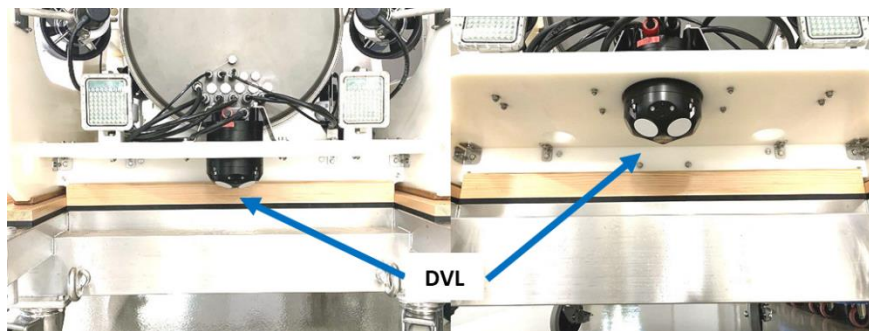


図 3.4-186 DVL1000-300m搭載

B 深度計

深度計は図 3.4-187 に示す様に、主耐圧容器の船首側鏡板（前蓋）に貫通孔を明けて深度計のダイヤフラムが海水に接するようにマウントしている。

図 3.4-188 に主耐圧容器の前蓋への搭載状況を示す。

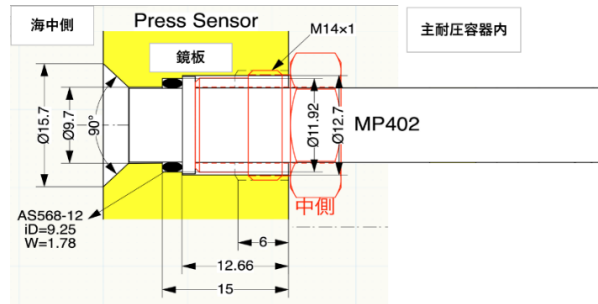


図 3.4-187 深度計の鏡板（前蓋）への取付け図

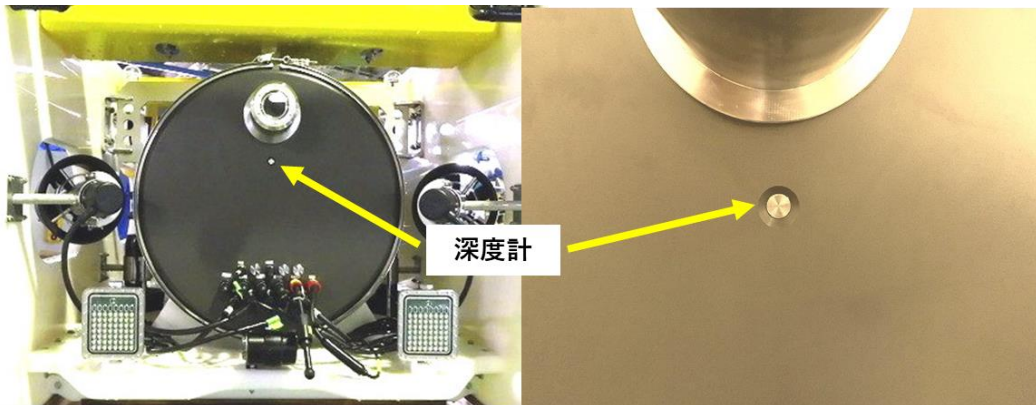


図 3.4-188 MP402 の主耐圧容器前蓋への搭載

C 前方探査ソナー

図 3.4-189 に前方探査ソナーの搭載状況を示す。前方探査ソナーは船首側の主耐圧容器前の艇体底部プレート上の艇体中心線上に搭載している。



図 3.4-189 前方探査ソナー搭載

D TV カメラ用耐圧容器・TV カメラ

図 3.4-190 に TV カメラの搭載状況を示す。TV カメラは、TV カメラ用耐圧容器に収納して、TV カメラ用耐圧容器を主耐圧容器の前方及び後方の鏡板（蓋）に、艇体中心船上となる位置に取り付けている。

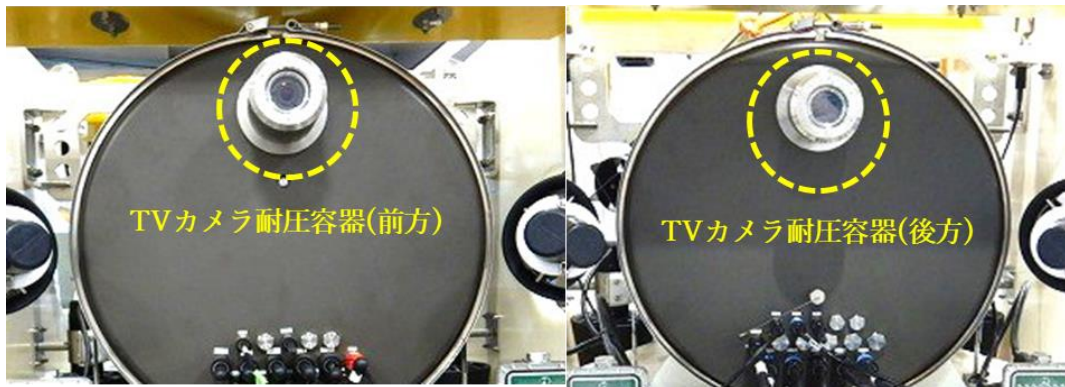


図 3.4-190 TV カメラの搭載状況（左；前方 TV カメラ、右：後方 TV カメラ）

E TV カメラ用照明装置（LED ライト）

図 3.4-191 に TV カメラ用 LED ライトの搭載状況を示す。LED ライトは、艇体最前方部と艇体最後方部の艇体底部プレート上に、左右振分で各 2 台の計 4 台搭載している。

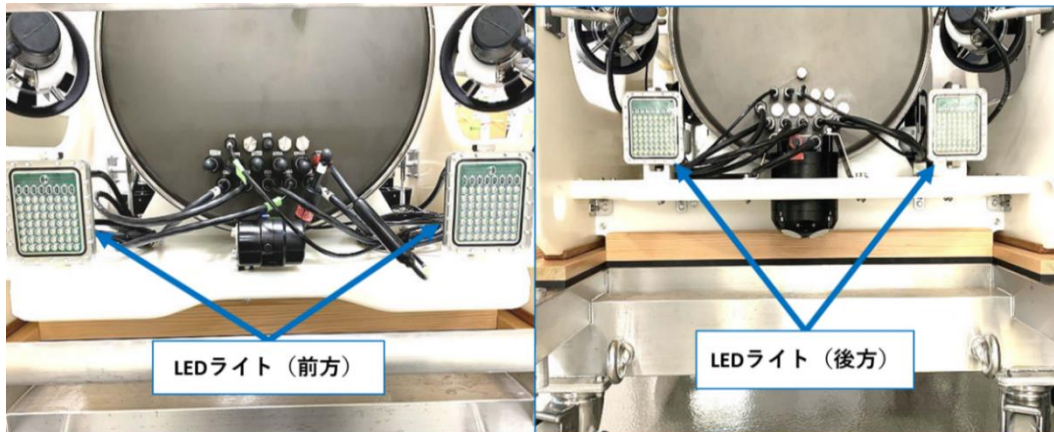


図 3.4-191 LED ライト搭載 (前方、後方)

3.4.2.3.2. アクチュエータ

A スラスト

図 3.4-192 にスラスト 6 台の搭載状況を示す。水平スラスト 4 台は、前側左右 2 台はそれぞれ艇体中心線に対しノズル側が 30° 外向きで後方に向く角度で取り付け、後側左右 2 台は、同じくノズル側が 30° 外向きで前方に向く角度で取付けている。垂直スラスト 2 台は、艇体前後の中間位置に左右振分で、ノズル側が下向きで取り付けている。

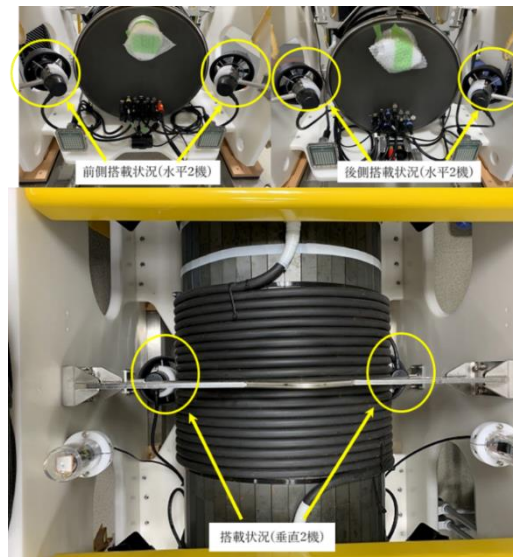


図 3.4-192 スラスト搭載

B バラスト投下装置

図 3.4-193 にバラスト投下装置の搭載状況を示す。バラスト投下装置は、機体の前後左右の中心の最下端分に取り付けており、バラスト搭載、投下でロール・ピッチに影響が出ない搭載位置としている。

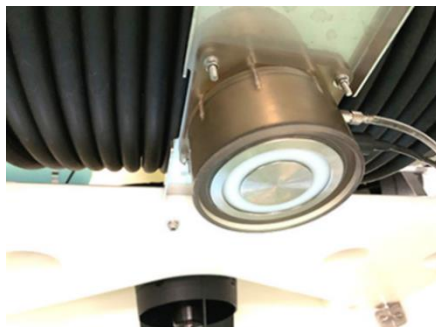


図 3.4-193 バラスト投下装置搭載状況

3.4.2.3.3. 通信装置

A 近距離通信装置(無線 LAN 水中部)

図 3.4-194 に無線 LAN 水中部の搭載状況を示す。無線 LAN 水中部は、艇体右舷側面プレート中央部の上部の内側に、PMMA 耐圧容器頂部がプレート上端より出ない位置に搭載している。



図 3.4-194 近距離通信装置（無線 LAN 水中部）搭載状況

B GPS 装置

図 3.4-195 に GPS 装置の搭載状況を示す。GPS 装置は、艇体左舷側面プレート中央部の上部の内側に、PMMA 耐圧容器が側面プレート上端より出ない位置に搭載しており、前述の無線 LAN 水中部とは丁度艇体中心に対し左右反対の位置となる。



図 3.4-195 GPS 装置搭載状況

3.4.2.3.4. AUV 組立完了

図 3.4-196、図 3.4-197 に組立が完了した r-AUV 外観を示す。



図 3.4-196 r-AUV 外観



図 3.4-197 r-AUV 外観

3.4.2.3.5. 付属品

r-AUV の運用に必要となる支援機器・部品として、運搬用台車、窒素置換装置、投棄用バラストを設計・製作した。

A 運搬用台車

図 3.4-198 に運搬用台車の外形図、図 3.4-199 に運搬用台車の外観写真を示す。

運搬用台車は、r-AUV の置台・移動・保管として用いる。台車フレームは SUS 製とし、直接 r-AUV が接する積載面は機体を保護するため木製（ベイマツ）としている。

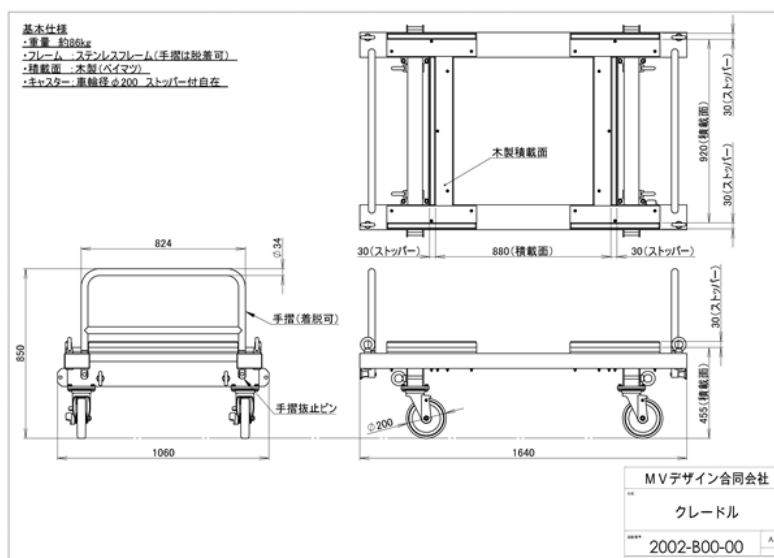


図 3.4-198 運搬用台車外形図



図 3.4-199 運搬用台車外観

B 窒素置換装置

図 3.4-200 に窒素置換装置外形図、図 3.4-201 に窒素置換装置外観を示す。

主耐圧容器等の電子機器を搭載している容器を開放した場合、再び容器を閉じた場合、一般に水中の方が温度は低いため、水中で運用する場合、容器内部の空気中の水分が凝縮・結露して内部機器の絶縁が低下する等の悪影響が発生する。窒素置換装置は、このような影響を避けるため、容器内部の空気を乾燥窒素に置換する装置である。また、容器内の空気を吸引するための真空ポンプを保有しているため、容器を閉じた後、吸引して容器内を負圧にしてある程度放置し、内部負圧変化の有無を確認することで、容器密閉が正常か否かの判定にも使用するものである。

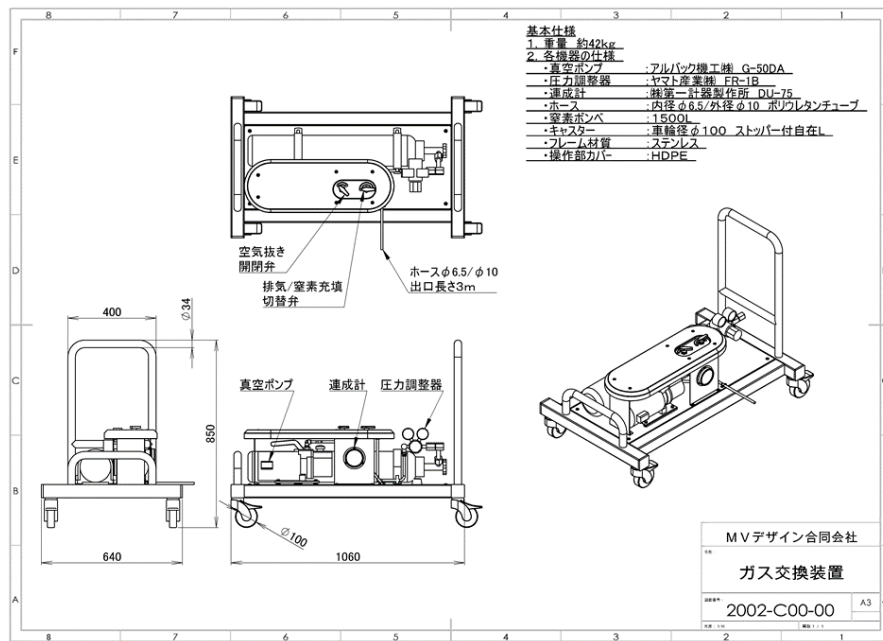


図 3.4-200 窒素置換装置外形図



図 3.4-201 窒素置換装置外観

C 投棄用バラスト

図 3.4-202 に投棄用バラストの外形図、図 3.4-203 に投棄用バラストの外観を示す。

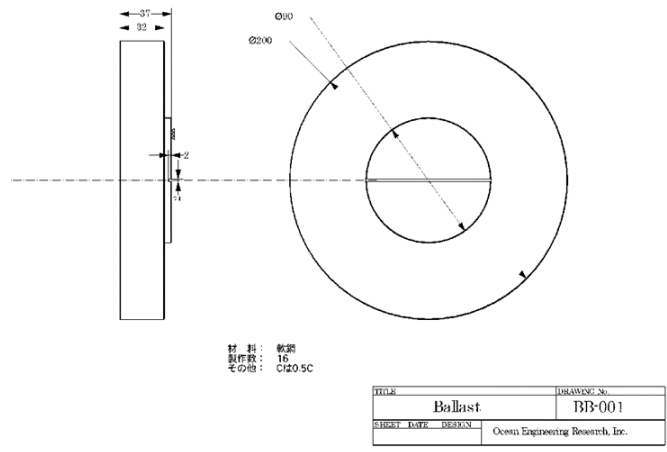


図 3.4-202 投棄用バラスト外形図

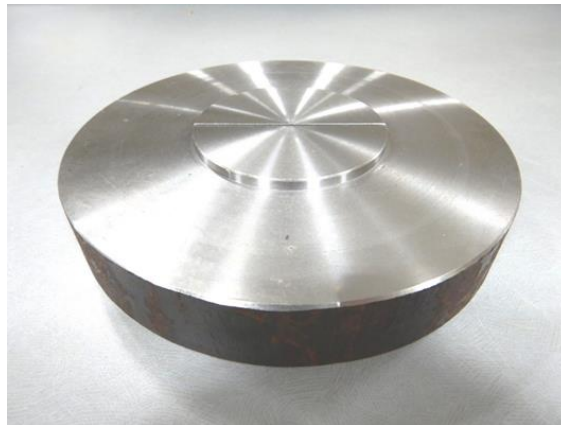


図 3.4-203 投棄用バラスト外観

3.4.2.4. 船上装置の設計・製作

3.4.2.4.1. 船上オペレーションシステム

r-AUV は、AUV モードと呼ぶプリプログラム方式による自律航行モードと、ROV モードと呼ぶ光ファイバーケーブルを接続してオペレータが遠隔操縦する遠隔操作モードがある。

r-AUV を AUV モードあるいは ROV モードで運用するための、それぞれに応じた船上オペレーションシステムを構成した。

A AUV モード船上オペレーションシステム

r-AUV はプリプログラム方式による自律航行を行うため、r-AUV をどのように航行させるかを記述したコースデータ等を、予め r-AUV にインストールしておく必要がある。

図 3.4-204 に AUV モード船上オペレーションシステムを示す。システムは、オペレーション用 PC、データ処理用 PC、LAN ハブと無線 LAN 親機で構成され、オペレーション用 PC でコースデータ等を作成し、無線 LAN により r-AUV にダウンロードする。また、ミッション終了後は、必要に応じて r-AUV のログなどの各種データを、無線 LAN 経由でオペレーション用 PC あるいはデータ処理用 PC にアップロードすることができる。

なお、ビークルが陸上あるいは船上にあって光ファイバーケーブルが接続可能な状態にある場合、AUV モード船上オペレーションシステムと、後述の ROV モード船上オペレーションシステムを組み合わせた状態のシステムとして、コースデータやログなどを光ファイバーケーブル経由でダウンロード、アップロードする事ができる。これらが終了した後、光ファイバーケーブルを切り離してビークルを着水させ、AUV モード船上オペレーションシステムの無線 LAN を使って、プリプログラムをスタートさせて AUV モードで運用することも可能である。

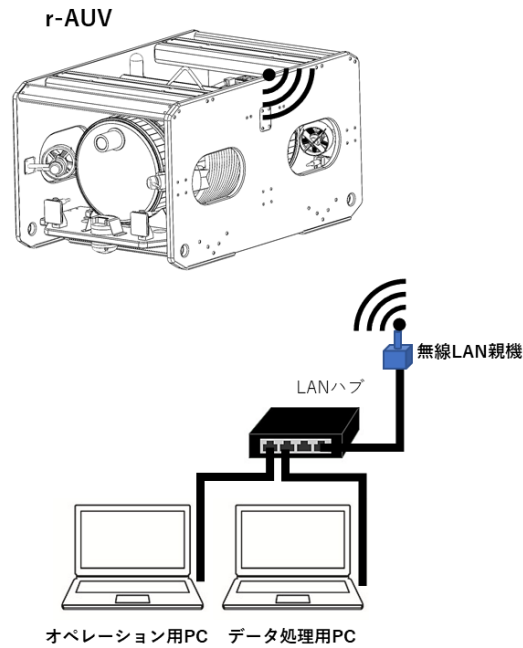


図 3.4-204 AUV モード船上オペレーションシステム

B ROV モード船上オペレーションシステム

図 3.4-205 に ROV モード船上オペレーションシステムの構成を示す。システムは、オペレーション用 PC とそれに接続されたジョイスティック(以下 J/S と記述する)、データ処理用 PC、LAN ハブ、船上局 (光通信装置) とそれに SDI/HDMI 変換器を経由して接続された 2 台のカメラモニタ、そして r-AUV は光ファイバーケーブルで船上局と接続されている。

オペレータは、オペレーション用 PC の操縦画面とカメラモニタのビークル TV カメラ映像を見ながら、J/S とオペレーション用 PC のキーボードを使ってオペレーションをする。

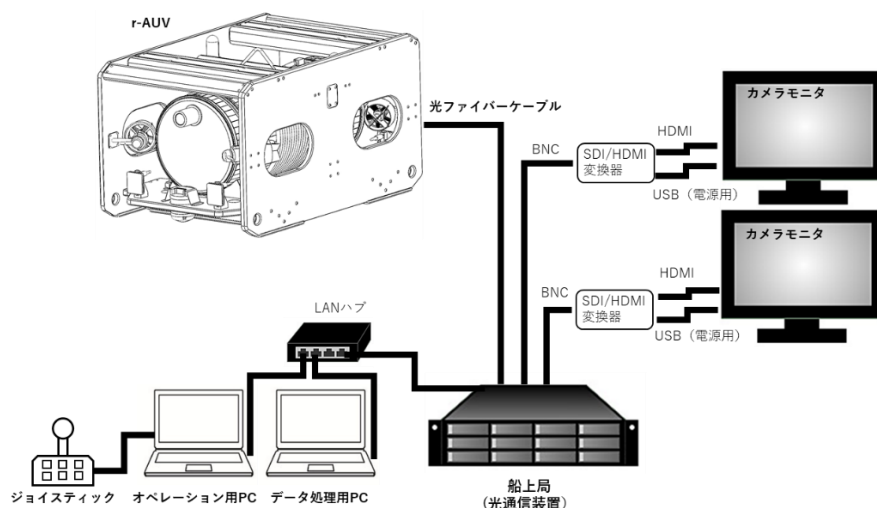


図 3.4-205 ROV モード船上オペレーションシステム構成

B-1 船上オペレーション装置

船上オペレーションシステムを構成する各船上装置を以下に示す。なお、無線 LAN 親機、光ファイバーケーブル、船上局（光通信装置）については、「3.4.2.1.6r-AUV 搭載機器の設計・製作」の項で記述した。

B-1-1 オペレーション用 PC

図 3.4-206 にオペレーション用 PC の外観を示す。オペレーション PC は、Panasonic 社製 TOUGHBOOK CF-20 で、画面：10.1 型、CPU：Intel Core i5、SSD：256GB、メモリ：8GB、Windows10Pro、パネルタッチ対応である。

図 3.4-207 にデータ処理用 PC の外観を示す。データ処理用 PC は、UNICOM 社製 LEVEL-15FX066-i7-RFSX で、画面：15.6 型、CPU：Intel Core i7、SSD：500GB、メモリ：16GB、OS：Windows10Home、Graphics board：GeForce GTX 1650 4GB GDDR6 である。



図 3.4-206 オペレーション用 PC



図 3.4-207 データ処理用 PC

B-1-2 ジョイスティック (J/S)

図 3.4-208 にジョイスティックを示す。図中の J/S の左の青い箱は、J/S 保管用ボックスである。ジョイスティックは APEM 社製 RSDesktop で、3 軸、解像度：12bit、ボタン：6 個、寸法：166.62×138.32×94.9mm である。



図 3.4-208 ジョイスティック

B-1-3 映像表示装置 (TV カメラモニタ)

図 3.4-209 に映像表示装置を示す。左側の写真は水槽作動確認時の画像である。映像表示装置は2台で、それぞれビークル前後のTVカメラ用のカメラモニタである。

カメラモニタは、SEZAC社製、HD CCTVLED MONITORで、画面：13.3型、解像度：1280×720、BNC/AV/HDMI/VGA端子対応である。

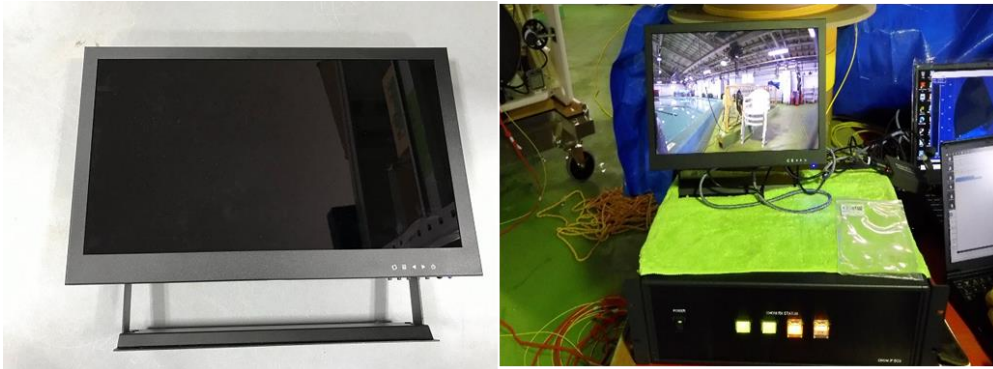


図 3.4-209 映像表示装置 (カメラモニタ)

B-1-4 映像録画装置

図 3.4-210 に映像録画装置を示す。映像録画装置は、I-O DATA社製 GV-HDRECで、記録方式：MPEG-4、画像サイズ：1920×1080、フレームレート：60fps、HDMI入力/出力×1、SDカードスロット：記録・再生用×1、USBポート：USB2.0 Standard A×1、外形寸法：140×32×60mm、質量：約160gである。



図 3.4-210 映像録画装置

3.4.2.5. 制御ソフトウェアの設計・製作

制御ソフトウェアは、前述のビークル搭載機器（制御コンピュータ、航行装置、アクチュエータ、通信装置等）や船上オペレーション装置を制御して、r-AUVの自律航行、ROVモード航行を行うと共に、これら機器の各種データの記録を行うものである。

3.4.2.5.1. 信号割付

各機器の制御に伴う信号割付を以下に示す。

A デジタル入出力ポート信号割付

表 3.4-38 にデジタル入出力（DIO）信号の割付を示す。

表 3.4-38 DIO 信号割付表

● MIX-10 基板 DIO

Sig No.	信号名称	CPU側			レベル	基板側			信号の意味
		NAME	CN	Pin		機能・機能	CN	Pin	
A0	DVL 電源	DIO-A0	PORT B-1	OUT	H	POWER	DIO	1	H ⁺ CON
A1	Micon 電源	DIO-A1	PORT B-2	OUT	H	"	"	2	H ⁺ CON
A2	ALK 電源	DIO-A2	PORT B-3	OUT	H	"	"	3	H ⁺ CON
A3	未使用	DIO-A3	PORT B-4	OUT	H	"	"	4	
A4	BL1-ON	DIO-A4	PORT B-5	OUT	H	"	"	5	バラスト1 ON 浮上用/バラスト 500maのON/バラスト出力
A5	BL1-OFF	DIO-A5	PORT B-6	OUT	H	"	"	6	バラスト1 OFF 浮上用/バラスト 500maのON/バラスト出力
A6	BL2-ON	DIO-A6	PORT B-7	OUT	H	"	"	7	バラスト2 ON 潜航用/バラスト(未使用)
A7	BL2-OFF	DIO-A7	PORT B-8	OUT	H	"	"	8	バラスト2 OFF 潜航用/バラスト(未使用)
B0	<未使用>	DIO-B0	PORT B-9	OUT	H				
B1	<未使用>	DIO-B1	PORT B-10	OUT	H				
B2	<未使用>	DIO-B2	PORT B-11	OUT	H				
B3	<未使用>	DIO-B3	PORT B-12	OUT	H				
B4	WOT	DIO-B4	PORT B-13	OUT	H				警報系本機(未使用)
B5	DVL-T	DIO-B5	PORT B-14	OUT	H	POWER	DIO	10	DVLドライバ(未使用)
B6	VH-OPU 電源	DIO-B6	PORT B-15	OUT	H	"	"	11	H ⁺ CON
B7	TH-ON C/F(スラスタ電源)	DIO-B7	PORT B-16	OUT	H	"	"	12	H ⁺ CON
B8	CCS D00	DIO-C0	PORT B-17	OUT	H	CCS-I/F	DIO	6	パラメータ(自働機/旋転)(未使用)
C1	CCS D01	DIO-C1	PORT B-18	OUT	H	"	"	7	"
C2	CCS D02	DIO-C2	PORT B-19	OUT	H	"	"	8	"
C3	CCS D03	DIO-C3	PORT B-20	OUT	H	"	"	9	"
C4	<未使用>		PORT B-21	OUT	H				
C5	<未使用>	DIO-C5	PORT B-22	OUT	H				
C6	<未使用>	DIO-C6	PORT B-23	OUT	H				
C7	<未使用>	DIO-C7	PORT B-24	OUT	H				
D0	CCS-D0	DIO-D0	PORT B-25	IN	H	CCS-I/F	DIO	1	パラメータ(自働機/旋転)(未使用)
D1	CCS-D1	DIO-D1	PORT B-26	IN	H	"	"	2	"
D2	CCS-D2	DIO-D2	PORT B-27	IN	H	"	"	3	"
D3	CCS-D3	DIO-D3	PORT B-28	IN	H	"	"	4	"
D4	漏水センサ	DIO-D4	PORT B-29	IN	H	POWER	DIO	13	LEAK C/H
D5	DVL-TX	DIO-D5	PORT B-30	IN	H	"	"	10	DVLドライバ(自働機)(未使用)
D6	<未使用>	DIO-D6	PORT B-31	IN	H				
D7	<未使用>	DIO-D7	PORT B-32	IN	H				
B0-7	<未使用>	DIO-E		IN	H	-	-	-	<B0-7> 一括未使用
B0-7	<未使用>	DIO-F		IN	H	-	-	-	<B0-7> 一括未使用

B アナログ・デジタル変換ポート信号割付

表 3.4-39 にアナログ/デジタル変換 (AD) 信号の割付、表 3.4-40 にデジタル/アナログ変換 (D/A) 信号の割付を示す。

表 3.4-39 AD 信号割付表

● MIX-10 基板 A/D ※ターゲット基板: P104-DAQ1616

Sig No.	信号名称	CPU側		変換係数	基板側			備考
		NAME	CN/Pin		機能・機能	CN	Pin	
AD0	B-VS DC100V電源電圧	AD0	PORT A-1	±10V	CCS-I/F	AIO	1	DC100V電圧(10V→150V)
AD1	B-AS # 電流	AD1	PORT A-3	±10V	CCS-I/F	AIO	2	DC100V電流 8V→50A
AD2	深度	AD2	PORT A-5	±10V	POWER	AIO	1	深度(OPSI=1V 2000PSI=5V MP402 red=+power,black=com)
AD3	温度	AD3	PORT A-7	±10V	POWER	AIO	2	機内温度(2°C→0.2V / 100°C→10V)
AD4	<未使用>	AD4	PORT A-9	±10V				
AD5	<未使用>	AD5	PORT A-11	±10V				
AD6	<未使用>	AD6	PORT A-13	±10V				
AD7	<未使用>	AD7	PORT A-15	±10V				
AD8	TH1 prn	AD8	PORT A-2	±10V	TH-F1	AIO	3	スラスター回転数(2.5mV/rpm) 前右
AD9	TH2 prn	AD9	PORT A-4	±10V	"	AIO	4	スラスター回転数(2.5mV/rpm) 前左
AD10	TH3 prn	AD10	PORT A-6	±10V	TH-F2	AIO	3	スラスター回転数(2.5mV/rpm) 上右
AD11	TH4 prn	AD11	PORT A-8	±10V	"	AIO	4	スラスター回転数(2.5mV/rpm) 上左
AD12	TH5 prn	AD12	PORT A-10	±10V	TH-F3	AIO	3	スラスター回転数(2.5mV/rpm) 後左
AD13	TH6 prn	AD13	PORT A-12	±10V	"	AIO	4	スラスター回転数(2.5mV/rpm) 後右
AD14	水温	AD14	PORT A-14	±10V	追加温度アンプ			水温(0°C→0V / 200°C→5V)
AD15	<未使用>	AD15		±10V				

表 3.4-40 D/A 信号割付表

●MDX-10基板 D/A				※ターゲット基板 P104-DAQ1616				
Sig No.	信号名称	CPU側		変換係数	相手側			備考
		NAME	CN/Fcn		基板・機器	CN	Pfn	
DA0	TH1 指令	DA0	PORTA-19	±10V	TH-F1	AIO	1	スワスタ1回転指令 (-10V→+10V-100%→+100%) 前右
DA1	TH2 指令	DA1	PORTA-20	±10V	"	AIO	2	スワスタ2 " 前左
DA2	TH3 指令	DA2	PORTA-21	±10V	TH-F2	AIO	1	スワスタ3 " 上右
DA3	TH4 指令	DA3	PORTA-22	±10V	"	AIO	2	スワスタ4 " 上左
DA4	TH5 指令	DA4	PORTA-23	±10V	TH-F3	AIO	1	スワスタ5 " 後左
DA5	TH6 指令	DA5	PORTA-24	±10V	"	AIO	2	スワスタ6 " 後右
DA6	FL指令	DA6	PORTA-25	±10V	L-DRV	AIO	1	フロントライト強度 (0→5V.0→100%)
DA7	RL指令	DA7	PORTA-26	±10V	L-DRV	AIO	2	リアライト強度 "
DA8	<未使用>	DA8	±10V		-	-	-	
DA9	<未使用>	DA9	±10V		-	-	-	
DA10	<未使用>	DA10	±10V		-	-	-	
DA11	<未使用>	DA11	±10V		-	-	-	
DA12	<未使用>	DA12	±10V		-	-	-	
DA13	<未使用>	DA13	±10V		-	-	-	
DA14	<未使用>	DA14	±10V		-	-	-	
DA15	<未使用>	DA15	±10V		-	-	-	

C シリアルインターフェース (SIF) 信号割付

表 3.4-41 にメイン CPU のシリアルインターフェース (SIF) 信号の割付、表 3.4-42 に 4ch 拡張ボードのシリアルインターフェース (SIF) 信号の割付を示す。

表 3.4-41 メイン CPUSIF 信号割付表

●メインCPU RS232C (PCM-3363 内蔵側 2ch)							ターゲット基板 PCM-3363				
SigNo.	信号名称	ボード	SIF ch	CPU側			RATE	相手側			信号の意味
				CN	Pfn	MODE		機器	CN	Pfn	
tyS0	PHINS_RX	内蔵	COM1	CNI0	3	RS232C		PHINS	DIO-I	3	
	PHINS_TX				5			DIO-I	16		
	PHINS_GND				9			DIO-I	15		
tyS1	GCS-I/F_RX	内蔵	COM2	CNI0	13	RS232C		GCS-I/F	RS232CI	1	GCS-I/F (Pana温度送受信用)
	GCS-I/F_TX				15			RS232CI	2		
	GCS-I/F_GND				19			RS232CI	3		

表 3.4-42 4ch 拡張ボード SIF 信号割付表

●4ch 拡張SIFボード							ターゲット基板 PCM-3642I					
SigNo.	信号名称	ボード	SIF ch	CPU側			RATE	相手側			信号の意味	
				CN	Pfn	MODE		機器	CN	Pfn		
tyAP0	Micron_RX	拡張	COM3		3	RS232C		Micron	A7	1	FRONT 水中コネクタ	
	Micron_TX				5				2			
	Micron_GND				9				5			
	<未使用>				13					<未使用>		
tyAP1	<未使用>	拡張	COM4		15	RS232C						
	<未使用>				19							
	AUX_RX				23				AUX	A18	3	FRONT 水中コネクタ
	AUX_TX				25			RS232C			4	
tyAP2	AUX_GND	拡張	COM5		29	RS232C						
	<未使用>				33							
	GPS_RX				35				GPS	A1	2	GPS 受信専用 (REAR 水中コネクタ)
	PHINS_TX				39			RS232C			3	PHINS 送信専用
tyAP3	GND	拡張	COM5		39	RS232C						
	<未使用>										4	

3.4.2.5.2. 制御ソフトウェア

制御ソフトウェアは、ホバリング型 AUV/ROV の基となる Tuna-Sand の系統で、水中ビークルとして実績がある最新の OS : Linux (Ubrntu) を搭載して、ビークルとしての運用実績も豊富な YOUZAN の制御ソフトウェアを移植し、r-AUV 用に改造している。

以下に、r-AUV を AUV モードと ROV モードで航行させるための 1 例を、ソフトウェアの起動や操作手順について簡単に示す。

A ネットワーク通信の開始

ビークル側の航行機器のハードやソフト、及び船上側オペレーションシステムの準備は出来ているとして、オペレーション用 PC を起動し、AUV 制御ソフトウェア (Commander.exe) を起動させると、ネットワーク通信は自動的に通信状態となり、図 3.4-211 に示す Commander 画面の右下 LINK が青色になり、AUV モードあるいは ROV モード航行が実行待ちの状態となる。

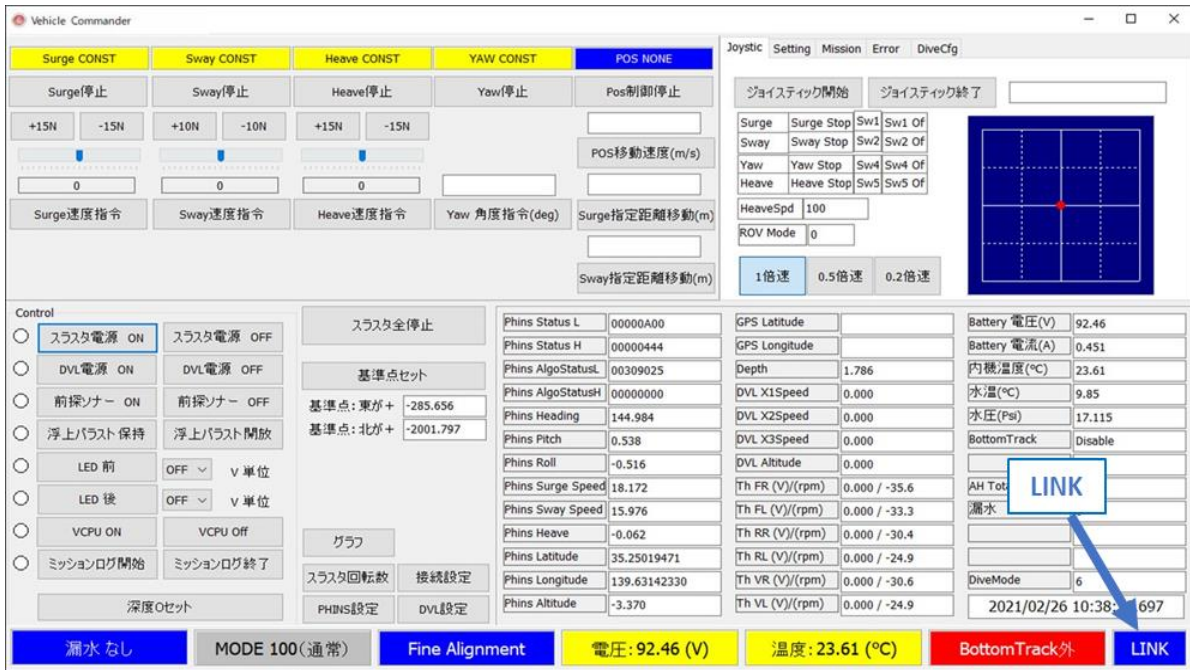


図 3.4-211 通信状態の Commander 画面

B AUV モード航行

AUV モードで r-AUV に自律航行ミッションをさせるためのコースデータは、市販のソフトウェアである EXCEL を使って CSV ファイルを作成し、Windows Internet Explorer を使って無線 LAN で r-AUV の CPU に転送・格納する。

ファイル転送後、ビークル側の各種準備が終了し、着水させた後、図 3.4-212 に示すオペレーション用 PC の Commander 画面 (Mission の選択画面例) の、右上のタブ“Mission”をクリックすると、画面の右上部に“Mission Commander Area”枠が表示されるので、その枠内の“DiveStart”ボタンをクリックすると r-AUV の自律航行ミッションが開始され、潜航が始まる。

自動航行ミッションが完了すると、r-AUV はコースデータで設定した海面座標点に浮上し、停止するので、揚収し、必要に応じて無線 LAN を使ってデータ処理用 PC にデータを吸い上げ、データ処理をすることになる。

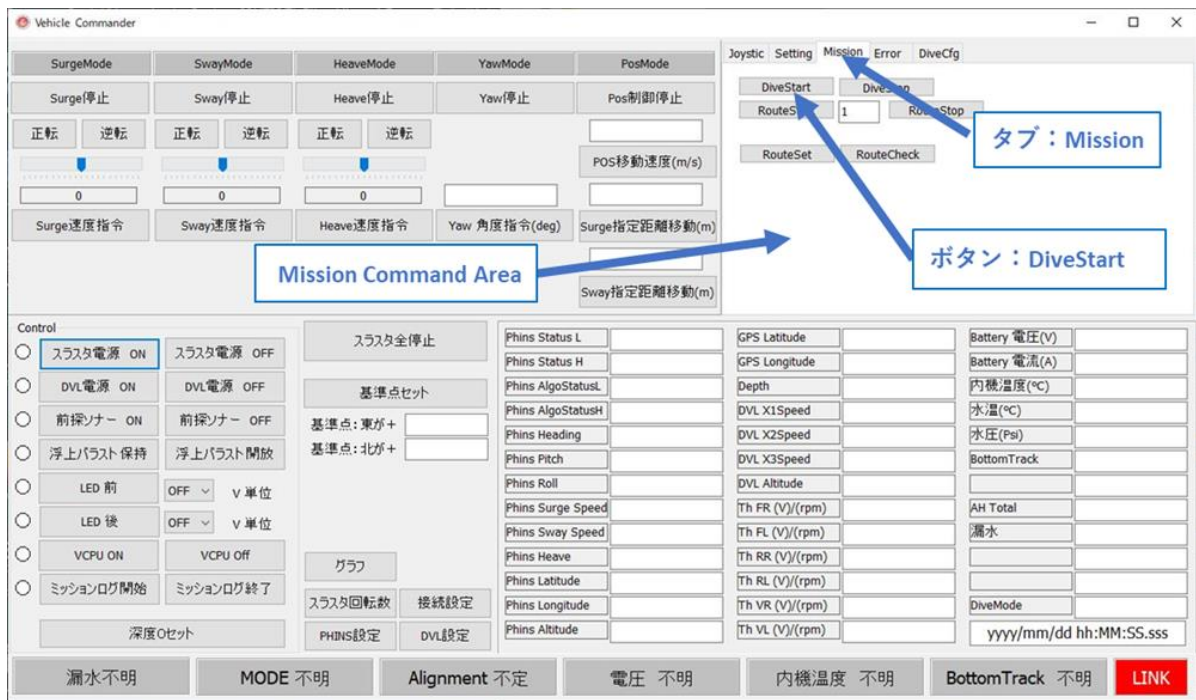


図 3.4-212 AUV モード Commander 画面 (Mission の選択画面例)

C ROV モード航行

ROV モードでの遠隔操作をする場合、前述のネットワーク通信を通信状態とした後、図 3.4-213 に示す Commander 画面 (Joystick の選択例) の右上のタブ“Joystick”をクリックすると画面の右上部に”Joystick Command Area”枠が表示されるので、その枠内の”ジョイスティック開始”ボタンをクリックすると、ジョイスティックが操作可能となり、”Joystick Command Area”枠内の四角い紺色の枠内にジョイスティック操作量が図示される。

以降はジョイスティックの操作と船上オペレーションシステムのカメラモニタ画面、前方探査ソナーの画像、Commander 画面に表示されるビークルの各種データなどを参照しながら、r-AUV を遠隔操縦する。

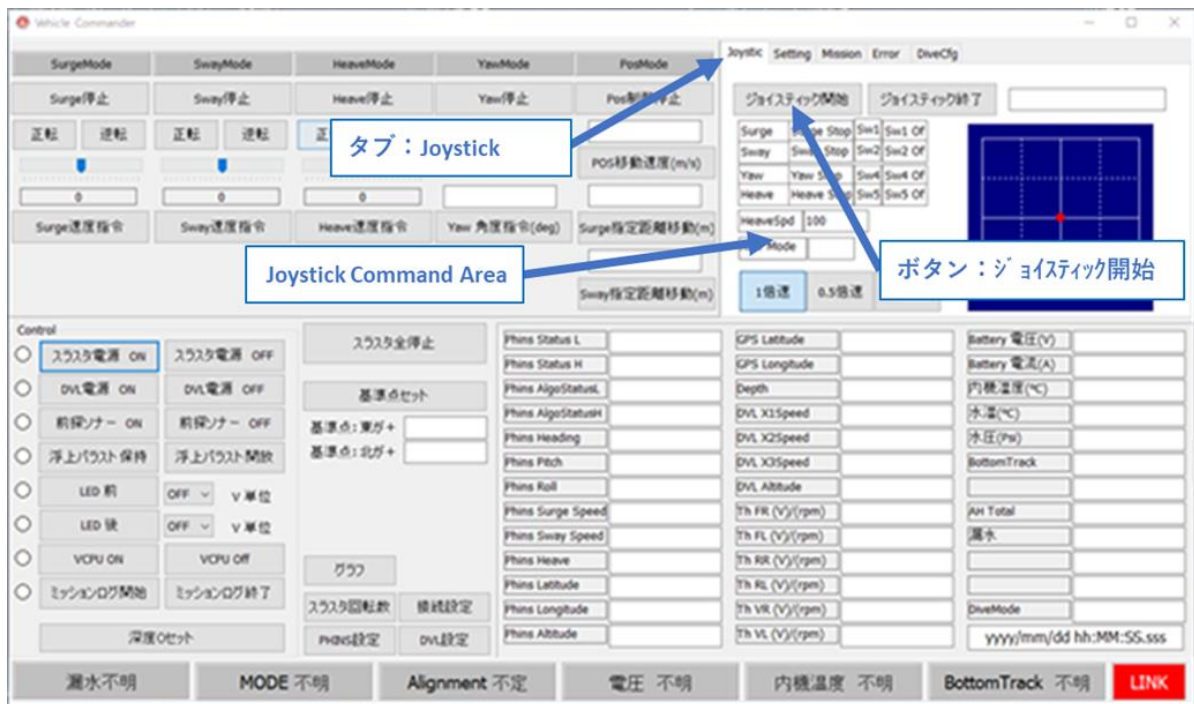


図 3.4-213 ROV モード Commander 画面 (Joystick の選択画面例)

3.4.2.6. AUV の作動確認 (陸上試験、水槽水中試験)

組立が完了した r-AUV の陸上作動試験、水中作動試験を実施し、正常に作動することを確認した。

3.4.2.6.1. 耐圧試験

製作した主耐圧容器に関して、検討の結果、下記に示した理由等を考慮し、所謂高圧水槽での外圧による耐圧試験は実施せず、真空引き試験と窒素置換試験での確認で、容器の変形や漏れがないことから、海中試験での気密および強度上の問題は無いと判断した。

<理由>：

- ・主耐圧容器真空引き試験は実施済み：真空引きにより容器に加わる外圧 (1 気圧) は、実際に海中試験を行う予定の水深 10m に相当するので、真空引き試験により海中試験水深での耐圧性能は確認できている。

- ・経験上、大体水漏れは水深 10m 以浅で発生し、陸上試験での水深 10m 相当の外圧で気密が保たれていれば、それ以深では O リングがリング溝接合部に張り付くため水漏れは発生しない。

- ・今回は容器の圧壊試験ではなく、水漏れしないことを確認することが重要である。

- ・今回の耐圧容器の大きさの容器が入る試験水槽は、高圧での試験用のものなので、設計水深 50m 相当の圧力 5kg/mm² のような低圧での圧力コントロールは困難なため、高圧水

槽での試験実施は難しい。

・今回の耐圧容器設計に採用した外圧強度計算式に基づき製作された耐圧容器は多数実績があり、機械的に図面通りに製作されていれば、強度的な問題無いと考えられる。

3.4.2.6.2. 陸上作動試験：

表 3.4-43 に陸上作動試験結果を示す。

陸上作動試験は、デバッグ用の陸上電源（DC100V）を用いて実施した。確認項目に応じて、光ファイバーケーブル経由あるいは無線 LAN 経由でシリアル通信、イーサネット通信により、IO 試験や各機器の作動試験を実施し、全て良の結果が得られ、r-AUV は正常に作動することが確認できた。

表 3.4-43 陸上作動試験結果

確認項目		機器	確認内容 (注：表中の船上PCとは、船上オペレーション用PCを指す)	結果
IO試験	DO	DVL 前探ソナー バラスト スラスト電源	船上側からON/OFF指令を出力して ◇対応機器がON/OFFするか ◇艇体CPU及び船上PCの対応ステータスがON/OFFとなるか	良
	DI	漏水センサ	漏水センサをショートし、艇体CPU及び船上PCのステータスが漏水となるか	良
	AD	電源電圧 電源電流 深度 容器内温度 水温	対応入力値が、船上PCで表示されるか	良
	AD/DA	スラスト指令信号・FB信号	指令値を与え、 ◇スラストが回転することを目視確認 ◇船上PCに回転の値が表示されるか (陸上でスラストの高回転は不可のため、低い回転数指令値を与えて確認した)	良
	DA	LEDライト：前 LEDライト：後	LEDライトが正常に点灯するか	良
シリアル通信		PHINS	PHINSからのデータが船上PCに表示されるか	良
		前探ソナー	船上のデータ処理用PCにデータが表示されるか	良
		GPS	衛星からのデータをPHINSへ送信出来ているか	良
イーサネット通信		PHINS	◇Webブラウザでモニタできるか ◇艇体CPUからのGPSデータを取得しているか ◇艇体CPUからの深度データを取得しているか ◇DVLからの対地速度データを取得しているか	良
		DVL	PHNSへ対地速度データを送信できているか	良
		無線LAN	船上PCで艇体CPU、PHINS、DVLにアクセスできるか	良
光通信		光通信装置	◇船上PCと艇体内機器が通信できるか	良
		光ケーブル	◇TVカメラ画像が船上TVカメラモニタに表示されるか	良
		TVカメラ：前 TVカメラ：後		良
各種設定		PHINS	◇深度計、DVL、GPSのレバーアーム（PHINSに対する各機器の位置）を設定 ◇艇体内部座標系を設定	良

3.4.2.6.3. 水槽水中作動試験：

水槽での水中作動試験は、

図 3.4-214 に示す国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC：Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology）の多目的プールで実施した。

多目的プールは、一辺が 21m のほぼ正方形（八角形）で、半分が深さ 1.5m、残り半分の深さが 3.3m の真水のプールである。

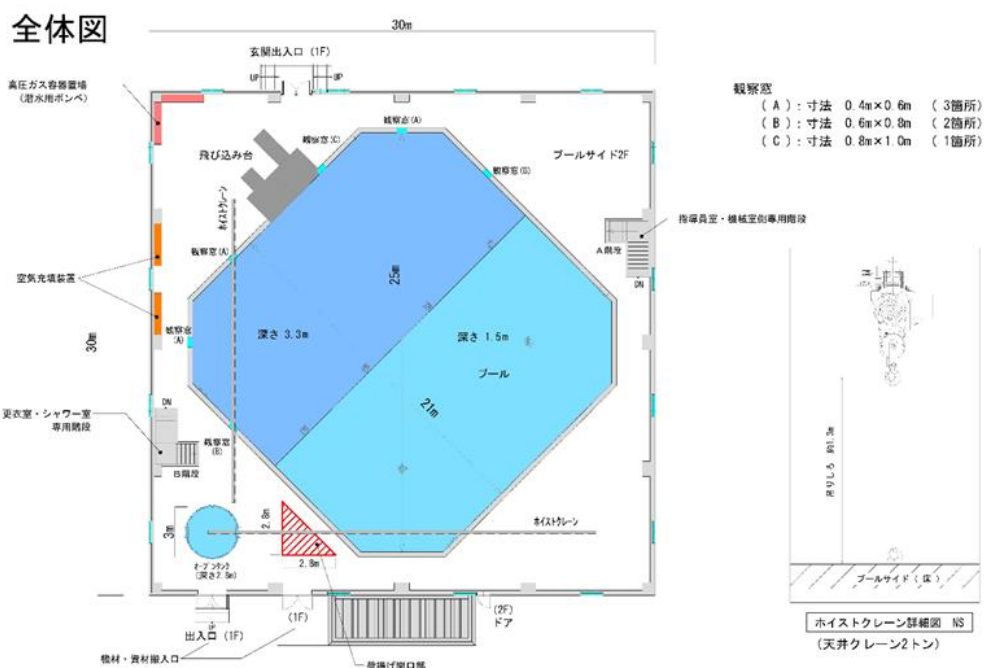


図 3.4-214 JAMSTEC 多目的プール全体図

表 3.4-44 に水中作動試験結果を示す。水中作動試験は、r-AUV に搭載した電池で実施し、確認項目に応じて、光ファイバーケーブル経由で作動試験を実施し、船上オペレーション用 PC、船上データ処理用 PC および目視で作動試験結果を確認した。浅いプールでの水中試験のため、音響マルチパスと考えられる影響で、DVL の速度データ、高度データが取得できない場合が多発したが、DVL の速度データ、高度データが取得できれば、それらのデータを用いる高度制御、定点保持制御、自動航行制御は正常に制御できることが確認できている。

表 3.4-44 水中作動試験結果

確認項目	機器・機能	確認内容	状況・処置 (船上PCは、船上オペレーション用PCを指す)	結果
水密試験 最大水深3.3m	AUV機体及び機器類	機体・機器の浸水・変形が無いこと	目視で機体・機器の浸水・変形が無いことを確認した。	良
	主耐圧容器	主耐圧容器の浸水・変形が無いこと	目視で主耐圧容器の浸水・変形が無いことを確認した。	良
	POMケース	POMケースの浸水・変形が無いこと	目視でPOMケースの浸水・変形が無いことを確認した。	良
通信	テザーケーブル ：光ファイバーケーブル	水中でも問題無く通信できること	水中でも正常に通信できることを船上PCで確認した。	良
音響機器 作動試験	DVL	対地速度、対水速度が取得できること	対地・対水速度データが取得できることを船上PCで確認した。	良(※)
	前探ソナー	対象物をプロファイリングできること	対象物をプロファイリングできることを船上データ処理PCで確認した。	良
自動制御	方位制御	方位制御ができること	方位制御ができることを船上PC及び目視で確認した。	良
	深度制御	深度制御ができること	深度制御ができることを船上PC及び目視で確認した。	良
	高度制御	高度制御ができること	高度制御ができることを船上PC及び目視で確認した。	良(※)
	定点保持、自動航行	定点保持、自動航行ができること	定点保持・自動航行ができることを船上PC及び目視で確認した。	良(※)
手動操作	ジョイスティック操作	艇体制御ができること	正常に艇体制御ができることを船上PC及び目視で確認した。	良
その他作業	機器設置データ調整		PHINSの位置データ出力結果に基づき、DVL取付角度の設定値を調整した。	
	ビークル操作画面の改良		操縦状況を参考に、より操作のしやすさを向上させるよう、船上オペレーション用PCの構成画面を整理した。(例えば、手動操作の表示等を纏める、フォントサイズ・ボタンサイズの調整、インジケータ(漏水等)の表示追加等)	
	艇体CPUの艇体制御ソフトウェアの自動起動化		主耐圧容器前側蓋コネクタにShortプラグを挿入させて艇体CPUを起動させると、艇体制御ソフトウェアが自動的に起動するようにした。	
(※)：プールの音響マルチパスと思われる影響で、DVLの速度・高度データ取得が出来なくなる場合が多発した。DVLの速度・高度データが取得できた場合は、それらのデータを使用する制御は正常に制御できた。				

なお、r-AUVの制御ソフトウェアは、前述のように、ホバリング型AUV/ROVの基となるTuna-Sandの系統で、水中ビークルとして実績がある最新のOS:Linux(Ubuntu)を搭載して、ビークルとしての運用実績も豊富なYOUZANの制御ソフトウェアを移植し、r-AUV用に改造しているが、AUVモードについては、Waypoint航行ソフトウェアの実装までとし、障害物回避などを含めた自律航行については、インストールはしているが、現在はコメント行にして機能を停止させており、将来的には実行可能な状態までとしている。

また、Waypoint航行については、コースデータ読み込みまでは確認しているが、屋内プールでの水槽試験のため、リアルタイムでのGPS受信や、上述のようにDVLデータの取得が困難なこともあり、今回の水中試験では実施していない。

自動航行については、図3.4-215の航跡図を示すように、目的点までの直線自動航行を実施し、正常に航行することを確認している。この目標点に向かう自動航行は、目標とする方位データとその方位方向に何m進むかの距離データ、深度データを与えて航行するもので、図3.4-215は、目標の絶対方位55°、直線距離10m、速度0.2m/s、深度制御無し(水面航行)で航行させたものである。

図3.4-216にr-AUVの水槽作動試験の様子を示す。

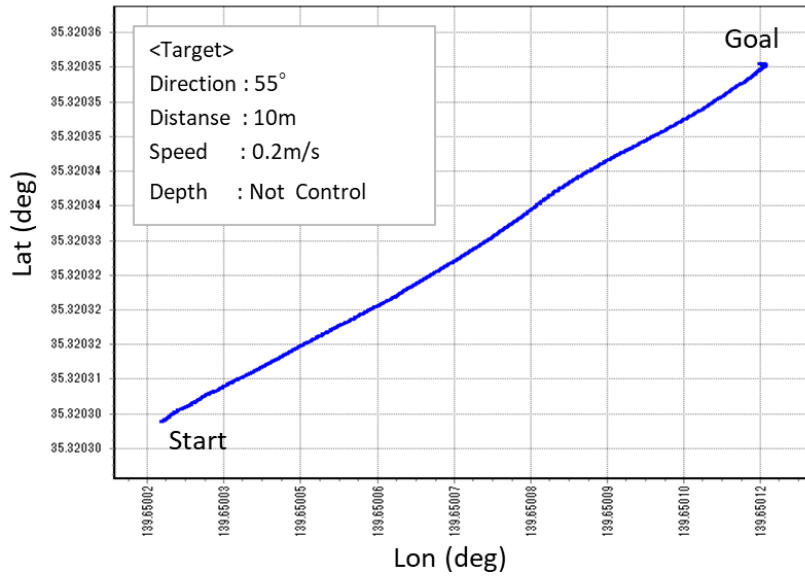


図 3.4-215 目標点向け自動航行航跡図

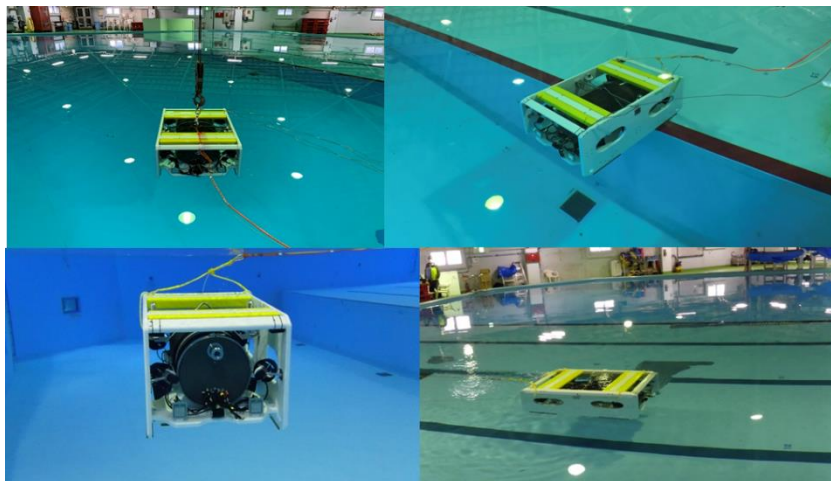


図 3.4-216 r-AUV 水槽作動試験状況

3.4.2.7. 充電時の r -AUV 主耐圧容器の振動

実寸モデルでの陸用実験中の鳴音については、使用する周波数に起因するコイルの音と考え、特に対策は実施していなかった。しかし、陸上での r -AUV 筐体組み込み予備試験の充電時でも鳴音が発生した。

状況を調査した結果、主耐圧容器からの鳴音で、主に蓋（鏡板）が振動していることが判明した。このため、振動状況、防振効果等の調査を行い、その結果に基づき、主要センサの内、振動の影響に注意が必要な慣性航法装置（Phins Compact C3：以下 Phins と呼ぶ）の設置に必要な制振対策を施し、Phins 稼働に問題無いレベルまで Phins 設置部の振動を低減

することができた。

3.4.2.7.1. r-AUV 筐体組み込み予備試験での主耐圧容器の振動調査

r-AUV への筐体組み込み予備試験の状況を図 3.4-217 に示す。充電の予備試験のため、主耐圧容器内機器は全て主耐圧容器の外に取り出した状態である。また予備試験用に製作した後蓋の中心部に設けた孔を通した電線が耐圧容器胴部の受電コイル取り込みの POM ケースの固定ボルトに接続されている。図 3.4-218 に後蓋からのコイル電線の引出し状況を示す。

なお、前蓋および後蓋の板厚は、実機が 22 mm に対し予備試験では 15 mm のものを使用している。

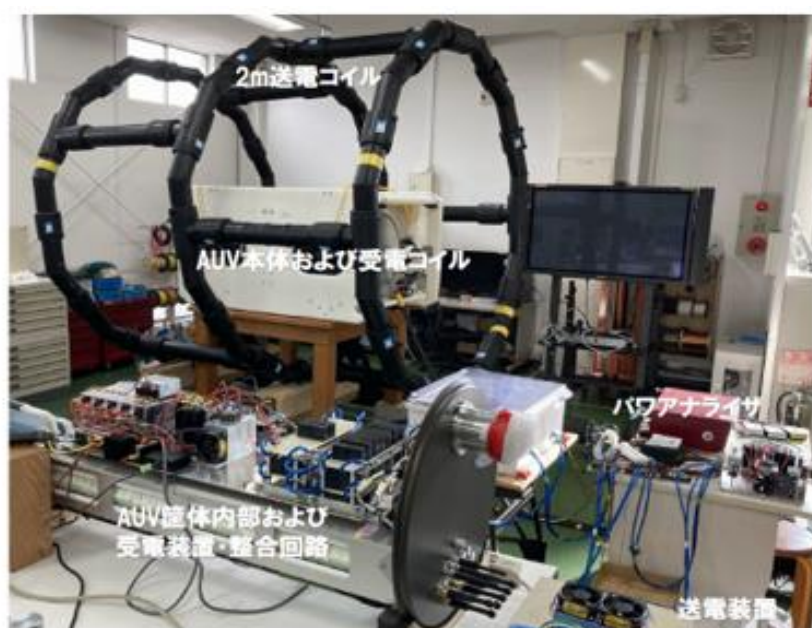


図 3.4-217 r-AUV 筐体組み込み予備試験状況

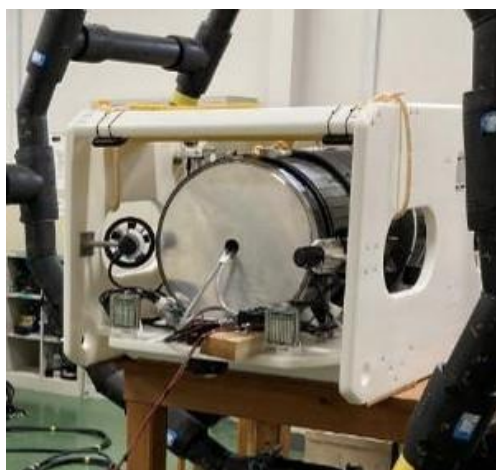


図 3.4-218 主耐圧容器後蓋からの電線取出し状況

予備試験での振動測定は、図 3.4-219 に示す JFE アドバンテック（株）製 ポータブル振動診断器 MK-220 を用いた。

ポータブル振動診断器 MAINTE PRO[®]

MK-220

「おまかせ診断」機能を搭載した現場支援ツール



JFE アドバンテック 株式会社

設備診断器MK-220の仕様

● 振動計測部

入力信号	振動ピックアップ信号 1チャンネル		
測定モード 測定周波数範囲 (初期値) 測定レンジ	測定モード	測定周波数範囲 (初期値)	測定レンジ
	加速度ACC (TH,OA)	5~20kHz	500 m/s ² _{r.p} (1m/s ² ±0.1G) *1
	加速度ACC (OA)	1k~20kHz	
	加速度ACC (PEAK)	1k~20kHz	
	加速度ACC (ENV)	1k~20kHz	
速度VEL	5~1kHz	500 mm/s _{r.p} *1	
変位DISP	5~1kHz	5000 μm _{r.p}	
周波数フィルター	測定モード	HPF	LPF
	加速度ACC (TH,OA)	5, 10, 15, 20,	1k, 2k, 5k, 10k, 15k, 20kHz
	加速度ACC (OA)	100, 200, 500,	
	加速度ACC (PEAK)	1k, 2k, 5k, 10k,	
	加速度ACC (ENV)	15k, 20kHz	
	速度VEL	5, 10, 15, 20,	100, 200, 250,
		100, 200,	500, 1k, 2kHz
変位DISP	500, 1kHz	100, 200, 250, 500, 1kHz	
ダイナミックレンジ	88dB以上		
解析周波数レンジ	10, 20, 50, 100, 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k, 20kHz (F.S)		
Window関数	レクタングュラー、ハミング、ハニング、フラットトップ		
分解能	解析周波数レンジの1/100、1/200、1/400、1/800、1/1600、1/3200、1/6400、1/12800		

*1 G, cm/s 表示可能

図 3.4-219 振動診断器 MK-200 外観および仕様

A 簡易計測による振動状況調査

r-AUV に搭載した状態での主耐圧容器振動の測定位置を図 3.4-220 に示す。

主耐圧容器はアルミ合金製で、胴部にはコイルやフェライトなどがあり、加速度センサの取付けが困難な場所があるため、早急に振動の状態を把握する策として、図 3.4-220 に示すように金属棒を用いて加速度センサを主耐圧容器各部に押し付けて測定を行った。このため絶対値としての精度は落ちるが、押しつけ力はほぼ同じになるようにして測定しており、各部の相対的な振動状態は把握できていると考える。

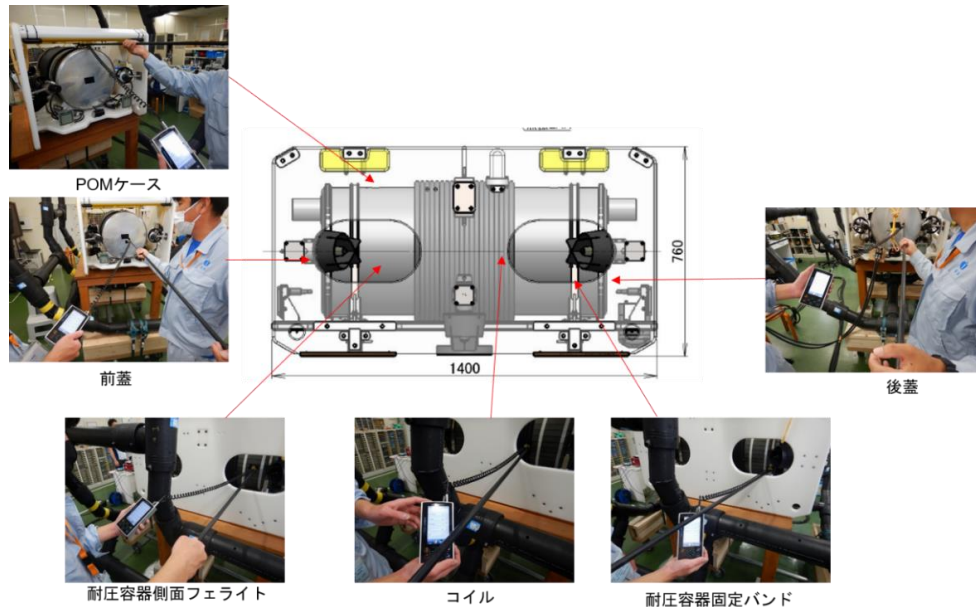


図 3.4-220 主耐圧容器の振動測定位置

表 3.4-45 の各部加速度ピーク値に示すように蓋中央部、特に前蓋の中央部の加速度が大きくなっている。前蓋より後蓋の加速度が小さくなっているが、これは後蓋の中央部から電線を引き出している影響であると思われる。なお、前蓋とは AUV の艇首側の蓋、後蓋とは艇部側の蓋を示す。

表 3.4-46 加速度の周波数スペクトルに示すように、振動周波数は 1600 Hz で、やはり蓋中心部の加速度が大きくなっている。給電周波数は 800 Hz であるが、1 周期の間に 2 回磁界のピークがあるため、振動は給電周波数の 2 倍の 1600 Hz になっているものと考えられる。

表 3.4-47 は給電電圧と受電電力を変更した時の後蓋での加速度の周波数スペクトル値、図 3.4-221 はその時の充電電流 10 A、受電電力 1 kW での加速度波形、図 3.4-222 は同じ条件での振動測定結果で、加速度は 17.81 m/s² となっている。給電電圧あるいは受電電力を上げると、振動は大きくなっていることが分かる。

表 3.4-45 主耐圧容器各部振動の加速度（充電電流 10 A、受電電力 1 kW）

測定位置	加速度ピーク値 (m/s ²)	備考
前蓋 左舷側端	32.10	
前蓋 中央	70.98	手に振動が伝わる
後蓋 右舷側端	15.21	
後蓋 中央	19.39	
主耐圧容器固定バンド	1.21	
主耐圧容器フェライト	5.85	

主耐圧容器コイル	0.56	
POM ケース	6.50	フェライト部と同程度の振動

表 3.4-46 主耐圧容器各部の加速度周波数スペクトル値 (充電電流 10 A、受電電力 1 kW)

測定位置	周波数 (Hz)	加速度 (m/s ²)	備 考
前蓋 左舷側端	1600	12.10	
前蓋 中央	1600	15.67	
後蓋 右舷側端	1600	10.60	
後蓋 中央	1600	15.51	
主耐圧容器固定バンド	1600	0.30	
主耐圧容器フェライト	1600	3.10	
主耐圧容器コイル	1600	0.26	
POM ケース	1600	3.85	

表 3.4-47 給電電圧・受電電力変更時の後蓋加速度の周波数スペクトル値

給電電圧 (V)	受電電力(kW)		加速度 (m/s ²)	備 考
60	0		4.09	
80	0		6.98	
100	0		10.50	
120	0		14.55	
120	0.25		15.01	
120	0.50		15.78	
120	0.75		16.67	
120	1		17.81	=1kW

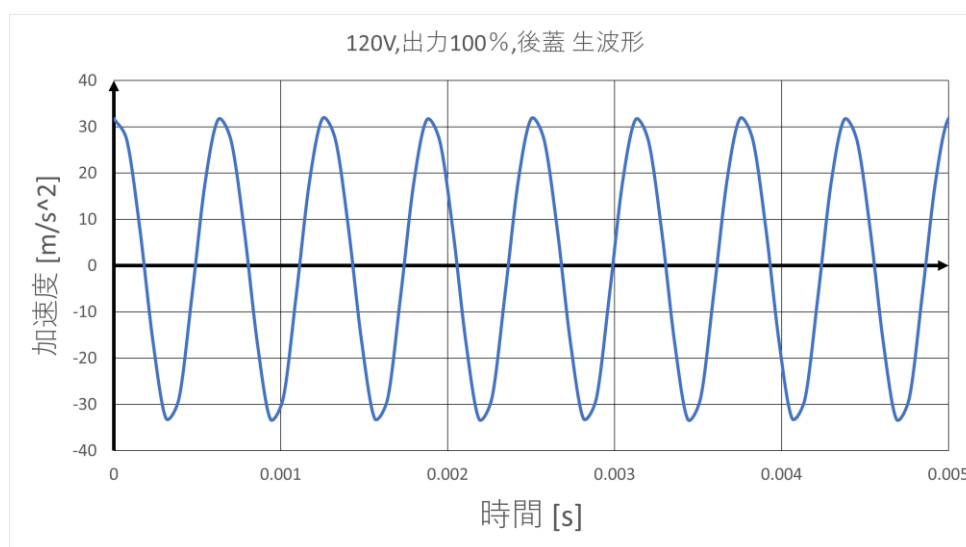
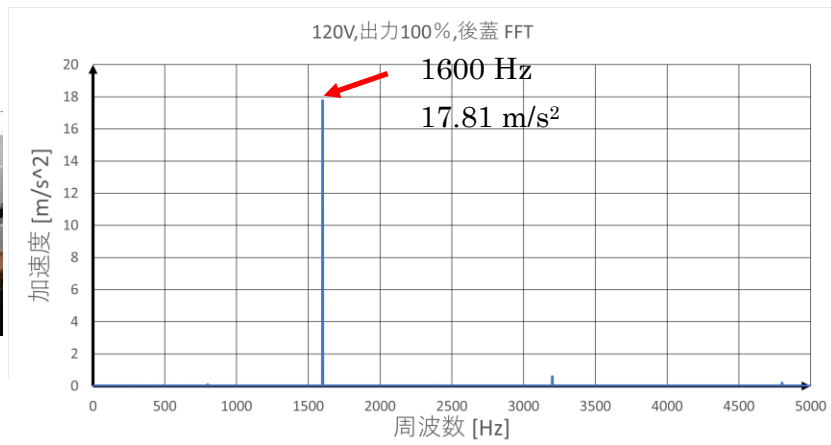


図 3.4-221 後蓋：振動加速度波形 (充電電流 10 A、受電電力 1 kW)



(a) 後蓋板厚 15mm
での振動測定の様子



(b) 加速度周波数スペクトル

図 3.4-222 後蓋の振動（充電電流 10 A、受電電力 1 kW）

A-1 制振シート貼付、内機器重量、蓋板厚の影響調査

簡易計測により板厚 15 mm の前蓋中心の振動が大きいことが判明したので、主耐圧容器の蓋について制振シート貼付、内機器重量、蓋板厚の振動への影響を調査した。

精度の良い振動測定を行うためには、加速度センサは対象物に機械的に結合する方が良く、一般にはネジ・ボルトによる締結や磁石による貼付などが行われる。しかし、主耐圧容器は水中機器用として軽量化のため限界設計をしており更なる加工は避けたい、材質がアルミ合金で磁石の使用はできない、また胴部には全周にわたりフェライトが貼り付けられていて、その上に受電コイルのゴム被覆ケーブルが巻き付けられている等々のため主耐圧容器への加速度センサの機械的結合は困難な状態である。

このため次善の策として、加速度センサを強力両面テープで前蓋中心に貼り付けて振動を測定することとした。強力両面テープの品名・品番は「スリーエム スコッチ® 超強力両面テープ プレミアゴールド スーパー多用途・品番：KPS-25・基材：アクリルフォーム、接着剤：特殊アクリル系、テープ厚み：1.1 mm」である。

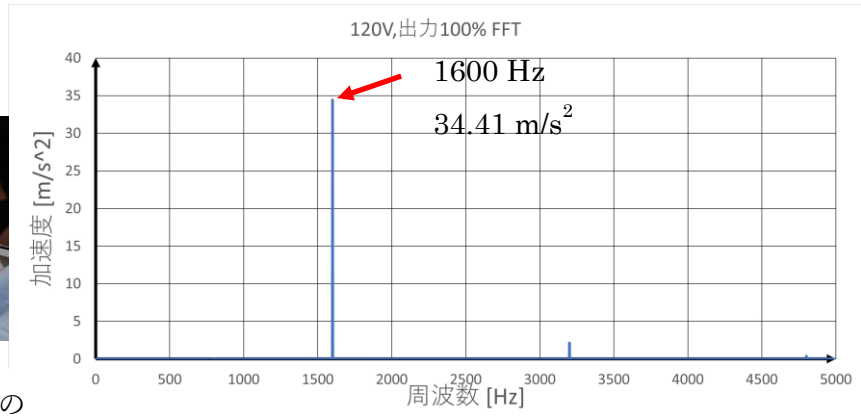
A-1-1 振動測定の基準状態

AUV への筐体組み込み予備試験で鳴音発生が確認された時の主耐圧容器の状態を、以降の振動状況調査・対策効果判断のための基準状態とする。この状態での充電電流 10 A、受電電力 1 kW における前蓋（板厚 15 mm）振動の加速度測定結果を図 3.4-223 に示す。

振動周波数 1600 Hz で、加速度は 34.41 m/s² であった。



(a) 前蓋 15mm での
振動測定の様子



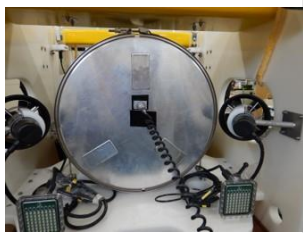
(b) 加速度周波数スペクトル

図 3.4-223 基準状態：前蓋(板厚 15 mm)の振動（充電電流 10 A、受電電力 1 kW）

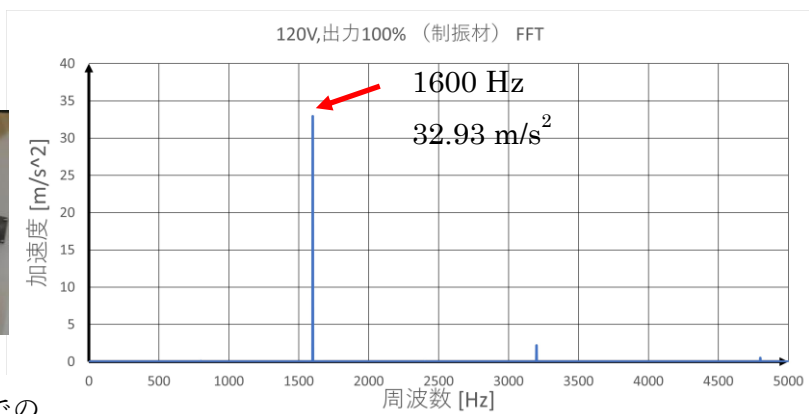
A-1-2 制振シート貼付による影響

図 3.4-224(a) に示すように、前蓋の 3 カ所に制振シートを貼付し、その効果を確認した。制振シートは、日東電工製レジトレックス D300-N(縦 100 mm、横 50 mm、厚さ 1.5 mm、比重 1.4)を使用した。

その結果、図 3.4-224 (b) の周波数スペクトルに示すように加速度は 32.93 m/s² で、基準状態より 1.49 m/s² 低下している。



(a) 制振シートでの
振動測定の様子



(b) 加速度周波数スペクトル

図 3.4-224 制振シート貼付：前蓋の振動（充電電流 10 A、受電電力 1 kW）

A-1-3 内機器重量の影響

筐体組み込み予備試験では、前述のように内機器は全て外に取り出し、主耐圧容器内は空の状態を実施している。このため、図 3.4-225 (a)の前蓋閉鎖前の状態を示すように、内機器とほぼ同重量となる土嚢 40 kg を主耐圧容器内に格納し、重量の影響を調査した。

その結果、図 3.4-225 (b)の周波数スペクトルに示す様に加速度は 33.7 m/s^2 で、基準状態より 0.68 m/s^2 低下している。

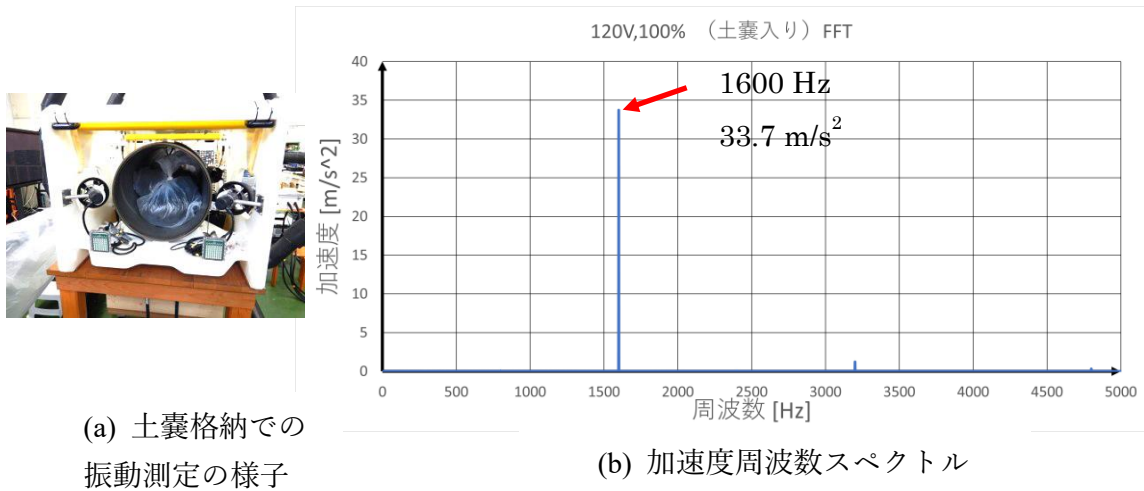


図 3.4-225 土囊格納状態：前蓋の振動（充電電流 10 A、受電電力 1 kW）

A-1-4 主耐圧容器蓋板厚の影響

筐体組み込み予備試験では、ケーブル取出し穴の関係等から主耐圧容器の蓋は板厚 15 mm のものを使用しているため、実機の蓋相当の板厚 22 mm にした場合の影響を調査した。

その結果、図 3.4-226(b)の周波数スペクトルに示すように加速度は 12.75 m/s^2 となり、基準状態より 21.66 m/s^2 低下して、約 $1/3.7$ の値となっている。

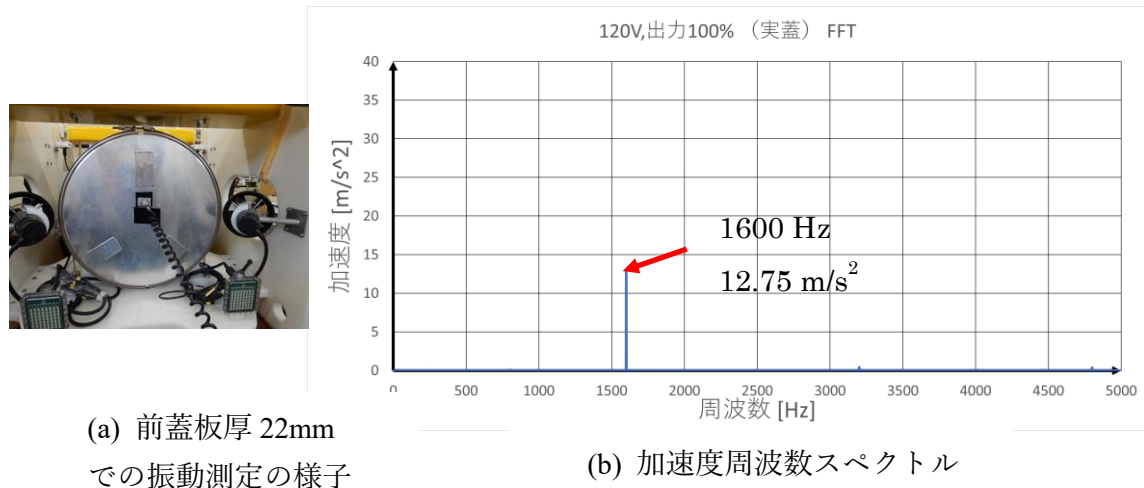


図 3.4-226 前蓋（板厚 22 mm）の振動（充電電流 10 A、受電電力 1 kW）

A-2 r - A U V 筐体組込み予備試験での主耐圧容器振動調査のまとめ

振動の原因はフェライトの磁気歪 [17]によるものと考えられるが、現状ではフェライト

の代替えとなる材料は簡単には見つからないため、起振源自体の対処による振動低減は困難と考えられる。

一方、前述までの調査の結果、本来の実機主耐圧容器蓋の板厚 22 mm にすることにより、蓋の振動は 12.75 m/s² 程度まで大幅に低下することが判明した。このため、実機では制振シートの貼付等はせずに従来の蓋のままとし、主耐圧容器の内機器毎に必要な応じて振動対策をするものとした。

3.4.2.7.2. 慣性航法装置の振動調査と対策

主耐圧容器の内機器で、コンピュータを始めとする r-AUV の制御機器類は基本的に PC-104 規格のボードスタックタイプで、ボードは直接シャーシにボルト固定されている。また電池への充電制御系などは、r-AUV 用として製作した専用ボードで、これらも直接シャーシにボルト固定されている。このため、これらの機器は振動に強い設計となっている。

その他の内機器類も、蓋板厚 22 mm での振動レベルや、主耐圧容器胴部と機械的に結合されていて胴部振動を代表すると考えられる POM ケースの振動レベルであれば、今までの各種 AUV での使用実績・経験から、新たな振動対策は施さなくても作動に問題は無いと考えられる。

一方、慣性航法装置 (iXblue 社: Phins-C3、以下 Phins と呼ぶ) は、FOG (Fiber-Optic Gyroscope) 式の IMU (Inertial Measurement Unit) で、可動部が無いいため比較的振動には強い機器とは考えられるが、メーカーによる振動制限が「5-40 Hz, 0.51 g (=5.0 m/s²) sinus max」となっているため、Phins 搭載部の振動を調査し、必要であれば対策を施すことにした。

振動測定は、JFE アドバンテック (株) 製 ポータブル振動診断器 MK-220 を用いた。

A Phins のダミー製作

振動調査に当たっては、Phins の万一の損傷を防ぐため、Phins とほぼ同様の重量・寸法のダミーを製作して、Phins 搭載部に設置して振動測定・評価を行うこととした。

ダミーの基本構造は図 3.4-227 に示すもので、Phins 本体ダミー (以下、本体ダミーと呼ぶ) と Phins 回路部ダミー (以下、回路部ダミーと呼ぶ) を製作し、それぞれ内部に設置したゴム巻の鉛で重量を調整している。

製作した本体ダミーを図 3.4-228 (a) に、回路部ダミーを図 3.4-228 (b) に示す。各ダミーの外枠は ABS 樹脂で、それぞれの重量、寸法は図 3.4-228 中に示す。

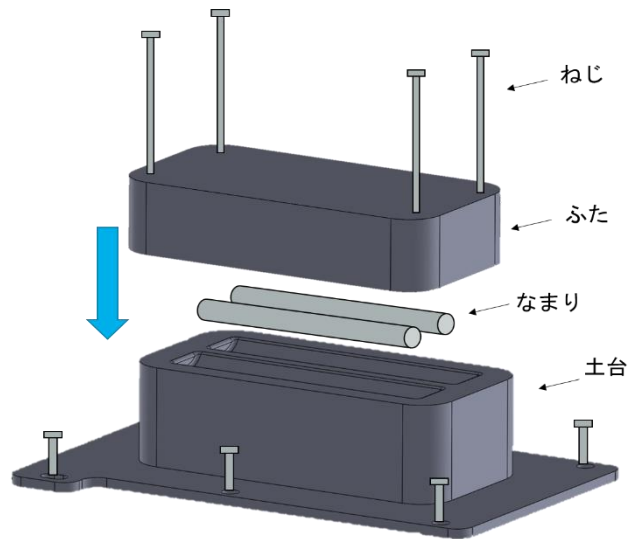
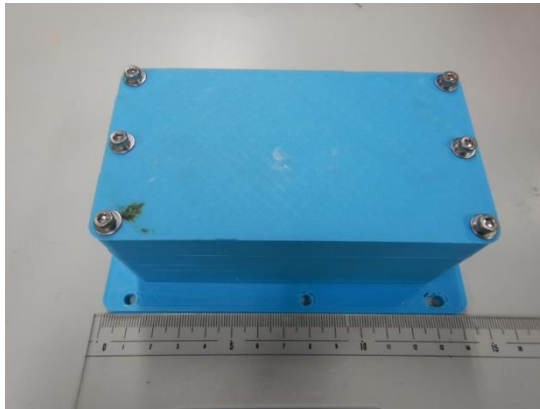
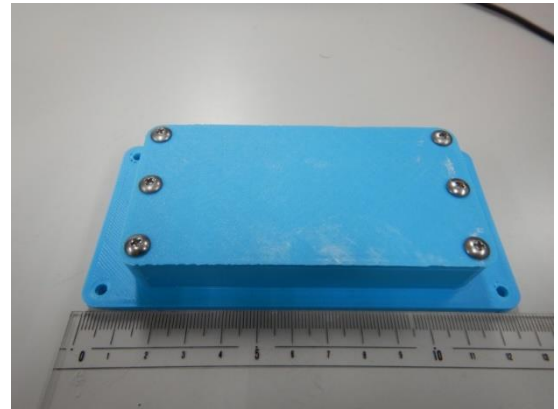


図 3.4-227 Phins ダミーの構造



(a)本体ダミー

重量：1253 g (実機：1280 g)
 寸法：L142 mm×W98 mm×H55 mm



(b)回路部ダミー

重量：348 g (実機：350 g)
 寸法：L127 mm×W61 mm×H23 mm

図 3.4-228 Pins ダミー

B Phins ダミーによる振動調査

B-1 Phins 設置面の振動調査

振動調査の第一段階として、Phins を取り外し、かつダミーも搭載しない状態でシャーシ側の Phins 設置面の振動測定を行った。加速度センサの取付け位置を図 3.4-229 に示す。

各受電電力での測定結果を表 3.4-48 に、充電電流 10 A、受電電力 1 kW での Phins 設置

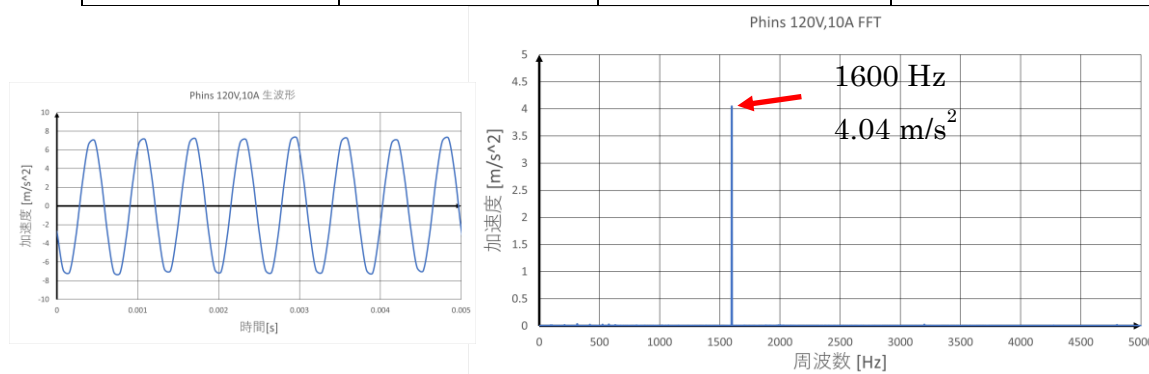
面振動の測定結果を図 3.4-230 示す。受電電力 1 kW での Phins 設置面での振動は、周波数 1600 Hz、加速度 4.04 m/s² であった。



図 3.4-229 加速度センサの設置位置

表 3.4-48 Phins 設置面振動の測定結果 (Phins 取り外し)

充電電流(A)	充電電力(kW)	振動周波数(Hz)	加速度(m/s ²)
0	0	1600	3.42
5	0.5	1600	3.80
10	1	1600	4.04



(a) 加速度波形

(b) 加速度周波数スペクトル

図 3.4-230 Phins 設置面振動 (Phins 取り外し：充電電流 10 A、受電電力 1 kW)

B-2 Phins 本体ダミーの振動調査

図 3.4-231 に Phins ダミーと加速度センサの設置位置を示す。Phins 設置面での振動測定の後、表 3.4-49 に本体ダミー上での各受電電力での振動測定結果を、図 3.4-232 に充電電流 10 A、受電電力 1 kW での加速度波形と振動周波数スペクトルを示す。 充電電流 10 A、

受電電力 1 kW では、振動周波数 1600 Hz で、加速度は 1.31 m/s² であった。

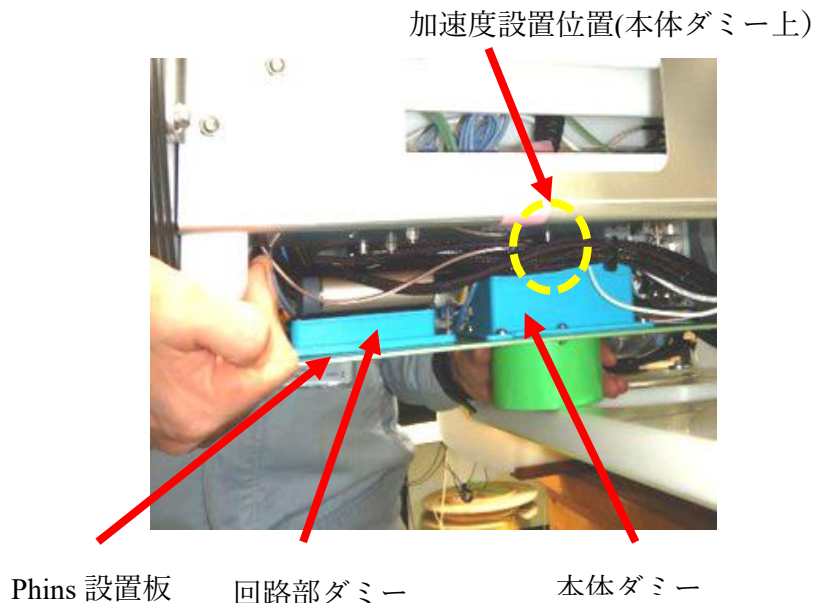


図 3.4-231 Phins ダミーと加速度センサの設置

表 3.4-49 Phin 本体ダミー上の振動

充電電流(A)	充電電力(kW)	振動周波数(Hz)	加速度(m/s ²)
0	0	1600	0.905
5	0.5	1600	1.043
7.5	0.75	1600	1.160
10	1	1600	1.310

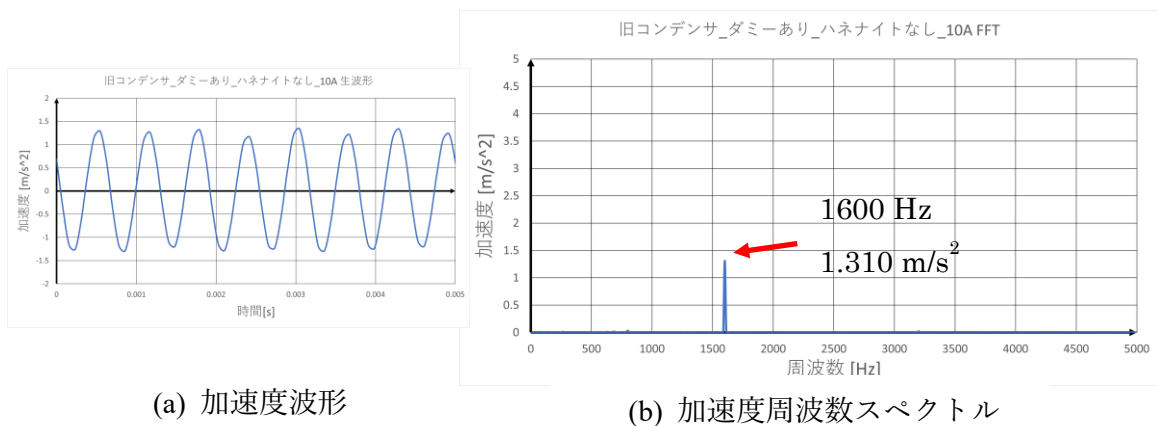


図 3.4-232 Phins 本体ダミー上の振動 (充電電流 10 A、受電電力 1 kW)

C 振動対策の検討

前述までの調査の結果、Phins 設置面での加速度は 4.04 m/s²、Phins 本体ダミー上での加速度は 1.31 m/s² と、メーカー振動制限「5-40 Hz 0.51 g (=5.0 m/s²) sinus max」よりは低い値となっている。

しかし、以下の理由により、Phins 設置には振動対策をすべきとの結論となった。

ダミーによる振動測定値はメーカーの振動制限値よりは低いものではあるが、同じオーダーである。今回は受電電力 1 kW での値であり、今後 3 kW での実験が行われる。

加速度センサの測定対象物への取付けを両面テープで行っており、振動を若干低めに測定している可能性がある。

今回の測定では耐圧容器の材質や耐圧容器がフェライトやコイル電線で囲われているなど、加速度センサを機械的に結合することが困難であり、早急に振動のオーダーを把握するために両面テープを使わざるを得なかったのだが、超強力両面テープではあるものの、テープは厚さ 1.1 mm のアクリルフォーム基材であるため外力が分散され、若干ではあるが振動が吸収される傾向にあると考えられる。

慣性航法装置 (Phins) は AUV 航行制御の要であり高価でもあるため、故障や損傷は絶対に防ぐ必要がある。

振動測定結果を基に制振ゴムメーカーとも協議の結果、Phins と Phins 取付け台の間に制振ゴム「内外ゴム株式会社製 制振ゴム ハネナイト GP35LE 厚み 5 mm」を設置して効果を調査することとした。

図 3.4-233 にハネナイトの周波数による損失係数を、表 3.4-50 にハネナイトの品種と特性一覧を示す。

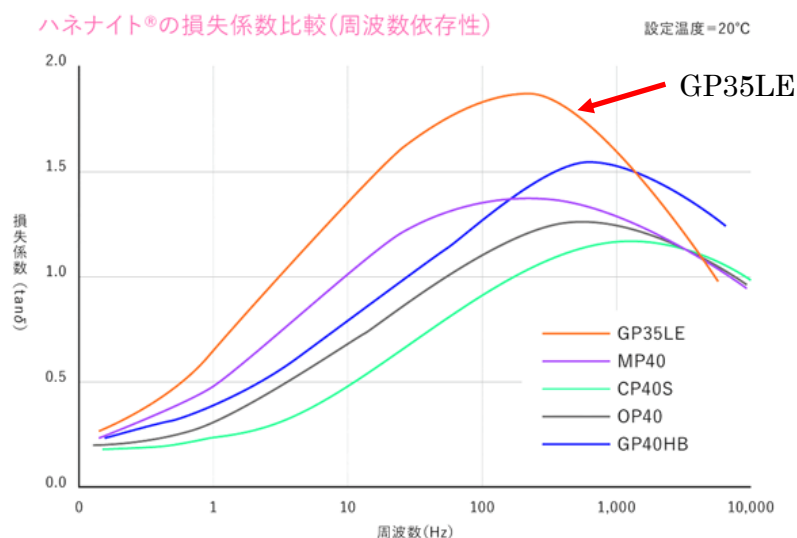


図 3.4-233 制振ゴム：ハネナイトの損失係数 (周波数依存性)：内外ゴム工業 HP

から引用

表 3.4-50 制振ゴム：ハネナイトの品種と特性一覧：内外ゴム工業 HP から引用

ハネナイト® の品種と特性一覧表										
GP35LE	一般用		広温度域	耐寒性用		耐候性用	難燃性用		スポンジ	
	GP35LE	GP60LE	MP40	CP40S	CP55S	OP40	GP40HB	GP50V		
機械的物性										
硬度	—	A33	A49	A39	A36	A49	A35	A43	A50	E24
引張強さ	MPa	11.9	8.5	6.0	8.8	9.8	14.7	8.1	7.2	1.5
	kgf/cm ²	121	87	61	90	100	150	83	73	15
引張伸び	%	790	630	500	1000	830	820	700	710	500
引裂強さ	kN/m	15.4	19.2	16.9	22.4	25.6	19.7	15.5	16.4	6.2
	kgf/cm	15.7	19.6	17.2	22.8	26.1	20.1	15.8	16.7	6.3
反発弾性率	%	2	4	4	10	10	9	5	5	5
静的せん断弾性率	MPa	0.17	0.41	0.27	0.23	0.44	0.30	0.38	0.43	0.07
	kgf/cm ²	1.7	4.2	2.8	2.3	4.5	3.1	3.9	4.4	0.74
比重	g/cm ³	1.26	1.27	1.35	1.09	1.2	1.18	1.35	1.4	0.36
圧縮永久歪(70°C×22hr)	%	9	18	13	29	25	9	11	25	
空気加熱老化試験(70°C×96hr)										
硬度変化	—	+2	+16	+8	+3	+2	+1	-2	+3	
引張強さ変化率	%	+1.7	+7.0	+6.9	+16	-8.1	-38	+16	+18	+170
引張伸び変化率	%	-7.0	-8.1	-11	-3.0	-9.1	-26	-21	-14	-2.0
耐水・耐油性(30°C×24hr)										
純水	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○
エタノール(99%)	—	○	○	○	○	○	○	○	○	△
トルエン	—	△	△	×	×	×	×	△	△	×
JIS1号油	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○
JIS3号油	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○
FuelC	—	○	○	×	×	×	×	○	○	×
FuelD	—	○	○	×	×	×	×	○	○	×
動的粘弾性(100Hz)										
Tg	°C	18	21	12	-9	-10	15	11	11	20
tan δ MAX	—	1.90	1.45	1.4	1.13	1.03	1.43	1.43	1.57	1.23
制振温度域(0.5<tan δ)	°C	0~58	4~48	-33~60	-40~40	-40~40	-7~45	-4~45	0~48	4~60
耐オゾン性(20%伸長×50pphm×40°C)										
暴露 24 hr	—	N.C.	N.C.	N.C.	C-4	N.C.	N.C.	A-1	C-4	
暴露 48 hr	—	A-1	B-1	N.C.		C-3	N.C.	A-1		
暴露 96 hr	—	A-2	B-3	N.C.			N.C.	A-2		
難燃性(UL94燃焼試験)										
難燃性	—							HB	V-0	

D 制振効果の評価

D-1 給電周波数 800 Hz での制振効果

前述までは、給電周波数 800 Hz で調査・検討を行っており、この 800 Hz での制振効果の評価した。

選定した制振ゴム：ハネナイト（厚さ 5 mm）は、Phins 取付け板と Phins ダミーの間に挟む形で設置した。

図 3.4-234 に制振ゴムの設置と本体ダミー上に取り付けた加速度センサの様子を示す。

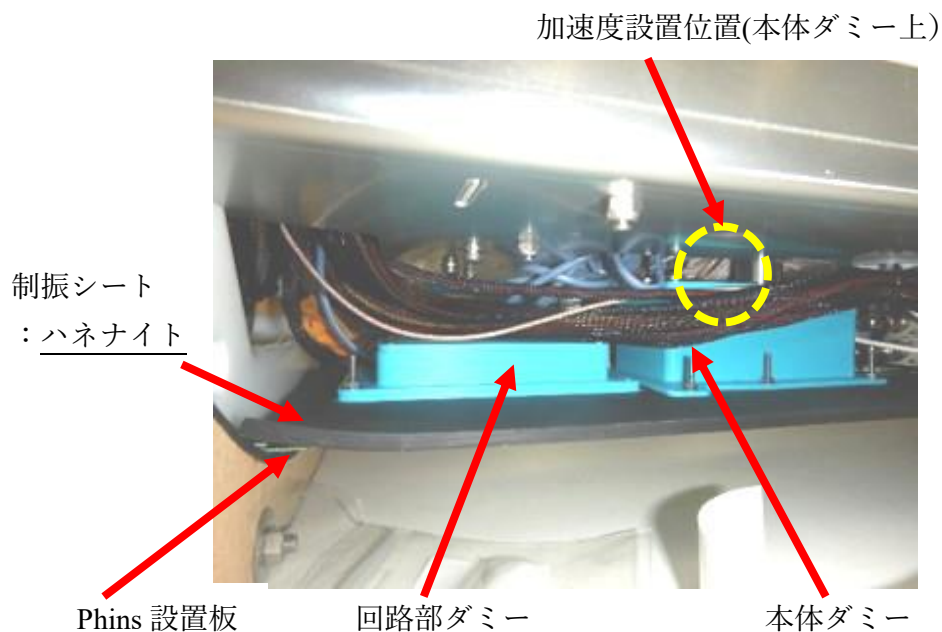
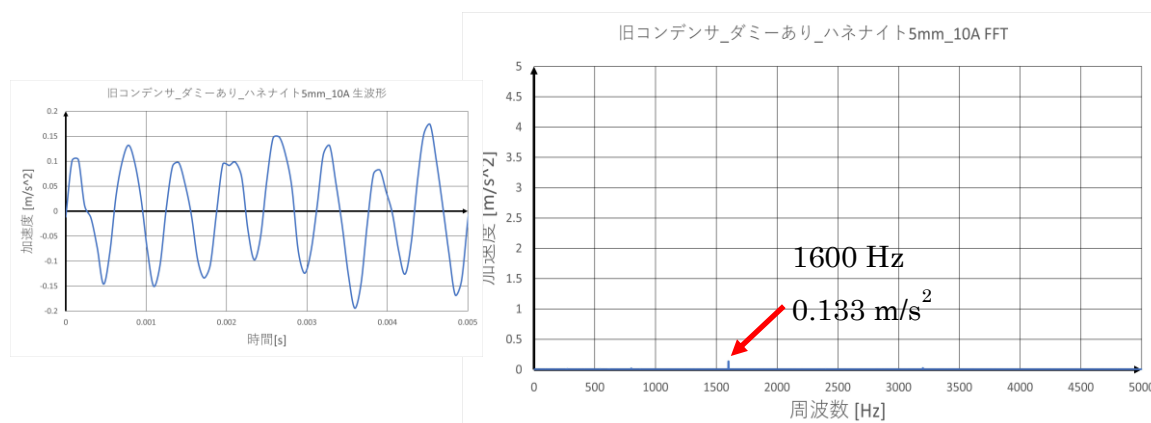


図 3.4-234 制振ゴム設置と加速度センサ取付け位置

表 3.4-51 制振ゴム設置後の各受電電力での本体ダミー上の振動

充電電流(A)	充電電力(kW)	振動周波数(Hz)	加速度(m/s ²)
0	0	1600	0.075
5	0.5	1600	0.081
7.5	0.75	1600	0.105
10	1	1600	0.133



(a) 加速度波形

(b) 加速度周波数スペクトル

図 3.4-235 制振ゴム設置後の本体ダミー上の振動 (充電電流 10 A、受電電力 1 kW)

各出力での本体ダミー上の振動周波数スペクトルの測定結果を表 3.4-51 に示す。図 3.4-235 は充電電流 10 A、受電電力 1 kW での加速度波形と振動周波数スペクトルである。

充電電流 10 A、受電電力 1 kW での加速度は 0.133 m/s² となっており、制振ゴム設置前の加速度 1.31 m/s² に比べ、振動は約 1/10 に減衰している。

この振動対策後の加速度 0.133 m/s² は、Phins のメーカー振動制限「5-40 Hz 0.51 g (=5.0 m/s²) sinus max」に対し、約 1/38 の加速度となっており、Phins 使用には問題ないレベルまで低減出来ていると判断される。

なお、振動周波数は 1600 Hz であるが、その加速度の波形は図 3.4-235 (a) に示したように振幅のバラツキが表れており、振動形態が変化しているものと思われる。

D-2 給電周波数 1500 Hz での制振効果

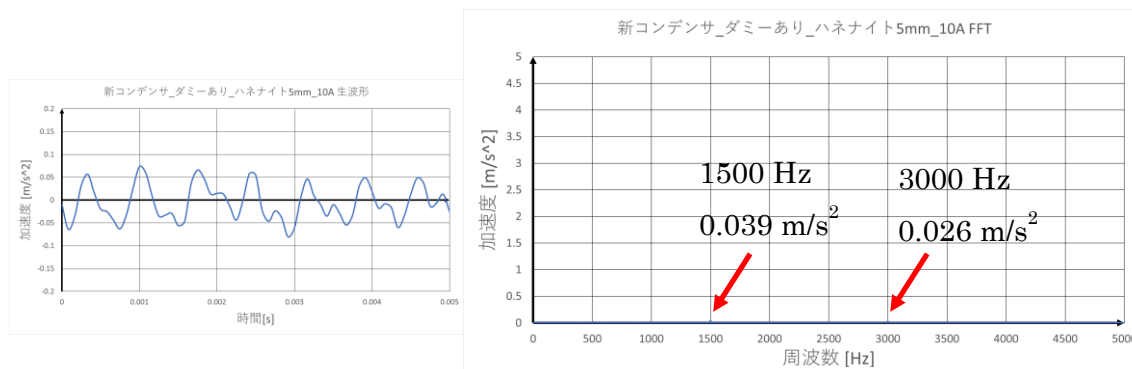
3.3.6 章の「実寸モデルを用いた実験」で述べたように、3 kW 給電では磁気飽和の影響を避けるため給電周波数を 1500 Hz とするが、前述までの給電周波数 800 Hz での調査・検討結果との比較をするため、1500 Hz でも 1 kW 受電電力までの振動調査を行い、制振効果を検討した。

制振ゴム：ハネナイトや Phins 本体ダミー上の加速度センサは、給電周波数 800 Hz の時と同じもので、設置位置も同じである。

表 3.4-52 に各受電電力での本体ダミー上の振動周波数スペクトルの測定結果を示す。図 3.4-236 は充電電流 10 A、受電電力 1 kW での加速度波形と振動周波数スペクトルで、図 3.4-237 は、図 3.4-236(b)の縦軸を拡大表示したものである。

表 3.4-52 1500 Hz：防振ゴム設置後の各受電電力での本体ダミー上振動

充電電流 (A)	充電電力 (kW)	振動周波数 (Hz)	加速度 (m/s ²)
0	0	1600	0.075
5	0.5	1600	0.081
7.5	0.75	1600	0.105
10	1	1600	0.133



(a) 加速度波形

(b) 加速度周波数スペクトル

図 3.4-236 1500 Hz：防振ゴム設置後の本体ダミー上の振動（充電電流 10 A、受電電力

1kW)

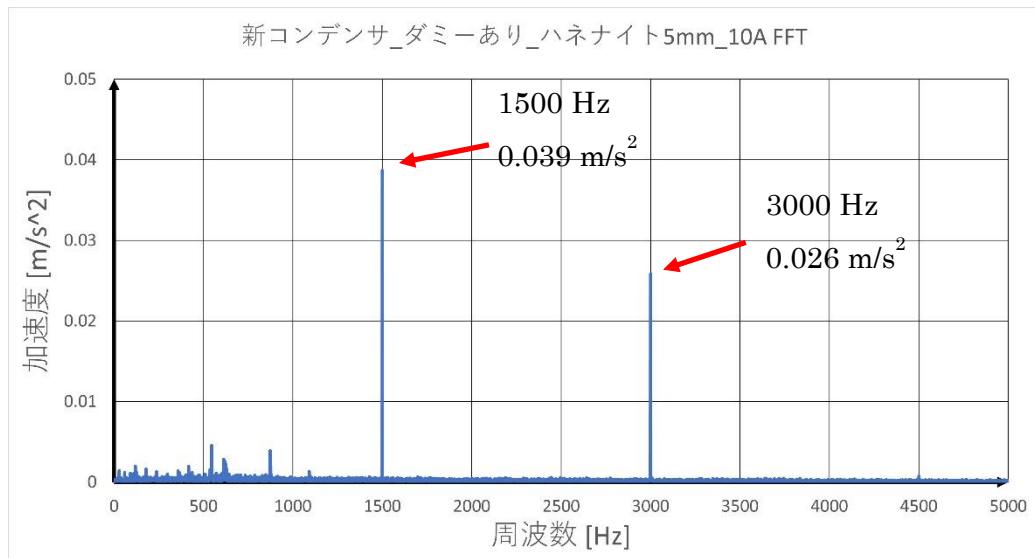


図 3.4-237 図 3.4-236(b)の縦軸を拡大表示

各受電電力での加速度は、給電周波数 800 Hz では前項の表 3.4-51 に示したように受電電力が大きくなるに従い加速度は増大し、受電電力 0 kW での 0.075 m/s² に対し受電電力 1 kW では 0.133 m/s² と約 40%振動が増えていた。しかし、1500 Hz では表 3.4-52 に示したように逆に受電電力が大きくなるに従い加速度は減少し、受電電力 0 kW での 0.063 m/s² に対し充電受電電力 1 kW では 0.039 m/s² と約 40%減少している。更に、受電電力 1 kW での 800 Hz との比較では、1500 Hz の加速度は約 70%の振動減となっている。

このように振動対策後の 1500 Hz、1 kW での加速度 0.039 m/s² は、Phins のメーカー振動制限「5-40 Hz 0.51 g (=5.0 m/s²) sinus max」に対し、約 1/128 の加速度となっており、800 Hz の時の加速度レベル低減量と比べても Phins 使用には更に問題ないレベルまで低減出来ていると判断される。

なお、図 3.4-236(a) の 1500 Hz の振動波形を見ると、800 Hz の時より更に波形の乱れが顕著になっていて、振動周波数 1500 Hz の 2 倍の振動数になると思われる波形が表れて来ており、図 3.4-236 (b) の振動周波数スペクトルの縦軸を拡大表示した図 3.4-237 に示したように 1500 Hz の 2 倍の 3000 Hz が表れている。

この振動波形の変化は、給電周波数が 1500 Hz となることにより整合コンデンサの重量が、800 Hz での整合コンデンサ重量 3.4 kg の約 1.4 倍の 4.7 kg になっていることや、内機器搭載用シャーシでの固定位置が若干変わっていることなどにより、振動形態が変化しているものと考えられる。

D-3 慣性航法装置部の振動調査と対策のまとめ

充電時の主耐圧容器の振動に対して、慣性航法装置 (Phins) 設置のための振動調査を行った結果、Phins 本体ダミー上での加速度は 1.310 m/s² で、Phins のメーカー振動制限「5-40

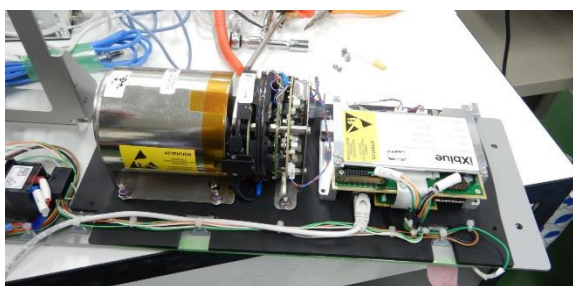
Hz 0.51 g (=5.0 m/s²) sinus max」よりは低い値であった。しかし、その値はメーカー振動制限値 5.0 m/s² と同じオーダーであり、加速度センサ固定方法による振動測定精度の信頼性の問題、更に慣性航法装置は AUV 航行制御の要であることから、Phins 設置には振動対策を施すこととした。

振動対策として、振動測定結果を参考に、Phins と Phins 取付け台の間に「内外ゴム株式会社製 制振ゴム ハネナイト GP35LE 厚み 5 mm」を設置し、その効果を Phins ダミーで評価した。

その結果、Phins 本体ダミー上面の加速度は、給電周波数 800 Hz の場合で、メーカー振動制限の加速度 5.0 m/s² に対し、その約 1/38 に減衰している。同じく給電周波数 1500 Hz での本体ダミー上部の加速度は約 1/128 まで減衰しており、Phins 実機設置には十分な制振効果が得られていることが確認できた。このように十分に振動を下げる事が出来たので、給電周波数 1500 Hz で行われる受電電力 3 kW の場合でも問題は無いと考えられる。

E Phins カバーの干渉対策

慣性航法装置はコンパクト化を図るため、OEM 仕様の Phins Compact C3 を採用しており、いわゆる筐体はなく、図 3.4-238(a) に示すように Phins 本体と回路部はむき出しの状態である。このため主耐圧容器内に格納する際は、磁気影響低減のために図 3.4-238(b) に示す様にアルミ製のカバーで Phins 本体と回路部の全体を覆っている。



(a) Phins 本体と回路部



(b) Phins カバー (干渉対策前)

図 3.4-238 Phins 外観および Phins カバー(改造前)

今回の振動対策で Phins と Phins 取付け台の間に制振シートを設置することとなったが、この制振シートを設置した場合の周囲機器と干渉有無を調査した結果、図 3.4-239(a) の断面図に示すように Phins 本体のカバー部が電池搭載用のガイドレールと干渉することが判明した。このため干渉対策を検討した結果、図 3.4-239(b) の断面図に示すように、カバー斜面部に肩部を設けてガイドレールを避けることとした。

図 3.4-240 に干渉対策をした Phins カバーの製作図を示す。図 3.4-241 は干渉対策をして新作したカバーで、図中の左側が干渉対策後のカバーである。図中右側のカバーは当初から使用していたカバーで、振動対策による制振ゴム設置により、Phins 本体位置上昇し

Phins 頂部がカバーと干渉するため、対策としてカバー上面をカットしたものであるが、磁気影響への問題と、その後カバー斜面部が電池ガイドレールと干渉することが判明したため、新た図中左側に示すカバーを製作したものである。

図 3.4-242 に、振動対策の制振ゴム上に設置した Phins を干渉対策後のカバーで覆った状態の透視イメージを示す。

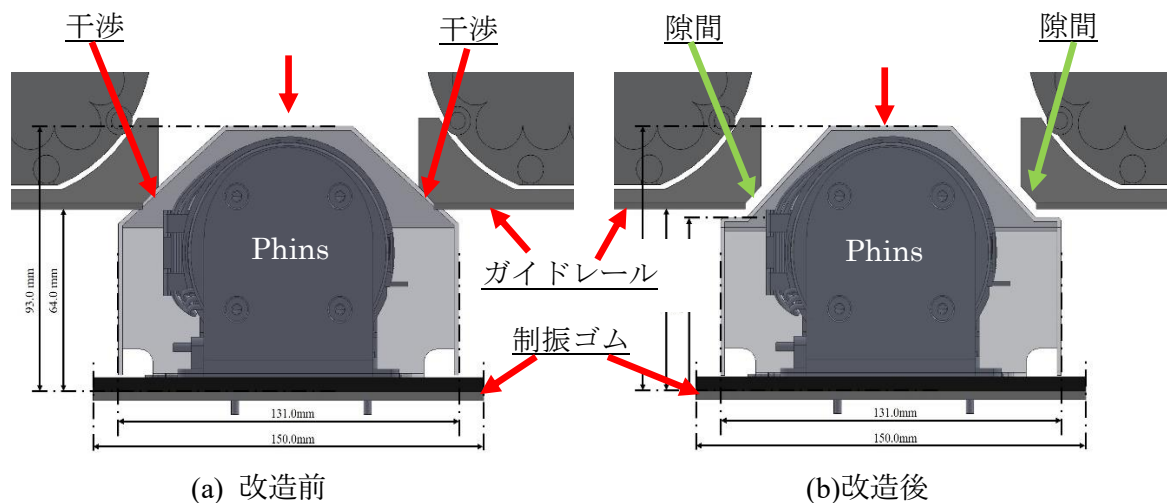


図 3.4-239 制振ゴム設置による Phins カバーとガイドレールとの干渉状況

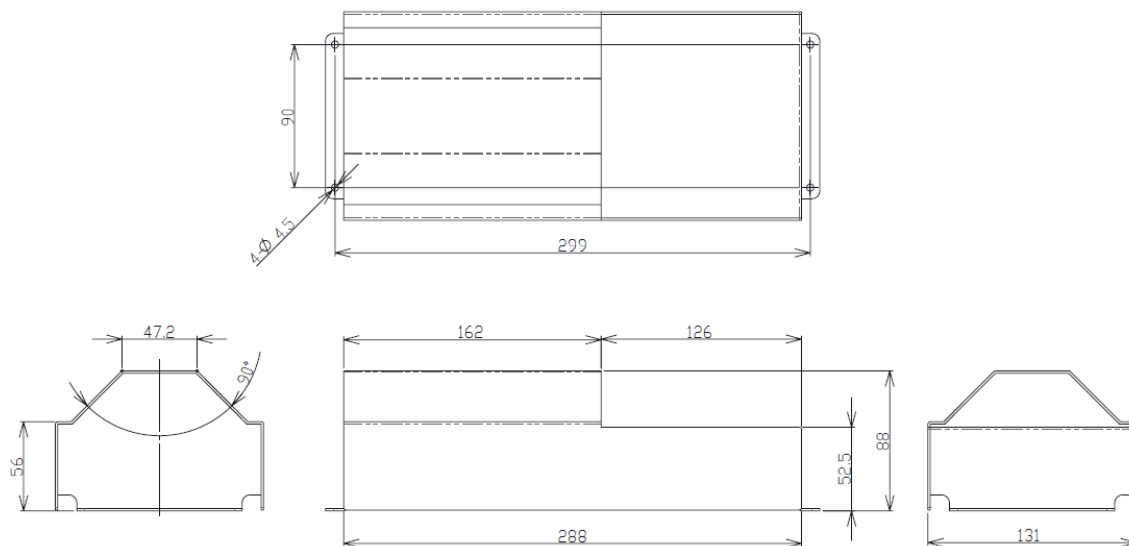


図 3.4-240 Phins カバー製作図 (干渉対策後)

対策後のカバー

対策前のカバー

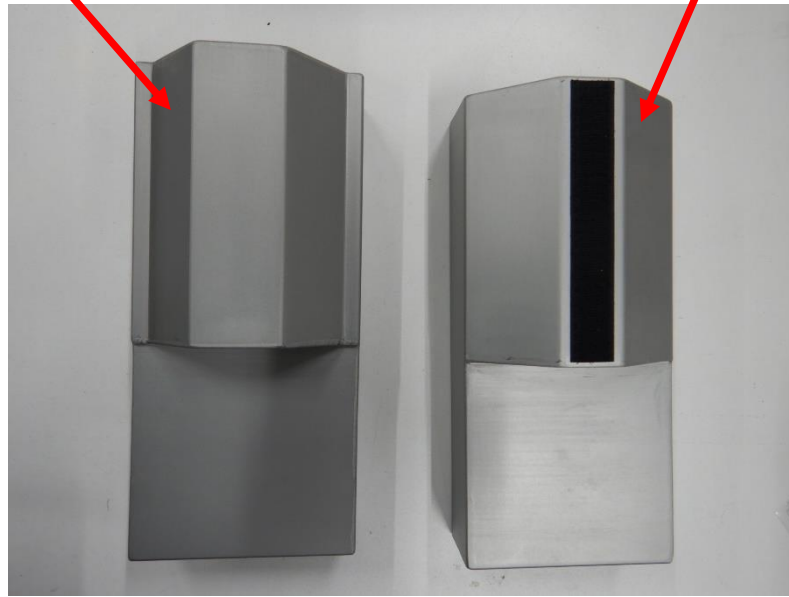


図 3.4-241 Phins カバー（干渉の対策前と対策後）

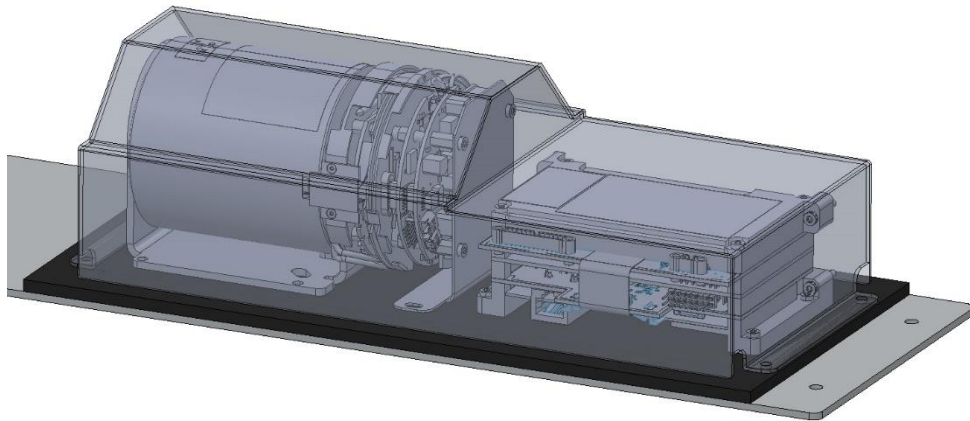


図 3.4-242 制振ゴム上の Phins に干渉対策後のカバーを設置したイメージ

3.4.2.8. 海中充電スタンド

本研究開発の海中給電試験では、図 3.4-132「給電実験の運用イメージ」で示したように、給電コイルをバージのムーンプール（開口部寸法：7.5m×3m）から懸吊する方式で行うことが当初からの計画である。このため海底に設置する方式ではなく、この懸吊式での海中充電スタンドの構造を設計・製作した。

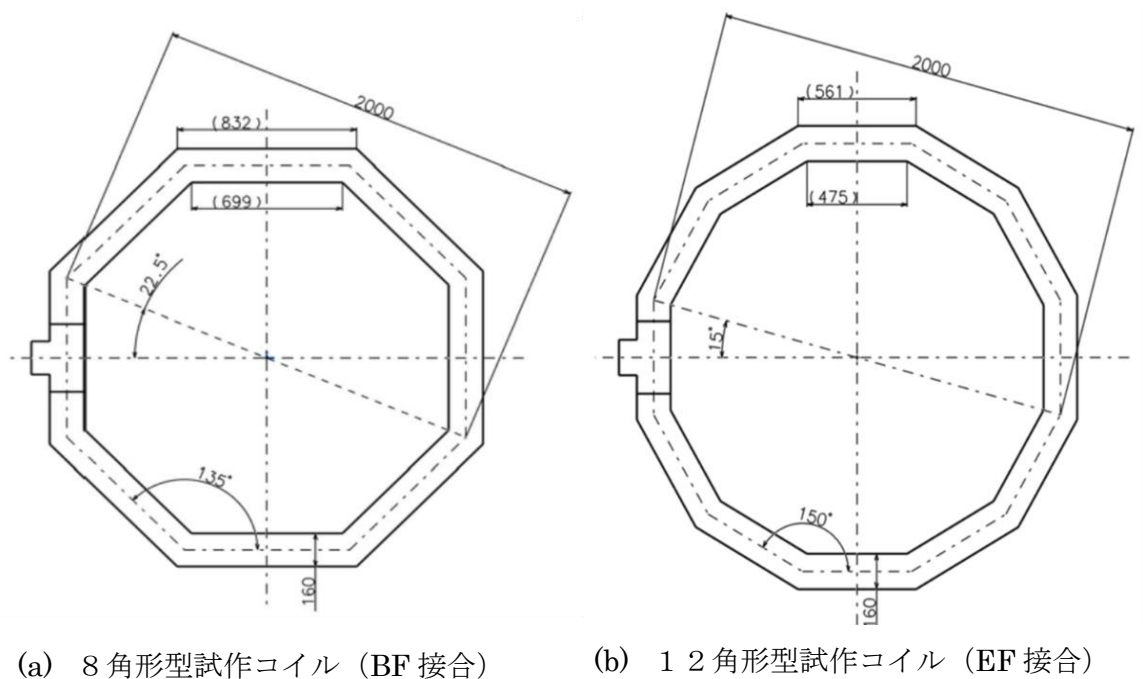
3.4.2.8.1. 海中充電スタンドの設計・製作

A 給電コイル

A-1 給電コイル構造の計画

海中給電実験で使用する給電コイルは、ポリエチレンパイプを接続して多角形型にしたものに電線を通してコイルを形成しており、ポリエチレンパイプの接続方法により、図 3.4-243(a)に示す、パイプ端面を突合せ接合する BF (Butt Fusion) 接合の 8 角形型と、図 3.4-243(b)に示す、ソケットにパイプを差し込んで接合する EF (Electro Fusion) 接合の 12 角形型を試作した。それぞれ、パイプ接続部頂角の距離が 2,000mm である。

に試作した 8 角形型コイルと 12 角形型コイルの外観を示す。



(a) 8 角形型試作コイル (BF 接合)

(b) 12 角形型試作コイル (EF 接合)

図 3.4-243 給電コイルの構造



(a) 8角形型試作コイル



(b) 12角形型試作コイル

図 3.4-244 試作コイル外観

試作・検討の結果、3連コイルとする場合の連結パイプと接続する際の製作上の問題、およびコイル部パイプ内部へ電線を通す際の作業性を考慮し、(b)の12角形型を採用した。

A-2 給電コイルの設計・製作

給電コイルは、ポリエチレン製の $\phi 110$ パイプと $\phi 143$ のパイプ接手を組み合わせてコイル中心径2,000mmの12角形のリング状にし、そのパイプの中に $\phi 22$ の電線が20ターン挿入してコイルとしている。このコイルを $\phi 143$ のT接手と $\phi 110$ のパイプにより、コイル部パイプ間中心距離1,000mmで繋いだ3連の給電コイルとしている。各受電コイルは内部に電線が通っており、防水構造となっているが、各コイルを連結する8本のパイプは、3連給電コイルの浮力抑制のため、穴を明けて内部に水が入る構造としている。

外部への配線引出しは、直パイプを3連のコイル頂部を繋ぐ形となる配線接続用ユニット（以下接続ユニットと呼ぶ）を接続している。この接続ユニットは、コイル部と同じポリエチレン製で、 $\phi 160$ のパイプを $\phi 200$ のT継手で接続している。この接続ユニットは内部に配線が通っているため、防水構造とし、中に水が入らないようになっている。

これらにより、図 3.4-245 に示す接続ユニットを含めた3連給電コイルの重量は、パイプの外径や肉厚等の実測値を参考にして求めた計算値では、空中重量：369.2kg、水中重量：2.8kgの負浮量（沈む）となっている。

図 3.4-246 に3連給電コイルの外観を示す。

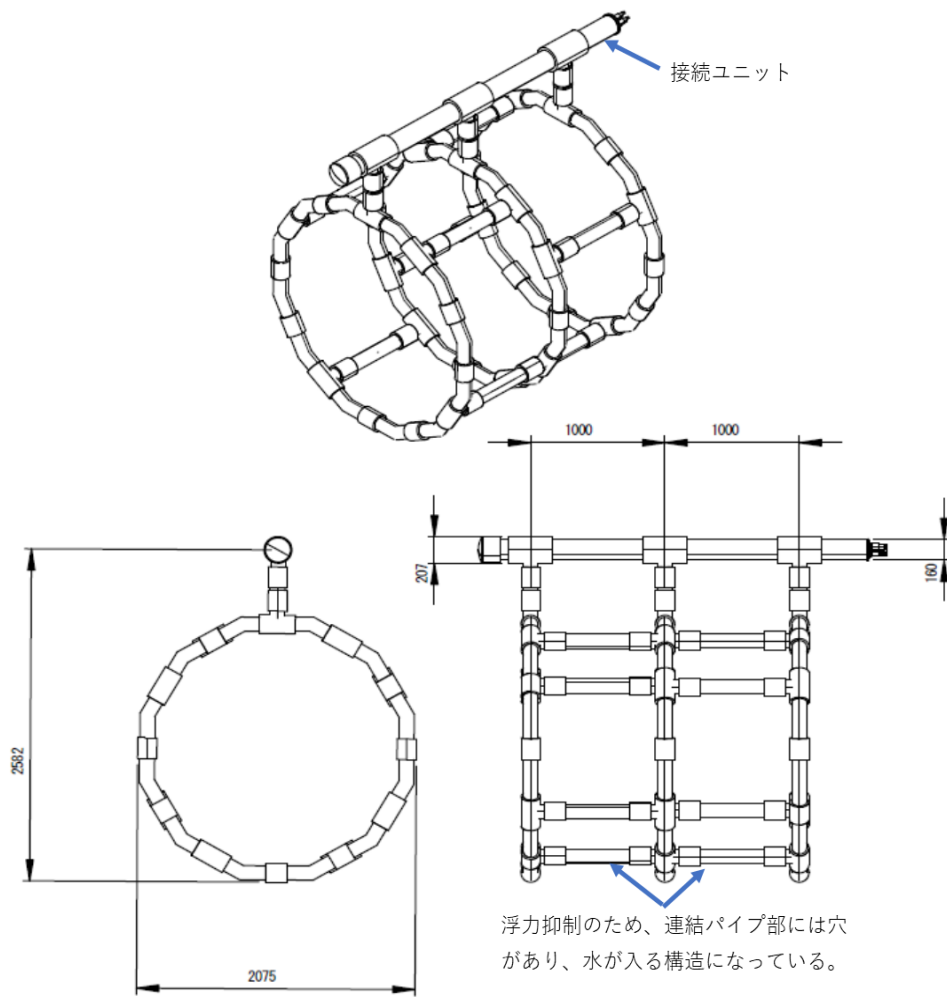


図 3.4-245 3 連給電コイル



図 3.4-246 3 連給電コイル外観

B AUV ガイドフレーム

B-1 AUV ガイドフレームの設計・製作

3 連給電コイルへ進入し、任意の前後位置で停止して滞留する際の位置規定治具として、図 3.4-247 に示す AUV ガイドフレームを 3 連コイル内に設置する。図 3.4-247 は、AUV ガイドフレーム内に、r-AUV を収納した状態を示している。

r-AUV は、機体幅 880mm/スキッド幅 890mm、高さ：760mm、長さ：1,400mm であることより、AUV ガイドフレームの入口内側寸法は 1,300mm 角で、奥部分の内側寸法は 1,000mm 角で、全長 2,960mm としている。磁気影響を避けるため、フレーム材は塩化ビニール (PVC) を採用し、入口部はパイプ、奥部分はチャンネルを使用している。パイプには水抜き、空気抜きの穴を適宜設けている。

ガイドフレーム(詳細)

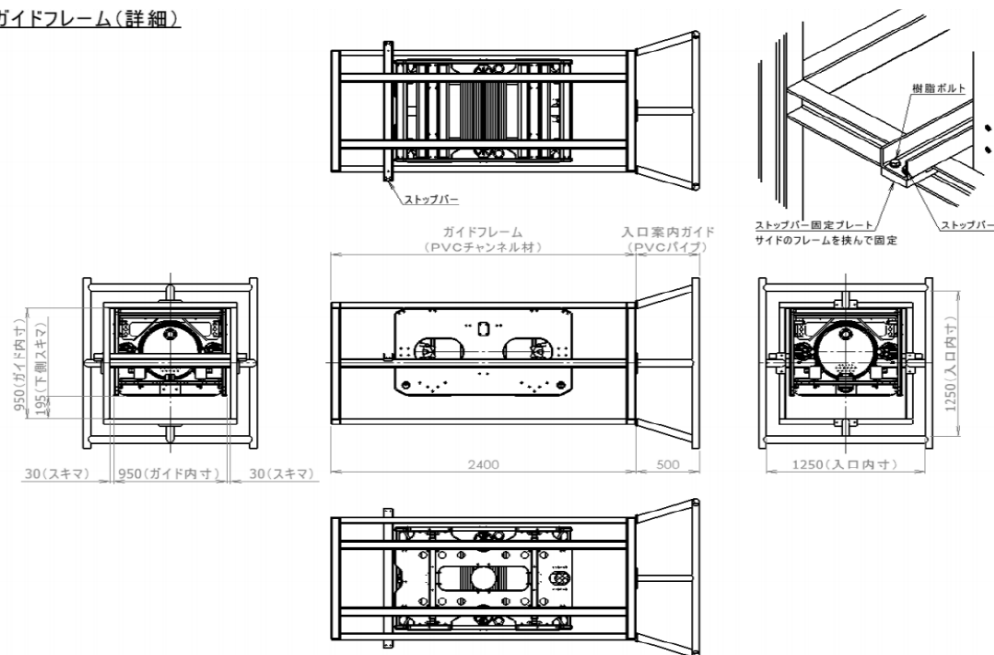


図 3.4-247 AUV ガイドフレーム構造図

図 3.4-248 は 3 連給電コイル内のガイドフレームの設置位置と AUV が進入・滞留している様子である。図 3.4-248 に示したように、給電コイル中心に対し、AUV ガイドフレーム中心は 120mm 下方にオフセットしている。これは、r-AUV が 3 連給電コイル内への進入を終了して前進を停止すると、r-AUV は自身の浮力により AUV ガイドフレームの上部フレームに当たるまで浮くことになり、その上部フレームに当たった位置で、r-AUV の中心と給電コイルの中心が一致するようにしているものである。

図 3.4-249 に AUV ガイドフレームの外観を示す。

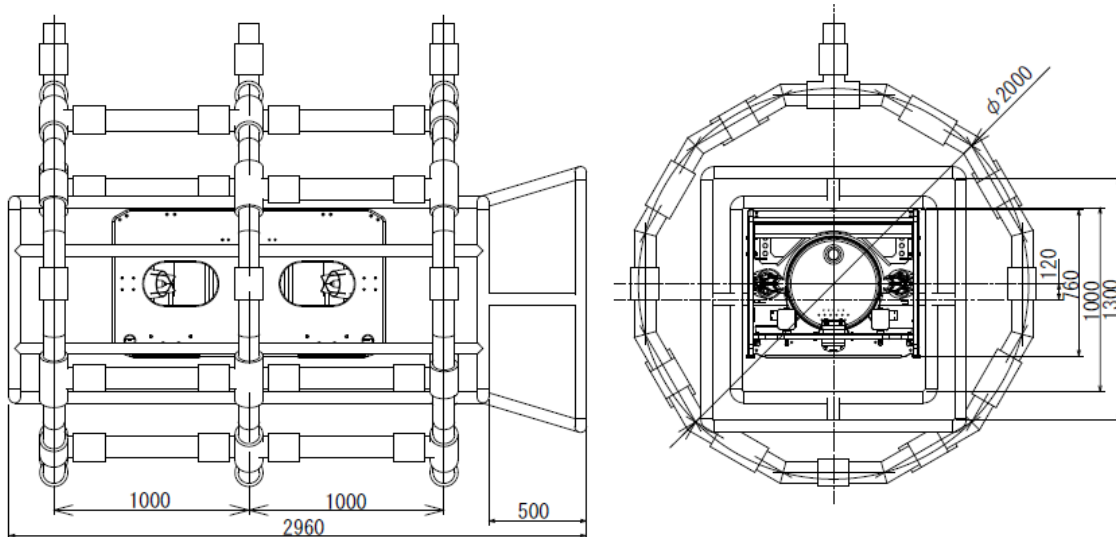


図 3.4-248 3連給電コイル内に設置した AUV ガイドフレーム(r-AUV 収納状態)



(a) AUV ガイドフレーム



(b) AUV ガイドフレーム
(3連給電コイル内に設置)

図 3.4-249 AUV ガイドフレーム外観

3.4.2.8.2. 海中充電スタンドの海中への懸吊、固定

海中充電スタンド（3連給電コイル）は、電磁界に影響が無い天然繊維あるいは化学繊維のロープで懸吊する。通信機材を取り付けた状態での3連給電コイルの計算重量は約7kgの負浮力で、これにAUVガイドフレームが取り付ける場合は、シンカー等は無くとも沈むことになる。海中実験を予定している場所は、湾の奥なので潮流の影響は小さいと考えられるが、r-AUVが海中充電スタンドに接触してしまった場合等、何らかの外的要因が多少加わっても3連給電コイルが動かないようにするために、海中充電スタンドを適宜バージ開口端等に、懸吊と同じく天然繊維あるいは化学繊維の控え索で固定する。

図 3.4-250 に、海中充電スタンドの懸吊例のイメージを示す。この図では 3 つの給電コイルへの荷重を均等とするために、吊り天秤を用いた場合を示しているが、試作 3 連給電コイルによる吊り揚げ試験では、図 3.4-251 に示す様に、各給電コイルに直接固縛したロープを纏めて 1 点吊りをしてしても問題は無かった。但し、この 1 点吊りの場合でも、給電コイルが動かないようにするための控え索の設置は必要である。

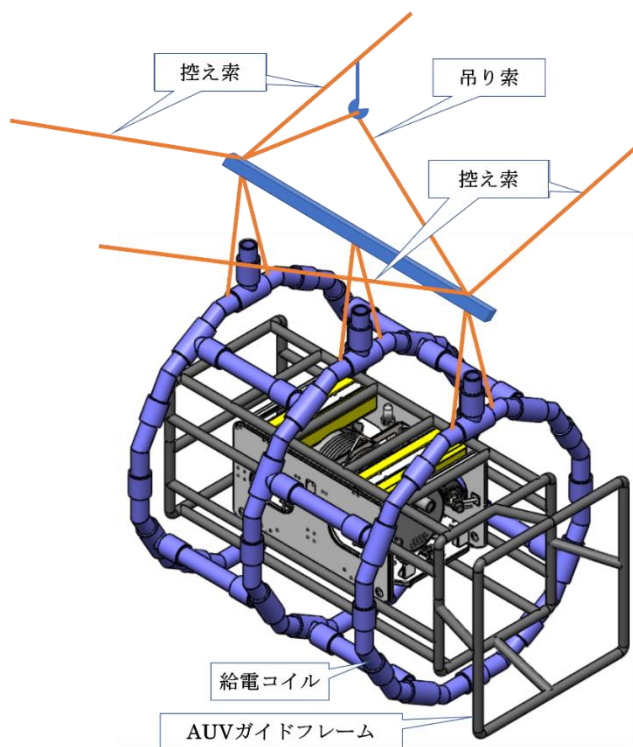


図 3.4-250 海中充電スタンドの懸吊イメージ



図 3.4-251 1 点吊り試験

A 水中実験での AUV ガイドフレーム使用状況の確認

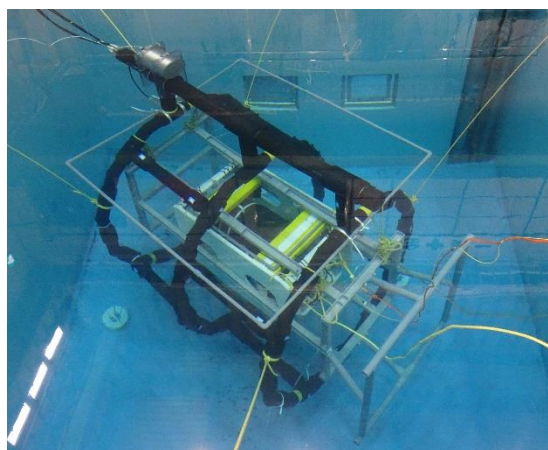
海中実験での海中充電スタンド内の AUV ガイドフレーム設置の様子を図 3.4-252 に示す。

図 3.4-253(a)は水槽での水中充電実験の様子で、AUV ガイドフレーム内に r-AUV が進入・滞留して充電を行っている。図 3.4-253 (b) は岸壁からの海中充電実験の様子で、波浪・潮流中で AUV ガイドフレーム内に r-AUV が進入・滞留していることが分かる。

いずれの実験でも、光ファイバーケーブルを介した遠隔操縦により、r-AUV は問題無く AUV ガイドフレーム内に進入でき、滞留して充電が実施されており、現状の AUV ガイドフレームの形状・構造で問題は無いことが確認できた。



図 3.4-252 海中充電実験での AUV ガイドフレーム



(a) 水槽での水中充電実験



(a) 岸壁での海中充電実験

図 3.4-253 r-AUV 水中充電実験の様子

3.4.2.9. 強電磁界が AUV 模擬筐体内に組み込んだ電子回路等に 与える影響の調査

本研究の海中給電実験は給電電力が4kW以上になる為、給電コイルから発生する磁界も強電磁界となり、r-AUVの動作に影響が有るのかを調査する必要がある。又、影響が有った場合は給電システム及びr-AUVの両側面から対策を実施する。

平成27年度「安全保障技術研究推進制度」の研究テーマ「海中におけるエネルギーの効率的伝送」において直径3.4mのコイルで100Wの電力を送電した場合に発生する磁界の最大値(634A/m:330Hz)によるアナログ温度センサ及び耐圧容器に収納されたボードコンピュータへの誤動作等の影響は無い事は確認されている。

2019年度はr-AUVに搭載される電子回路について電磁波ノイズの影響を受ける機器をリストアップし、試験方法の検討を行った。

3.4.2.9.1. 搭載機器

今回、r-AUVに搭載される電子機器は表3.4-53の通り。但し、No.1、No.2の機器は海上に浮上した時にしか動作しない。又、No.3からNo.7の機器はROVモードや実験データ収集の為に使用する為、本来のAUV動作時には使用しない。

その為、実際の運用時に影響を受ける可能性が有るのはNo.8からNo.14の機器を想定する。特に耐圧容器外部に設置されて、耐圧容器とケーブルで接続されるスラスタに関してはケーブルに重畳されるノイズによって誤動作し、スラスタそのものが破壊される懸念が有る為、重点的に検討する。

表 3.4-53 r-AUV に搭載される電子機器

No.	項目	機器名	メーカー	型番	個数
1	通信関係	Wifi	ERECOM	WHR-300xx3	1
2		GPS			1
3	内臓制御機器	1000BASE-T コンバータ G49	カナレ電気	TRM-300A	2
4		1000BASE-T コンバータ G51	カナレ電気	TRM-300A	2
5		HD-SDI コンバータ	カナレ電気	EO-100A-47	2
6		HD-SDI コンバータ	カナレ電気	OE-101B OE3G101	2
7		光合波/分波器	カナレ電気	FCWDM-8B	2
8		カメラユニット	日立国際電気	KP-HD-20A	2

9		CPU ボード一式	ADVANTEC	PCM-3363D-1GS8A 1E	1
10	アクチュエータ	垂直/水平用スラスト	TECNADYNE	Model 521	6
11	航法装置	INS	IXBLUE	PHINS C-3	1
12		DVL	Nortek	DVL1000,300m	1
13	深度計	深度計	Micron Instruments	MP402	1
14	障害物探知	前方探知ソナー	Tritech 社	Micron Sonar	1

3.4.2.9.2. 想定磁界

本研究の目標値である 3kW の電力を 80%の高率で給電する為には送電側電力は約 4kW になる。そこで、シミュレーションを用いて発生する磁界の大きさを調査した。

A シミュレーションモデル

以下の仕様で作成した図 3.4-254 のモデルでシミュレーションを実施した。

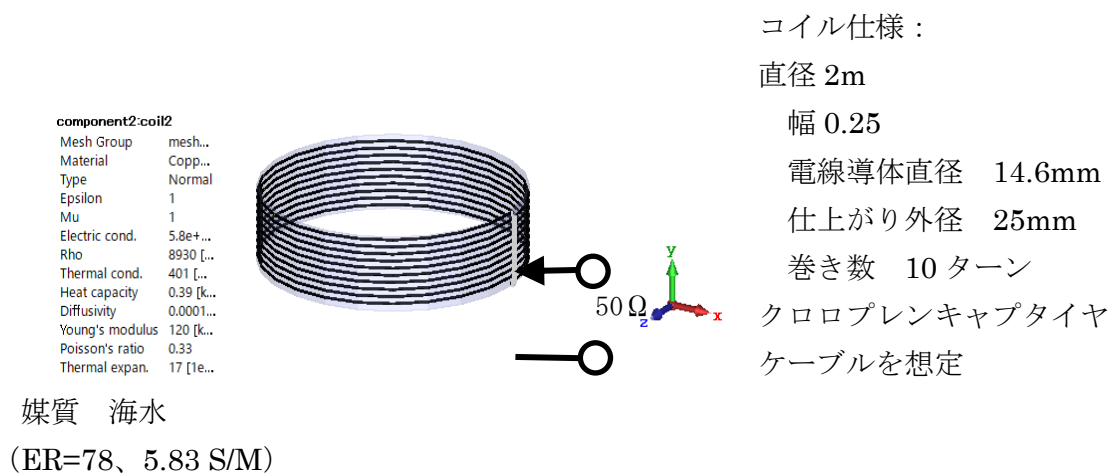


図 3.4-254 コイルシミュレーションモデル

B 単体モデルでのシミュレーション

コイルの Q 値が最大となる周波数 (600Hz) で計算した結果、コイルパラメータは $Q=53$ 、 $L=301\mu\text{H}$ $R=21.2\text{m}\Omega$ となり、発生する磁界強度のシミュレーション結果を示す。

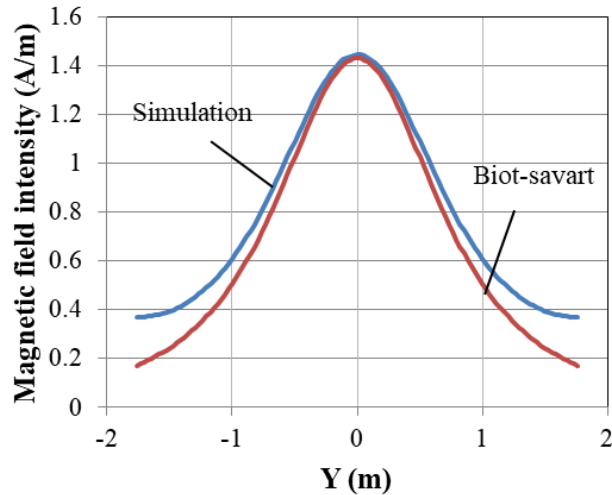


図 3.4-255 磁界強度シミュレーション結果

シミュレーションでは $50\ \Omega$ の強制給電を用いており、ポートの入力電流値は 0.286A となる。Y 軸 0m 地点の磁界強度は、シミュレーションで 1.455A/m 、ビオ・サバルの公式

$$H = \frac{a^2 IN}{2(a^2 + Y^2)^{3/2}} \quad (3.4-26)$$

では 1.428A/m となる。ここで、 a はコイル半径、 I は電流、 N はコイル巻き数とした。

コイルのリアクタンス X_L はシミュレーションで 1.12Ω と計算されたので、入力電力を 4kW とした場合の入力電流は

$$\text{入力電流} = \sqrt{\frac{P_{\text{in}}}{X_L}} = 59.8\text{A}, \quad (X_L = 1.12\Omega) \quad (3.4-27)$$

により、 59.8A となる為、最大磁界強度の実効値は、シミュレーションのポート電流値 0.286A に比例するとして、

$$1.455\text{A/m} \times 59.8\text{A} / 0.286\text{A} = 204\text{ A/m} \quad (3.4-28)$$

となる。

C 共振モデルでのシミュレーション

本研究では磁界共鳴方式を利用している為、磁界共鳴を起こした場合の電界強度を算出する。コイルを共振させると、共振回路の電圧、電流は大きくなる。LCR 直列回路においてはコイルに印加される電圧は Q 倍に増加する。計算を簡単に行うため図 3.4-256 の等価回路で Spice を用いて計算する。下記モデルで入力電力 4KW とした場合、L1 に流れる入力電流を図 3.4-257 に示す。

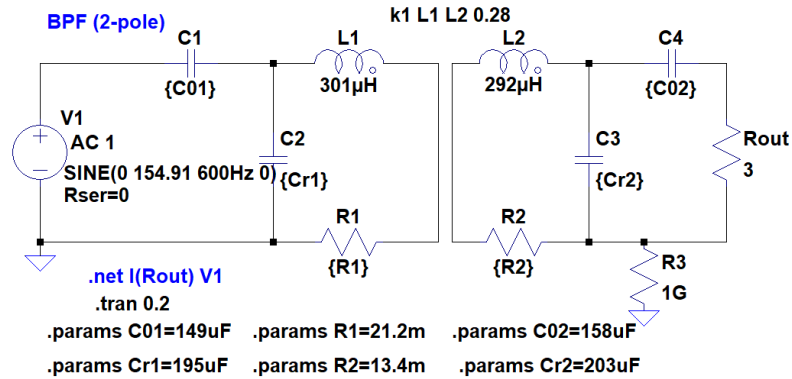


図 3.4-256 等価回路

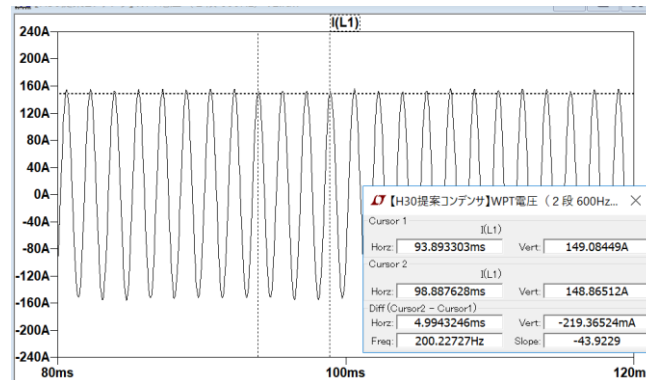


図 3.4-257 L1 電流波形

シミュレーションの結果、コイルに流れる電流は最大で 149A になり、発生する磁界強度は、

$$1.455\text{A/m} \times 149\text{A}/0.286\text{A} = 758\text{ A/m} \quad (3.4-29)$$

となる。

3.4.2.9.3. 試験方法

ノイズ試験は耐圧容器の電子機器を搭載した状態で給電コイルの中に設置して、給電コイルが発生する強電磁界環境下で、本体の誤動作及びセンサから得られる情報の正誤の有無で判定する。但し、事前に影響を受ける可能性の高い機器に関しては個別に確認を進めて行く。

給電コイルから出る磁界は周波数 1kHz 以下の正弦波で高調波が少ない事を想定している為、電子機器で使われている数 MHz 以上の高い周波数に対する影響は少ないもの考える。又、耐圧容器の材料はアルミニウムで密閉構造になっている為、耐圧容器に内蔵される機器は影響が少ないものとする。

但し、耐圧容器外に出ている機器（スラスト）に関しては接続するケーブルに磁界により電流が発生し、誤動作もしくは故障の原因になる事が考えられる。

そこでノイズ試験と対策に関しては、以下の手順で実施する。

- ① 単体の機器に磁界をかけて接続線等に発生するノイズを確認する。ノイズに関しては機器の動作に影響するものと機器の破壊につながるものに分類して、観測された場合は個別に対策を検討する。
- ② 2分の1モデルの耐圧容器を使って対策を行った機器を入れてノイズの影響の有無を個別に確認する。ノイズの影響が観測された場合は個別に対策を検討する。
- ③ r-AUV に実際に機器を組み込んで動作させた状態で強電磁界を発生させて、ノイズによる誤動作及びセンサ情報の異常の有無を確認する。

2019 年度はスラストを入手してノイズ印加方法の検討を行ったが実際の試験は 2020 年度に実施する。

3.4.2.10. 送電コイルから AUV へのノイズ影響検討

送電コイルが発生する磁場が AUV に搭載される機器に与える影響を調査する必要があるが、基本的に機器はアルミ製の耐圧容器の中に入る為、影響は少ないものと考えられる。但し、耐圧容器の外側に出ている物に関しては接続ケーブルを経由してノイズが入る可能性がある。

そこで、まずケーブルに磁界をかけた場合にケーブルに発生するノイズを調査し、電子回路が破損するレベルのノイズが発生するかどうかを調査した。

3.4.2.10.1. 測定系および測定条件

測定系は図 3.4-258 に示す。負荷抵抗の値を変えてノイズの有無及び大きさを測定する。

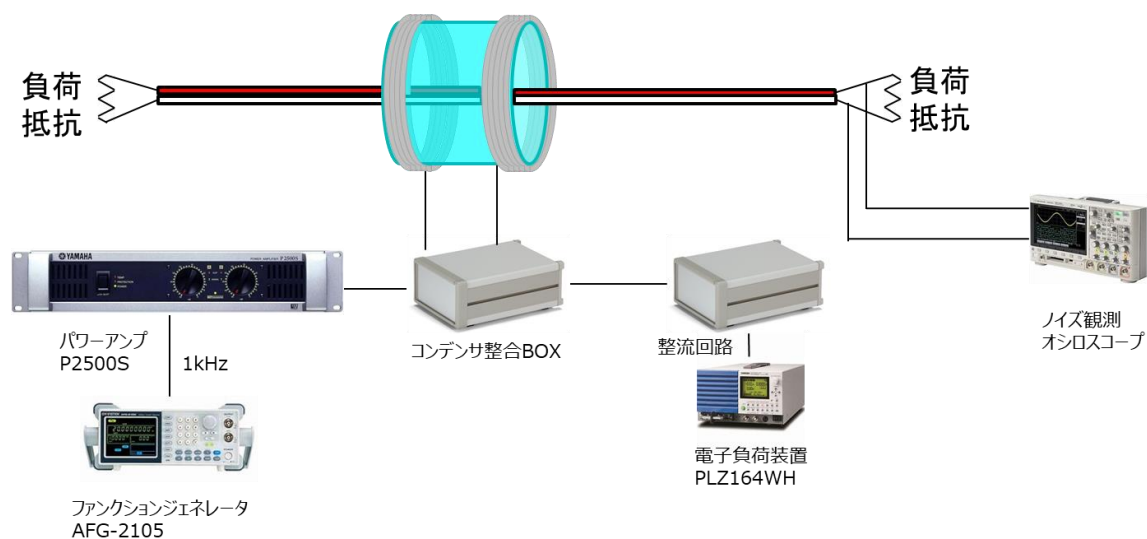
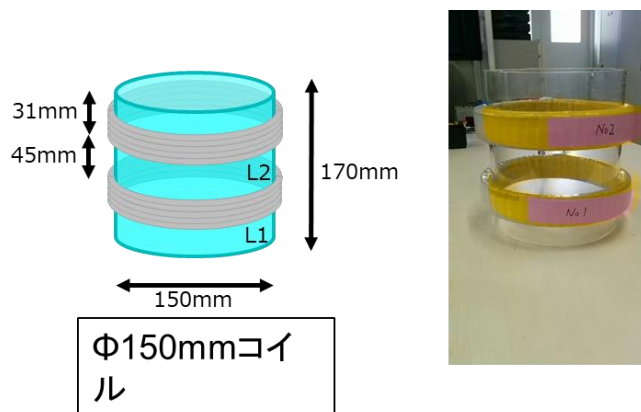


図 3.4-258 ノイズ試験用磁界発生装置系統図

実験は 150mm コイルを用いて 2m コイルで 3kW 送電時に発生するのと同等の磁界を発生して試験を実施した。なお 2 mコイルでのシミュレーションによる中心部の 3kW 送電時最大磁界レベル 953uT であった。コイル仕様を図 3.4-259 に、入力側コイル中心部の磁界の大きさを表 3.4-54 に示す。



周波数：1kHz
 コイル仕様：Φ0.06×1200本のリッツ線を40ターン巻き
 L1=365.9uH,Q1=15.6
 L2=365.3uH,Q2=15.5
 K=0.19
 整合用コンデンサ：直列C01,C02=35uF
 共振Cr1,Cr2=63uF

図 3.4-259 使用コイル仕様

表 3.4-54 入力側コイル (L1) 中心部の磁界の大きさ

FG設定電圧 (V)	アンプ出力 電力(W:RMS)	整合出力 電力(W:RMS)	磁界レベル(uT)
0.01	0.05	0.00	130.52
0.02	0.23	0.05	263.30
0.03	0.54	0.17	400.30
0.04	0.98	0.72	540.10
0.05	1.57	0.56	680.30
0.06	2.28	0.84	821.60
0.07	3.28	1.18	961.30
0.08	4.12	1.56	1101.50
0.09	5.24	2.00	1242.80
0.10	6.49	2.49	1383.00
0.11	7.89	3.04	1524.00
0.12	9.41	3.64	1665.00
0.13	11.08	4.30	1806.00
0.14	12.89	5.00	1948.00
0.15	14.84	5.77	2090.00
0.16	16.90	6.58	2231.00
0.17	19.14	7.44	2372.00
0.18	21.49	83.53	2513.00
0.19	23.98	9.33	2653.00
0.20	26.62	10.35	2795.00
0.21	29.44	11.42	2937.00
0.22	32.38	12.57	3079.00
0.23	35.70	13.83	3230.00

← 3KW 相当

試験に使用したケーブルは 3 種類で図 3.4-260 に示すように 2 芯キャブタイヤケーブル (撚線)、バラ線、同軸線である。負荷抵抗は 1MΩ、100 k Ω で試験を実施した。



2 芯キャブタイヤケーブル (撚線)

バラ線

同軸線

図 3.4-260 試験に使用したケーブル

なおバラ線に関しては磁界の影響の受け方を考慮して、図 3.4-261 のように 3 パターンで実施した。

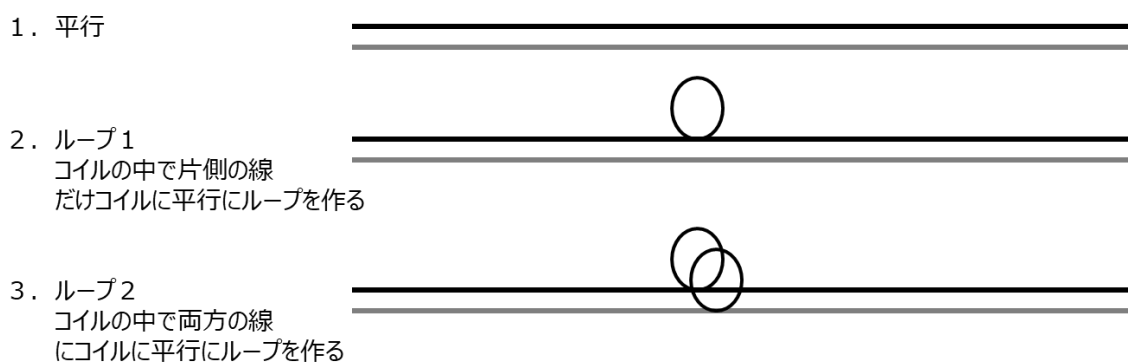


図 3.4-261 バラ線の測定パターン

3.4.2.10.2. 試験結果

表 3.4-55 磁界印可時のノイズレベル

負荷抵抗	ノイズレベル(p-p : mV)				
	撚り線直線	バラ線ループ1	バラ線ループ2	バラ線平行	同軸
100KΩ	17.5	111.7	38.2	32.2	測定器ノイズ以下
1MΩ	92.7	359.3	229.5	168.1	測定器ノイズ以下

磁界印可時のノイズレベルを表 3.4-55 に示す。試験結果から最大でも 0.5Vp-p 以下なので、信号系の破損につながる事は無いと考える。今後は実機での検証を進めながらノイズの影響を確認していくものとする。

3.4.3. 大型水槽又は実海洋での長期運用実験

本章では実験場を調査した結果と、選定した実験場で行った長期運用実験(2021年7月)、3kW給電実験(2022年2月)、実海域実験(2022年7月)、AUV実海域充電実験(2022年12月)について説明する。

3.4.3.1. 実験場の調査

下表に調査した実験場候補地の一覧を示す。(基本使用料は2020年調査当時の概算料金であるため参考扱い。口之島は2022年度に追加調査)

表 3.4-56 実験場候補地の調査結果

候補地・基本情報	水質	写真	結果
<u>ニッスイマリン (屋内プール)</u> 福岡県北九州市 W14×L14×D7 (m) 基本使用料 ¥200,000/日 ダイバー、クレーン作業費別途	真水		-
<u>ニッスイマリン (岸壁)</u> 福岡県北九州市 D5 (m) 基本使用料 ¥10,000/日 ダイバー、クレーン作業費別途	海水		-
<u>福島ロボットテストフィールド</u> 福島県相馬市 W12×L30×D7 (m) 基本使用料 ¥144,200/日 クレーン使用料別 作業員は自己手配	真水		-

<p>佐世保高専 地域共同テクノセンター 長崎県佐世保市 W4.3×L11×D3.65 (m) 基本使用料 ¥5,500/時 年会費 3 万円で何度でも使用可</p>	<p>真水</p>		<p>-</p>
<p>オキシーテック (岸壁) 現 OKI コムエコーズ 静岡県沼津市 D3~10 (m) ダイバー、クレーン対応可 費用は要相談</p>	<p>海水</p>	<p>-</p>	<p>-</p>
<p>オキシーテック (バージ) 現 OKI コムエコーズ 静岡県沼津市 D30 (m) ダイバー、クレーン対応可 費用は要相談</p>	<p>海水</p>		<p><u>2022.7.4~8</u> 実海域実験</p>
<p>長手漁港 長崎県五島市 D3.2 (m) ダイバー、クレーン別途調達 (渋谷潜水工業)</p>	<p>海水</p>		<p>-</p>
<p>JAMSTEC 本部 (多目的プール) 神奈川県横須賀市 W25×L25×D3.3 (m) 基本使用料 ¥4,800/時 送電コイル搬入不可 (入口サイズ超過のため)</p>	<p>真水</p>		<p><u>2021.2</u> AUV デバッグ</p>
<p>日本サルヴェージ (屋内プール) 福岡県北九州市 W5.5×L5.5×D4.8 (m) ダイバー、クレーン対応可 費用は要相談</p>	<p>海水</p>		<p><u>2021.3.8~12</u> 実寸モデル実験</p> <p><u>2021.8.30~9.3</u> 長期運用実験</p> <p><u>2022.2.14~2/25</u> 3 kW 給電実験</p>

<p><u>日本サルヴェージ (岸壁)</u> 福岡県北九州市 D3 (m) ダイバー、クレーン対応可 費用は要相談</p>	<p>海水</p>		<p><u>2022.2.14~2/25</u> 3 kW 給電実験</p>
<p><u>口之島 西之浜漁港</u> 鹿児島県十島村 D5.5 (m) ダイバー、クレーン別途調達 (いであ) 海域使用料なし</p>	<p>海水</p>		<p><u>2022.12.9~12/26</u> AUV 実海域 充電実験</p>

3.4.3.2. 長期運用実験

実運用を想定した動作確認を目的とし、海水中の AUV に対して充電と放電を繰り返し行い、3 日間で 5 サイクルの充放電を行う計画で実験した内容について説明する。

【実験期間】2021 年 8 月 30 日～9 月 3 日（うち充放電は 8 月 31 日～9 月 2 日で実施）

3.4.3.2.1. 実験場所

2020 年度に実寸モデル実験を行った、日本サルヴェージ株式会社門司支店内の海水プールを実験場所に選定した。本研究の開発拠点がある福岡市から近く、短時間で機材輸送が可能なことと、天候に左右されない屋内で海水環境があること、および実寸モデルの実験を支障なく遂行できたことが選定理由である。

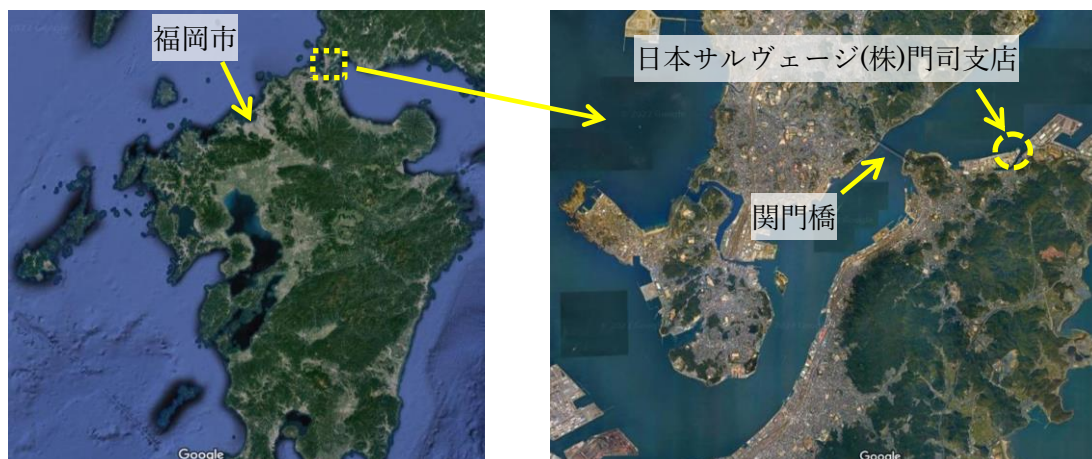


図 3.4-262 実験場所の位置 (Google マップより)



(a) 海水プール (5.5×5.5×深 4.8 m)



(b) 天井クレーン 2基

図 3.4-263 実験設備 (日本サルヴェージ株式会社門司支店内)

実験設備は図 3.4-263 に示すように屋内の海水プールと天井クレーンがあり、海水プールには隣接する岸壁から海水をろ過・無ろ過を選択して取水できる。ろ過した場合、無ろ過より若干導電率が下がるものの視認性が良い。この実験ではろ過した海水を選択した。実験時の海水プールコンディションを表 3.4-57 に示す。

表 3.4-57 長期運用実験時の海水プールコンディション

	水温	導電率 (25°C換算)	塩分濃度 (25°C換算)
2021年8月31日 14:30	22.1 °C	4.04 S/m	2.57%
2021年9月1日 17:00	22.3 °C	4.04 S/m	2.57%

3.4.3.2.2. 実験方法

3.3.7.4 で述べたようにこの実験には振動対策が間に合わなかったことから、慣性航法装置が故障するのを防ぐため、AUV から慣性航法装置を取り外した状態で実験を行った。これにより AUV の運動制御が正しく機能しない可能性があるが、この実験の目的は充放電の繰り返しであることから、AUV の移動はスラスト駆動ではなくダイバーに曳航してもらって充電位置に移動させる方法をとって問題を回避した。

また、AUV は大容量電池を搭載しているため最大 1 kW までの確認しかできない (この時点で急速充電電池はまだ準備中)。3.3.7.2 で説明したように、この実験には効率重視で共振周波数を 800 Hz にして、1 kW 用給電システムとして臨んだ。

送電コイル (充電スタンド) の海水プール内の設置状態を図 3.4-264、図 3.4-265 に示す。プールの対角線上に配置することで AUV の投入エリアを確保するとともに、送電コイルの開口面とプール壁面が近付かないようにしている。また、AUV を送電コイルの中心位置に安定して滞在させておくため、送電コイルの給電エリア内に塩ビ材製のガイドフレームを装着した。充電時の AUV の位置は図 3.4-266 に示すように送電コイルの中心とし、放電時は図 3.4-267 の位置に移動させて、AUV をロープでプール壁面に繋いだ状態のままスラ

スタを駆動させることで電池残量を消費させた。実験系とネットワーク構成は図 3.4-268 に示す。

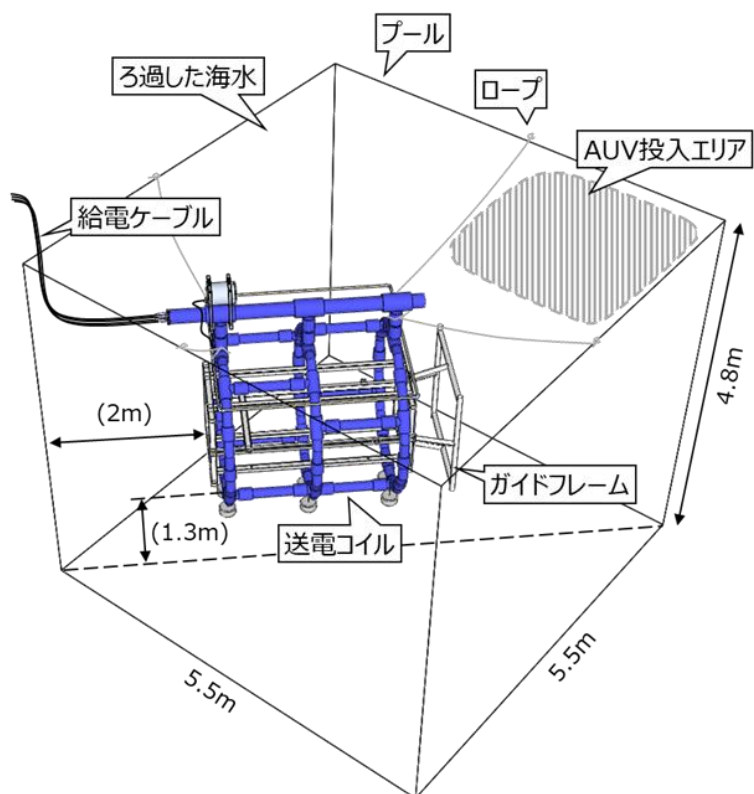


図 3.4-264 海水プール内の送電コイル（充電スタンド）設置図

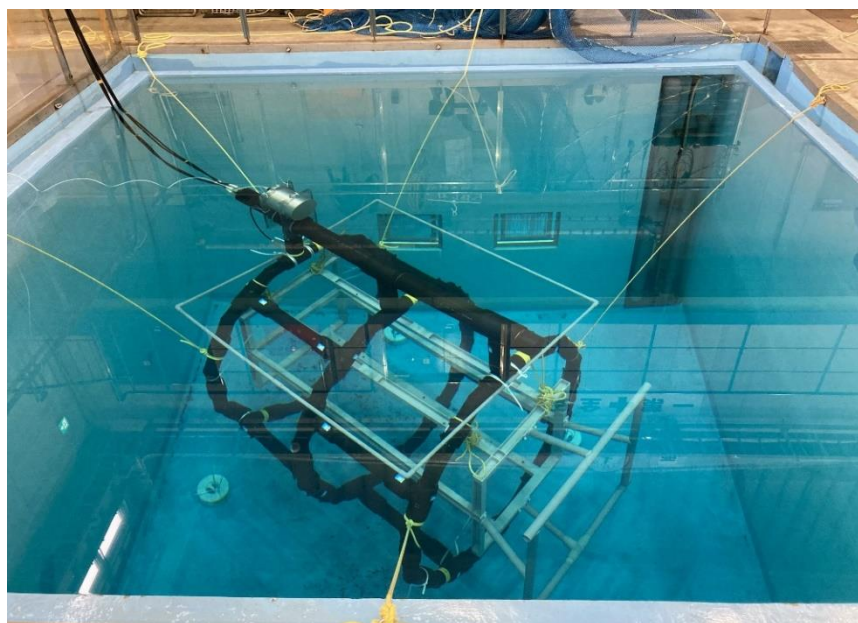
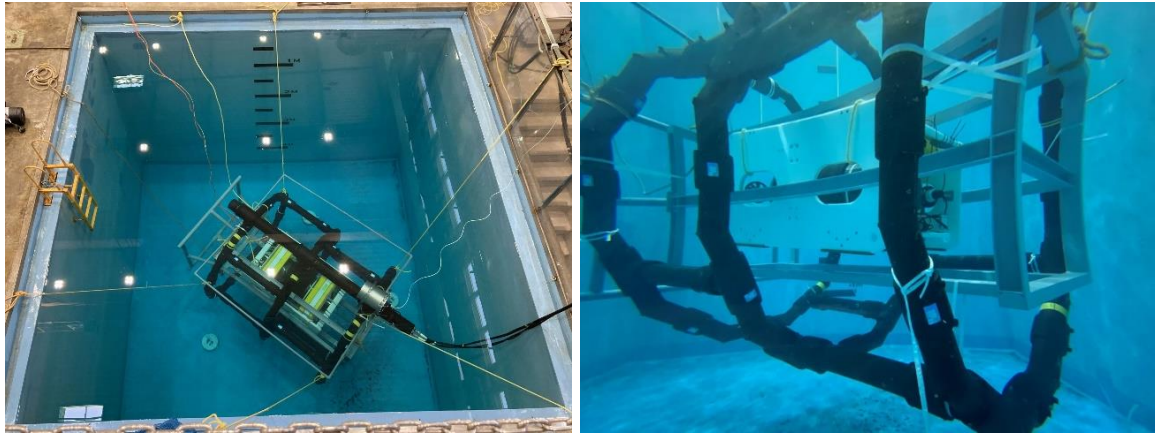


図 3.4-265 送電コイル（充電スタンド）設置状態



(a) 上から見た状態

(b) 水中の様子

図 3.4-266 充電中の AUV

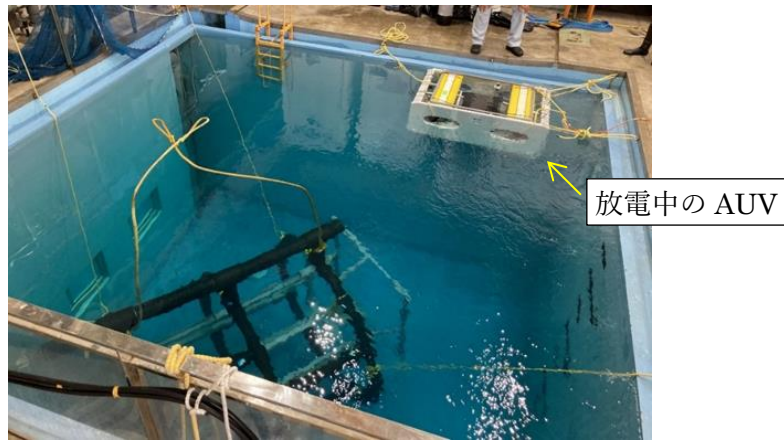


図 3.4-267 放電中の AUV

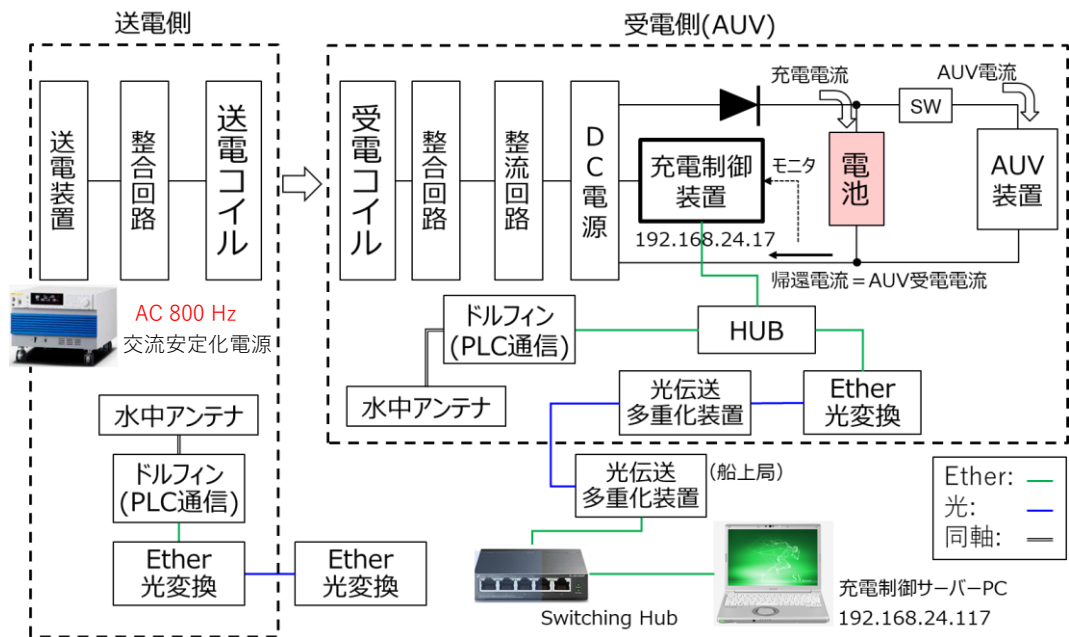


図 3.4-268 実験系およびネットワーク構成

図 3.4-268 に示すように、受電側である水中の AUV と、地上に設置される船上局（AUV をコントロールする）とは光ケーブルで接続されていて、充電制御（コマンド送信やログ取得）を行う充電制御サーバーPC は、船上局経由で AUV 内に搭載した充電制御装置に接続している。送電装置には交流安定化電源（KIKUSUI 製 PCR6000WE2R）を用い、これを地上に設置した。ケーブルと水中コネクタを介して水中の整合回路と送電コイルに繋ぎ、地上側で出力電圧を手動で調節することで送電電力を制御した。充電の手順は下記のとおり。

充電手順

- ① AUV が充電位置に来たら送電側の電圧設定値を 60 V にして出力を ON
- ② AUV の充電装置が起動したことを確認（充電制御サーバーPC から確認できる）
- ③ 送電側の電圧設定値を 120 V に上げる
- ④ 充電制御サーバーPC から指令を出し充電電流を徐々に増やす
（AUV 受電電流 10.6 A まで）
- ⑤ 充電を停止する時は先に電流を 0 A に下げ、その後に送電電圧を 0 V に下げる

3.4.3.2.3. 実験結果

3 日間で 5 回の充電と 4 回の放電を実施した。その結果を表 3.4-58 と表 3.4-59 に示す。また、充電前後の電池電圧の変化をまとめたグラフを図 3.4-269 に示す。これにより、本研究の kW 級ポジションフリーワイヤレス給電システムは、海水中の AUV に対して 1 kW（100 V×10 A）で充電をして、その後に移動して AUV を動作（放電）させて、また電池残量が減ったら充電するという、実運用を模した作業を繰り返し実行できることが証明できた。

表 3.4-58 長期運用実験結果

		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
充電	開始電圧 (V)	95	95.7	97.3	99.5	101.3
	停止電圧 (V)	98.5	99.3	101	102.9	105
	Δ電圧 (V)	3.5	3.6	3.7	3.4	3.7
	最大充電電流 (A)	10	10	10	10	10
	充電時間 (分)	32	35	60	60	47
放電	開始電圧 (V)	98	98.8	100.6	102.1	-
	停止電圧 (V)	96.5	97.5	99.3	101.2	-
	Δ電圧 (V)	1.5	1.3	1.3	0.9	-
	放電電流 (A)	6.3A/2.5A	2.5A/4.5A	4.5A	4.6A	-
	放電時間 (分)	20	30	30	20	-

表 3.4-59 繰り返し充放電のまとめ

	合計
充電時間 (時間)	4
充電量 (Ah)	39
放電時間 (時間)	1.7

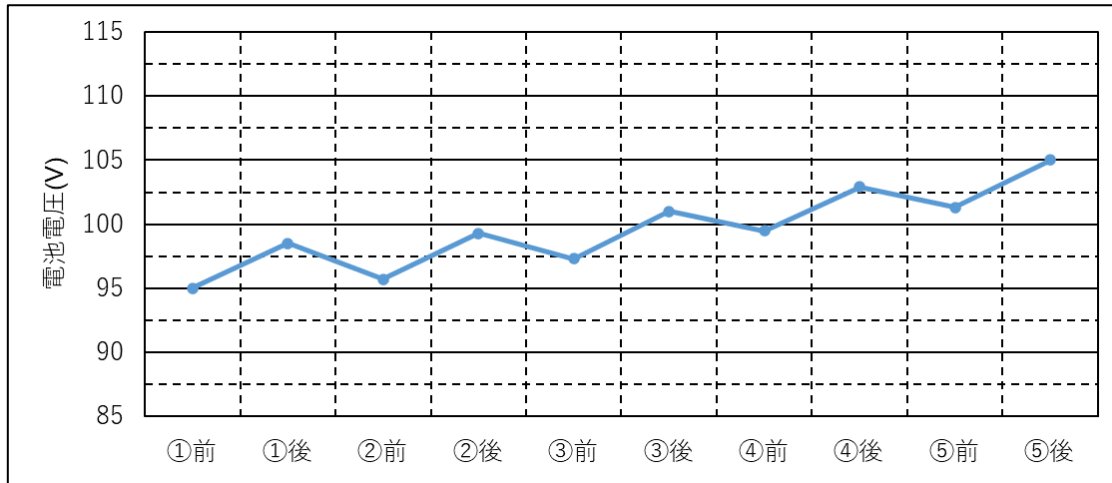


図 3.4-269 充電前後の電池電圧の変化 (①～⑤は充電〇回目を表す)

3.4.3.2.4. 課題と考察

A 充電効率について

充電を止める直前の電圧と電流から算出した送電電力と受電電力を表 3.4-60 にまとめる。受電した電力すべてが充電に消費されているわけではなく、制御回路などで消費される分を除いて充電に使われるため、受電電力は AUV 受電電力と充電電力の 2 つに分けて記載した。繰り返し充電を行っても各回でばらつきなく安定した充電が実施できたことがわかる。

ここで効率は $[\text{AUV 受電電力}] \div [\text{送電電力}]$ で求めている。AUV 受電電力は充電装置の電力消費後の電力になるため、実際にコイルが受け取った電力よりも小さい。したがってコイル間の効率より低くなる。そこで、事前に確認していた充電装置の電力消費に相当する 140 W 分を補正した電力をコイル受電電力の推定値とし、コイル間効率を $[\text{コイル受電電力}] \div [\text{送電電力}]$ として求めた。これまでの小型モデルや実寸モデルの効率および研究の効率目標値はこの値に相当する。結果は AUV 受電電力から求めた効率より約 8% 良いが、実験室 (空気中) で同じ電力を伝送したときの値 (表 3.4-60 の右端列) よりは約 8% 低かった。

表 3.4-60 長期運用実験の充電効率

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	空気中
送電電力 (kW)	1.64	1.69	1.7	1.72	1.74	1.54
AUV 受電電力 (kW)	1.04	1.05	1.07	1.09	1.11	-
充電電力 (kW)	0.96	0.97	0.99	1.01	1.03	-
効率	63.4%	62.2%	63.0%	63.5%	63.9%	-
コイル受電電力 (kW)	1.18	1.19	1.21	1.23	1.25	1.23
コイル間効率	72.0%	70.4%	71.2%	71.6%	72.0%	79.9%

図 3.4-270 にコイル受電電力とコイル間効率の関係を整理し、海水中の結果と空気中の結果を比較した。送電側の交流安定化電源の電圧設定値はどちらも 120 V 一定である。コイル受電電力を増やす (= 充電電流を増やす) につれて海水中と空気中の効率の差は小さくなっている。このまま電力を増やすと効率は改善できる可能性はある (3.3.6.5 の実寸モデルの 800 Hz における最大有能電力効率は 84%) が、電池を 1 kW 以上の電力に耐えられるものに変えなければ実験できないため、この実験時に確認することはできなかった。

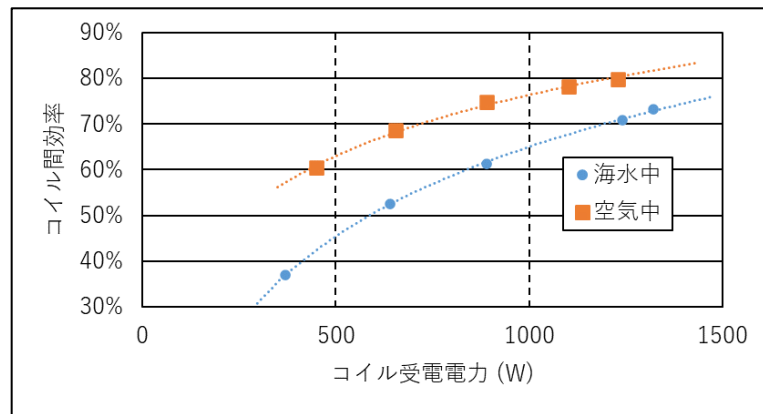


図 3.4-270 コイル受電電力とコイル間効率

次に送電側の安定化交流電源の電圧設定値ごとの海水中的コイル間効率の変化を図 3.4-271 に示す。電源の電圧設定値により効率が変化していることがわかる。電圧設定値は充電装置に十分な電圧を供給する必要があるので充電電圧以下には設定できないが、グラフの傾向から、できるだけ電圧設定値を下げることによって効率が改善できることがわかる。

以上のことから、本実験は効率の観点では最適化できていなかったと考えられる。次回の実験では電力の大きさに合わせて電源電圧を調整する送電制御も含めて取り組む必要があると考え、3.4.3.3 および 3.4.3.4 の 3 kW 給電実験にて実証している。

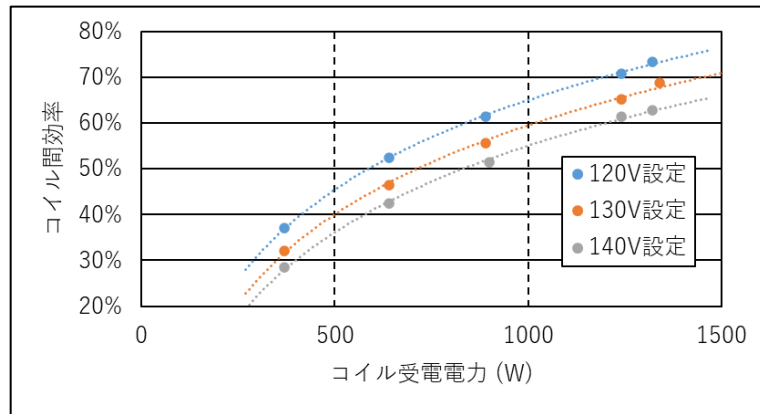


図 3.4-271 電源電圧設定値とコイル間効率

B 電池温度について

3.3.7.2 に掲載の大容量電池仕様では使用温度範囲の周囲水温が最大 32°Cとなっていて、電池セル周囲温度の明確な上限はない。そこで、メーカーから得た上限 40°Cという見解をもとに、耐圧容器の機内温度を 40°Cまでと規定して実験を行った。しかし、ここで機内温度に相当する温度計測を行うセンサを AUV に搭載していないことが判明し、急遽代案として電池に近い AUV 制御部の基板上的温度センサの値を、機内温度相当と仮定して実験を遂行した。結果、図 3.4-272 に示すように温度センサの値は実験開始 60 分で 40°Cに達し、やむなく充電を停止した。このことが充電時間を十分に長くできなかった原因である。

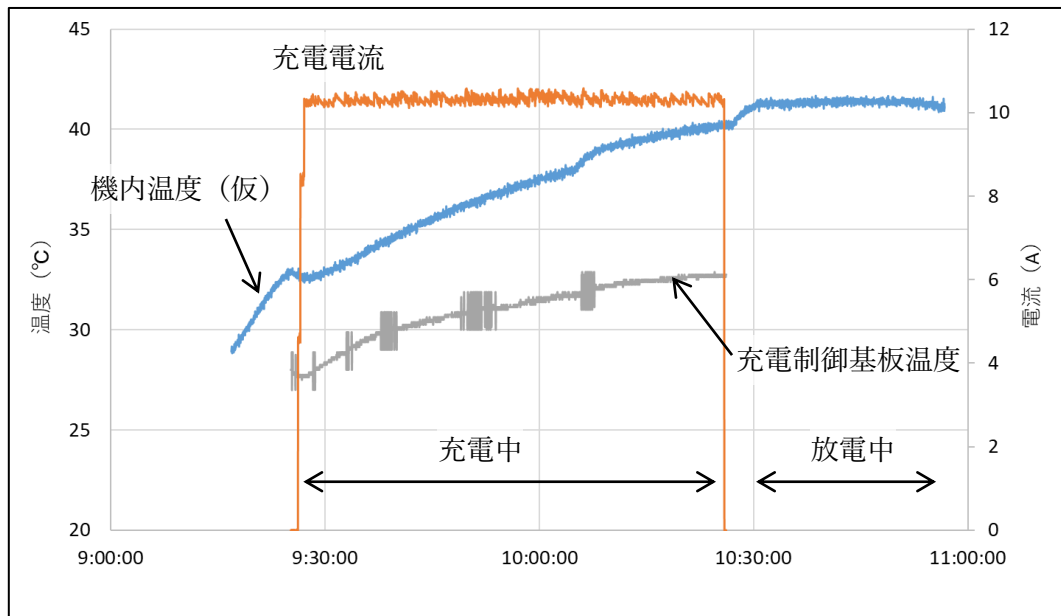


図 3.4-272 充電中および放電中の温度変化（充放電 4 回目のデータより）

また、充電停止直後に温度が上昇し、放電中は温度一定になっていたが、40°Cを超えたままだったため長時間の連続放電はリスクがあると判断し、短時間で放電を停止した。

充電停止直後に温度が上昇したことについては、充電制御系の整流器および DC/DC に冷却用ファンが装備されていることに関連している。充電中にだけ作動するようになっていることから、充電停止後に冷却用ファンが停止して、機内温度上昇につながったと推測できる。このことは、機内温度測定場所が電池周囲温度として使用するには適さない場所である可能性が高いことを示している。充放電を止めると電池の発熱はないが、一方で、機内温度が上昇しているということは、耐圧容器内の空気の攪拌が少なくなったことで熱伝導の影響が大きくなったことを示しており、測定箇所が熱源に近いと推測できる。実際、のちほど確認すると、機内温度にしてきた AUV 制御部の基板上の温度センサ設置箇所は CPU に近かった。同じ耐圧容器内にある充電制御装置の基板上に設けた温度センサは、充電中でも 33 °C 以下であったので、電池周囲温度は実際には 40 °C まで到達していなかった可能性が高いと考えられる。したがって次回実験は、電池周囲温度あるいは電池セル温度を測定できるような温度センサを搭載して臨まなければならない。

なお 4 回目の充放電時のデータを代表として図 3.4-272 に掲載したが、1~5 回目ではほぼ同じ温度カーブが計測されている。

C 熱解析による電池温度の推測

電池温度を正しく把握できなかったことが長時間の充放電ができなかった原因であるが、長期運用実験での電力は 1kW であり、温度測定場所を適切にしたとしても、最終的に電力を 3 kW にした場合に、温度上昇の課題が発生するかどうか判断できない。

熱解析は 2 次試作設計時の評価でも実施 (3.4.1.5.5 充電時の発熱影響予測を参照) してきたが、3 次試作まで設計が進んだ段階で再度 CAD モデルの見直しや DC/DC 電源の FAN の影響などを加味し、特に電池の温度上昇にフォーカスした解析を実施した。

C-1 熱解析モデル

図 3.4-273 のように AUV 内部をモデリングし、充電装置側と AUV 側の発熱量を表 3.4-61 のように定義して解析を行った。電力を増やすと充電装置側の発熱量は増えるが、AUV 側は変わらない。なお解析には市販の熱流体解析ソフト STREAM を使用している。

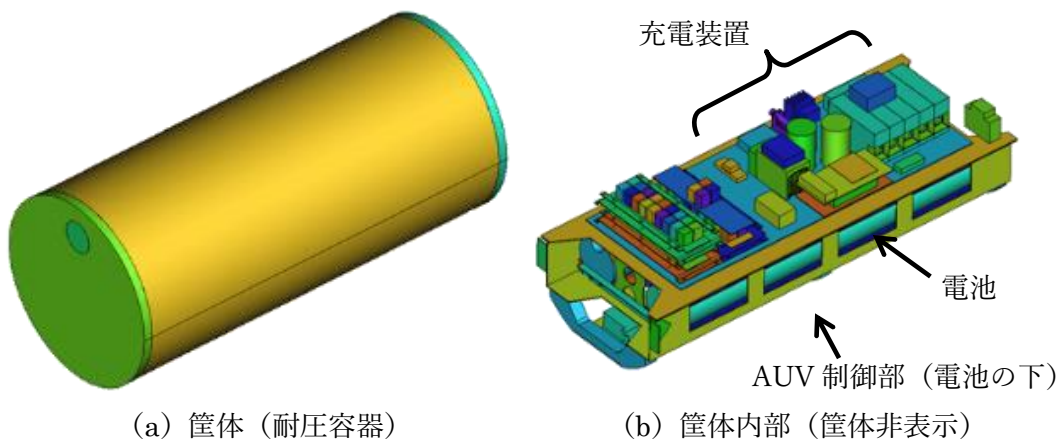


図 3.4-273 熱解析モデル

表 3.4-61 各部の発熱量 (単位 W)

大項目	項目	品番	1kW条件	2kW条件	3kW条件
充電装置側	整流回路	S50VB80	15	35	60
	平滑コンデンサ	LNT2V472MSEG	5	10	15
	DC/DCコンバータ	PCA600F-24	100	200	300
	通信制御部 (ドルフィン)		0.72	0.72	0.72
	充電制御基板		0.875	0.875	0.875
	シャント抵抗(充電制御基板上)	TLR3APDTE4L00F50CT	0.4	1.6	3.6
	逆流阻止ダイオード	T40HF40	8	15	24
	HUB	LAN-GIGAP301BK	0.6	0.6	0.6
	整流用ヒートシンクファン		0	0	0
	ヒートシンク用電源	PBA10F	1.35	1.35	1.35
	12V→5V電源(Hub用電源)	PQDE6W-Q24-S3-T	0	0	0
充電装置側合計			131.945	265.145	406.145
AUV側	CPU		20	20	20
	電源+IO基板類		20	20	20
	HUB		5	5	5
	光伝送装置類		10	10	10
AUV側合計			55	55	55

C-2 熱解析結果

周囲海水温度を 25 °C とし、1 kW、2 kW、3 kW で充電を行った場合の電池温度の定常解析の結果を表 3.4-62 に示す。開始温度 25 °C から 1 kW 充電時で最大 2.7 °C の上昇、3 kW 充電時でも最大 6.5 °C の上昇に抑えられることがわかった。3 kW 充電時の温度分布を図 3.4-274 に示す。電池全体の温度差は 2 °C 以内に収まっていて、温度分布の極端な偏りは発生していない。この解析結果より、電池の温度を正しく測定できれば 3 kW の充電も可能と考える。

表 3.4-62 熱解析結果 (単位 °C)

受電電力	1 kW	2 kW	3 kW
電池①	26.9~27.5	28.1~29.1	29.4~30.8
電池②	27.1~27.7	28.6~29.6	30.0~31.5
参考 DC/DC ファン	36.7	47.2	57.8
参考 整流器ファン	29.8	32.9	36.8
参考 充電制御基板	33.2	39.0	46.1
参考 CPU 最大温度	82.1	84.9	87.1

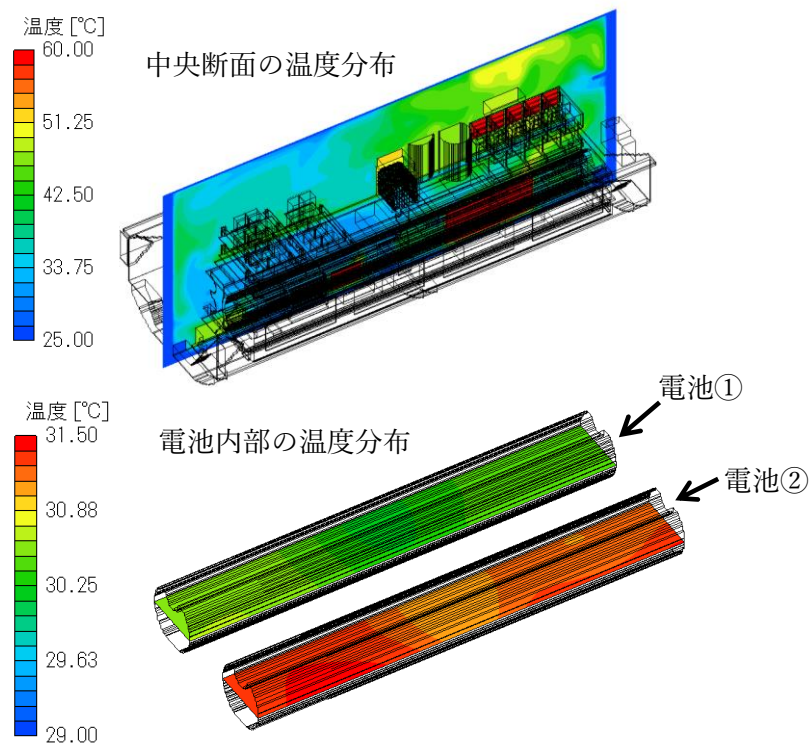


図 3.4-274 3 kW 充電時の温度分布

3.4.3.3. 3 kW 給電実験 (海水プール)

海水中の AUV に 3 kW の電力伝送を行うことを目的とした実証実験を行った。またポジションフリーの確認と伝送効率の改善の確認も合わせて実施した。その内容について説明する。

【実験期間】 2022 年 2 月 14 日~2 月 25 日

3.4.3.3.1. 実験場所

長期運用実験に続き、日本サルヴェージ株式会社門司支店内の海水プールを使用した。海水プールで実証が成功した場合、実験期間の後半に隣接する岸壁を使って実際の海で実

験できる環境があるため、この場所を選択した。

3.4.3.3.2. 実験方法

3.3.7.3 で説明した 3 kW 用給電システムを用いる。3.4.3.2 の長期運用実験から AUV の電池を急速充電電池に換え、共振周波数を 1.5 kHz にし、振動対策を施し慣性航法装置を装備した状態になっている。

送電コイル（充電スタンド）の海水プールへの設置条件は図 3.4-275 に示すとおりで図 3.4-264 の長期運用実験のときと同じになるように設置した。ただし AUV の位置を可変にするため長期運用実験時に用いたガイドフレームは設置していない。また、送電コイルの上側に取り付けてある長方形の枠は通信用アンテナで、通信機器を内蔵した通信タンクとつながっており、通信タンクは光ケーブルを介して地上側につながっている。

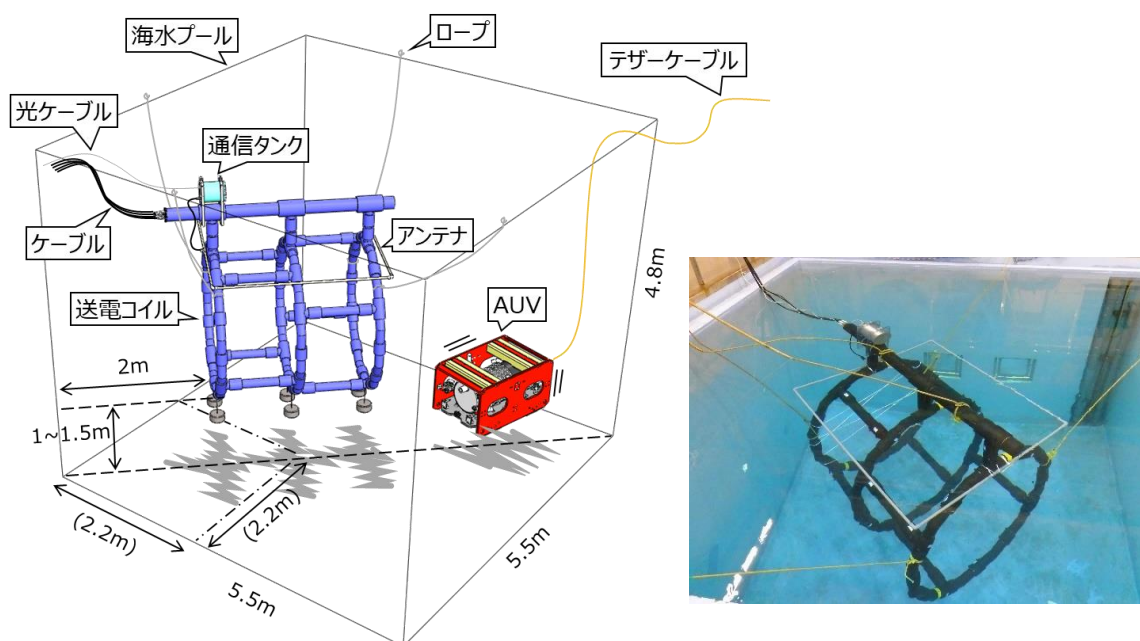


図 3.4-275 海水プール内の送電コイル設置条件（3 kW 給電実験）

ポジションフリーで給電ができることを確認するため、まず給電エリア内の①中心、②中心から 0.4 m 上方（送電コイルに接触）、③中心から手前に 1 m の地点（出入口）、④中心地点で水平方向に 45° 回転した状態、の 4 条件でスラストを駆動させずロープで固定して、AUV 側の消費電力変動がない状態（静特性）で実験した。その後、ロープを外し AUV がフリーな状態でスラストを駆動させて給電エリア内に留まるよう動作している状態（動特性）で実験して、消費電力すなわち負荷が変動する中でも給電できることの確認を行った。①～④における送電コイルと AUV の位置関係を図 3.4-276 に、実験時の写真を図 3.4-277 に示す。

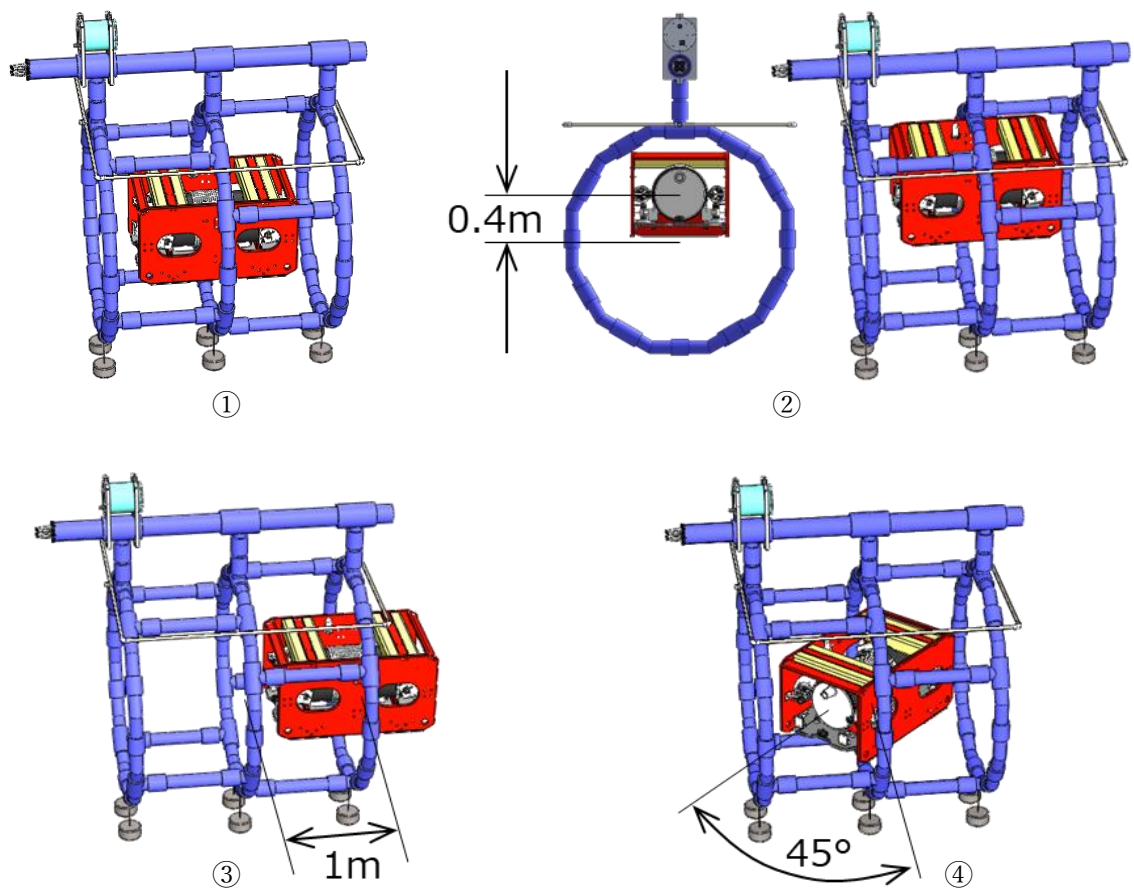


図 3.4-276 静特性の測定位置

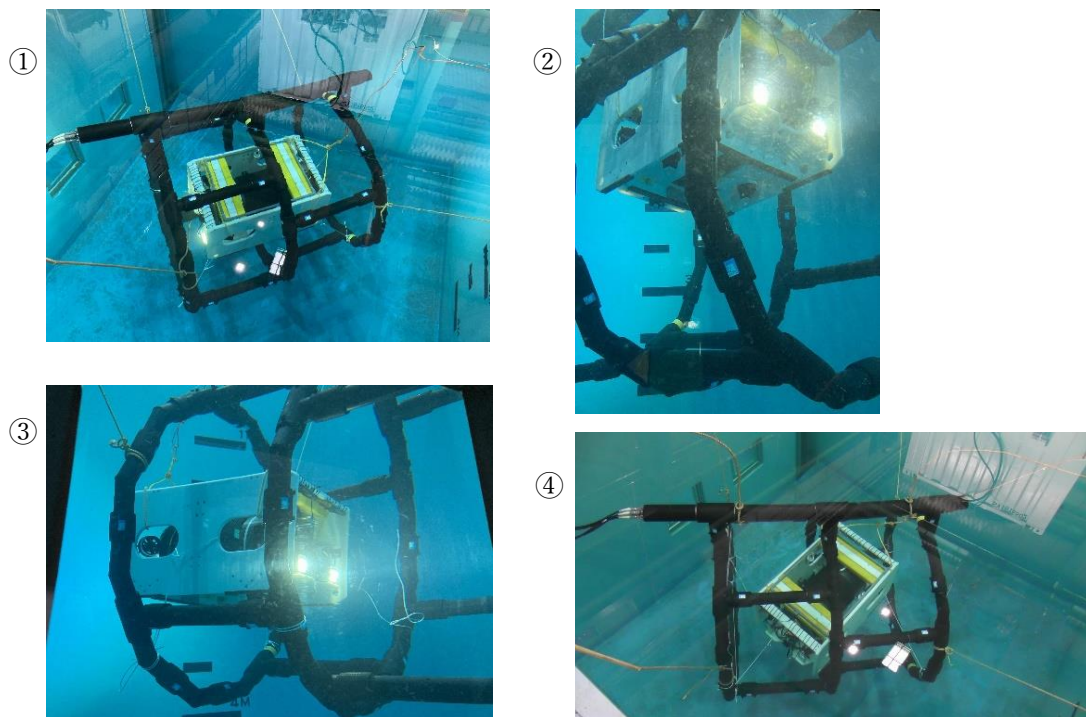


図 3.4-277 静特性の測定時の写真

実験系を図 3.4-278 に示す。長期運用実験時（図 3.4-268）からの変化点は大きく3つあり、DC 電源への入力電流と入力電圧をモニターしてコイル受電電力を把握できるようにした点と、充電制御サーバーPC から送電装置をコントロールできるようにした点、そして水中アンテナを使って水中通信ができるようにしたことである（長期運用実験時も水中アンテナは準備していたが、技術的課題が生じ使用できなかった）。充電制御を有線で行う場合は図 3.4-278 中の A の LAN ケーブルを繋いで B を外し、充電制御を無線（海中通信）で行う場合は B の LAN ケーブルを繋いで A を外して実験した。

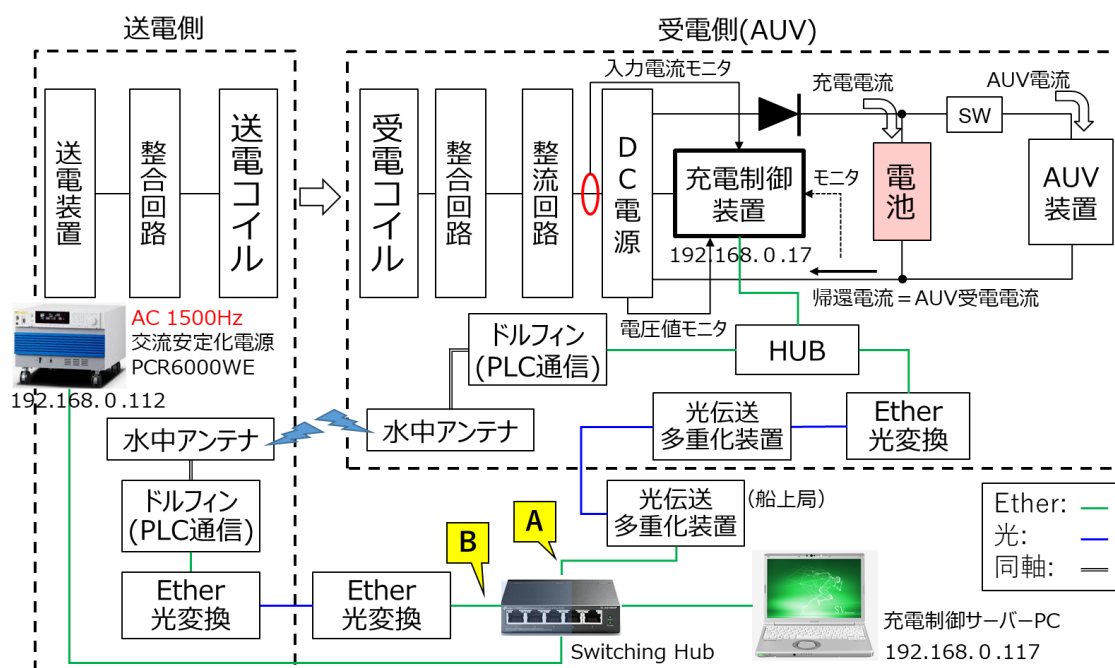


図 3.4-278 実験系およびネットワーク構成 (3 kW 給電実験時)

3.4.3.3.3. 実験結果

この実験では有線で充電制御を行って実施した。海中通信で充電制御を行った実験については 3.4.3.4.4.C で説明する。海中通信について詳細は 3.5 章で説明しているが、十分な通信速度が得られており、有線と海中通信の違いで電力伝送に差は生じていない。

A 静特性の実験結果

電池の仕様では 30 A まで充電電流を増やすことができるが、充電制御回路の保護回路の制約により最大 24 A 設定として実験した。実験時の海水コンディションを表 3.4-63 に、各位置における AUV 受電電流最大時の測定結果を表 3.4-64 に示す。図 3.4-276 に示した①～④いずれの位置においても上限まで電流を流すことができ、最大 2.8 kW の電力を受け取ったことがわかる。ここで、表中の「AUV 受電電流」は図 3.4-278 の帰還電流の値、「受電電力」は DC 電源の入力電流と入力電圧より求めた値、「充電電力」は AUV 装置の消費

電力を0とした場合の電池充電電力に相当する。また、「伝送効率」は受電電力÷送信電力により求め、「全体効率」は充電電力÷送電電力であり充電器効率も含んだ値になる。なお本研究の目標としている効率80%の値は「伝送効率」の値に相当するため、この実験によって目標に近い効率が達成できていることを確認できた。

表 3.4-63 3 kW 給電実験時の海水プールコンディション

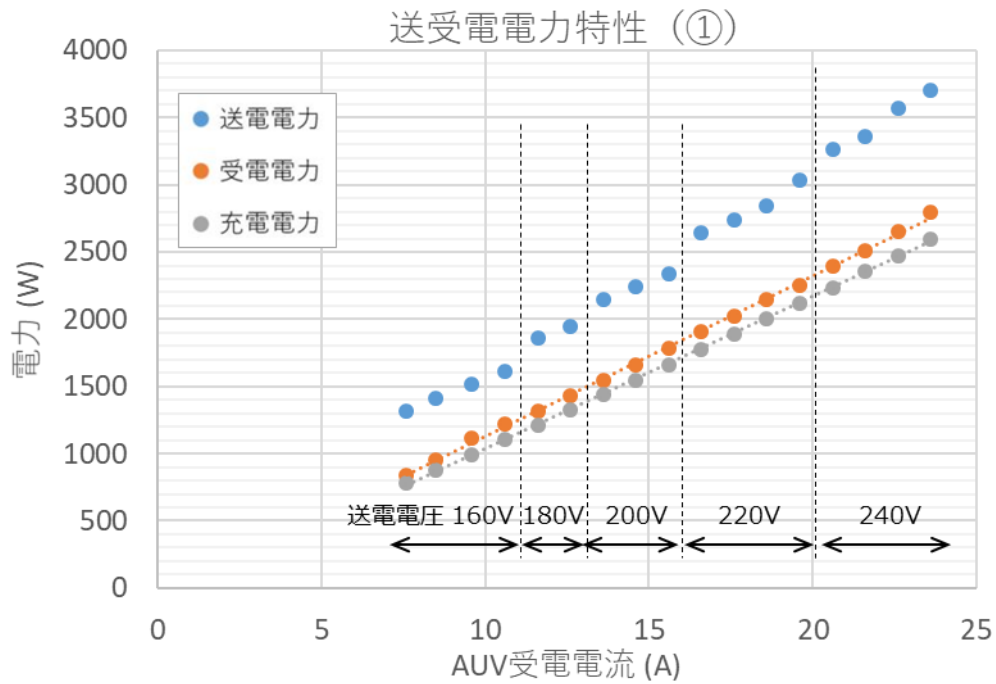
	水温	導電率 (25°C換算)	塩分濃度 (25°C換算)
2022年2月15日 09:15	12.3 °C	4.92 S/m	3.09%
2022年2月16日 10:00	12.0 °C	4.94 S/m	3.10%
2022年2月17日 10:05	11.8 °C	4.95 S/m	3.10%
2022年2月18日 09:45	11.5 °C	4.98 S/m	3.12%

表 3.4-64 静特性の実験結果 (AUV 受電電流最大時)

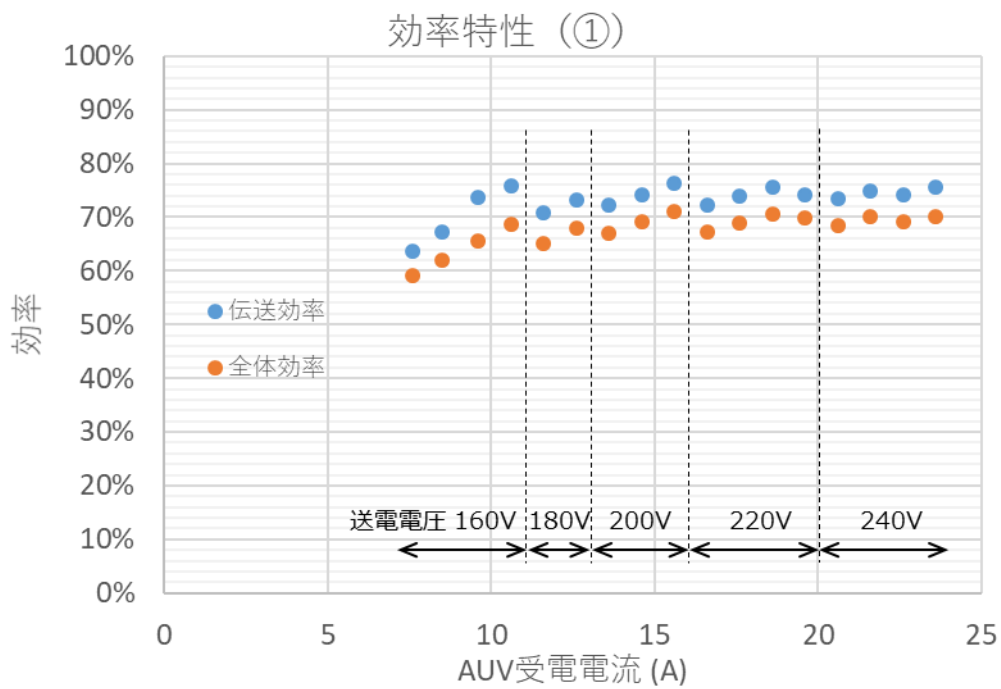
実験位置	AUV 受電電流 (A)	送電電力 (W)	受電電力 (W)	伝送効率 (%)	電池電圧 (V)	充電電力 (W)	充電器効率 (%)	全体効率 (%)
①	23.6	3700	2800	76	109.9	2594	93	70
②	23.6	3650	2850	78	110.0	2596	91	71
③	23.6	3800	2820	74	109.6	2587	92	68
④	23.6	4000	2820	71	111.8	2638	94	66

図 3.4-279～図 3.4-282 は各位置の AUV 受電電流と電力および効率の関係を示したグラフである。3.4.1.6.5 (空間での予備実験) で行った事前検討と同様に、AUV 受電電流の大きさに合わせて送電側の送電装置に使用している交流安定化電源の電圧設定値を調整しながら実験した。グラフより、AUV 受電電流が小さい、すなわち伝送する電力が小さいときでも伝送効率が高く保たれていることがわかる。逆に AUV 受電電流が大きい、すなわち伝送する電力が大きいときでも、電力供給不足によるシステムダウンを引き起こすことなく電力伝送ができていることも見て取れる。

これらの結果より、AUV が送電コイル内のどこにいても 1 kW 以下の電力から 3 kW 近い大電力まで高効率で安定して伝送できていることがわかった。なお図 3.4-280 の測定位置②における測定結果グラフのポイント数が少ないのは実験時間の都合上であり、測定位置①と同様に AUV 受電電流 7.6 A のときも電力伝送はできていたがデータが残せていなかったためグラフに載せられていない。また、図 3.4-281 と図 3.4-282 では AUV 受電電流 4.6 A からグラフのプロットが始まっているが、測定位置③と④では①と②に比べて効率が悪いことが予想されたため、念のため小さい電力から実験を開始したからである。

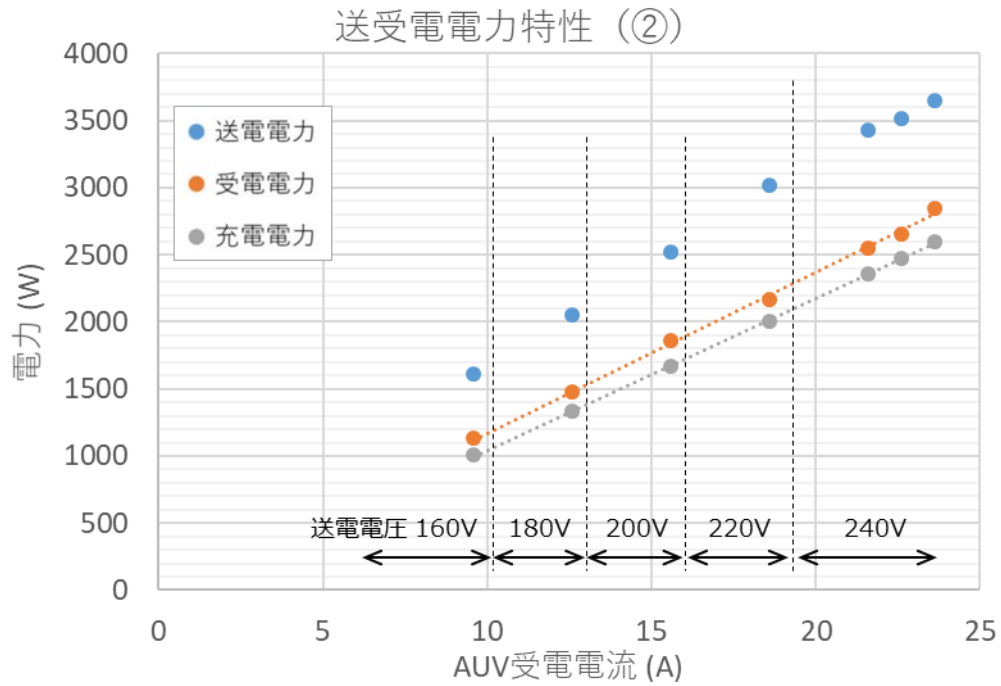


(a) 電力特性のグラフ

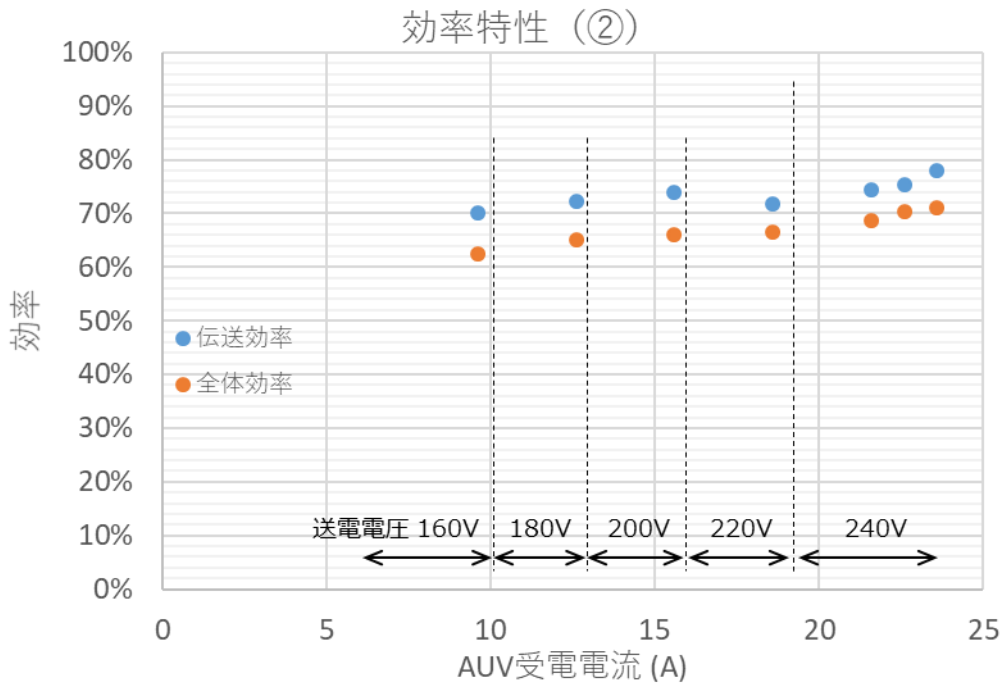


(b) 効率のグラフ

図 3.4-279 測定位置①における AUV 受電電流と電力および効率

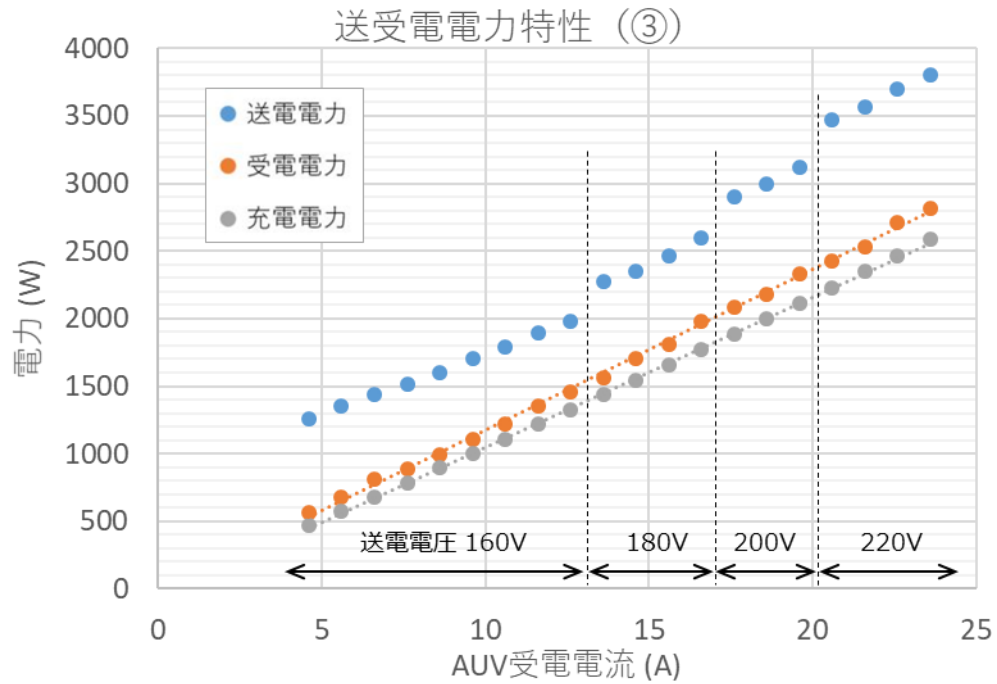


(a) 電力特性のグラフ

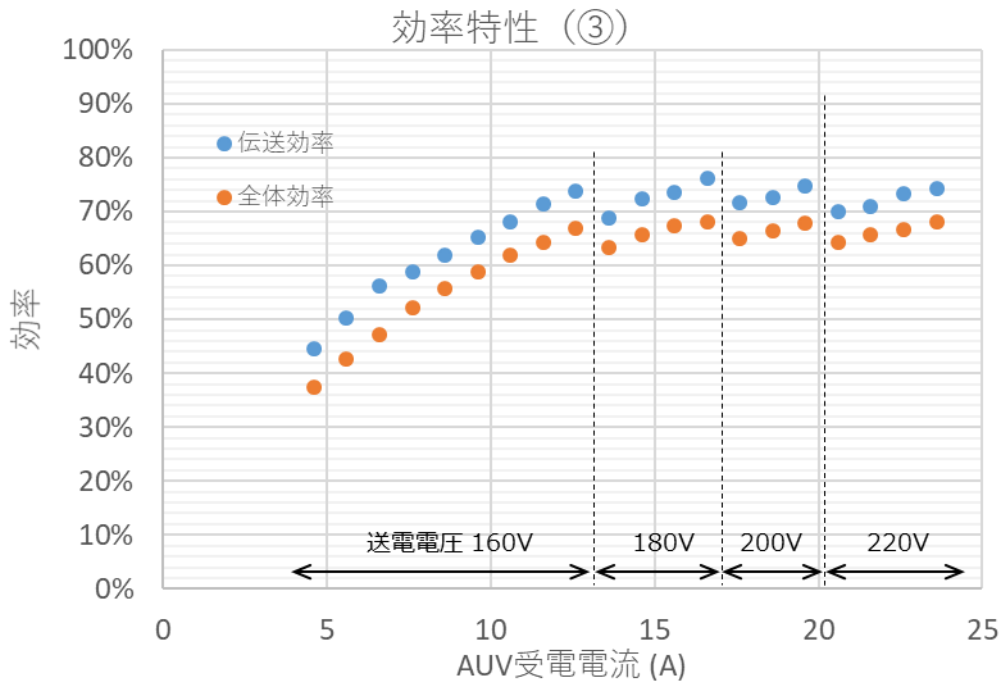


(b) 効率のグラフ

図 3.4-280 測定位置②における AUV 受電電流と電力および効率

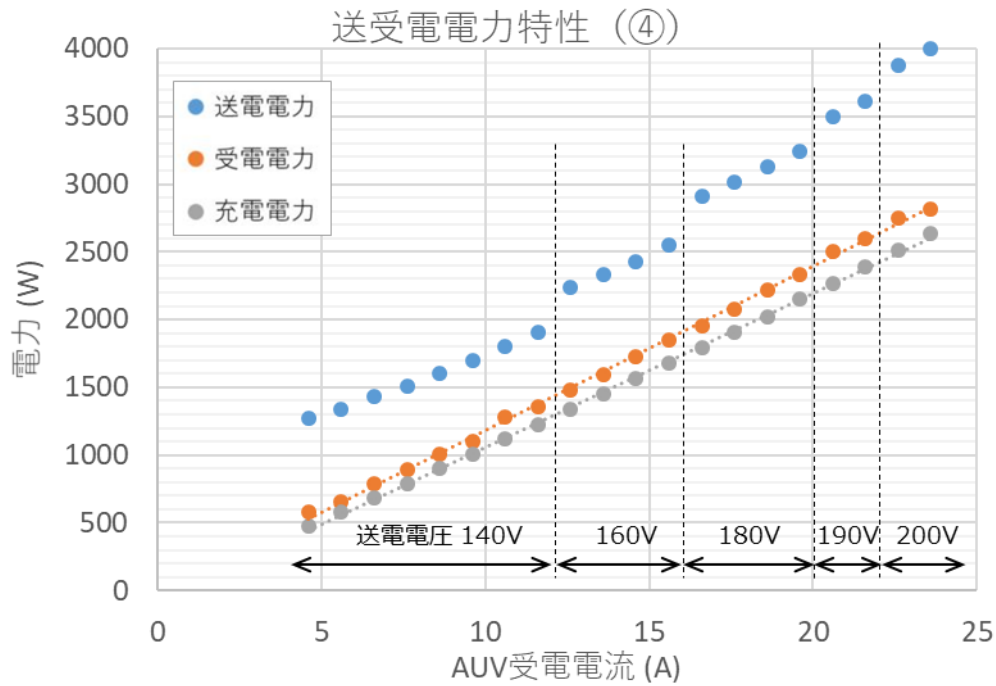


(a) 電力特性のグラフ

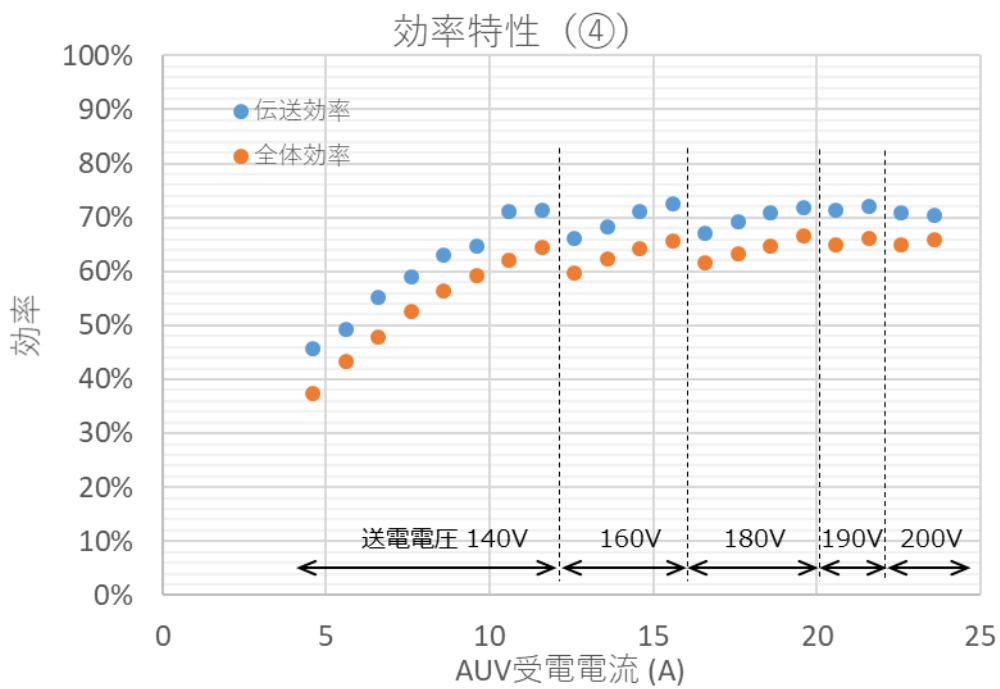


(b) 効率のグラフ

図 3.4-281 測定位置③における AUV 受電電流と電力および効率



(a) 電力特性のグラフ



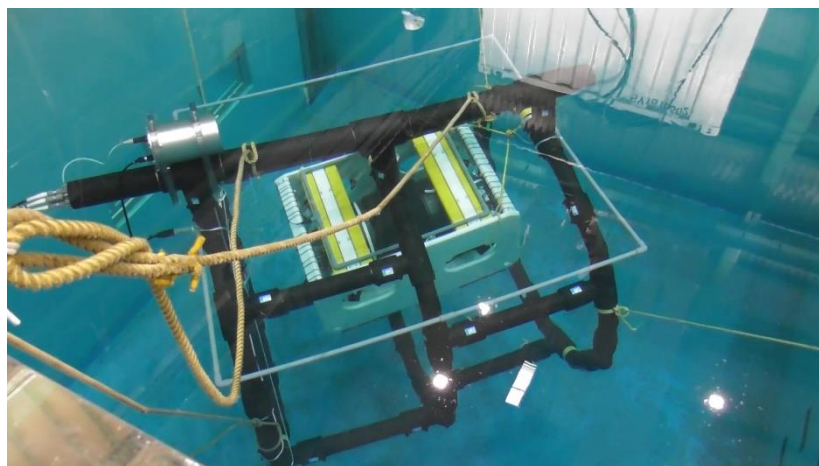
(b) 効率のグラフ

図 3.4-282 測定位置④における AUV 受電電流と電力および効率

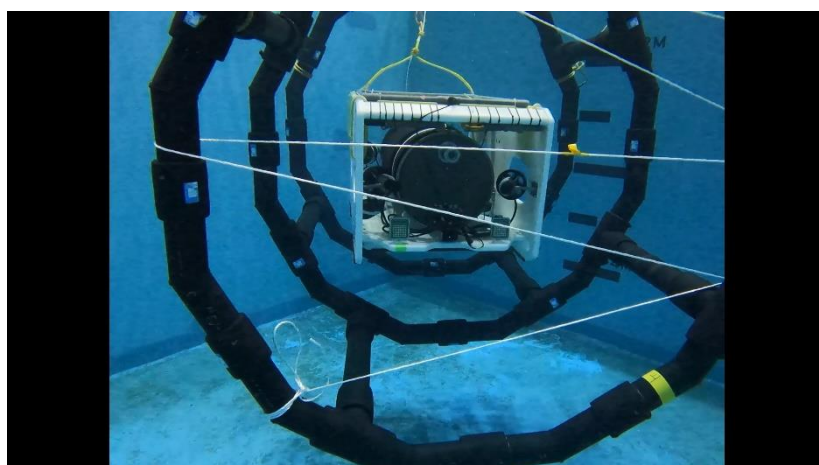
B 動特性の実験結果

AUV を固定せず、スラストを駆動して自力で送電コイル内に滞留するよう動作している

状態、すなわち AUV の消費電力が変動する状態で電力伝送を行い充電した。ただし自律航行ではなくオペレータが光ケーブル経由で地上からコントロールしている。なお、動特性の実験でも有線系の通信を使って(図 3.4-278 の A の LAN ケーブルを接続し B を外して)送電制御を含めた充電制御を行っている。実験時の写真を図 3.4-283 に、結果は表 3.4-65 と図 3.4-284 に示す。AUV の位置を固定せず、スラストが駆動していても安定して充電できていることがわかる。



(a) 上からみた様子

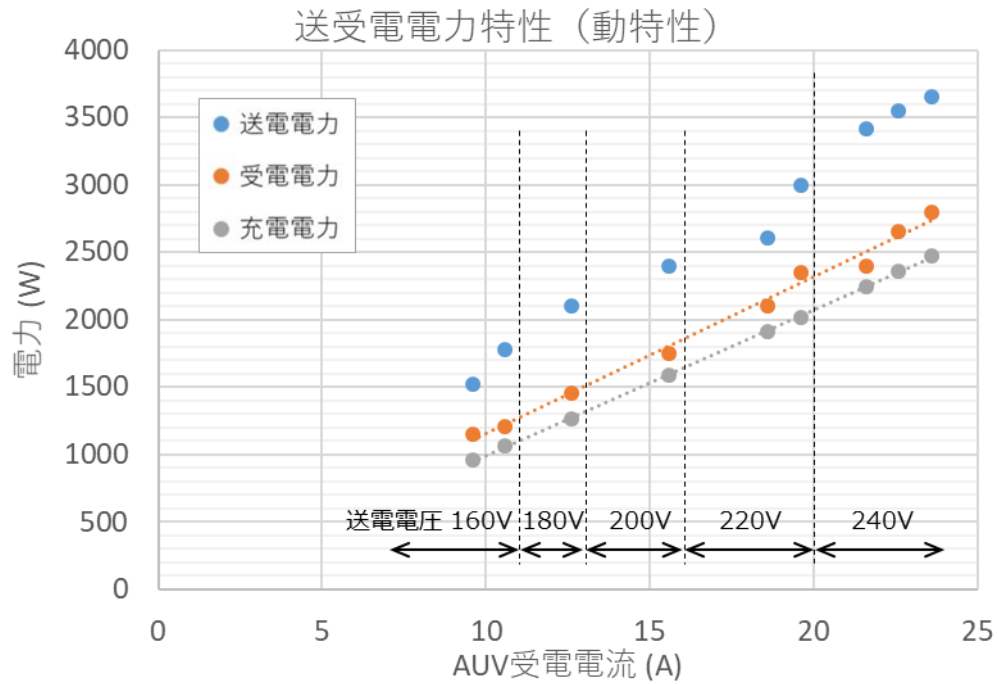


(b) 水中の様子

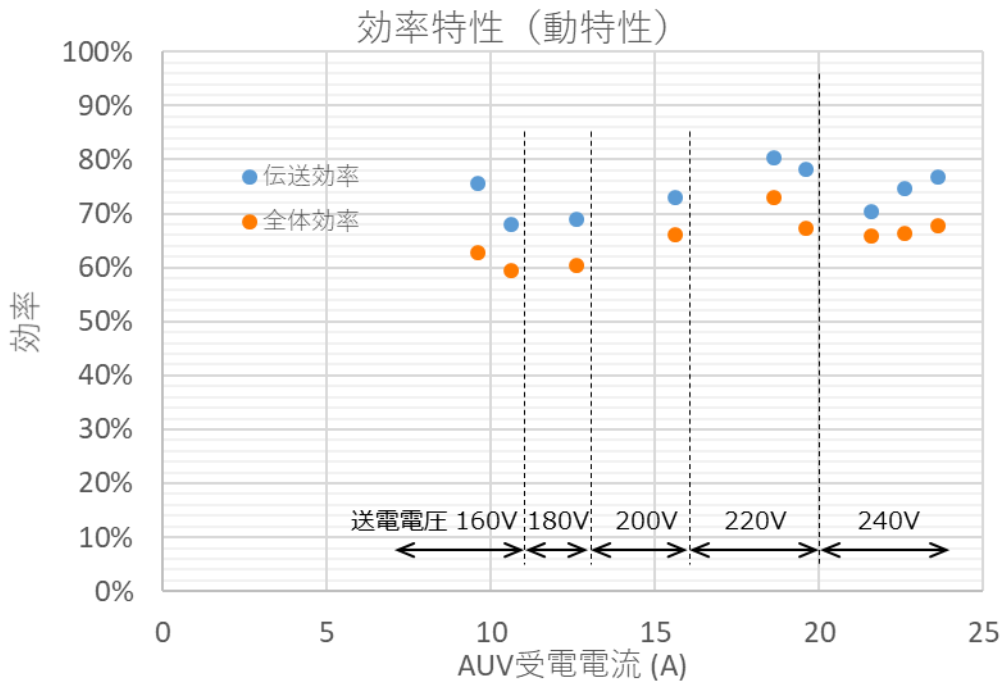
図 3.4-283 動特性測定時の写真

表 3.4-65 動特性の実験結果 (AUV 受電電流最大時)

	AUV 受電電流 (A)	送電電力 (W)	受電電力 (W)	伝送効率 (%)	電池電圧 (V)	充電電力 (W)	充電器 効率 (%)	全体効率 (%)
動特性	23.6	3650	2800	77	104.9	2476	90	68



(a) 電力特性のグラフ



(b) 効率のグラフ

図 3.4-284 動特性の AUV 受電電流と電力および効率

図 3.4-285 は充電制御装置のログより電池電圧、AUV 受電電流、充電電流、受電電力 (input_power)、温度 (LM75b_temp1) の時間経過特性を示したものである。図 3.4-286 は AUV 装置のログから 6 軸の各スラスターの回転と電池電圧 (bat1)、AUV 消費電流 (curr1) を示したものである。図 3.4-287 は急速充電電池の BMU (Battery Management Unit) のログ

から総電圧、バッテリー電流、充電電力、各セルの電池平均温度、を示したものである。

図 3.4-286 の AUV 装置のログデータからスラストが不規則に回転を行い消費電流が 1A ~4A で変動していることがわかり、図 3.4-285 の充電制御装置のログデータから、多少の変動はあるものの AUV 受電電流はほぼ一定に保たれ、電池電圧が緩やかに上昇し続けていることがわかる。このことから、AUV の電力消費が変動しても安定的な充電ができていることが確認できた。また、充電時は AUV 受電電流を一定に保っているため(図 3.4-285)、図 3.4-287 の電池の充電電流の変動は基本的に AUV の電流消費 (図 3.4-286) を打ち消す方向に変動している。

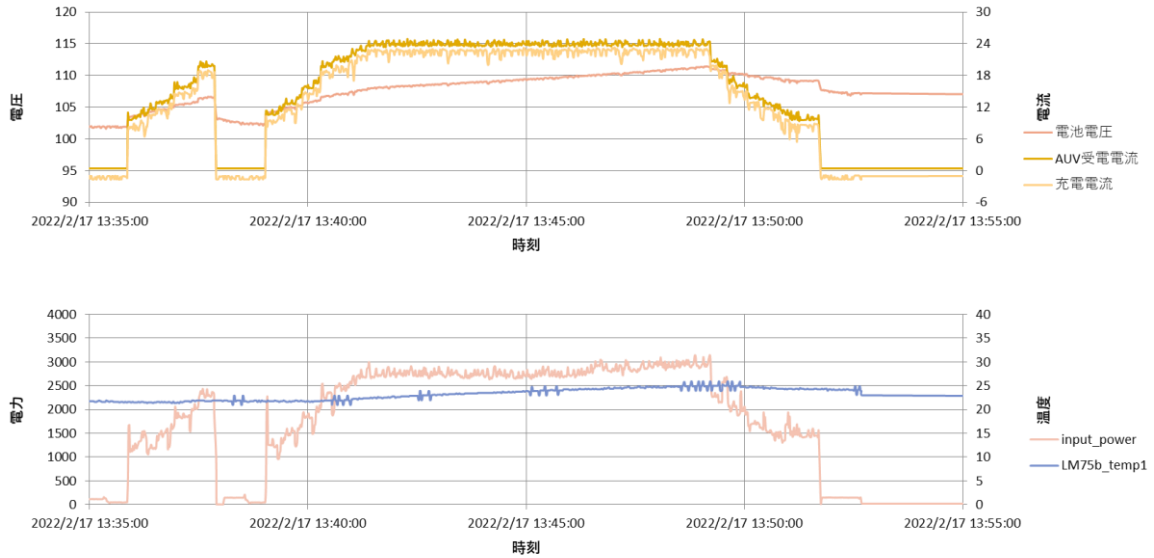


図 3.4-285 充電制御装置の電圧、電流、電力、温度ログ (海水プール・動特性)

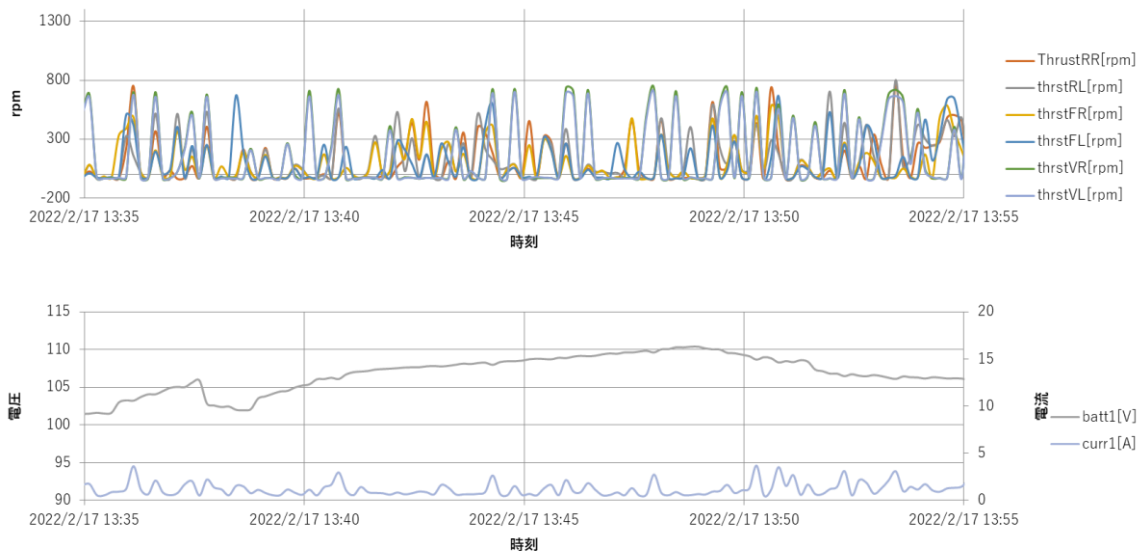


図 3.4-286 AUV 装置のスラスト回転数、電圧、電流ログ (海水プール・動特性)

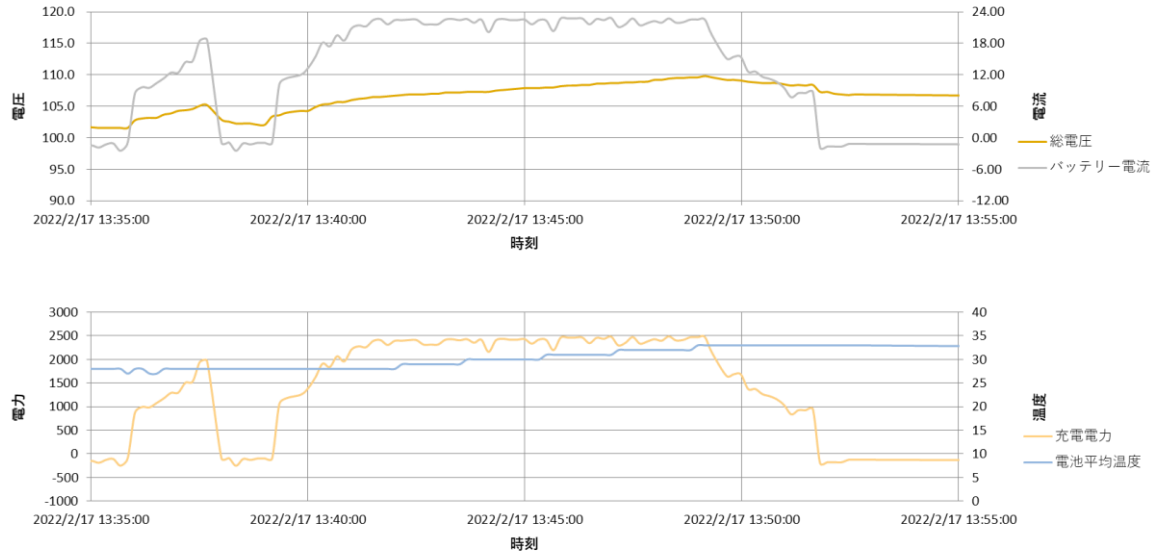

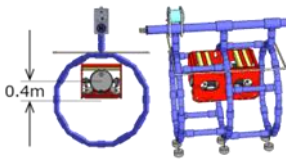
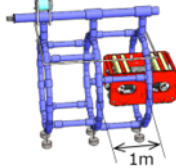
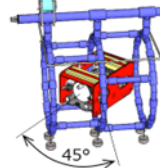


図 3.4-287 急速充電電池 BMU の電圧、電流、電力、温度ログ（海水プール・動特性）

3.4.3.3.4. 課題と考察

A ポジションフリーに対する考察

表 3.4-66 AUV の位置と結合係数

	①	②	③	④
位置				
結合係数	0.20	0.22	0.17	0.14
伝送効率	76%	78%	74%	71%

静特性の実験位置①～④における送電コイルと受電コイルの結合係数の推定値（実寸モデル実験値と電磁界シミュレーションより）、およびこの実験における伝送効率を表 3.4-66 に示す。この結果より、結合係数が大きいほど効率が良いことがわかる。AUV のコイル軸と送電コイルのコイル軸が平行な場合（④のように傾いている場合以外）は、結合係数が最大となるのはコイル間の距離が最も近くなる②の位置であり、結合係数が最小となるのはコイル間の距離が最も離れる③の位置になる。したがって、コイル軸が平行な場合は、送電コイル内の全ての場所で結合係数が 0.17 以上あり、③の場所で問題なく電力伝送でき

ていたことから、AUV がどこにいても電力伝送はできると言える。

次に送電コイルと AUV のコイル軸が④のように平行でない場合は、ある位置におけるコイル軸が平行な時の結合係数を k_0 とし、コイル軸の角度を θ とすると、角度 θ のときの結合係数 k_θ は次の式で表される。

$$k_\theta = k_0 \cos \theta \quad (3.4-30)$$

位置④における実験結果から、結合係数が 0.14 以上あれば 3 kW 級の電力伝送が 70%以上の高効率で実施できると言える。したがって(3.4-30)より、位置③において少なくともコイル軸の角度 34° (結合係数 0.14) まで許容できることがわかる。このことから、この給電システムは、送電コイル内の AUV の位置だけでなく AUV の傾きにまで対応できるポジションフリー給電システムであることが実証された。

B 最大電力について

今回の実験では安全性を考慮して最大受電電力を 2.8 kW とした。実験の結果 2.8 kW をターゲットとして安定した充電制御ができる実績が得られたので、次の実験ではあとわずかではあるが 3 kW をターゲットとして充電装置の安全面での改良を図る。

C 効率について

この実験での最大伝送効率は 78%であった。給電エリア全域で 70%以上を達成できており高効率なポジションフリー給電システムとして十分な性能を示すことができた。目標の 80%まであとわずかではあるが、送電電圧の最適化を進めることで以降の実験で達成を目指す。

D 電池温度について

3 次試作以降、急速充電電池に対応したことで、電池の各セルの温度をモニター出来るセンサが追加され、実験中に随時確認できる環境が構築できた。図 3.4-287 を見ると、10 分で温度上昇が $4\sim 5^\circ\text{C}$ という結果であった。急速充電電池は容量が 15 Ah で、充電開始電圧を高め状態から開始した影響もあり、実質的に 10~20 分の充電時間で満充電になってしまう。そのため、この実験では電池セルの最高温度は 36°C にとどまっており、使用温度範囲(環境温度) $0\sim 40^\circ\text{C}$ およびセル温度注意検出温度 50°C に対して余裕を持った状態で運用できた。

しかし、将来的に電池容量がこの 3 倍の仕様になった場合、充電時間が 30~60 分程度となり最大で 30°C の温度上昇が予想される。そのとき AUV の内機温度 25°C ならばセル温度が 55°C 程度になるので、その場合は充電電流を抑えるなどの対策が必要と考える。ただし電池仕様としては 80°C を超えない限り充電は可能であり、寿命面での劣化はあるが安全面

での問題はないので、その点を考慮して充電仕様を定めることとする。

3.4.3.4. 3 kW 給電実験（岸壁）

前述のとおり海水プールの実験では 3 kW の大電力をポジションフリーかつ高効率でワイヤレス給電できることが確認された。また、AUV のスラスタが駆動していても問題なく充電できることも実証した。そこで、潮流のある実際の海でも同じように充電できるか実験を行った。

【実験期間】 2022 年 2 月 14 日～2 月 25 日

3.4.3.4.1. 実験場所

海水プールに隣接する日本サルヴェージ株式会社門司支店所有の岸壁（田野浦 D 岸）にて行った。水深は 3~5 m（図 3.4-288 参照）。なお実験にあたって門司海上保安部への行事許可申請は日本サルヴェージより対応実施。

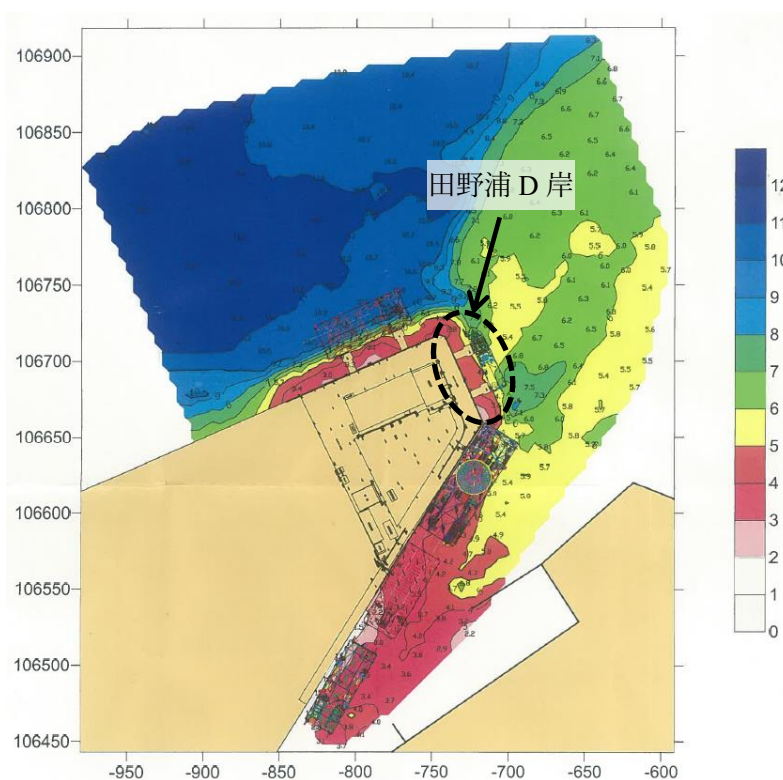


図 3.4-288 日本サルヴェージ周辺の水深（単位 m）

3.4.3.4.2. 実験方法

岸壁からクレーンで AUV を海に投入し、続いて送電コイル(充電スタンド)を投入して、岸壁からの距離を一定に保持した状態で設置した（図 3.4-289）。送電コイルには通信用ア

ンテナと通信タンクを装着し、充電制御を海中通信経由で実施できるように準備している。なお、波風が激しかった（12時の平均風速5.8 m/s、観測地点：八幡、気象庁データ）ため、図示していないが実際には写真（図 3.4-290）にあるように、AUV が送電コイルへ衝突しないよう、ガイドフレームを送電コイルに装着して実験を行った。AUV の上下左右方向の移動は制限されるが前後方向は制限されないため、送電コイル内に滞留するためスラスト駆動が必要な状況であることに変わりはない。実験系は図 3.4-278 に示したとおりだが、充電制御を無線（海中通信）で行った。

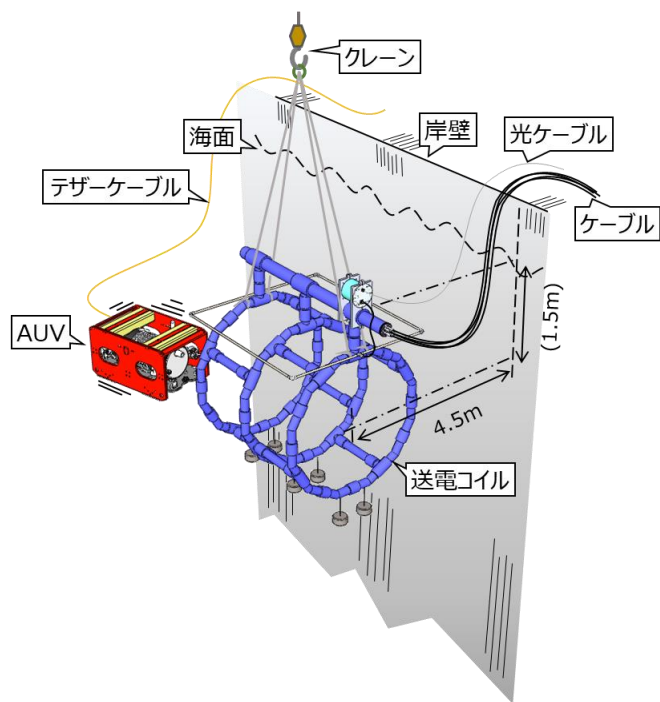
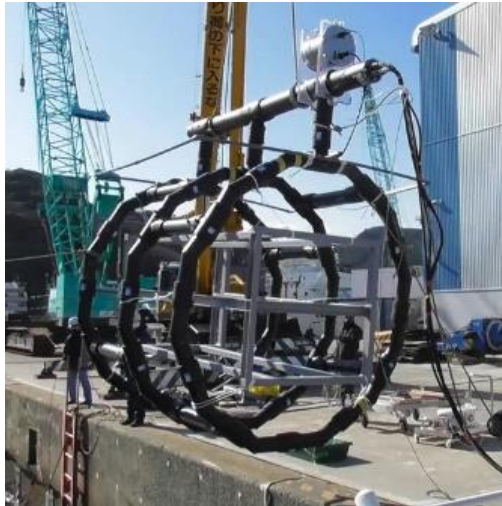


図 3.4-289 岸壁実験における送電コイル（充電スタンド）設置図



(a) 海中投入前の充電スタンド

(b) 海中設置後の充電スタンド



図 3.4-290 送電コイル（充電スタンド）設置状態

3.4.3.4.3. 実験結果

AUVはスラスタを駆動して自力で送電コイルに進入させ、常に給電エリア内に滞留するよう操作している状態で給電実験を行った（図 3.4-291）。ただし動特性実験時と同じく自律航行ではなく光ケーブル経由でオペレータが地上からコントロールして動かした。その結果を表 3.4-67、図 3.4-292 に示す。伝送効率 80%を超える実験結果を得ることができた。



(a) 海上から見た充電スタンドの中の AUV

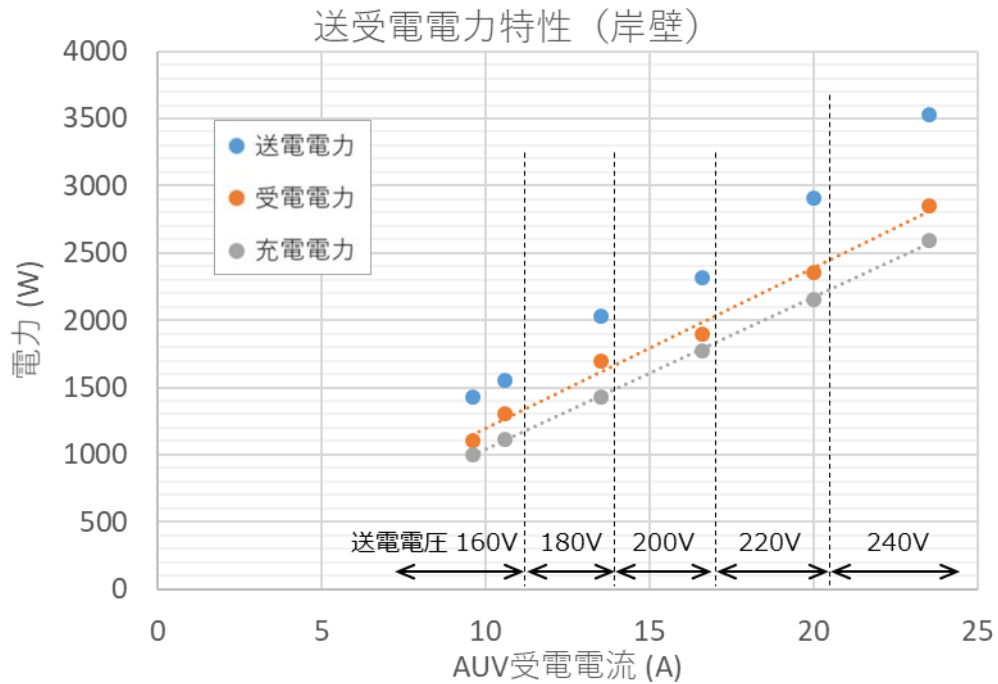


(b) 海中から見た充電スタンドの中の AUV

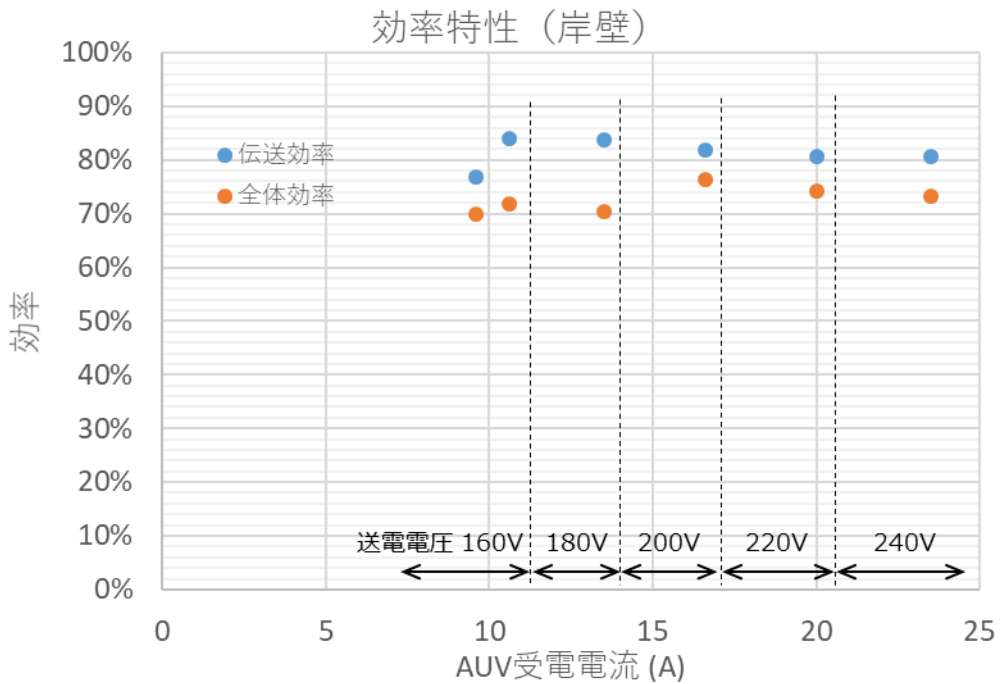
図 3.4-291 岸壁実験中の AUV

表 3.4-67 岸壁実験の結果 (AUV 受電電流最大時)

	AUV 受電電流 (A)	送電電力 (W)	受電電力 (W)	伝送効率 (%)	電池電圧 (V)	充電電力 (W)	充電器 効率 (%)	全体効率 (%)
岸壁	23.5	3530	2850	81	110.2	2589.7	93	73



(a) 電力特性のグラフ



(b) 効率のグラフ

図 3.4-292 岸壁実験の AUV 受電電流と電力および効率

図 3.4-293 は充電制御装置のログより電池電圧、AUV 受電電流、充電電流、受電電力、温度 (LM75b_temp1) の時間経過特性を示したものである。図 3.4-294 は AUV 装置のログから 6 軸の各スラスターの回転と電池電圧 (bat1)、AUV 消費電流 (curr1) を示したものである。図 3.4-295 は急速充電電池の BMU (Battery Management Unit) のログから総電圧、バッ

テリー電流、充電電力、各セルの電池平均温度、を示したものである。なおこのとき 2 度充電を実施しているのでグラフには山が 2 つ現れている。

これらのグラフから、潮流に逆らって AUV の位置を充電スタンドの中心に保つためにスラストが激しく駆動して AUV の消費電流が 2~10 A で変動しており、充電電流が常に 5A 以上変動していたことがわかる。バッテリー電流も激しく変動して、電池への充電電力が 1.5~2 kW 程度まで低下していることがわかる（海水プールでは 2.5 kW）。

しかしながら、このような厳しい環境下でも指示どおりに電流が制御されて、問題なく 3 kW の大電力の伝送（電池への充電電力としては 1.5~2 kW）に成功することができた。これにより、潮流のある実海域でも安定して給電ができることを実証できた。

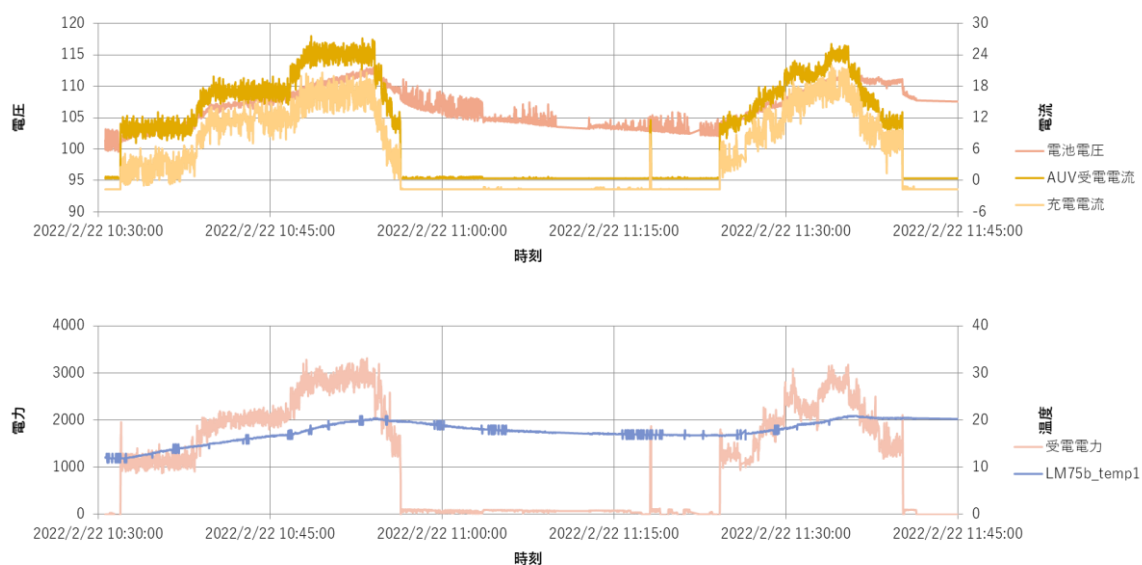


図 3.4-293 充電制御装置の電圧、電流、電力、温度ログ（岸壁実験）

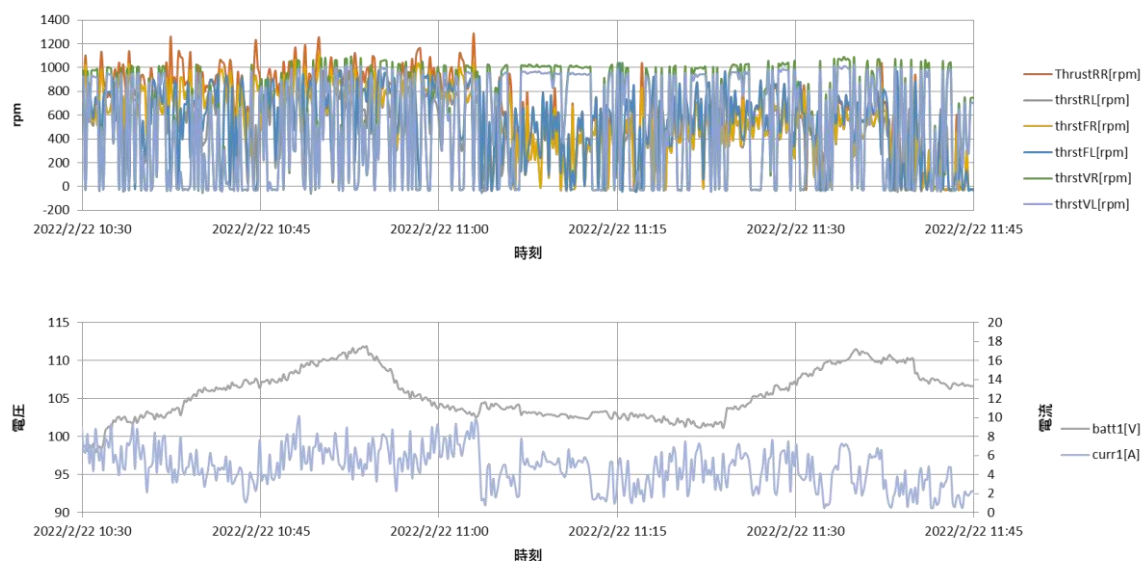


図 3.4-294 AUV 装置のスラスト回転数、電圧、電流ログ（岸壁実験）

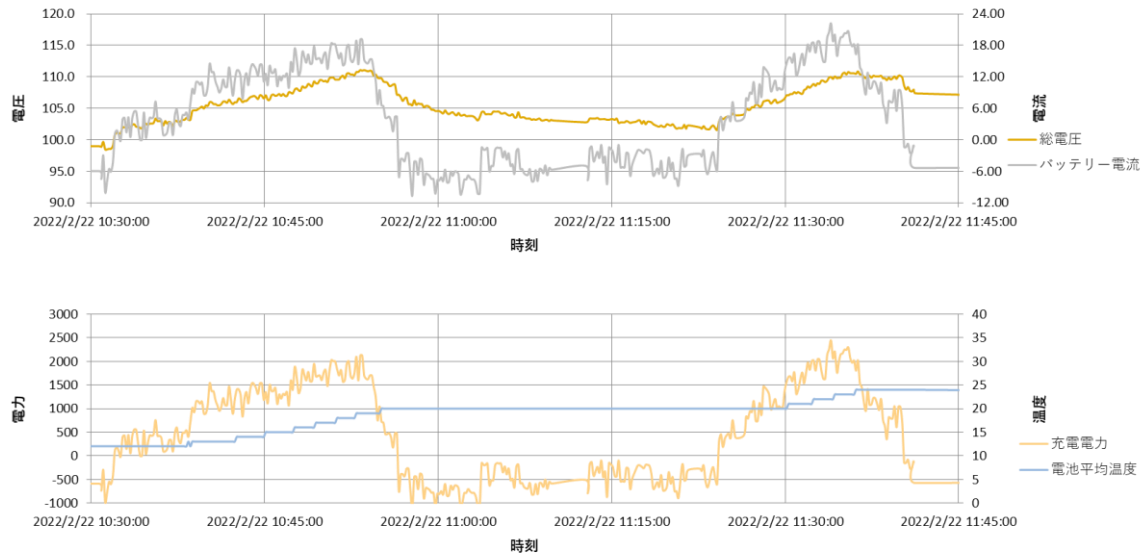


図 3.4-295 急速充電電池 BMU の電圧、電流、電力、温度ログ (岸壁実験)

3.4.3.4.4. 課題と考察

A 効率について

岸壁実験での伝送効率は 80 %を超え、海水プールよりも良い結果となった。

海水プールと岸壁で違いとして考えられる点は、海水プールでは送電コイルの開口面とプール壁面が十分に離せないため、鉄骨など金属建材の影響を受けている可能性があるが、岸壁ではコイル開口面側に遮るものがなく、コイルの性能が十分に発揮できていた可能性があるという点である。電磁界シミュレーションで送電コイルの設置場所による性能変化を検証し、設置環境の推奨条件を検討する必要がある。

B 運用面について

また、運用面の課題として、AUV を進入させるときの視認性がよくないこともわかった。実際の海中では遠くまで見通すことはできず、かなり近づかないと送電コイルがどこにあるのか AUV 側から確認できなかった。送電コイルに照明を付けて離れていても見つけやすくしたり、また送電コイル側にカメラを付けたりして送電コイルからも AUV の位置を確認できるようにするなど、使いやすい充電スタンドとしての工夫が必要であることが、実際の海で実験したことでわかった。

C 送電制御について

3.4.1.6.4 (送電制御システム) で説明した送電制御システムを本実験で実証した。閾値設定は表 3.4-68～表 3.4-70 のように電流に応じて交流安定化電源の電圧設定値が変わるようにしている。ほぼ同じ閾値設定だが条件に合わせて調整を施した。

C-1 有線通信での実験 (海水プール)

図 3.4-278 の有線通信 (A を繋いで B を外した状態) で実験した時の充電制御装置とパワーアナライザのログを図 3.4-296 に示す。パワーアナライザは図 3.4-278 には図示していないが、送電側の交流電源と整合回路の間で電圧と電流をモニタリングしている。なお AUV はロープで固定せず充電スタンド中央付近に位置保持するよう駆動している状態である (動特性)。

図 3.4-296①のとき

0 A → 160 V 設定 → 10 A → 11 A → 12 A → 13 A 指令 → 180 V へ上昇 → 13 A → 14 A → 16 A 指令 → 200 V へ上昇 → 16 A → 17 A → 20 A 指令 → 220 V へ上昇 → 20 A → 21 A、0 A → 60 V へ降下

図 3.4-296②のとき

0 A → 160 V 設定 → 11 A → 12 A → 13 A 指令 → 180 V へ上昇 → 13 A → 14 A → 16 A 指令 → 200 V へ上昇 → 16 A → 17 A → 20 A 指令 → 220 V へ上昇 → 20 A → 21 A → 22 A 指令 → 240 V へ上昇 → 22 A → 23 A → 24 A

図 3.4-296③のとき

240 V 設定 → 21 A → 20 A 指令 → 20 A → 220 V へ降下 → 17 A → 16 A 指令 → 16 A → 200 V へ降下 → 14 A → 13 A 指令 → 13 A → 180 V へ降下 → 12 A → 11 A 指令 → 11 A → 160 V へ降下 → 10 A → 0 A → 60 V へ降下

設計どおり、電流値が Zone をまたぐ場合に送電電圧が切り替わる動作が実施されたことがわかる。

表 3.4-68 送電制御の閾値設定 (有線通信・海水プール)

Zone		0	1	2	3	4	5	out
電流 (A)	下限	0	0	12	14	17	21	24
	上限	0	12	14	17	21	24	-
電圧設定値 (V)		60	160	180	200	220	240	N/A

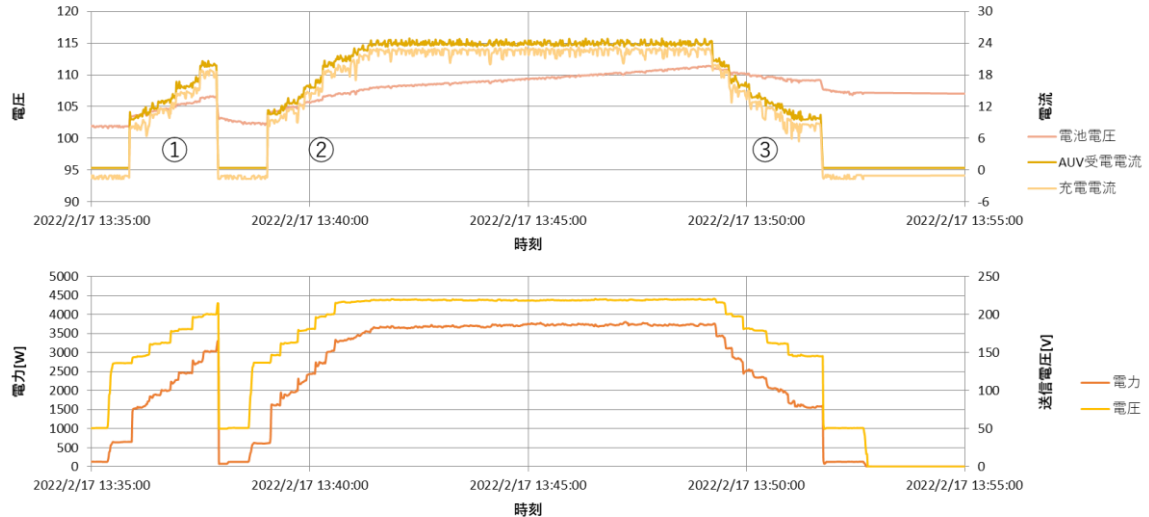


図 3.4-296 送電制御時の電圧、電流、電力（有線通信・海水プール）

Zone1→Zone2 への遷移時のログを図 3.4-297 に示す。Zone をまたぐ電流値を指令した後、電圧をすぐに変更し、電流はその 4 秒後に変更するよう制御したが、意図どおりに動作していることが確認できた。また他の Zone 間でも同様に動作できていることも確認した。

次に Zone5→Zone4 への遷移時のログを図 3.4-298 に示す。Zone をまたぐ電流値を指令した後に電流値がすぐに変更され、その 4 秒後に電圧を変更するよう制御したが、意図どおりに動作していることが確認できた。

このことから、電流を増やすときも減らすときも問題なく制御できたことがわかる。

```

input data = 1573
wirte data = 1573

node_visa_flag = 0
data is buf[1488] = new_target_value = 1573

data error (←ここでのdata error はSQLに非格納のデータという意味なので無視)
data is buf[1489] = 9816,VOLT X2,

visa_volt =>180
ADDR : TCPIP0::192.168.0.112::inst0::INSTR
SEND : volt 180
RECV :
ADDR : TCPIP0::192.168.0.112::inst0::INSTR
SEND : volt?
RECV : +1.80000E+02
コマンド一致

conn.writ yes -> y
data is buf[1490] = 0, 13360, 1453, 11.15, 17.251, 2756, 2733, 2311, 9.429, 2711, 1438, 21.75, 0.00, 0.00, 192.95, 2968, 5.68, 6.46, 1246.4,
data is buf[1491] = 0, 13380, 1395, 10.72, 15.817, 2757, 2734, 2299, 9.630, 2712, 1438, 21.75, 0.00, 0.00, 192.95, 3081, 4.85, 5.04, 973.1,

data is buf[1492] = match command and response
data error
data is buf[1493] = 0, 13390, 1404, 10.79, 15.831, 2758, 2735, 2284, 9.725, 2712, 1438, 21.75, 0.00, 0.00, 192.95, 3063, 4.99, 4.96, 957.6,
data is buf[1494] = 0, 13400, 1518, 11.63, 15.582, 2762, 2738, 2186, 10.342, 2716, 1573, 21.62, 0.00, 0.00, 192.95, 3015, 5.34, 5.02, 968.9,
data is buf[1495] = 2222, 0x3a, 0xbb, 0xb8, 0xb9, 0x4, 0xc, 0xc, 0x40, 0x1e, 0x19, 0x1c, 0x0, 0x1, 0xf9, 0x9, 0x3a, 0x1e, 0x1e, 0x1b, 0x1b, 0x19,
data is buf[1496] = 0, 13410, 1589, 12.16, 17.032, 2762, 2738, 2224, 10.103, 2716, 1573, 21.62, 0.00, 0.00, 192.95, 2944, 5.85, 5.65, 1090.1,

```

←充電電流13A 設定入力

送電側の設定を180Vに

送電側の設定を確認

←ライトコマンドとステイタスが一致

←ライトコマンドとステイタスが一致を受電装置が確認

ログ4個経過 = 4秒後

←充電電流12A→13A変更

図 3.4-297 Zone1→Zone2 への遷移時のログ（有線通信）

```

data is buf[2174] = 0, 19440, 2805, 21.16, 22.943, 2934, 2909, 706, 19.666, 2883, 2794, 25.00, 0.00, 0.00, 291.58, 2667, 7.88, 7.82, 2279.4,

input data = 2659
wirte data = 2659
node visa_flag = 0
data is buf[2175] = new_target_value = 2659

data error
data is buf[2176] = 0, 19450, 2682, 20.25, 23.500, 2931, 2906, 831, 18.879, 2880, 2659, 25.00, 0.00, 0.00, 291.58, 2702, 7.62, 7.93, 2311.4,
data is buf[2177] = 0, 19460, 2620, 19.79, 22.371, 2931, 2906, 812, 18.998, 2880, 2659, 25.88, 0.00, 0.00, 291.58, 2757, 7.22, 7.36, 2147.5,
data is buf[2178] = 0, 19470, 2707, 20.43, 22.308, 2926, 2902, 1051, 17.493, 2876, 2659, 25.88, 0.00, 0.00, 291.58, 2704, 7.61, 7.44, 2168.7,
data is buf[2179] = 0, 19480, 2593, 19.59, 22.617, 2929, 2903, 904, 18.419, 2878, 2659, 24.00, 0.00, 0.00, 291.58, 2767, 7.15, 7.41, 2160.2,
data is buf[2180] = 9816,VOLT X4,

visa_volt =>220
ADDR : TCPiP0::192.168.0.112::inst0::INSTR
SEND : volt 220
RECV :
ADDR : TCPiP0::192.168.0.112::inst0::INSTR
SEND : volt?
RECV : +2.20000E+02
コマンド一致

conn.writ yes -> y
data is buf[2181] = 0, 19490, 2723, 20.55, 22.620, 2926, 2901, 1053, 17.480, 2875, 2659, 24.00, 0.00, 0.00, 291.58, 2532, 8.86, 7.39, 2156.0,
data is buf[2182] = 0, 19510, 2593, 19.59, 23.865, 2929, 2905, 843, 18.803, 2879, 2659, 25.25, 0.00, 0.00, 291.58, 2536, 8.83, 8.84, 2577.4,
data is buf[2183] = match command and response

```

図 3.4-298 Zone5→Zone4 への遷移時のログ（有線通信）

C-2 無線（海中通信）での実験（海水プール）

図 3.4-278 の無線（海中通信、B を繋いで A を外した状態）で実験した時の充電制御装置とパワーアナライザのログを図 3.4-299 に示す。なお AUV は C-1 と同様にロープで固定せず充電スタンド中央付近に位置保持するよう駆動している状態である（動特性）。

図 3.4-299①のとき

0 A→160 V 設定→10 A→11 A→12 A→13 A 指令→180 V へ上昇→13 A→14 A→16 A 指令→200 V へ上昇→16 A→17 A→20 A 指令→220 V へ上昇→20 A→21 A→22 A 指令→240 V へ上昇→22 A→23 A→24 A

図 3.4-299②のとき

240 V 設定→指令ミス→0 A→即時 60 V へ降下

実験中、電流を下げるときに意図せず指令ミスで電流が停止したが、充電装置に高電圧がかかることを防ぐ目的で準備していた電圧低下制御が即座に働き、図らずも安全面での確認もできた。

表 3.4-69 送電制御の閾値設定（無線・海水プール）

Zone		0	1	2	3	4	5	out
電流 (A)	下限	0	0	12	14	17	21	24
	上限	0	12	14	17	21	24	-
電圧設定値 (V)		60	160	180	200	220	240	N/A

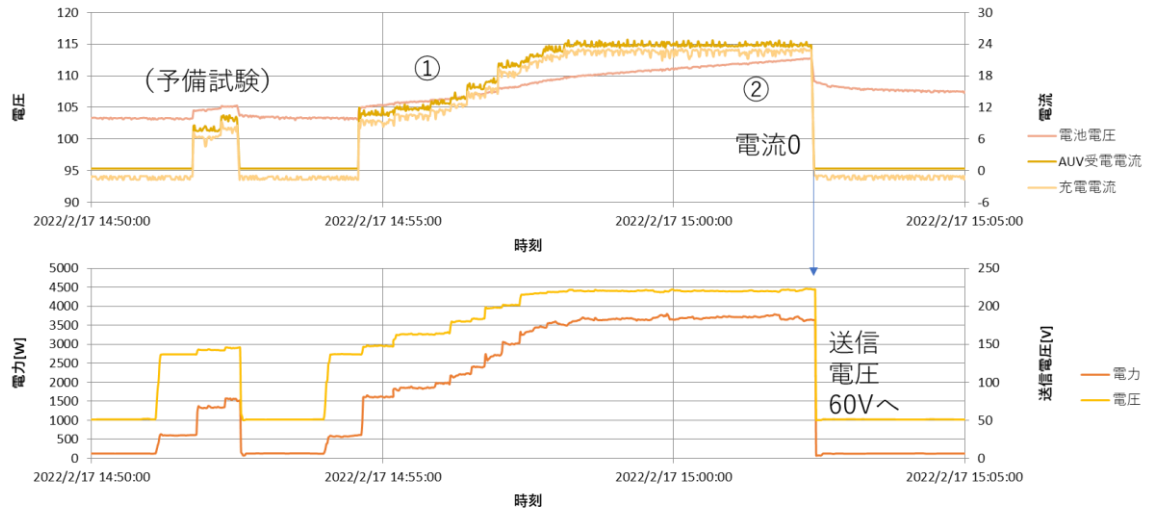


図 3.4-299 送電制御時の電圧、電流、電力（海中通信・海水プール）

C-3 無線（海中通信）での実験（岸壁）

場所を岸壁に変えて、C-2 同様に無線で充電制御を実施した。2 回行い、まず 1 回目の充電制御装置とパワーアナライザのログを図 3.4-300 に示す。このときは潮流がある中で AUV のスラストが激しく駆動して位置保持をしている状態であったが、問題なく動作していることが確認できた。

図 3.4-300 の電流を増加させているとき

0 A → 160 V 設定 → 10 A → 11 A → 12 A → 14 A 指令 → 180 V へ上昇 → 14 A → 15 A → 16 A 指令 → 200 V へ上昇 → 16 A → 17 A → 20 A 指令 → 220 V へ上昇 → 20 A → 21 A → 22 A 指令 → 240 V へ上昇 → 22 A → 23 A → 24 A

図 3.4-300 の電流を減少させているとき

240 V 設定 → 21 A → 20 A 指令 → 20 A → 220 V へ降下 → 17 A → 16 A 指令 → 16 A → 200 V へ降下 → 15 A → 14 A 指令 → 14 A → 180 V へ降下 → 12 A → 11 A 指令 → 11 A → 160 V へ降下 → 0 A → 60 V へ降下

表 3.4-70 送電制御の閾値設定（無線・岸壁）

Zone		0	1	2	3	4	5	out
電流 (A)	下限	0	0	12	15	17	21	24
	上限	0	12	15	17	21	24	-
電圧設定値 (V)		60	160	180	200	220	240	N/A

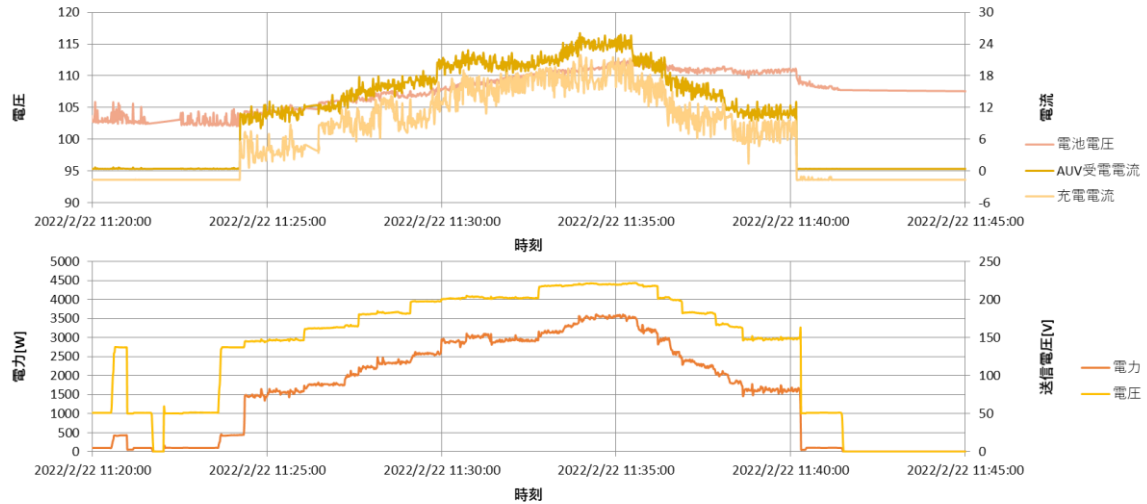


図 3.4-300 送電制御時の電圧、電流、電力（海中通信・岸壁・1回目）

次に2回目の実験結果を図 3.4-301 に示す。強風が収まらないため AUV をガイドフレームにロープで半固定状態にした。1 回目よりもスラストの駆動が減って充電電流が安定していることが見てわかる。本実験により、岸壁で2回企画して2回とも成功したことで、実海域でも海中通信による充電制御ができることが実証された。

図 3.4-301 の電流を増加させているとき

0 A → 160 V 設定 → 10 A → 11 A → 12 A → 14 A 指令 → 180 V へ上昇 → 14 A → 15 A → 16 A 指令 → 200 V へ上昇 → 16 A → 17 A → 20 A 指令 → 220 V へ上昇 → 20 A → 21 A → 22 A 指令 → 240 V へ上昇 → 22 A → 23 A → 24 A

図 3.4-301 の電流を減少させているとき

240 V 設定 → 21 A → 20 A 指令 → 20 A → 220 V へ降下 → 17 A → 16 A 指令 → 16 A → 200 V へ降下 → 15 A → 14 A 指令 → 14 A → 180 V へ降下 → 12 A → 11 A 指令 → 11 A → 160 V へ降下 → 10 A

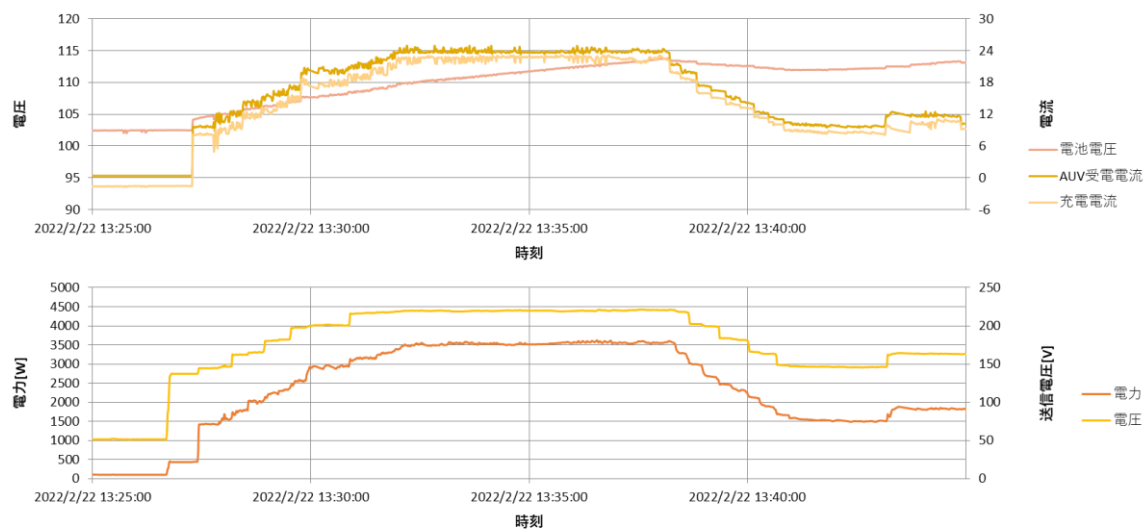


図 3.4-301 送電制御時の電圧、電流、電力（海中通信・岸壁・2回目）

C-4 送電制御の課題

C-4-1 AUV の位置に対する送電側電圧設定値の最適化

AUV の位置によりコイル間の結合が変わるため、送電側電圧設定値の最適値は場所により変動する。静特性の実験における AUV とコイルの位置関係と送電側電圧設定値および充電電流設定値の関係を示すと表 3.4-71 のようになる。

これからわかるように中央から大きく動いたとき（例えばコイルと AUV の角度が変わったとき）は同じ閾値で運用しようとするのが難しい。将来的には何等かの手段で AUV とコイルの位置関係を検出し、送電制御を行っていくことが望ましいと考えられる。

表 3.4-71 AUV の位置による送電電圧設定値と充電電流設定値

		送電電圧設定値 (V)			
		静特性① (中央)	静特性② (上寄せ)	静特性③ (出入口)	静特性④ (45°)
電流設定値 (A)	5			160	140
	6			160	140
	7			160	140
	8	160	160	160	140
	9	160	160	160	140
	10	160	160	160	140
	11	160	180	160	140
	12	180	180	160	140
	13	180	180	160	160
	14	200	200	180	160
	15	200	200	180	160
	16	200	200	180	160
	17	220	220	180	180
	18	220	220	200	180
	19	220	220	200	180
	20	220	240	200	180
	21	240	240	220	190
	22	240	240	220	190
	23	240	250	220	200
	24	240	250	220	200

C-4-2 送電電圧が変わらない現象について

今回の試験では水中通信で2回同じパターンで送電制御が働かなかったケースがあった。その時のログを図 3.4-302 に示す。

発生時は、電流を増加させて Zone が遷移するときで、意図した動作は、電流値を指令後すぐに送電電圧を1段階上昇させ、その4秒後に電流が指令した値に変わるというものだったが、この時は送電電圧が変更されずに電流が4秒後に変更されるという動作になっていた。電流が増えて、状態遷移としては Zone が切り替わったという判断になるので、いったん電流を元の値に戻して状態遷移を元の Zone に戻し(そこで電圧を下げる動作は確認できたので Zone 管理は正しく行われている)、その後再度同じ動作を行うことでリカバリはできた。

原因としてはソフトウェアのバグまたは通信の不具合であるが、現時点でソースコード上からはバグが発見できず、また実験室で再現実験を試みたが発生しなかった。通信の不具合で充電制御装置からメッセージが送信されなかった可能性はあるが、同じ現象が2回発生していることから偶発的ではない可能性が排除できない。

この現象は実験室でも再現せず、3.4.3.5.4 でその後の対応について述べる。

```
data is buf[519] = 0, 5110, 2770, 20.90, 22.936, 2873, 2847, 1343, 15.653, 2823, 2659, 18.38, 0.00, 0.00, 265.96, 2427, 9.63, 8.82, 2345.1,
input data = 2794 ←充電電流21A設定入力
wirte data = 2794
node_visa_flag = 0
data is buf[520] = 0, 5120, 2725, 20.57, 25.535, 2862, 2837, 1787, 13.360, 2814, 2659, 18.38, 0.00, 0.00, 265.96, 2424, 9.65, 9.91, 2634.4,
data is buf[521] = new_target_value = 2794 ←この後送信電圧変更コマンドが送出されない
data error
data is buf[522] = 0, 5130, 2646, 19.98, 25.067, 2862, 2837, 1688, 13.480, 2814, 2659, 18.38, 0.00, 0.00, 265.96, 2469, 9.32, 9.61, 2554.8,
data is buf[523] = 0, 5140, 2439, 18.45, 23.948, 2874, 2850, 1234, 16.340, 2826, 2659, 18.38, 0.00, 0.00, 265.96, 2610, 8.29, 8.83, 2349.0,
data is buf[524] = 0, 5150, 2770, 20.90, 24.800, 2874, 2850, 1302, 15.911, 2825, 2659, 18.38, 0.00, 0.00, 265.96, 2355, 10.15, 9.39, 2496.6,
data is buf[525] = 0, 5160, 2590, 19.57, 25.207, 2872, 2846, 1397, 15.313, 2823, 2659, 18.38, 0.00, 0.00, 265.96, 2475, 9.28, 9.82, 2611.1,
data is buf[526] = 0, 5170, 2632, 19.88, 24.829, 2877, 2851, 1248, 16.252, 2828, 2794, 18.38, 0.00, 0.00, 265.96, 2385, 9.93, 9.62, 2558.7,
```

図 3.4-302 送電電圧変更のコマンド未送出時のログ

C-4-3 通信の安定性について

海中通信で ping 応答について確認した結果を図 3.4-303 に示す。海水プールでは 16 回、岸壁では 48 回、ランダムに測定している。

海水プールでは遅延のばらつきは少ないが、岸壁では遅延が 1 秒を超えることがあることが確認できた。ただし応答がなくなることはなかった。岸壁では遅延のばらつきが大きいことから、時折、回線状況が悪化していると理解できる。岸壁実験ではガイドフレームを使用していたものの波が強く海中でもかなりの揺れがあり、その影響でアンテナ間の距離が大きく変動し、遅延が大きくなる瞬間があったと推測できる。

この現象が C-4-2 の原因になった可能性もあるため、リカバリーや再送方法の検討を行って、以降の実験ではより安定して動作させる工夫を盛り込んでいく。

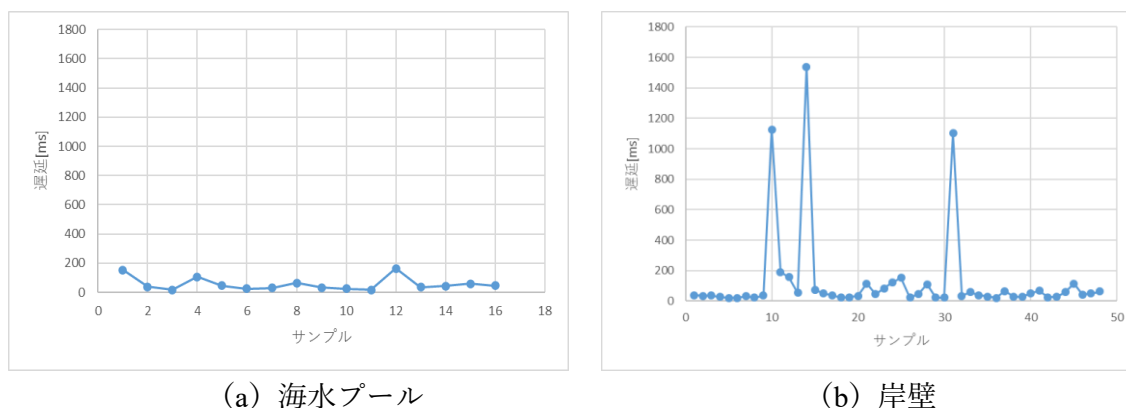


図 3.4-303 海中通信時の ping 応答の遅延

3.4.3.5. 実海域実験

海中に吊り下げた充電スタンドに向けて AUV を前進させ、充電スタンドに進入後、充電を開始して 3 kW の電力伝送を行い、充電停止後に AUV を充電スタンドから後進して退出させる一連の動作ができることを実証した実験について以下に説明する。

【実験期間】 2022 年 7 月 4 日～7 月 8 日

3.4.3.5.1. 実験場所

静岡県沼津市にある株式会社 OKI コムエコーズ所有の計測バージ、SEATEC II を実験場に選定した。水深 32 m あり実海域実験にふさわしいこと、バージ内の開口部にて実験を行うため天候に左右されないこと、潜水作業、クレーン作業、水中撮影など実験サポートが十分に得られること、またデモンストレーションとして見学者に見ていただきやすい環境であることが選定理由である。SEATEC II は水深 32 m の地点に係留されており、長さ 30 m、幅 13 m の実験専用バージである。内部の開口部には海面がそのまま露出しており、室内環境のまま実際の海を使った実験が可能な施設である。

図 3.4-304 に実験場所の地図を、図 3.4-305 に SEATEC II の係留位置を、図 3.4-306 に SEATEC II の外観と内部にある開口部 (7.5 m × 3 m) の写真を示す。



図 3.4-304 実海域実験の場所（静岡県沼津市、株式会社 OKI コムエコース）

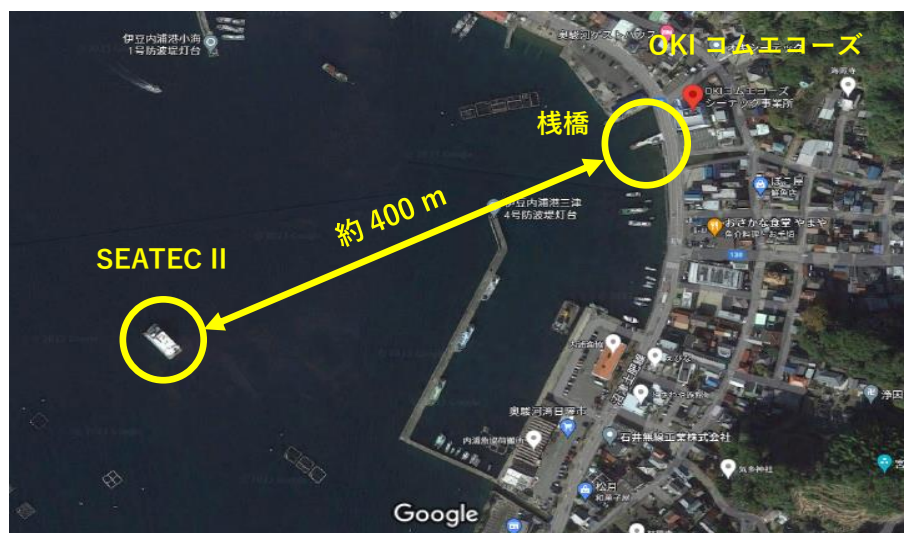


図 3.4-305 計測バージ「SEATEC II」係留位置



(a) 計測バージ「SEATEC II」外観

(b) 内部の開口部

図 3.4-306 SEATEC II 外観と開口部の写真

3.4.3.5.2. 実験方法

3.4.3.4 と同じく、急速充電電池を搭載し共振周波数 1.5 kHz で 3 kW の電力伝送が可能な 3.3.7.3 の 3 kW 用給電システムを使う。機器接続図（図 3.4-307）のとおり充電制御は海中通信経由で行う。送電コイルに通信用アンテナと通信機器を搭載したタンクを取り付けた充電スタンドは、図 3.4-308 に示すように開口部から送電コイル中心が海面下 3.2 m に位置するようにクレーンで吊り下げて図 3.4-309 のように四方からロープを張って固定した。

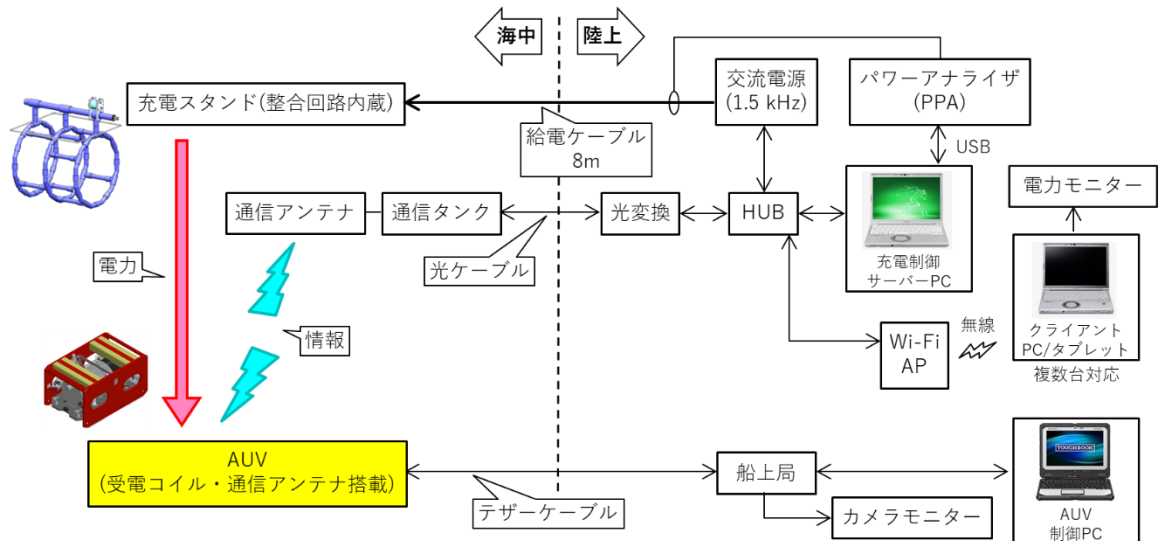


図 3.4-307 実海域実験の機器接続図

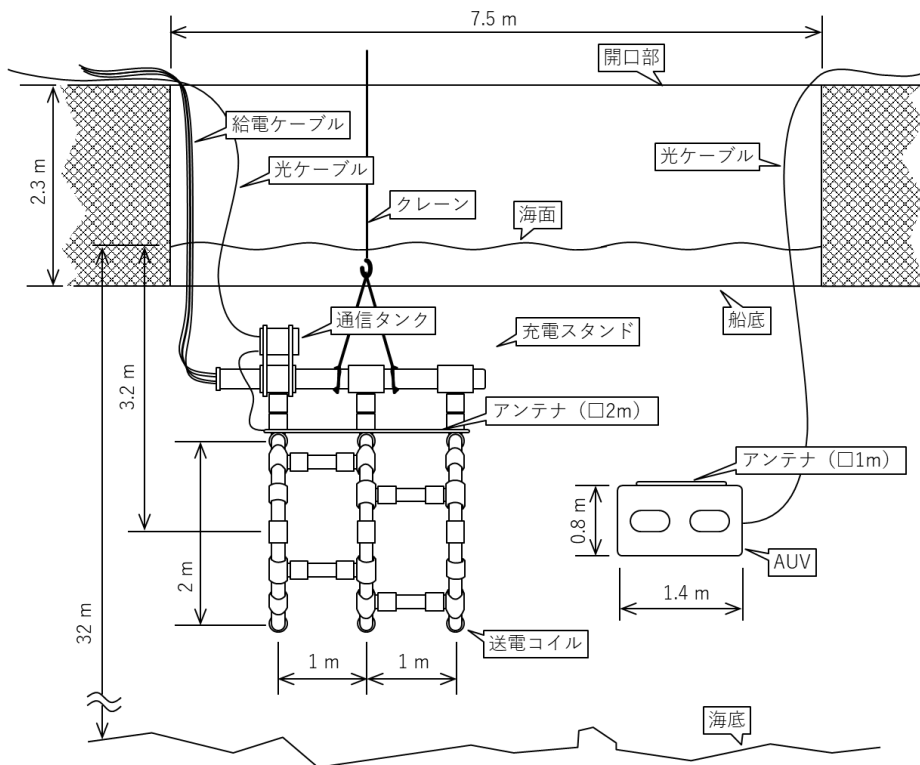
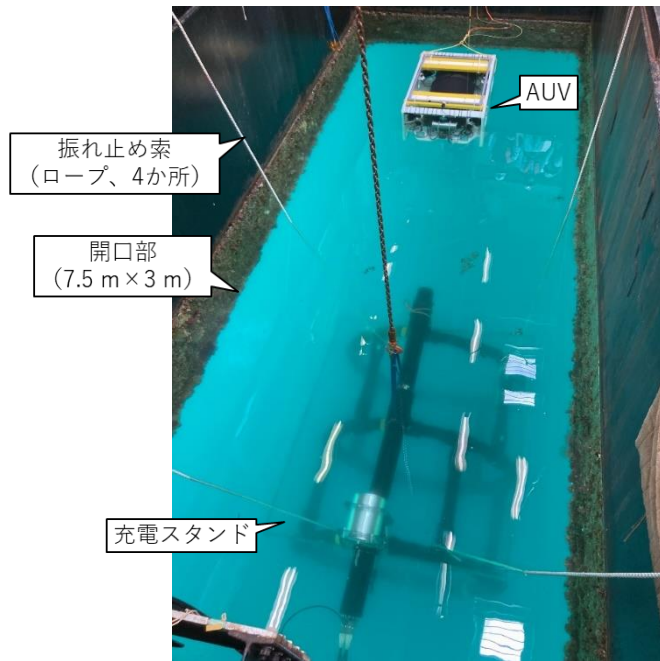


図 3.4-308 実海域実験の充電スタンド設置図



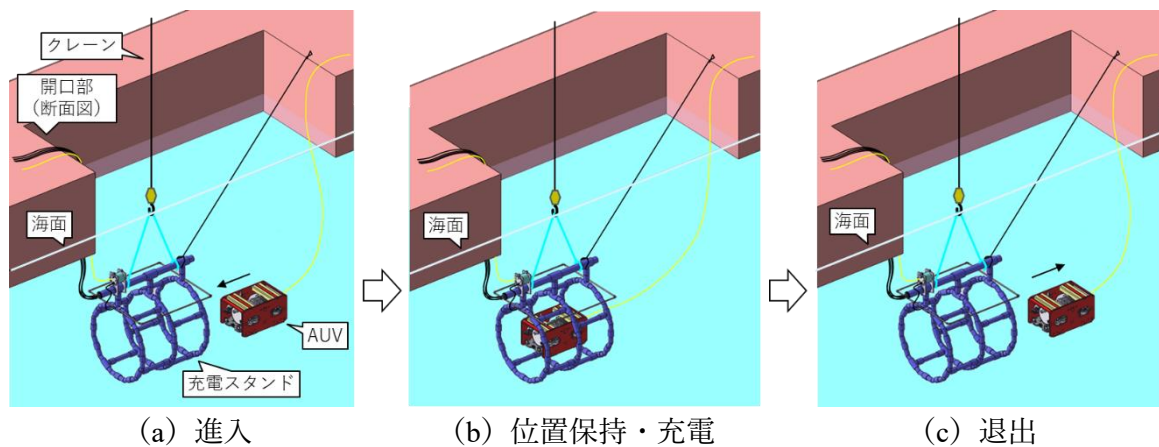
(b) 陸上側機器

(a) 充電スタンド

図 3.4-309 実海域実験の機器設置状況

実験の内容は 3.4.3.4 の岸壁実験とほぼ同じであるが、充電スタンドの設置環境に大きな違いがある。この実験では充電スタンドの周囲に障害物がなく、海底との距離も離れているため実海域実験として十分に成り立ち、またガイドフレームを使用しないためポジションフリーも実証できる。

この実海域環境において、図 3.4-310 に示すように、まず充電スタンドから数 m 離れた位置から AUV を充電スタンドに向かって前進させ、次に充電スタンド内に進入して位置保持しているところへ充電を行い、充電終了後、AUV を後退させて一連の動作を完了とする。なお AUV は光ケーブル経由で地上のオペレータが操作する(以降 ROV モードと呼ぶ)ため自律航行は実施していない。位置保持動作もオペレータがコントローラーでスラスト回転数を調節しながら手動で行う。



(a) 進入

(b) 位置保持・充電

(c) 退出

図 3.4-310 実海域実験の実験方法

3.4.3.5.3. 実験結果

A 進入～充電～退出の一連動作について

進入から退出までの一連の動作を確認した結果を表 3.4-72 にまとめた。進入中の AUV の様子を図 3.4-311 に、位置保持中の AUV を図 3.4-312 に、3 kW 達成時のモニター画面を図 3.4-313 に示す。逐次更新される画面表示の、ある瞬間を捉えたものである。

すべての動作を問題なく実行できたことで、本研究で開発したシステムが、実海域においてもポジションフリーかつ 3 kW の大電力ワイヤレス給電を実現できることが実証できた。

表 3.4-72 実海域実験の動作確認結果

項目	結果	判定	備考
1 充電スタンドに進入	衝突なく進入できた	OK	ROV モード
2 充電スタンド内で位置保持	はみ出しなし	OK	ROV モード
3 海中通信リンク確立	7~10 Mbps	OK	PHY レート
4 電源供給開始	充電制御回路起動	OK	電圧 64V 印加
5 受電側データ取得	モニター表示成功	OK	海中通信
6 充電開始	8 A から開始	OK	受電電力 0.8 kW
7 充電電流を増加	最大 25.5 A	OK	送電制御成功
8 最大電力の確認	3 kW 達成	OK	効率 70~75%
9 充電電流を減少、停止	25.5 A → 0 A へ	OK	送電制御成功
10 充電スタンドから退出	衝突なし	OK	ROV モード

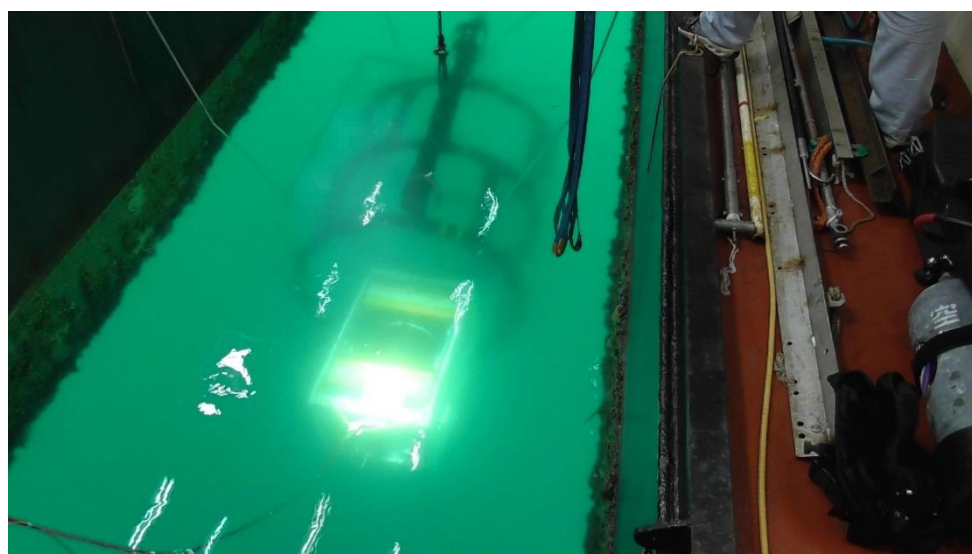


図 3.4-311 充電スタンドに進入中の AUV

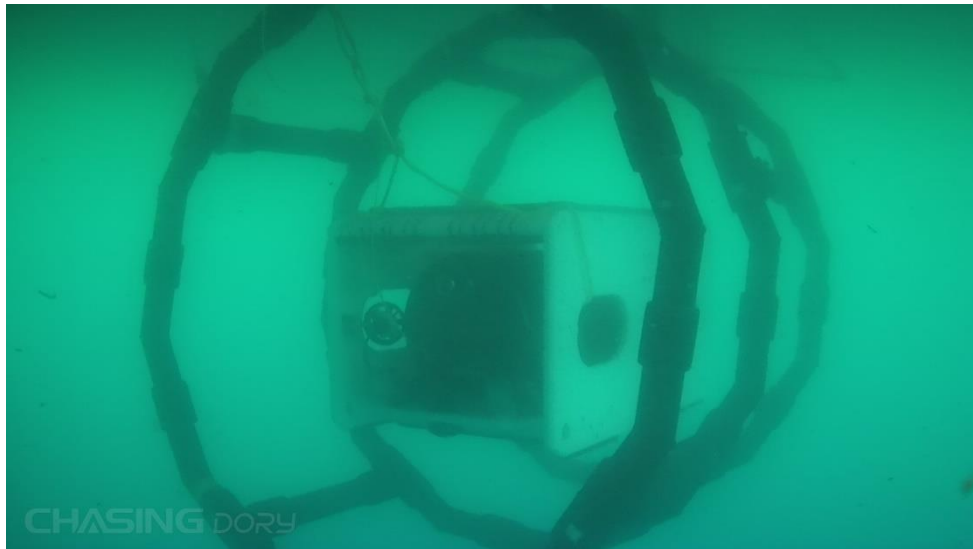


図 3.4-312 充電スタンド内で位置保持中の AUV

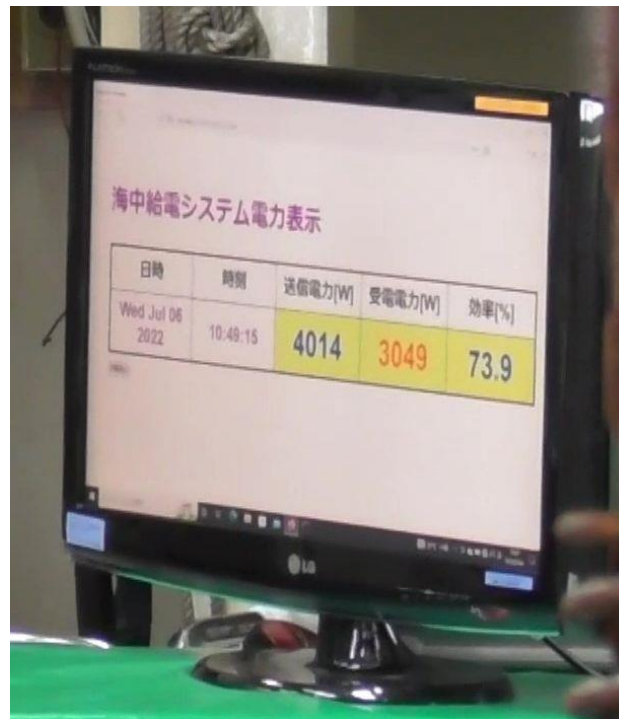


図 3.4-313 3 kW 達成時のモニター画面表示（受電電力 3049 W、効率 73.9%）

B 位置保持中に充電しているときの電力および効率

3 kW 電力伝送時の各電力のログを図 3.4-314 に、効率等のデータを図 3.4-315 に示す。また、そのときの各スラスタの回転数を図 3.4-316 に、電池電圧と AUV 消費電流を図 3.4-317 に示す。これらのグラフより 13:34~13:50 まで 3 kW の電力が伝送できており、そのときの効率が 70~75%であることがわかる。また充電中もスラスタが激しく駆動してい

て AUV の消費電流の変動も大きいですが、その中でも電池電圧が順調に増えていることから正しく充電できていたことが見てわかる。なお等価抵抗値については別途説明する。

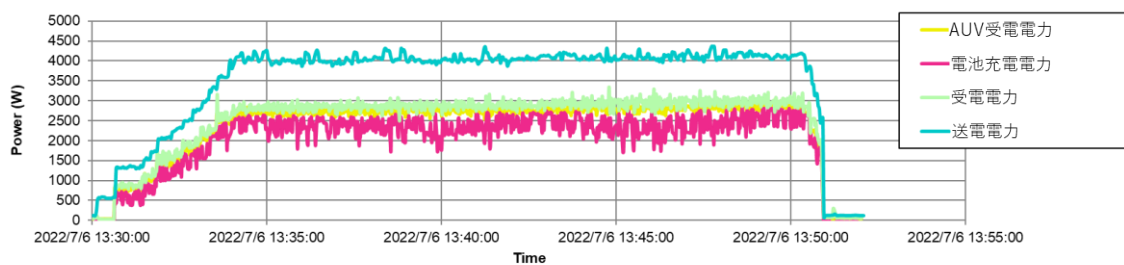


図 3.4-314 実海域実験中の電力ログ

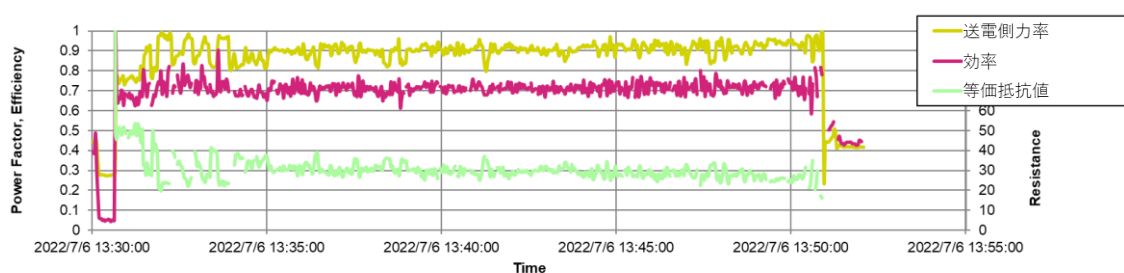


図 3.4-315 実海域実験中の送電側力率、効率、等価抵抗値

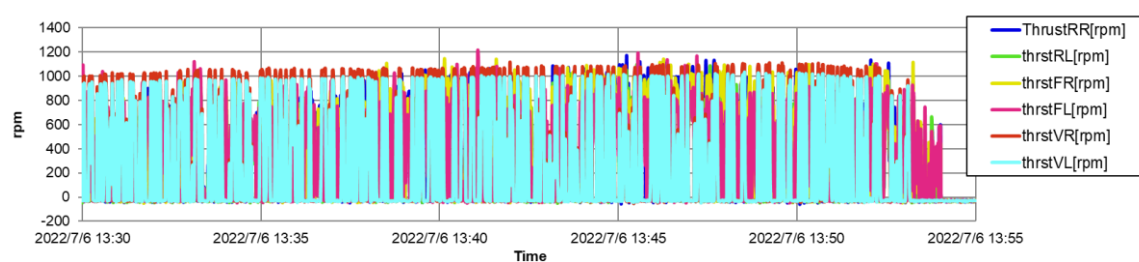


図 3.4-316 実海域実験中のスラスト回転数のログ

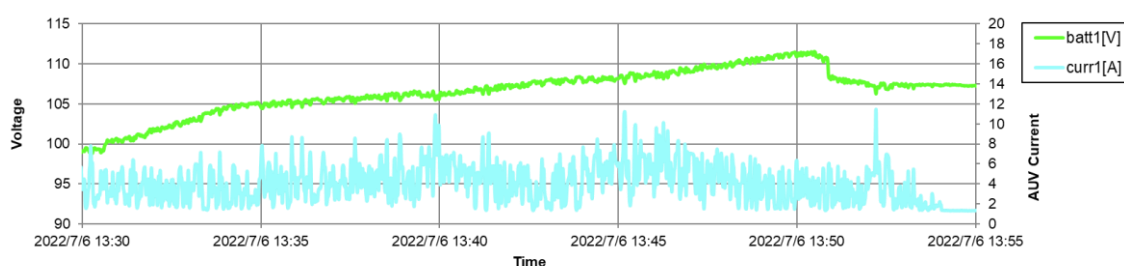


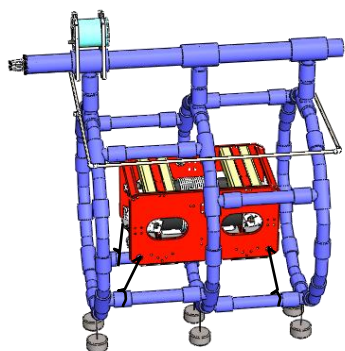
図 3.4-317 実海域実験中の電池電圧、AUV 消費電流のログ

C 静特性測定結果

位置保持動作中は AUV が充電スタンドの中からはみ出したり、送電コイルに衝突した

りするような激しい位置変動はなかった。給電できるエリアぎりぎりの充電性能を実海域においても確認するため、3.4.3.3の海水プールの実験と同じく、AUVの位置をロープで固定して静特性を測定した。その結果を図 3.4-318～図 3.4-321 に示す。

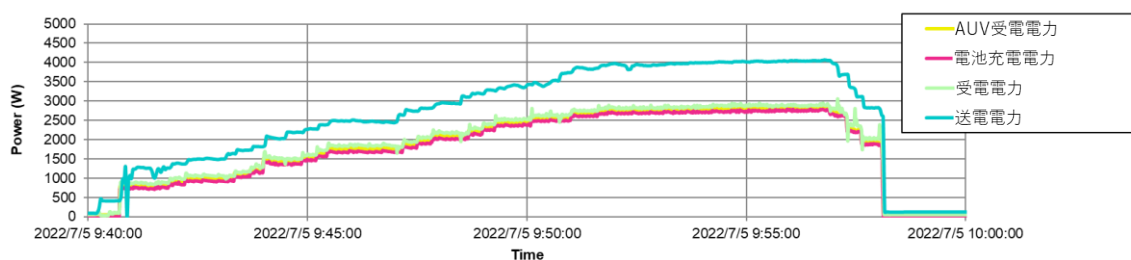
いずれの位置においても最大電力 2.9 kW 以上、効率 70%以上あり、あらためて本給電システムがポジションフリーを実現できていることが実証された。



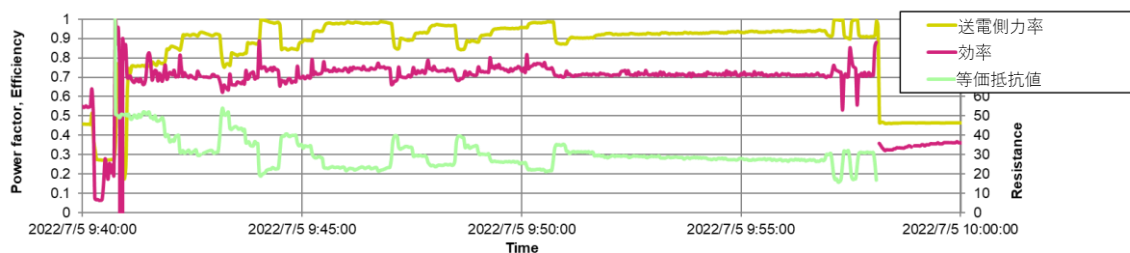
(a) 配置図



(b) 実際の配置

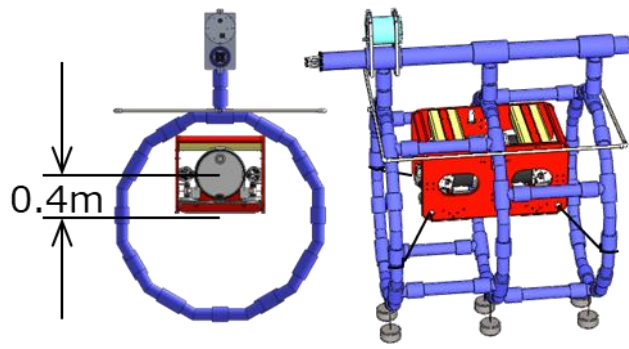


(c) 静特性 (中心) 測定時の電力ログ

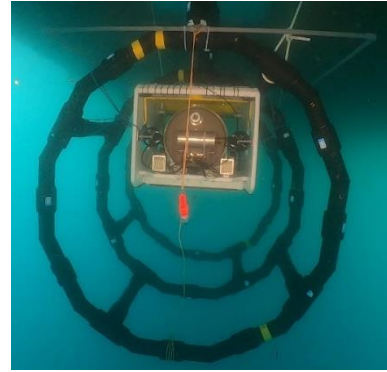


(d) 静特性 (中心) 測定時の送電側力率、効率、等価抵抗値

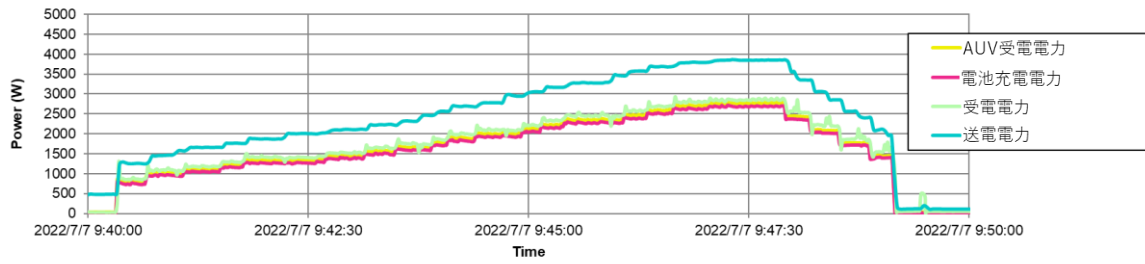
図 3.4-318 中心位置における静特性測定結果 (実海域実験)



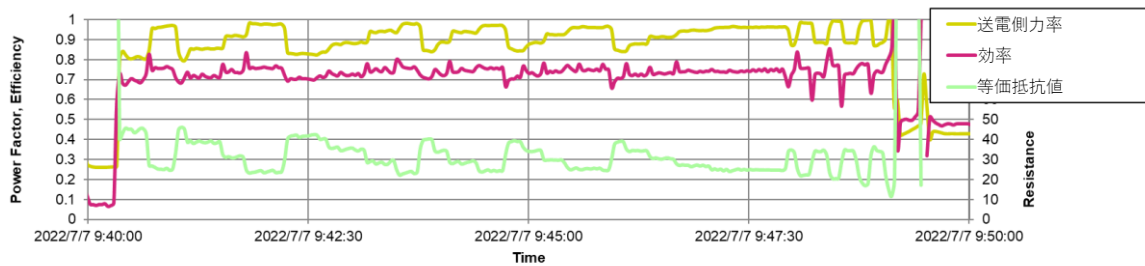
(a) 配置図



(b) 実際の配置

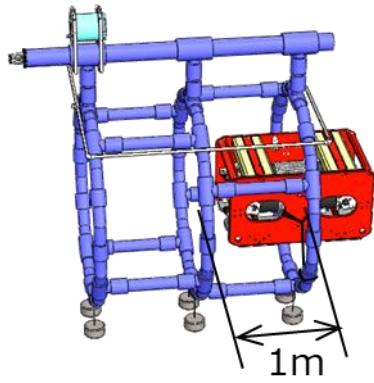


(c) 静特性（上端）測定時の電力ログ

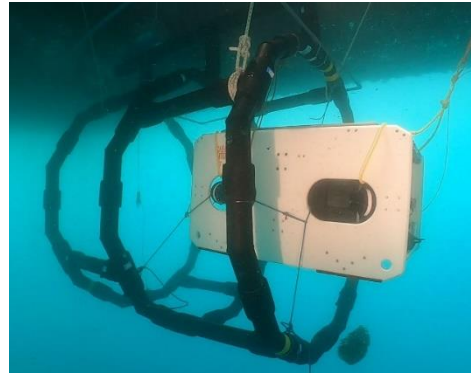


(d) 静特性（上端）測定時の送電側力率、効率、等価抵抗値

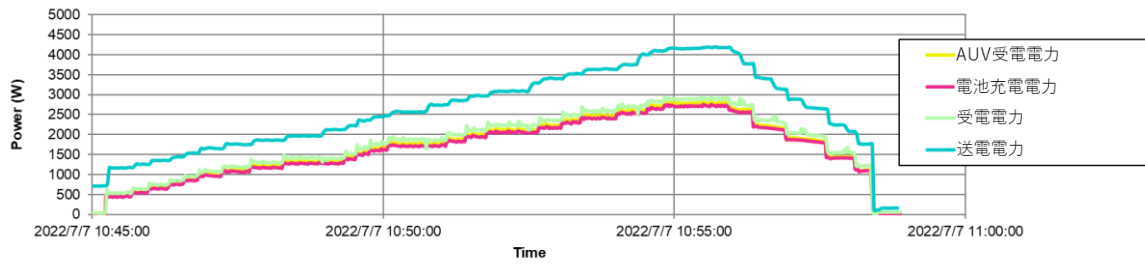
図 3.4-319 上端位置における静特性測定結果（実海域実験）



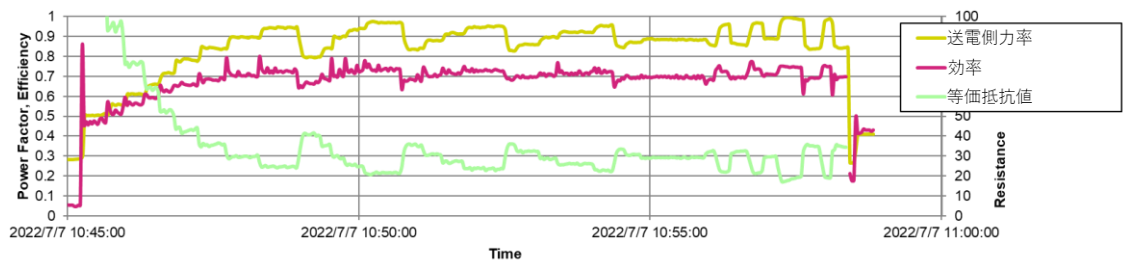
(a) 配置図



(b) 実際の配置

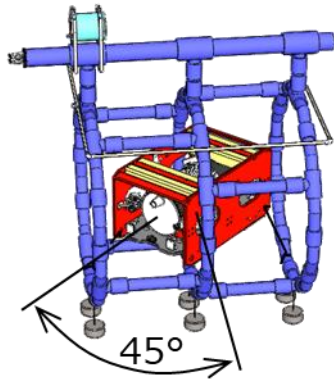


(c) 静特性（出入口）測定時の電力ログ



(d) 静特性（出入口）測定時の送電側力率、効率、等価抵抗値

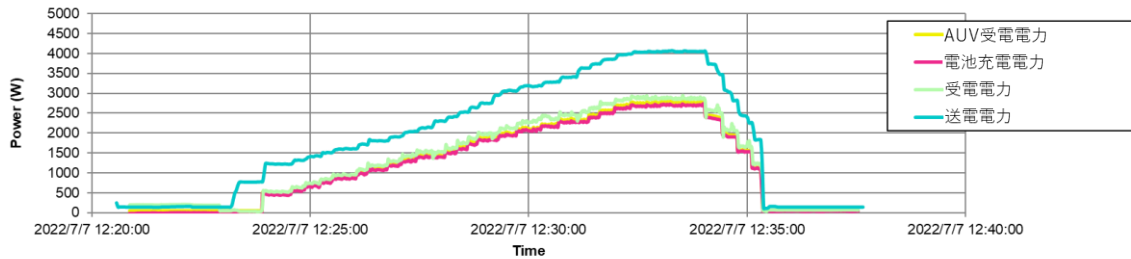
図 3.4-320 出入口位置における静特性測定結果（実海域実験）



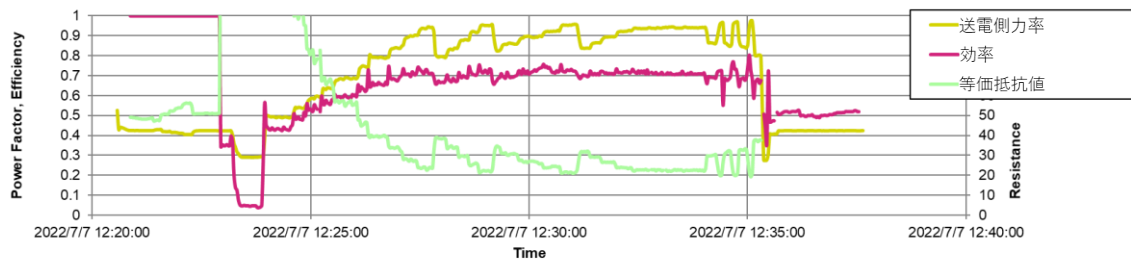
(a) 配置図



(b) 実際の配置



(c) 静特性 (45°) 測定時の電力ログ



(d) 静特性 (45°) 測定時の送電側力率、効率、等価抵抗値

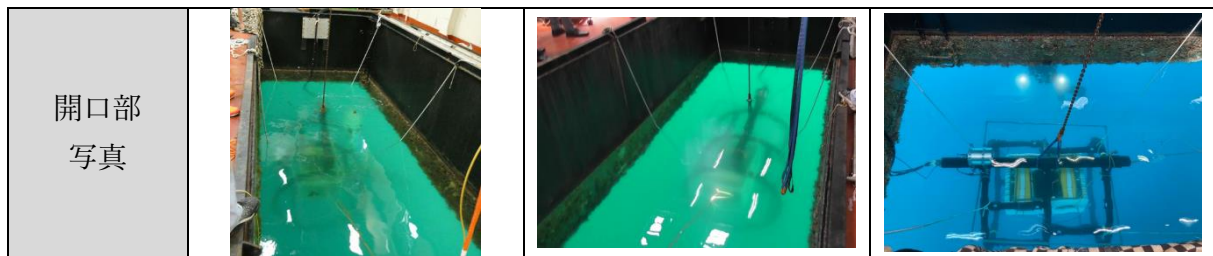
図 3.4-321 斜め 45° 位置における静特性測定結果 (実海域実験)

D 海水特性測定結果

海水色や濁度は日によって変わったが、塩分濃度の変化は小さかった。SEATEC II の海面下 3 m に設置されている据付センサのデータと開口部から見た海水のようすを表 3.4-73 に示す。

表 3.4-73 実海域実験時の海水コンディション

測定日時	2022年7月5日 9時45分	2022年7月6日 9時45分	2022年7月7日 9時45分
水温	22.8°C	24.1°C	23.1°C
塩分濃度	3.18%	3.19%	3.23%



3.4.3.5.4. 課題と考察

A 運用面について

効率は常時ではないが 80%近い数字で安定した電力伝送を実現できている。したがって、本研究の最終目標であった、「海中にポジションフリーワイヤレス給電システム及び海中充電スタンドを設置し、kW 級の電力を伝送効率 80 %以上で海中移動体（AUV）へ給電すること」についてはほぼ達成できた。ただ、これまで実施した実験で用いた海中移動体は AUV ではあるが自律航行をしていたわけではなく ROV モードでの運用であったため、自律航行中のセンサ類や制御系に本給電システムが影響を及ぼすことなく充電できるかについては実証できていない。

そこで、本研究で製作した AUV を実際に自律航行させている状態で本給電システムを用いた kW 級の電力伝送を行い、課題を調査するための追加実験を計画することとした。詳細は 3.4.3.6 で述べる。

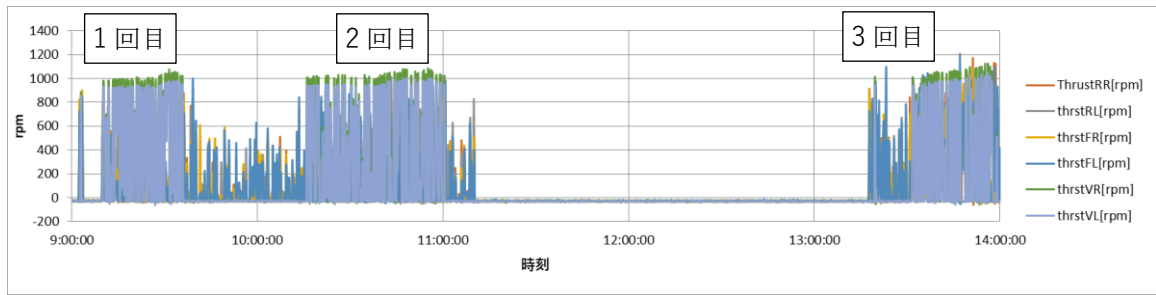
B 送電制御について

3.4.3.4.4 で発生した電圧設定値が変更できなかった現象について、パケットロスが発生しているものと推測されたが実験室の環境では再現試験を行ったものの再現しなかった。

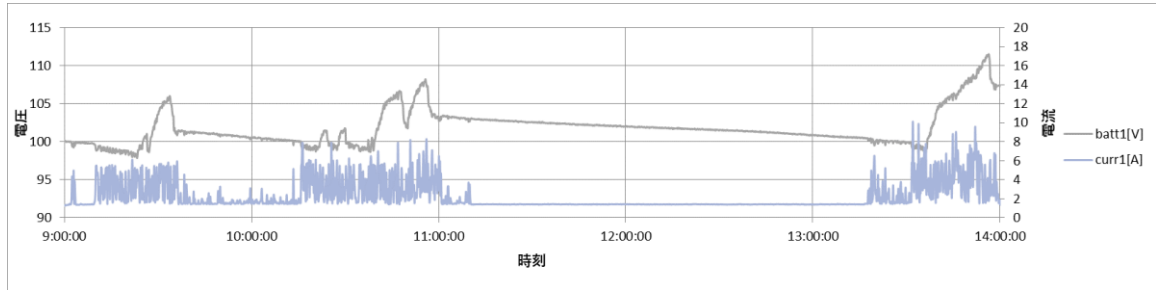
従ってここでの実験では基本的にパケット受信に関して待ち時間を長く持つ対策のみ実施し、水中通信のノイズ対策に期待をするという方針とした。

B-1 実験時の送電制御結果

7月6日に3回実施した実験における充電制御結果について、そのときの AUV の動作状況を図 3.4-322 に、それぞれの制御結果を表 3.4-74、表 3.4-75、表 3.4-76 に示す。



(a) スラスト回転数のログ



(b) 電池電圧と AUV 消費電流のログ

図 3.4-322 充電制御確認時の AUV 位置保持動作中の状況

表 3.4-74 1 回目の制御結果

回数	電圧			設定不可Warning回数	結果	
1	160	180	↗	1	中止	4秒経過後Zone設定戻す
2	160	180	↗	0	OK	
3	180	200	↗	0	OK	
4	200	220	↗	1	OK	4 秒(以上)遅延
5	220	240	↗	0	OK	
6	240	260	↗	2	OK	8 秒(以上)遅延
7	260	240	↘	0	OK	
8	240	260	↗	0	NG	パケットロスト
9	240	240	→	0	OK	リカバリー処理 (電圧はそのまま)
10	240	260	↗	0	OK	
11	260	240	↘	0	OK	
12	240	220	↘	0	OK	
13	220	200	↘	0	OK	
14	200	180	↘	0	OK	
15	180	160	↘	0	OK	

表 3.4-75 2回目の制御結果

回数	電圧			設定不可Warning回数	結果	備考
1	160	180	↗	0	OK	
2	180	200	↗	2	OK	8秒(以上)遅延
3	200	220	↗	1	OK	4秒(以上)遅延
4	220	240	↗	2	OK	8秒(以上)遅延
5	240	260	↗	1	OK	4秒(以上)遅延
6	260	240	↘	0	OK	
7	240	220	↘	0	OK	
8	220	200	↘	0	OK	
9	200	180	↘	0	OK	

表 3.4-76 3回目の制御結果

回数	電圧			設定不可Warning回数	結果	備考
1	160	180	↗	0	OK	
2	180	200	↗	2	OK	8秒(以上)遅延
3	200	220	↗	1	OK	4秒(以上)遅延
4	220	240	↗	0	OK	
5	240	260	↗	0	OK	
6	260	240	↘	0	OK	
7	240	220	↘	0	OK	
8	220	200	↘	0	OK	

最終形の構成でも実海域で水中通信を経由して充電制御実験を行っている時、パケットロスおよび4～8秒の遅延が発生し制御に支障が生じた。データ遅延に関しては今回メッセージを無限に待つ処理になっていたためリカバリーができたが、パケットロスに関しては対応のしようがなく手動でコマンドによるリカバリー処理を行わざるを得なかった。

表 3.4-74 表 3.4-75、表 3.4-76、から電圧上昇時のパケットロス・遅延の発生状況は、18回中10回（55%）と高率であった。

B-2 考察および対策

パケットロスおよび遅延の発生は送電制御を使用して電流値を増加させるときの昇圧制御に限られていた。一方送電制御を使用して電流値を減少させるときの降圧制御ではその現象が発生しなかった。

電圧上昇時のメッセージシーケンスを図 3.4-323 電圧上昇時メッセージシーケンス図に示す。パケットロス/遅延はこの図中の充電装置から充電制御サーバーにメッセージを応答するパスで発生し、これ以外のパターンではパケットロス/遅延は発生しなかった。



図 3.4-323 電圧上昇時メッセージシーケンス図

なおパケット遅延は当初 4 秒以上応答のない場合はロスト扱いの設計としていたが、この試験時は無限に応答を待つ作りとしていた。

B-3 対策および効果

電圧上昇時の制御と下降時の制御の違いの一つに、充電制御 Server が送信したメッセージに対して充電制御サーバーからの応答が早いことがある。応答時間は理論的にはフレーム処理のタイミングによるが 20ms またはそれ以下となる。一方電圧降下時は充電制御 Server がメッセージを発信してから 4 秒以上経過後してから応答を返している。電圧下降制御時のシーケンス図を図 3.4-324 に示す。

原因ははっきりしないが、このパターン以外のパケットロスやログ出力なども含めて発生していないので、水中通信固有の内在する問題を考慮し充電装置側で状態遷移表に対する処理を実行してから 500ms 経過後に電圧変更コマンドメッセージを応答するようにシーケンス間に Wait 処理を挿入した。

変更後のシーケンス図を図 3.4-325 に示す。



図 3.4-324 電圧下降時メッセージシーケンス図



図 3.4-325 メッセージシーケンス図 (Wait 処理追加)

3.4.3 以降に述べる本研究の最後実施した実海域試験においては水中通信経路で充電制御試験を行ったが、主試験目的が AUV モードの機能評価であり時間的・物理的な制約でパケットロストに対する詳細の評価はできなかったが、充電制御時に同様の現象が発生することは無かったため一定の効果はあったと考える。

3.4.3.6. AUV 実海域充電実験

本研究で製作した AUV はプリプログラム方式による自律航行ができるように自己位置・機体姿勢等を検知するセンサを備えている。これまでの実験で使用していなかったこれらのセンサを活用して AUV を自律航行させ、充電実験を行い、センサ類へ影響なく本給電システムが運用できるのか実験で確認した内容について説明する。

【実験期間】2022 年 12 月 10 日～12 月 26 日（準備、デバッグ作業等含む）

3.4.3.6.1. 実験場所

鹿児島県十島村口之島の西之浜漁港は水深 5.5 m、海底から岸壁までの高さ約 7 m で実験上の都合がよく、また船の往来もなく障害物もない。港内を広く使用でき、かつ使用許可申請も得やすいためこの場所を実験場に選定した。岸壁すぐそばの製氷棟が AUV の整備基地として利用できることも実験場としての条件に合致した。口之島の位置を図 3.4-326 に、実験に使用した区域の写真を図 3.4-327 に示す。実験域は海側 30 m×20 m、陸側 30 m×6.5 m について許可申請した。



図 3.4-326 鹿児島県十島村口之島の位置



(a) 北端のフリー岳山頂から見た口之島全景



(b) 西之浜漁港の全景と実験域

図 3.4-327 西之浜漁港と実験域の写真

3.4.3.6.2. 実験方法

実験用 AUV は、いわゆる完全自律航行をする AUV としての高度な外界把握および認識機能、例えば海中充電システム位置の把握やその詳細形状を認識するためのセンサなどのハードウェアやソフトウェア等は装備していない。しかしながら、この実験用 AUV は、慣性航法装置 (INS) で一番の問題となる加速度積分での誤差蓄積により生じる位置ドリフトを、DVL により得られる対地速度でダンピングして位置補正する方式を採用している。そのため誤差蓄積が問題とならないような比較的短距離の航行であれば、INS と DVL での自己位置把握のみによる自律航行 (全自動航行) が可能であり、以下の表 3.4-77 の機能によって、設定した航行シナリオによるプリプログラム方式での自律航行ができる。

そこで今回の実験では図 3.4-328 の AUV 航行測線計画に基づき作成したコースデータ (P0、P00、P1、P2 の 4 つの点を緯度、経度、高度で規定) を順次、表 3.4-78 のように Waypoint 航行した。海中の充電スタンドの設置状況は図 3.4-329～図 3.4-332 に示す。

表 3.4-77 実験用 AUV が有する自律航行の機能

機能	内容
Waypoint 航行	予め設定された地球座標と深度または海底からの高度で規定される複数の Waypoint を順次通過航行する
深度保持	制御可能深度：海面～50 m
高度保持	制御可能高度：0.2 m～50 m
方位保持	制御可能方位：±180°

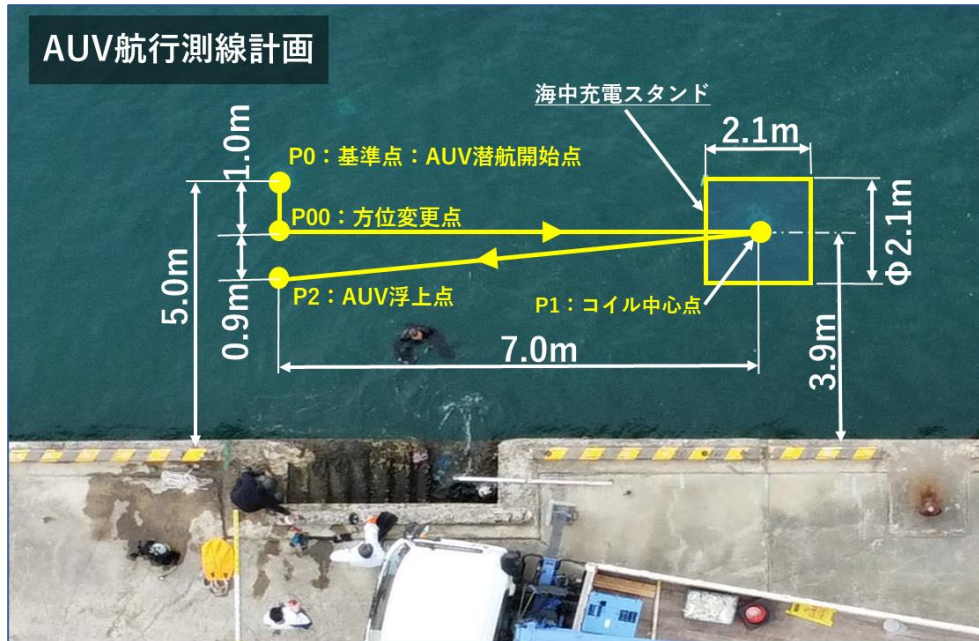


図 3.4-328 充電スタンド位置と AUV 航行測線計画図

表 3.4-78 実施した Waypoint 航行の内容

順序	内容	備考
1	基準点 P0 の直上で海面浮上状態における GPS によるポジションアップデートを実行	
2	点 P0 で潜航を開始し、高度 1.2 m まで潜航	
3	高度 1.2 m で点 P00 まで 1 m 航行	
4	点 P00 で、充電スタンド方向へ方位を変更	高度 1.2 m そのまま維持
5	方位変更後、充電スタンドの中心位置 P1 まで 7 m 航行	高度 1.2 m そのまま維持
6	点 P1 に到達後、P1 で設定時間位置保持※ ※位置保持時間：10 分間または 20 分間で設定	位置保持中に充電。位置保持終了時間までに充電を停止
7	位置保持時間終了後に充電スタンドから離脱、点 P2 まで約 7 m 航行し、海面に浮上	

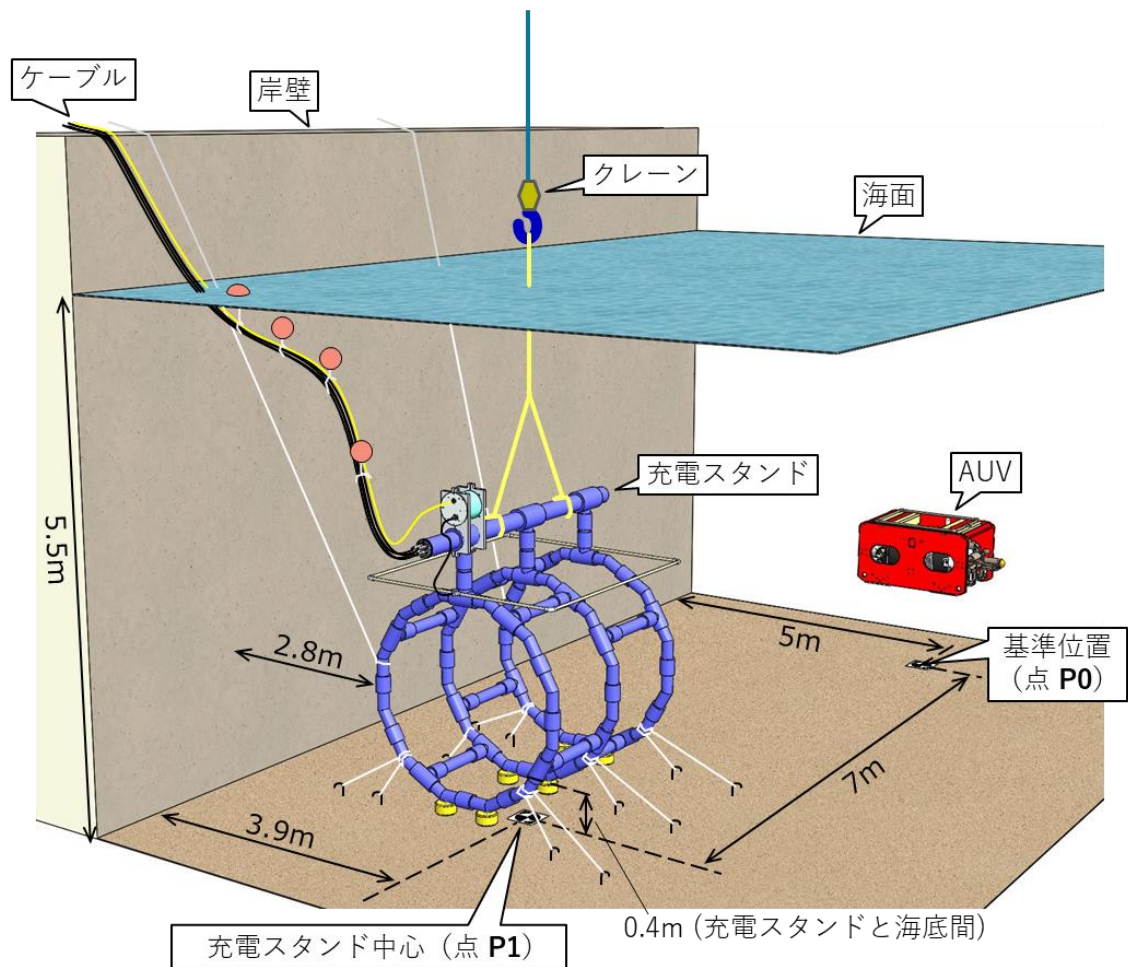


図 3.4-329 AUV 実海域充電実験の充電スタンド設置図

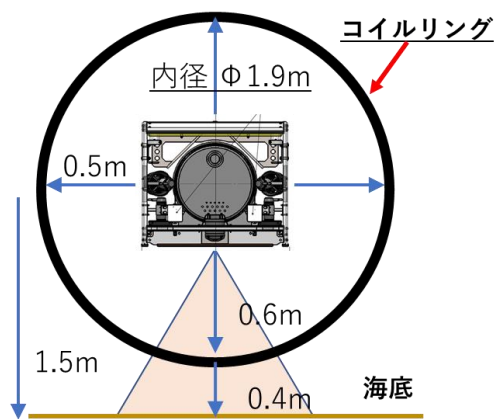


図 3.4-330 AUV 実海域充電実験の充電スタンド設置図 (充電スタンド正面から)

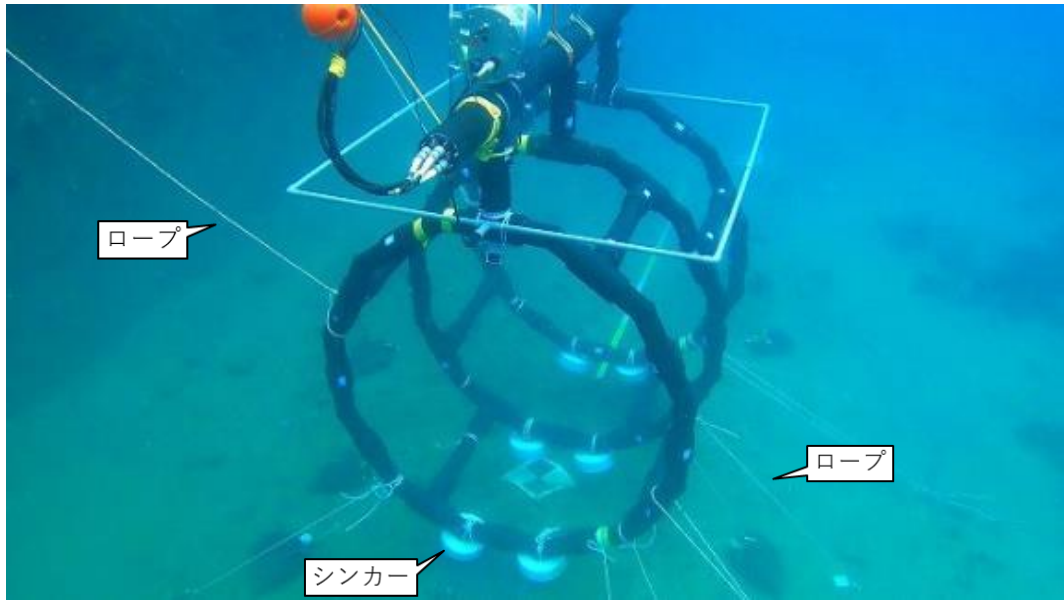


図 3.4-331 AUV 実海域充電実験の充電スタンド設置状況（海中）



図 3.4-332 AUV 実海域充電実験の陸上側機器および車両の配置状況



図 3.4-333 トラック内部の船上局・送電機器設置状況

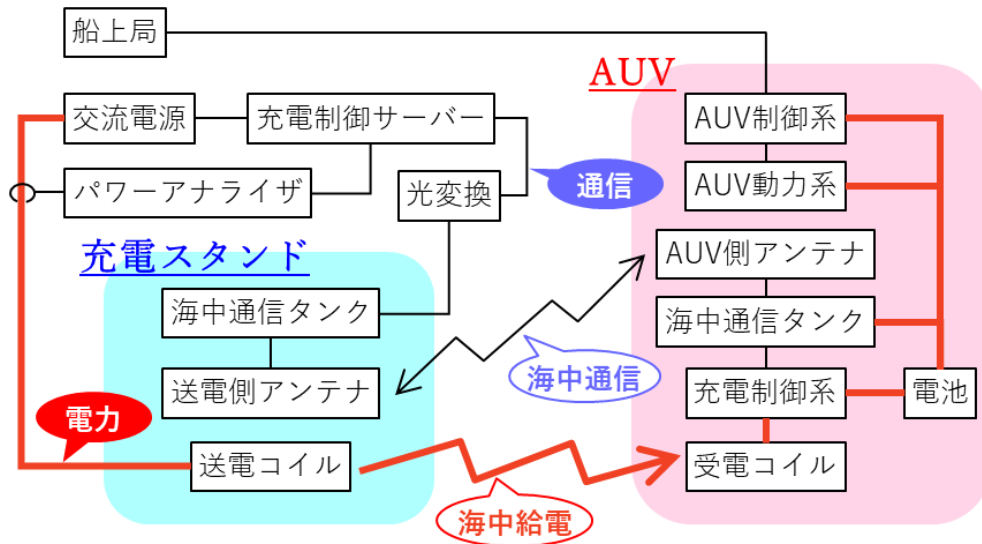


図 3.4-334 AUV 実海域充電実験の機器接続図

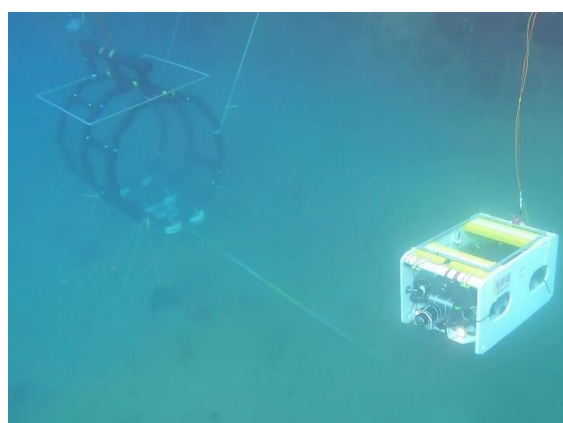
図 3.4-329 は充電スタンドの設置位置と AUV の基準位置の関係を示している、海底からの高さ方向の位置関係は図 3.4-330 に示す。実際の設置状況は図 3.4-331 の写真に示す。充電スタンド下部にシンカーを 6 個（水中重量 27 kg = 4.5 kg × 6）取り付け、さらに海底に打ち込んだペグや岸壁のボラードなどにロープで固縛することで、海中位置を安定させた。また図 3.4-332 のように岸壁に車両を配置して充電スタンドと AUV の着水および揚収をユニッククレーン車で行い、図 3.4-333 のようにトラック内部に船上局や送電機器類を設置した。図 3.4-334 は機器接続図で、赤太線が電力経路、黒線が通信経路を示す。充電制御には海中通信を用いた。

なお AUV には大容量電池をはじめに搭載しておき、1 kW の電力伝送に成功したのちに急速充電電池に交換して、3 kW の電力伝送を実験する順番で実施した。

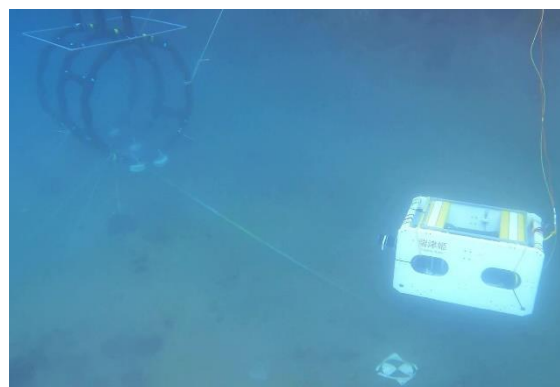
3.4.3.6.3. 実験結果

A 自律航行への影響について

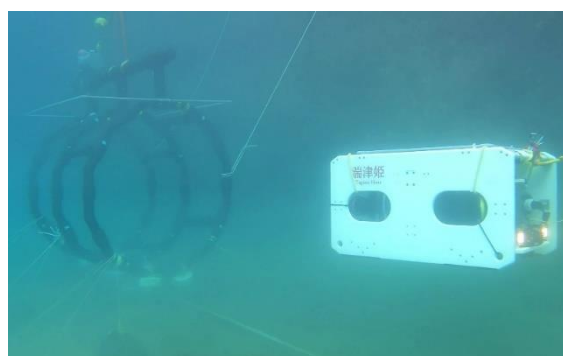
2022年12月20日～21日にかけて表 3.4-78 の Waypoint 航行と充電を組み合わせた実験を6回（設定ミス等による中断を除く回数）企画し、全て成功した。また、伝送電力が1kWでも3kWでもWaypoint航行に影響は見られなかった。自律航行（Waypoint航行）の様子を図 3.4-335 に、航跡図を図 3.4-336 に示す。



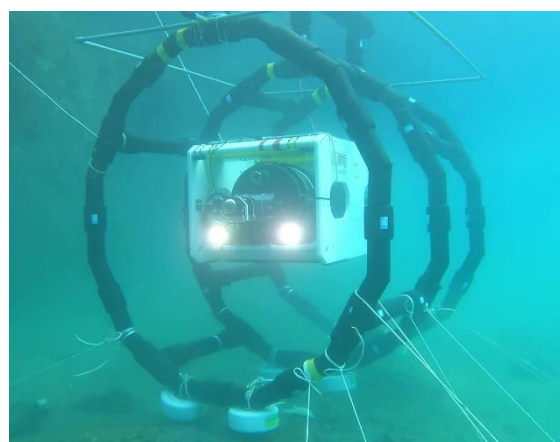
(a) P0 から P00 へ航行中



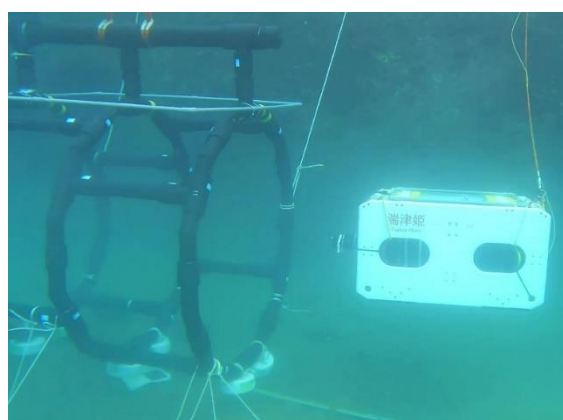
(b) P00 で方位変更中



(c) P00 から P1 へ航行中

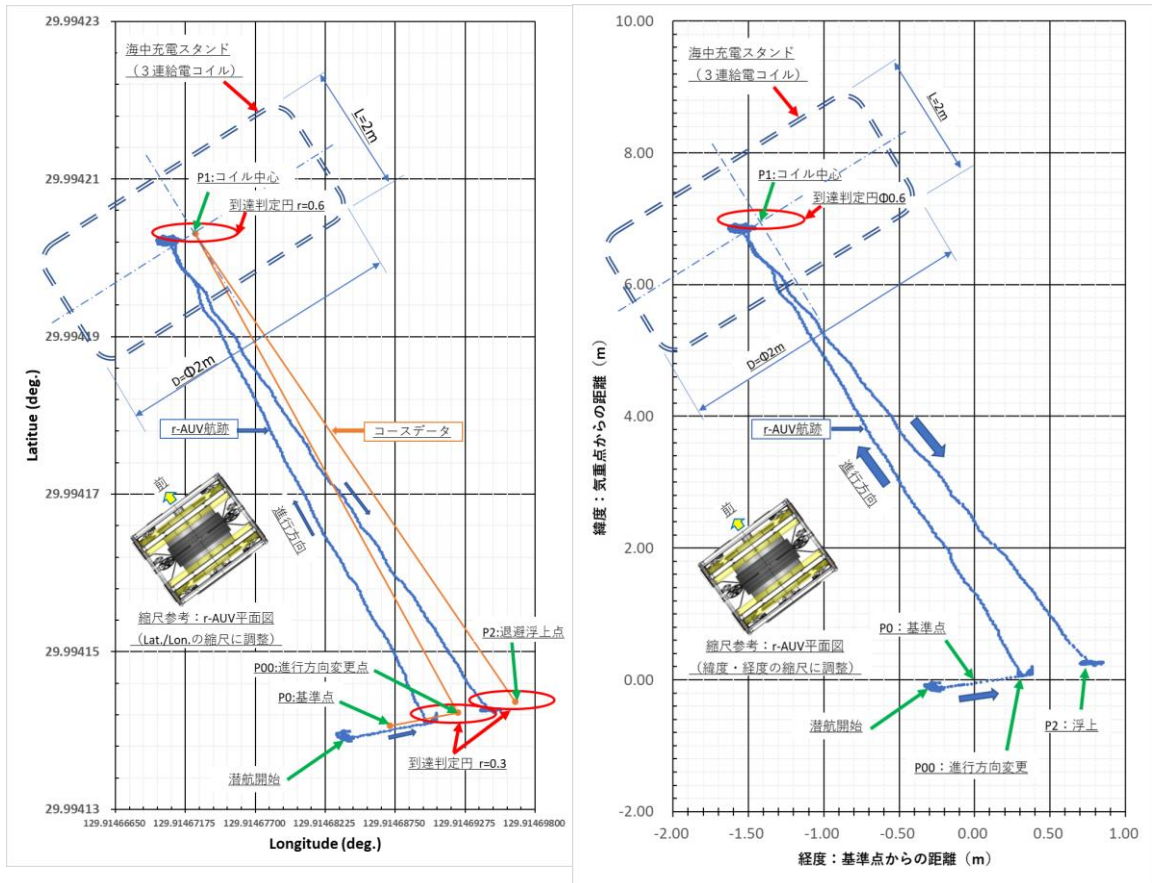


(d) P1 で位置保持



(e) 位置保持完了後、P2 へ航行中

図 3.4-335 自律航行の様子（Waypoint の詳細は表 3.4-78）



(a) 緯度・経度表示

(b) 基準点からの距離表示

図 3.4-336 AUV 自律航行航跡図

AUVの自律航行時の航跡図の例(図3.4-336(a))について説明する。図中橙色の線は航行予定のコースデータ、紺色線がAUVの航跡である。なお、縦軸の緯度と横軸の経度の縮尺が異なるため、参考として図中にAUVの平面図を緯度・経度それぞれ縮尺に調整したものを示している。

図3.4-336(b)は、P0:基準点位置を原点として、緯度・経度をそれぞれ距離(m)に換算した場合の航跡図である。

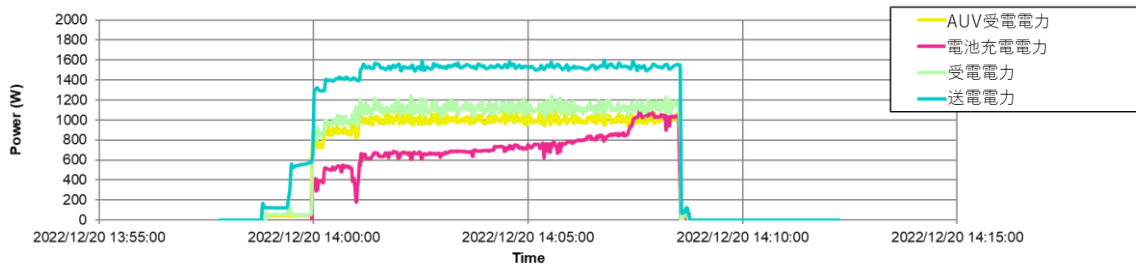
AUVは、P0:基準点から約0.3m離れた位置で潜航を開始して、高度1.2mに到達後P00:進行方向変更点へ向かい、P00の真上では無いが、赤楕円線で示す到達判定円(半径:0.3m)内に入ったと判定して、P1:海中充電スタンドのコイル中心へ向かって方位を変更している。その後約7m航行してP1:コイル中心の到達判定円(半径0.3m)内に入ったと判定し、コイル中心で位置保持をしている。コイル内で設定時間位置保持をした後、コイルを離脱して、P2:退避浮上点に向かって航行し、ここでもやはり到達判定円(半径0.3m)内に入ったと判定して浮上している。

このように、AUVは、各Waypointに設定してある目標到達円を次々とヒットしながら、設定したコースデータどおりに自律(全自動)航行を達成している。このことから、本給電システムはセンサ類に悪影響を与えていないことが実証できた。

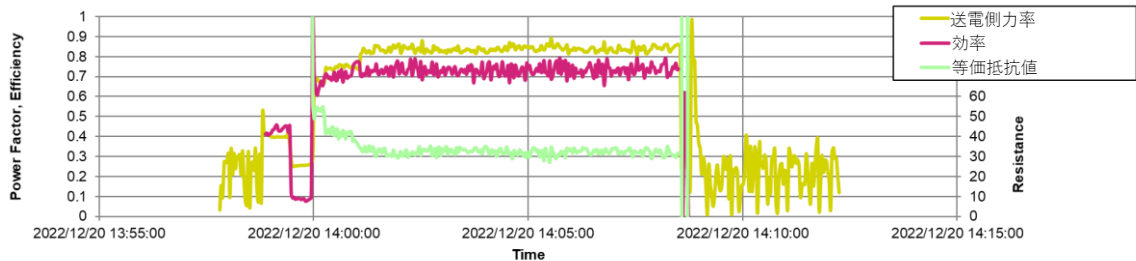
B 1 kW 電力伝送

AUV に大容量電池を搭載し、最大電力 1 kW の実験を行った (2022 年 12 月 20 日)。なお 3.4.3.2 では大容量電池を用いた際に共振周波数 800 Hz で実験を行ったが、今回の実験では共振周波数 1.5 kHz とし、3 kW 給電用システムと同じ周波数とした。これにより電池交換のみで 3 kW 実験に切り替えることができる。

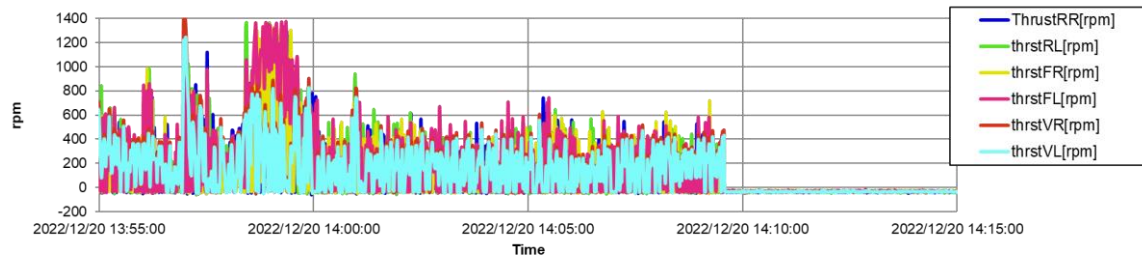
電力、効率、スラスト回転数および電池電圧などのグラフを図 3.4-337 に示す。



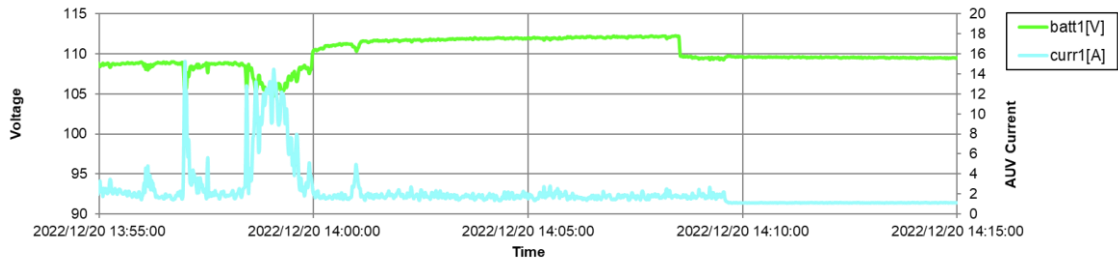
(a) 電力ログ



(b) 送電側力率、効率、等価抵抗値のログ



(c) スラスト回転数のログ



(d) 電池電圧と AUV 消費電流のログ

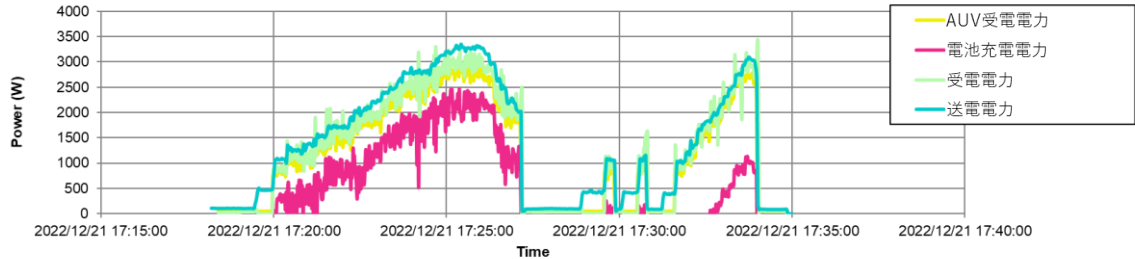
図 3.4-337 自律航行中の充電実験ログ (1 kW)

14:00 に充電を開始して 14:08 頃に充電を停止しているが、その間は電池電圧が順調に増えている。このグラフより、問題なく充電できていたことがわかる。また伝送効率は 70%

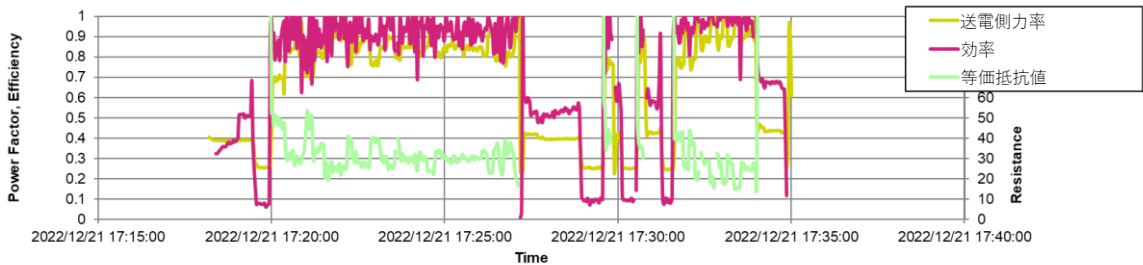
～75%あり、自律航行中でもこれまでと変わらず高効率で充電できることが実証できた。

C 3 kW 電力伝送

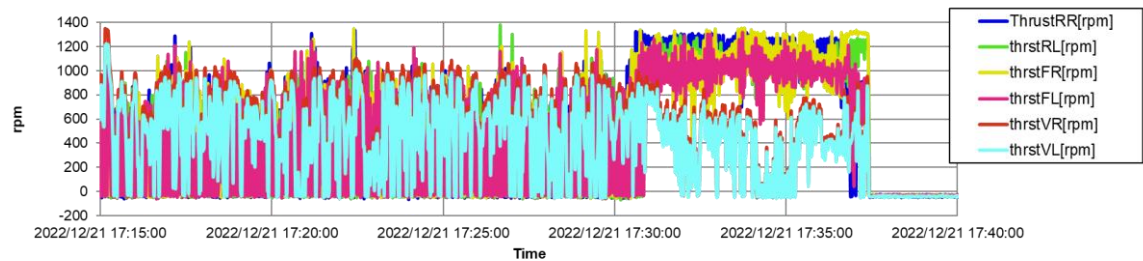
AUV に急速充電電池を搭載し、最大電力 3 kW の実験を行った（2022 年 12 月 21 日）。電力、効率、スラスト回転数および電池電圧などのグラフを図 3.4-338 に示す。



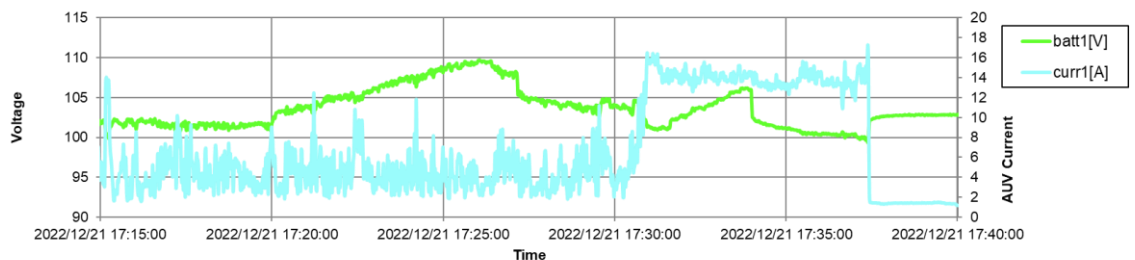
(a) 電力ログ



(b) 送電側力率、効率、等価抵抗値のログ



(c) スラスト回転数のログ



(d) 電池電圧と AUV 消費電流のログ

図 3.4-338 自律航行中の充電実験ログ (3 kW)

位置保持中に 17:20～17:27 と 17:31～17:34 の 2 回、充電を実施した。この時間中は電池電圧が上昇し続けていることから、問題なく充電できていることがわかる。しかし伝送効率が 100%を超えている場合があり、3 kW の受電電力に対し送電電力が 3 kW しかないこ

とから、送電電力が正しく測定できていなかったと考えられる。

これは電流センサの初期化がうまく実施できていなかった可能性が高くその結果パワーアナライザの送信電力の値は低く測定されたことが原因と想定される。

当日は天候や準備の関係で実験時間が非常に限られてしまったため、この件に関してのリカバリー処置がとれなかったことは残念であった。

また2回目の充電の少し前から、スラストの回転数が増加して消費電流が増大しており上下スラスト以外は一様に回転数が増えていて、かつ AUV は充電スタンド内にとどまっていたことから考えると、急に潮流が強くなったか、あるいは座標がずれて充電スタンド内で AUV が側面を押し付けるような動きをしていた可能性がある。

このような状況でも 3 kW の受電電力が確認できていることから、本給電システムは 3 kW の電力を自律航行中でも問題なく伝送できることを実証したと言える。

3.4.3.6.4. 課題と考察

A 効率と送電制御について

1 kW の実験時の効率と送電側の力率を図 3.4-339 に示す。電力が大きくないため送電制御の Zone は立ち上げ時の 65 V と充電時 (0~9 A) の 160 V だけとした。力率は最大 0.84 でありまだ余裕があったと考えられ、送電電圧の設定値を 160 V より下げる、あるいは電流をもう少し増やすことでまだ効率向上の余地はあったと考えられる。しかしながら AUV 実海域充電実験の主眼は効率ではなく自律航行であったため、途切れずに充電できたことは評価できる。

次に 3 kW の実験の送電電圧の設定値と電流と電力の関係を図 3.4-340 に示す。沼津の 3.4.3.5 実海域実験のときと同じく最大電流時 (25.5 A) の送電電圧の設定値を 260 V とした。今回の実験の最大受電電力は 3.4.3.5.3.B とほぼ同じ 3 kW だったため、効率も同じく 70~75%はあったと推察できる。

受電電力は

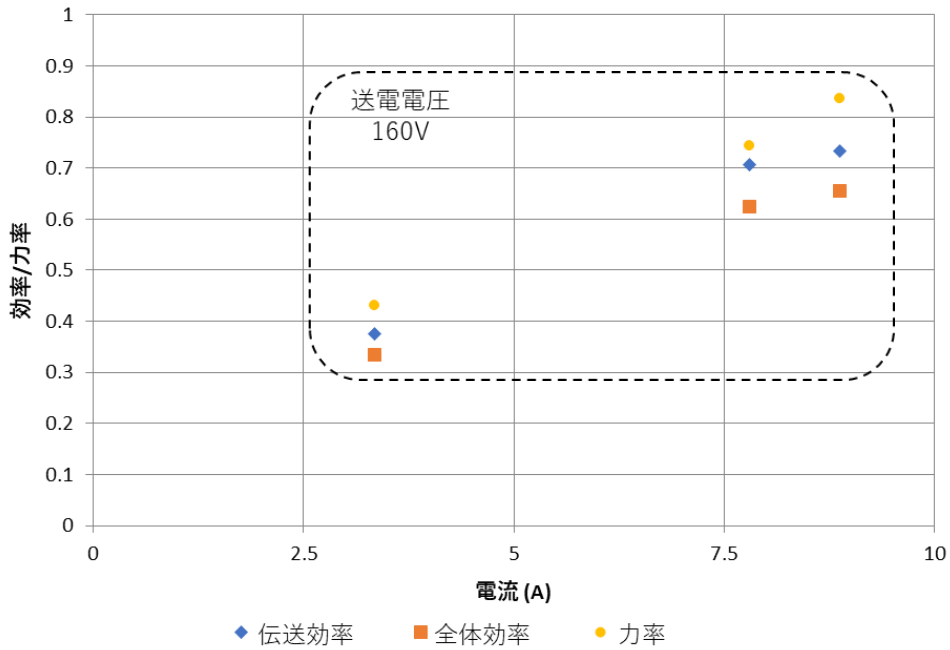


図 3.4-339 1 kW 実験時の電流と効率と送電側力率

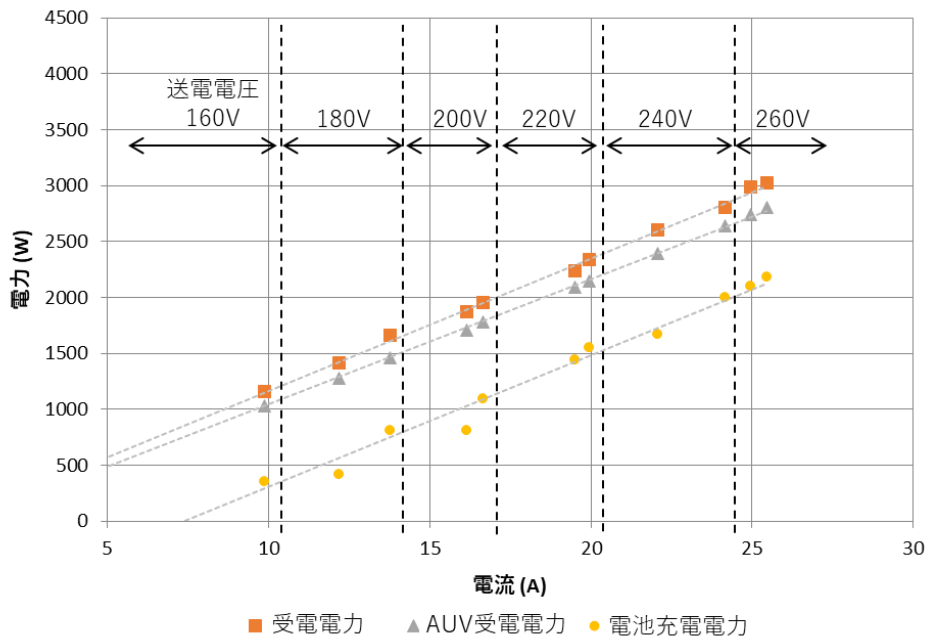


図 3.4-340 3 kW 実験時の送電電圧の設定値と電流と電力

B 充電スタンドと AUV の連携について

充電スタンドと実験用 AUV に搭載した充電制御システムの間は海中通信で連携しているが、充電制御システムは AUV 制御システムとは独立していて、充電スタンドから AUV 制御システムに直接コマンドを送ることはできない。また、実験用 AUV の制御システムに

は外部からコマンドを受けて動作するような仕組みも組み込まれていない。したがって、例えば充電が終了したことを知らせるコマンドを充電スタンドから実験用 AUV へ送ったとしても、それを受けて退出するといったようなことができない。したがってこの実験では、位置保持時間を一定時間に設定し、その間に充電を開始から終了まで終わらせる方法を取った。

本実験の目的はこれで達成できた。しかしながら実際は目視できない海底で充電するため、AUV が充電スタンドにやってきても、いつ充電をはじめて、いつ退出すればいいのかわからないと運用できない。将来的には、本研究で充電制御に採用した海中通信を含め、なにかしらの手段で充電スタンドと AUV が連携できるようにする必要がある。

C 実海域実験のまとめ

電力の大小や潮流の有無、さらには充電スタンドを海中に吊っても海底に設置しても、AUV を物理的に拘束することなくワイヤレスで充電できることが、これまでの実験を通して証明できた。様々な環境や条件のなかでも充電のたびに AUV を引き上げることなく、海中で連続稼働できる可能性を示したことになり、海底探査の効率化、低コスト化につながる成果だと考える。

3.5. 充電制御およびデータ伝送のための海中通信方式の確立

3.5.1. 概要

海中でワイヤレス給電による電池の充電では、送受信システムの動作状況を逐一確認しながら充電制御を行う必要がある。本研究では Wavelet OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を用いた海中電波通信技術を確立し充電制御およびデータ伝送の研究開発を行った。

海水の物性は電波の周波数が高くなると減衰が大きくなる。そのため本技術は、2~28 [MHz]の周波数帯域を標準モードとし、その周波数を 1/2~1/16 に分割したモードを生成することで海中電波通信に適した電波利用を行う。Wavelet OFDM では帯域内に複数のモードとチャンネルを導入することでロバスト性の向上と通信長距離化を実現する。

本研究では、海中電波通信に適したアンテナの検討、Wavelet OFDM により無線通信装置の開発、また塩水、海水を使った小型・大型水槽や実海域実験による基礎検討を実施し、さらに AUV を用いた実証実験により本技術の有用性を確認した。

3.5.2. Wavelet OFDM 方式

3.5.2.1. Wavelet OFDM の概要

Wavelet OFDM では、シンボル長以上の長さを持つインパルス応答を使って各サブキャリアを帯域制限し、第一サイドローブを十分に低いレベルにすることが可能な Wavelet 変換を採用している。Wavelet は、画像処理などに使用されているものを含め、多くの種類を有する。ここでは、通信に適した Wavelet 変換として、完全再構成コサイン変調フィルタバンク (PR-CMFB) を選定した。このフィルタバンクの特長は、実数変換であり、一次変調にはパルス振幅変調 (PAM) を使用することである。また、送受信機のフィルタが整合フィルタの関係となり、理想的な環境では ICI (Inter-Carrier Interference) も ISI (Inter-Symbol Interference) もなく完全に直交すること、オーバーラッピングファクタを $g \geq 4$ ($g=2K, K: \text{integer}$) に設定すればサブキャリアの第一サイドローブレベルを 30 [dB]以下にできること、高速変換アルゴリズムが使用できることなどがあげられる。

Wavelet OFDM のスペクトルを図 3.5-1 に示す。選定したフィルタバンクを使用することにより、各サブキャリアの第一サイドローブレベルが 35 [dB]減衰するため、少なくとも任意の 2 本のサブキャリアを不使用とすることで、35 [dB]のスペクトルノッチを容易に形成

可能である。従って、さまざまな制約により通信に使用できない周波数帯域が存在する場合においても、本方式により柔軟に対応することが可能となる。

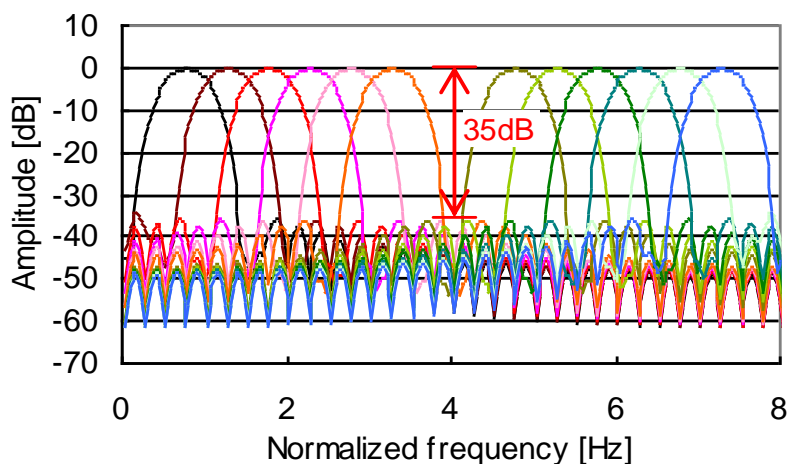


図 3.5-1 Wavelet OFDM スペクトル

3.5.2.2. Wavelet OFDM の主な仕様

Wavelet OFDM 方式では、サブキャリア毎の変調に PAM (Pulse Amplitude Modulation) を用いて 2PAM~32PAM に対応し、周波数範囲は 2~28 [MHz]を基本とする。この場合の物理層の最大速度は 250 [Mbps]である。誤り訂正には、リードソロモン符号 (RS : Reed Solomon)、畳み込み符号 (CC : Convolutional Code)、接続符号 (RS-CC)、または低密度パリティ符号 (LDPC : Low Density Parity Code) が用いられる。

一般的に、伝送路特性は周波数領域においてフラットではなく、信号減衰の大きさやノイズの量が周波数によって異なる。Wavelet OFDM では、海中通信向けに狭帯域でも通信が可能となる複数のモードの開発を行った。伝送路特性に応じて適切なモードを選択することが可能であるため、海中での通信距離の向上が期待できる。

表 3.5-1 に Wavelet OFDM の基本仕様を示す。通信のモードについては 3.5.2.2.1 に記述している。

3.5.2.2.1. 通信モード

表 3.5-2 はモードの対応表であり、各モードにおけるシンボル長、チャンネル数、周波数シフト量、キャリア番号、及び Channel ID を示している。更に、図 3.5-2 に各モードと Channel ID の関係を示す。

標準モードでは、シンボル長が 8.192 [μ sec]であり、周波数範囲が 2~28 [MHz]のチャンネル (Channel ID : x-1) のみを使って送受信を行う。標準モードを基準とした場合に、1/N モード (N=2, 4, 8, 16) ではシンボル長が N 倍、すなわちサブキャリア間隔が 1/N 倍となり、

周波数シフトを行うことにより、各モードでN個のチャンネルが利用可能である。各チャンネルのサブキャリア数は同数（理論最大値：512）となっているので、基本的に各チャンネルでのロバスト性はほぼ同等である。

表 3.5-1 Wavelet OFDM 基本仕様

項目	仕様
キャリア間隔	61.03515625 [kHz] 30.517578125 [kHz] 15.2587890625 [kHz] 7.62939453125 [kHz] 3.814697265625 [kHz]
シンボル長	8.192 [μsec] 16.384 [μsec] 32.768 [μsec] 65.536 [μsec] 131.072 [μsec]
一次変調 (PAM)	2, 4, 8, 16, 32
周波数範囲	0 ~ 31.25 [MHz]
最大PHY速度	250 [Mbps]
誤り訂正	リードソロモン符号 畳み込み符号 接続符号 低密度パリティ符号

表 3.5-2 モード対応表

モード	シンボル長 [us]	チャンネル数	周波数シフト [MHz]	キャリア番号	Channel ID
標準	8.192	1	0	0 - 511	x-1
1/2	16.384	1	0	0 - 511	x-2
		2	15.625	512 - 1023	x-3
1/4	32.768	1	0	0 - 511	x-4
		2	7.8125	512 - 1023	x-5
		3	15.625	1024 - 1535	x-6
		4	23.4375	1536 - 2047	x-7
1/8	65.536	1	0	0 - 511	x-8
		}	}	}	}
		8	27.34375	3584 - 4095	x-15
1/16	131.072	1	0	0 - 511	x-16
		}	}	}	}
		16	29.296875	7680 - 8191	x-31

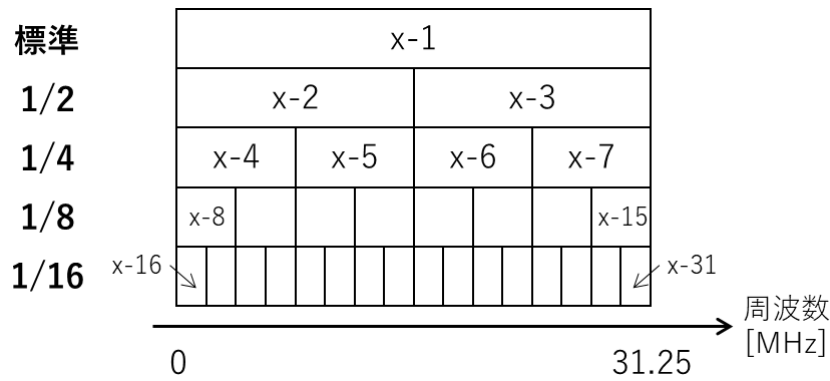


図 3.5-2 各モードと Channel ID の関係

3.5.2.3. 基本通信特性

複数モードの技術を搭載した FPGA ボードで取得した基本通信特性を以下に示す。FPGA (Field Programmable Gate Array) ボードには、Intel 社製 Arria10 SoC チップ (型番：10AS066N2F40) を搭載した開発キット (型番：DK-SOC-10AS066S-A) を用いている。

3.5.2.3.1. 送信信号スペクトル (Power Spectral Density : PSD)

標準モードから 1/16 モードまでの各モードの送信信号スペクトル (PSD) を図 3.5-3 に示す。横軸が周波数 [MHz]、縦軸が 10 [kHz] 当りの送信電力 [dBm/10kHz] を表しており、低い周波数帯域ほど信号が通りやすいという海水中の伝送路特性を考慮し、ここでは各モードにおいて最も低い周波数帯域の Channel ID (x-1, x-2, x-4, x-8, x-16) のみを抽出している。

Wavelet OFDM 方式では、ハードウェアの制約によりチャネルの帯域内にある 512 本のサブキャリアの内、432 本のみを使用するため、実際のスペクトルは図 3.5-2 で定義されている帯域幅よりも狭くなる。また、1/N モード (N=2, 4, 8, 16) は標準モードと比較しサブキャリア間隔が狭いため、使用不可のサブキャリア数に相当する帯域も狭く、使用周波数の下限は標準モードの下限よりも低くなる。具体的には、標準モードの使用周波数の下限は 2 [MHz] であり、1/N モードでは $2 \cdot (1/N)$ [MHz] となる。

3.5.2.3.2. 通信速度測定 (静的環境)

アッテネーター (Attenuator: ATT) 評価装置で伝送路の減衰量を変化させた時の、UDP プロトコルでの通信速度を図 3.5-4 に示す。PSD と同様、各モードの最も低い周波数帯域を使用する Channel ID (x-1, x-2, x-4, x-8, x-16) において測定を行い、横軸が減衰量 [dB]、縦軸が通信速度 [Mbps] を表している。

最大速度の領域 (フラット領域) において、各モードの速度がシンボル長の変化に対応した関係になっていることがわかる。一例として、1/2 モードの速度は 1/4 モードの速度の

約2倍となっている。但し、標準モードにおいては、FPGA ボードに搭載している Ethernet の規格が 100BASE-TX であるため、UDP では約 95 [Mbps]、TCP では約 70 [Mbps]が上限となっている。

また、速度低下の領域（減衰領域）においては、ATT 評価装置がほぼフラットな減衰特性を有するため、いずれのモードにおいても減衰量が 50 [dB]を上回る辺りから速度が低下し始め、減衰量が 90 [dB]の付近で通信断（速度が 0）となるような傾向を確認できる。

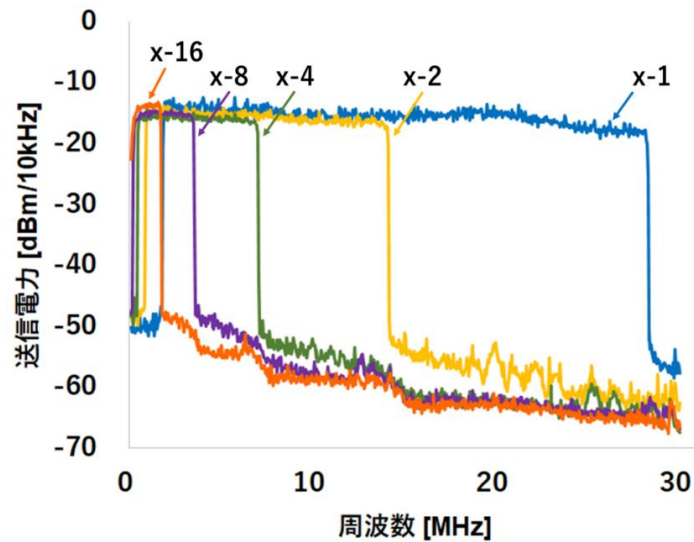


図 3.5-3 各モードの PSD

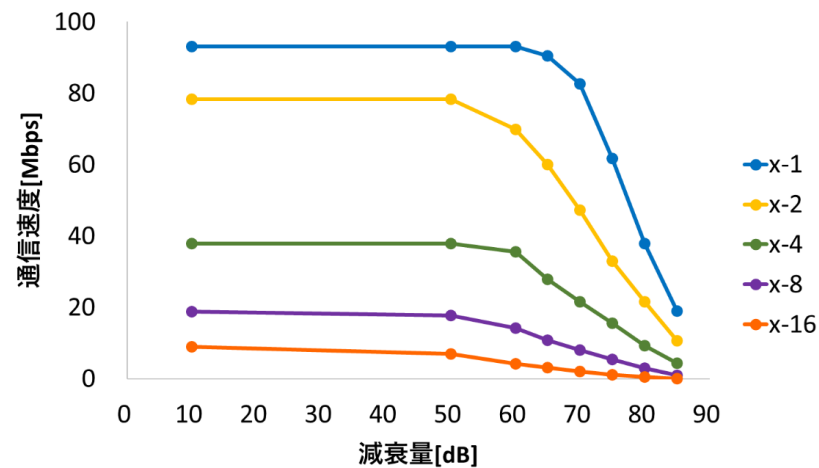


図 3.5-4 各モードの UDP 通信速度

3.5.3. 実施内容

以下各年度で実施した取り組みの内容について述べる。

3.5.3.1. 事前検証フェーズ

事前検証フェーズでは、Wavelet OFDM 方式のアルゴリズムを検討するために、FPGA ボードを用いて、開発環境の構築と基本的な性能評価を行った。

3.5.3.1.1. 海中通信用送受電アンテナ（結合器）

A 海中通信の送受信アンテナ（結合器）の目標仕様

海中で電波伝搬を使った通信は、海水が Na+Cl-イオンにより導電性を持つため減衰量が非常に大きく実用化された例はない。この減衰量は例えば 10MHz では 102dB/m、100MHz では 324dB/m となる。海中で数 Mbps 程度の通信速度を得るためには HF 帯以上の通信が必要であるため、減衰量が大きくても高速通信が可能な Wavelet OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を利用した通信技術を海中通信への適用可能性を検討する。この方式では 0.5~31MHz の周波数対を使い通信を行うため、これに対応した結合器を開発する必要がある。表 3.5-3 に結合器の仕様を示す。タイプ A~C の結合器のいずれかが実現できれば本研究の海中通信が可能となる。

表 3.5-3 結合器の目標仕様

項目	タイプA		タイプB		タイプC	
伝送帯域	2-28MHz	全伝送帯域	2-28MHz	伝送帯域で 6MHz以上の帯 域を確保する	①0.5-7MHz ②8-15MHz ③16-23MHz ④24-31MHz	①~④の1つ
挿入損失	-50dB以上		-50dB以上		-50dB以上	
入出カインピーダンス	50Ω		50Ω		50Ω	

B 結合器の基礎検討

本年度はタイプ A を目標に基礎検討を行った。タイプ A は帯域幅が 26MHz と極めて広帯域な結合器である。図 3.5-5 に 4つのコイルを使った広帯域結合器の構成を示す。送受電部とも各 2つのコイルを用いて 2つのコイルは電流の向きが逆になるように配置する。

さらに2つのコイルの共振周波数を帯域の中心周波数から上下に分離することで広帯域を得ることができる。図 3.5-6 に等価回路を図 3.5-7 にコイル直径 0.12m、間隔は 0.12cm とした塩水 4%での伝送の予備実験結果を示す。この応用としてコイル3または4をワイヤレス給電の受電コイルと共用することも考えられるため、次年度はこの方式の適用可能性を実験で確認する。

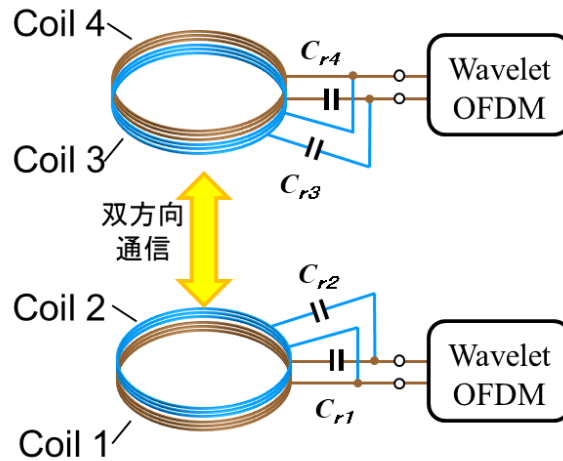


図 3.5-5 4つのコイルを使った広帯域結合器の構成

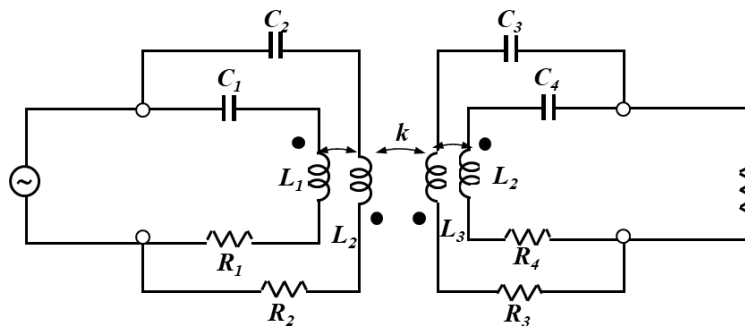


図 3.5-6 等価回路

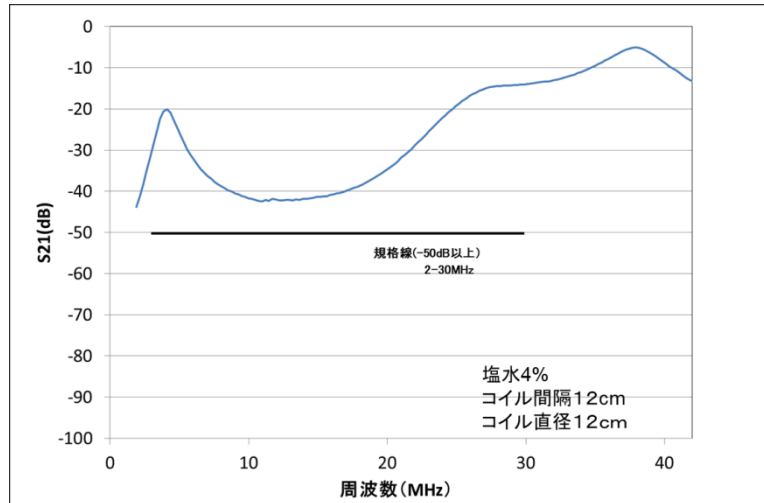


図 3.5-7 結合器の伝送特性

3.5.3.1.2. Wavelet OFDM について

A Wavelet OFDM 概要

Wavelet OFDM では、シンボル長以上の長さを持つインパルス応答を使って、各サブキャリアを帯域制限して第一サイドローブを十分に低いレベルにすることが可能な Wavelet 変換を採用し、伝送路環境に柔軟に追従するとともに、高速伝送を実現する。

Wavelet は、画像処理などに使用されているものを含め、多くの種類を有する。ここでは、通信に適した Wavelet 変換として、完全再構成コサイン変調フィルタバンク(PR-CMFB)を選定した。このフィルタバンクの特長は、実数変換であり、一次変調にはパルス振幅変調(PAM)を使用することである。また、送受信機のフィルタが整合フィルタの関係となり、理想的な環境では ICI(Inter-Carrier Interference)も ISI(Inter-Symbol Interference)もなく完全に直交すること、オーバーラッピングファクタ $g \geq 4$ ($g = 2K$, K : integer)に設定すれば、サブキャリアの第一サイドローブレベルを 30 [dB]以下にできること、高速変換アルゴリズムが使用できることなどがあげられる。

ここでは、Wavelet OFDM 信号処理の構成法について述べる。まずは、Wavelet OFDM を通信に用いる場合の構成である、完全再構成コサイン変調フィルタバンク(PR-CMFB)について述べる。このフィルタバンクは、直交フィルタバンクの一種である。

PR-CMFB は、ラティスフィルタ型をベースとしたプロトタイプフィルタとタイプ IV の高速 DCT(Discrete Cosine Transform)を使って構成することが可能である。これにより、PR-CMFB においても高速アルゴリズム変換による演算量の低減を行うことができる。DCT には、主に 4 つのタイプ (I、II、III、IV) が存在する。DCT-IV は、それ自身が逆変換となる特長をもつ。図 3.5-8 は、高速 PR-CMFB のブロック図を示す。図に示すように、高速 PR-

CMFB のシンセシスフィルタバンクとアナリシスフィルタバンクは、共に DCT-IV とプロトタイプフィルタから構成され、通常はラティス型のフィルタ構造を有する。

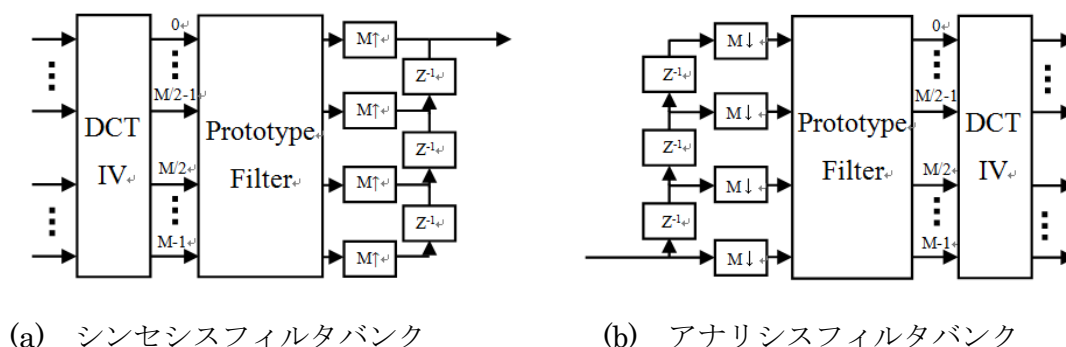


図 3.5-8 高速 PR-CMFB

Wavelet OFDM のスペクトルを図 3.5-9 に示す。選定したプロトタイプフィルタを使用することにより、各サブキャリアの第一サイドローブレベルが 35 [dB] 減衰することがわかる。少なくとも任意の 2 本のサブキャリアを不使用とすることで、35[dB] のスペクトルノッチが容易に形成できる。この特長により、伝送路の状況を把握して柔軟に対応することにより、不要なサブキャリアを不使用にして、使用サブキャリアのみにエネルギーを集中することが可能となる。

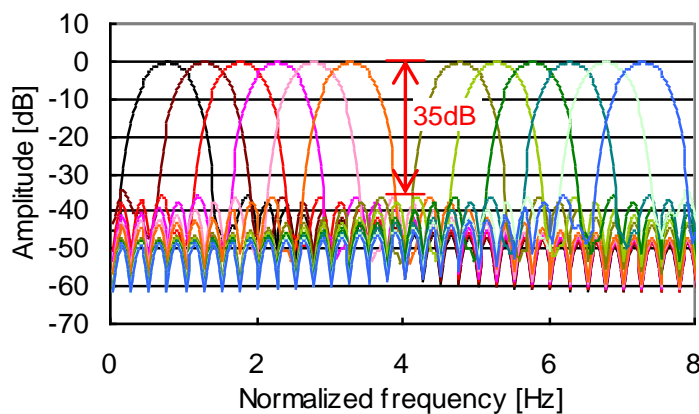


図 3.5-9 Wavelet OFDM スペクトル

B Wavelet OFDM の主な仕様

表 3.5-4 に Wavelet OFDM の基本仕様を示す。キャリア間隔は 61kHz、シンボル長は 8.192 μ sec、変調には PAM(Pulse Amplitude Modulation)を用いて 2~32PAM/carrier まで対応し、周波数範囲は 2~30MHz を基本とする。この場合の最大物理速度(Physical layer)の速度は約

240Mbps である。誤り制御には、リードソロモン符号(RS: Reed Solomon)、畳み込み符号(CC: Convolutional Code)、接続符号(RS-CC)や低密度パリティ符号(LDPC: Low Density Parity Code)が利用される。

図 3.5-10 に Wavelet OFDM を利用した送信系のブロック図を示す。簡単に説明すると、上位から流れてきたデータに対して、Scrambler ブロックでデータにスクランブルを行い、誤り訂正符号処理後、Mapping ブロックで変調し、IDWT ブロックで Wavelet 逆変換を行う。最後に AFE を通して送信する。

一般的に、伝送路特性は周波数により変化するため、その特性に応じて使用する周波数帯域を選択する。従来の Wavelet OFDM 方式では、2~30MHz の中で約 6MHz (サブキャリアベースで 102 本) 以上の可用帯域を確保できない場合、端末間の接続が確立しない仕様となっていた。従って、周波数変動が大きく、可用帯域が狭い範囲に集中している伝送路への適用には課題があった。そこで、今回新たに狭帯域でも通信が可能となるモードの検討および開発を行った。従来のモードを標準モードとし、使用する帯域を 1/2 および 1/4 とするモード (1/2 モード、1/4 モード) を新設する。各モードでの最小可用帯域も約 3MHz (サブキャリアベースで 50 本) まで変更可能であり、ロバスト性の向上も期待できる。

表 3.5-5 にモード対応表を示す。この表では、各モードにおけるシンボル長、チャンネル数、周波数シフト、キャリア番号および Channel ID を示す。なお、サンプリング周波数は 62.5MHz、IDWT では 512 ポイント Wavelet 変換を使用している。さらに、図 3.5-11 には各モードと Channel ID の関係を示す。

標準モードでは、シンボル長 8.192 μ sec で 2~30MHz 内の約 430 サブキャリアを利用し 1 チャンネル(x-1)のみを使って送受信を行う。一方、1/2 モードでは、シンボル長は標準モードの 2 倍でサブキャリア間隔は標準モードの 1/2 となり、周波数シフトを行うことにより 2 チャンネル(x-2、x-3)が利用可能である。また、1/4 モードでは、シンボル長は標準モードの 4 倍でサブキャリア間隔は標準モードの 1/4 となり、同様に 4 チャンネル(x-4、x-5、x-6、x-7)の構成となる。上記により、各チャンネル ID に対応するサブキャリア数は同数 (理論最大 512 サブキャリア) となっているので、基本的に各チャンネルでのロバスト性はほぼ同等になっている。

今回、標準モードを基本にシンボル長、言い換えるとサブキャリア間隔を可変とするために、リサンプリング技術を適用した。図 3.5-12 の送信ブロックに示すように、AFE の直前でリサンプリング処理を行うことで 1/2 および 1/4 モードに対応した。なお、Wavelet(逆)変換ブロックは通常、送信機 (図 3.5-12 の IDWT) と受信機 (図示せず) に各 1 個しか持たないため、同時に複数チャンネルを利用することは想定していない。図 3.5-13 にリサンプリング処理の具体的な事例を示す。図 3.5-12(a)では Channel ID: x-3 の場合、図 3.5-12 (b)では Channel ID: x-5 の場合における概念図を示す。

まず、図 3.5-12 (a)では、サンプリング周波数($2 \cdot fs_1$)は 62.5MHz である。ここで、サンプリング周期が 2 倍になるとナイキスト周波数(fs_1)未満に存在していた標準モードの信号は、ナイキスト周波数は fs_2 で、 fs_2 未満の帯域に信号が再配置される。次に、2 倍アップサン

プリングを実行することで、折り返し信号が fs_2 の高周波側に生成され、ナイキスト周波数は fs_3 になる。さらに、フィルタ処理により高域側の折り返し信号が除去され、最後に周波数シフトによりチャンネル 2 (Channel ID: x-3) へ移動する。

図 3.5-12(b)では、同様にサンプリング周波数($2*fs_1$)は 62.5MHz である。ここで、サンプリング周期を 4 倍にすることでナイキスト周波数は fs_4 となり、 fs_4 未満の帯域に信号が再配置される。次に 2 倍アップサンプリングを実行することで、折り返し信号が fs_4 の高周波側に生成され、ナイキスト周波数は fs_5 になる。さらに、フィルタ処理により高域側の折り返し信号が除去され、最後に周波数シフトにより高周波側へ移動する。続けて、2 倍アップサンプリングを実行することで、折り返し信号が fs_5 の高周波側に生成され、ナイキスト周波数は fs_6 になる。さらに、フィルタ処理により高域側の折り返し信号が除去され、最後に 1/4 モードのチャンネル 2 (Channel ID: x-5) が生成される。

その他の Channel ID についても同様の生成方法で、標準モードの信号を基準に各チャンネルへ再配置を行う。このように、標準モードを起点として、リサンプリング処理を加えることにより、各 Channel ID で決められているシンボル長とサブキャリア間隔に変更される。

通信を行なう場合、各チャンネル内で伝送路特性を推定し、使用するチャンネルを決める。具体的には、各サブキャリアの信号対雑音比 (SNR) から算出される物理速度を計算し、最も減衰やノイズの影響が少ない、言い換えると物理速度が速くて通信パケットの再送が少ないチャンネルを選択する。伝送路推定は、定期的に行う場合と、伝送路環境が急変してデータ誤りが増大したことをトリガとして行う場合の 2 つの制御パターンがある。

表 3.5-4 Wavelet OFDM の基本仕様

	Wavelet OFDM
Carrier Space [KHz]	61.03515625
Symbol Length [μ sec]	8.192
Modulation [PAM] (per carrier)	2、 4、 8、 16、 32
Frequency Range [MHz]	2 ~ 30
Maximum PHY Rate [Mbps]	240
Forward Error Correction	Reed-Solomon (RS) Convolutional Code (CC) RS +CC and LDPC-CC

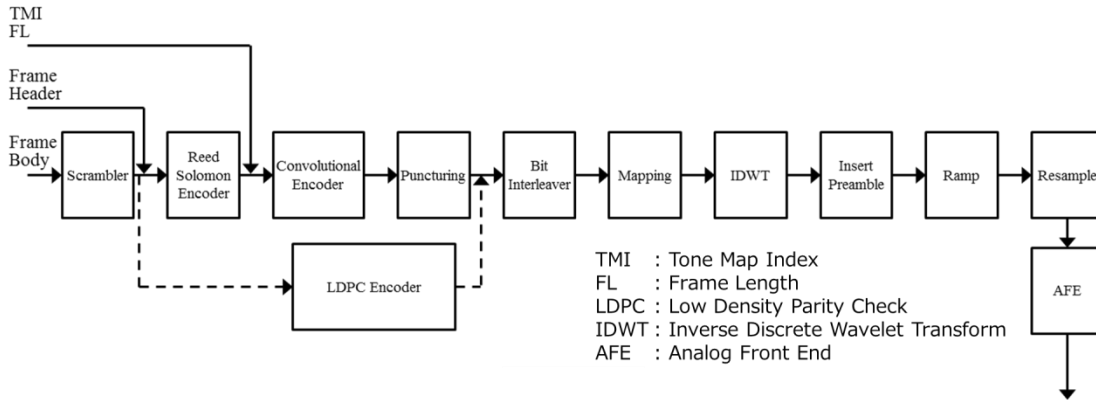


図 3.5-10 Wavelet OFDM 送信ブロック

表 3.5-5 モード対応表

モード	シンボル長 [us]	チャンネル数	周波数シフト [MHz]	キャリア番号	Channel ID
標準	8.192	1	0	0 - 511	x-1
1/2	16.384	1	0	0 - 511	x-2
		2	15.625	512 - 1023	x-3
1/4	32.768	1	0	0 - 511	x-4
		2	7.8125	512 - 1023	x-5
		3	15.625	1024 - 1535	x-6
		4	23.4375	1536 - 2047	x-7

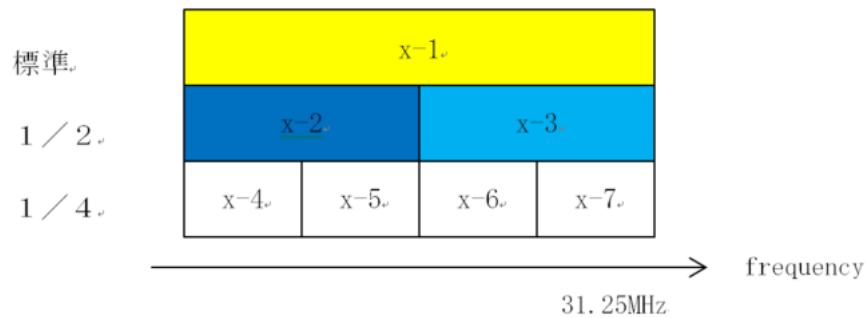


図 3.5-11 Channel ID と周波数の関係

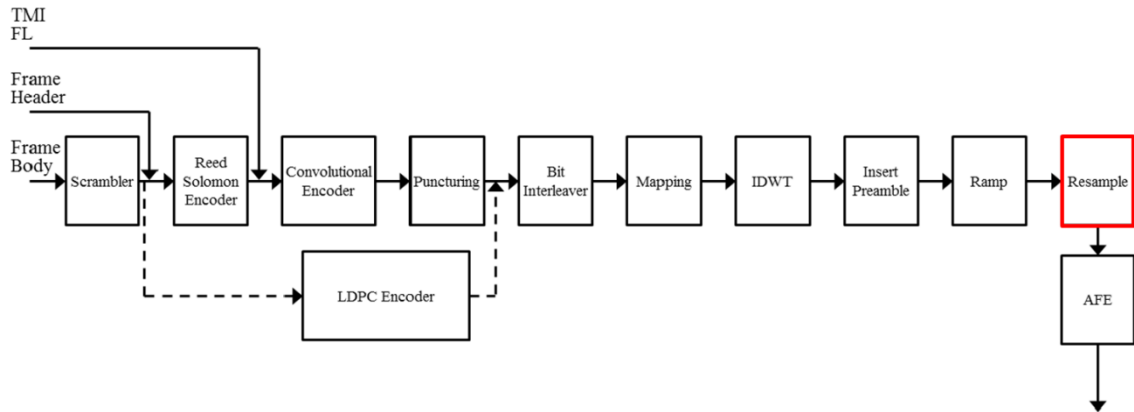


図 3.5-12 Wavelet OFDM 送信ブロック (1/2 モードおよび 1/4 モード対応)

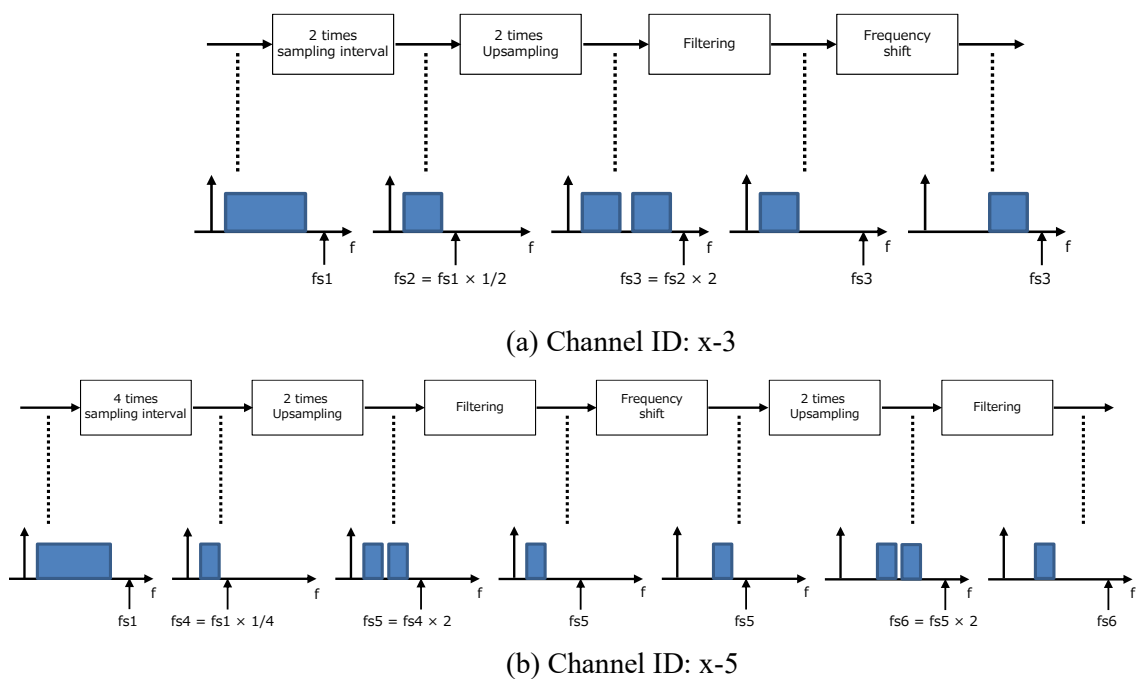


図 3.5-13 リサンプリング処理の一例

C FPGA を用いた基本通信特性

図 3.5-14 に今回使用する FPGA ボードを示す。FPGA は Intel 社製 Arria10 SoC チップ(型番:10AS066N2F40)を用い、これを搭載した開発キット(型番:DK-SOC-10AS066S-A)にて評価用プロトタイプの FPGA ボードの開発を行なった。

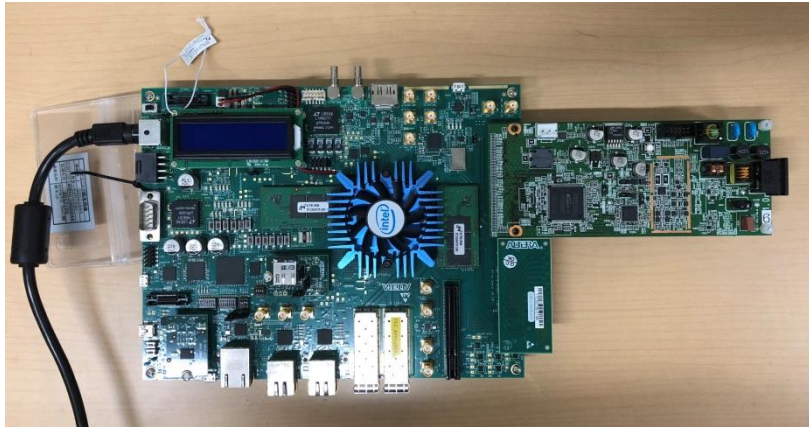


図 3.5-14 FPGA ボード

C-1 送信信号スペクトル (PSD)

送信信号スペクトル (PSD) の測定系を図 3.5-15 に示す。

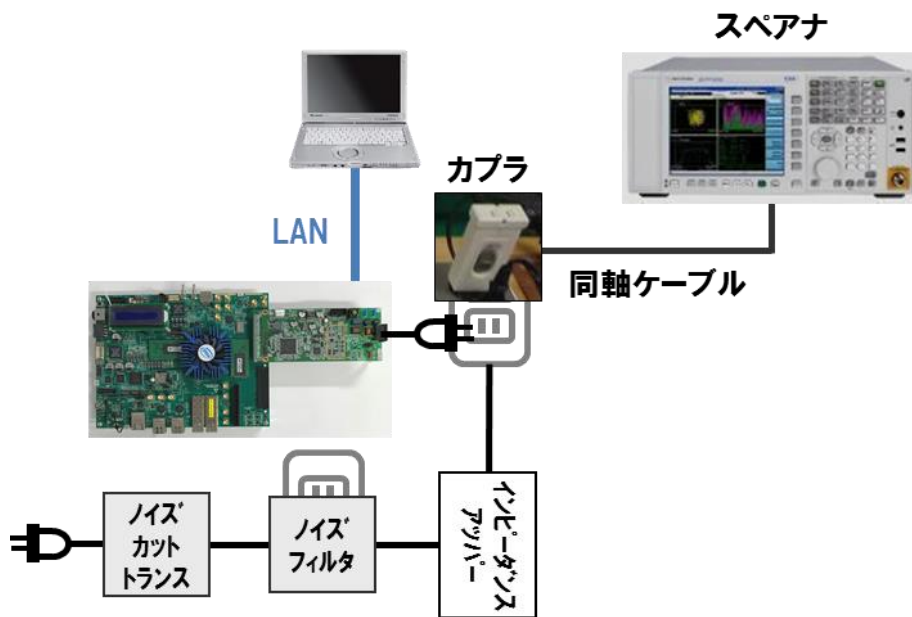


図 3.5-15 PSD 測定系

標準モード、1/2 モード、1/4 モードにおける各 Channel ID の送信信号スペクトルを図 3.5-16～図 3.5-18 に示す。横軸が周波数[MHz]、縦軸が送信電力[dBm/10kHz]を表しており、各モードの各 Channel ID において設計仕様通りのスペクトルが得られている。なお、1/2 モードおよび 1/4 モードの一部のチャンネルで送信パワーがフラットになっていないのは、リサンプリング処理の中で用いているフィルタの特性が見えているためである。

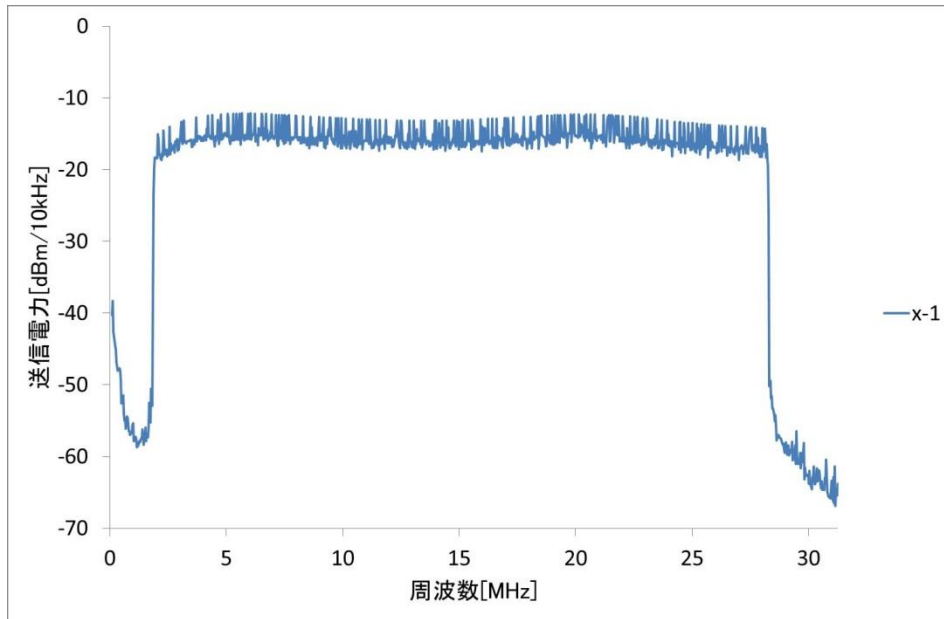


図 3.5-16 標準モード (Channel ID : x-1)

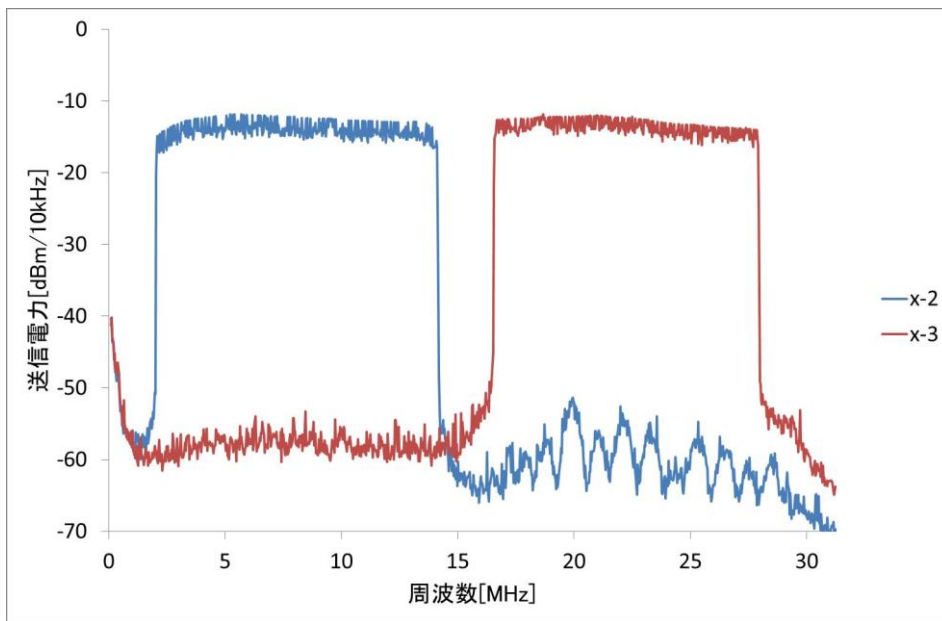


図 3.5-17 標準(1/2)モード (Channel ID : x-2~x-3)

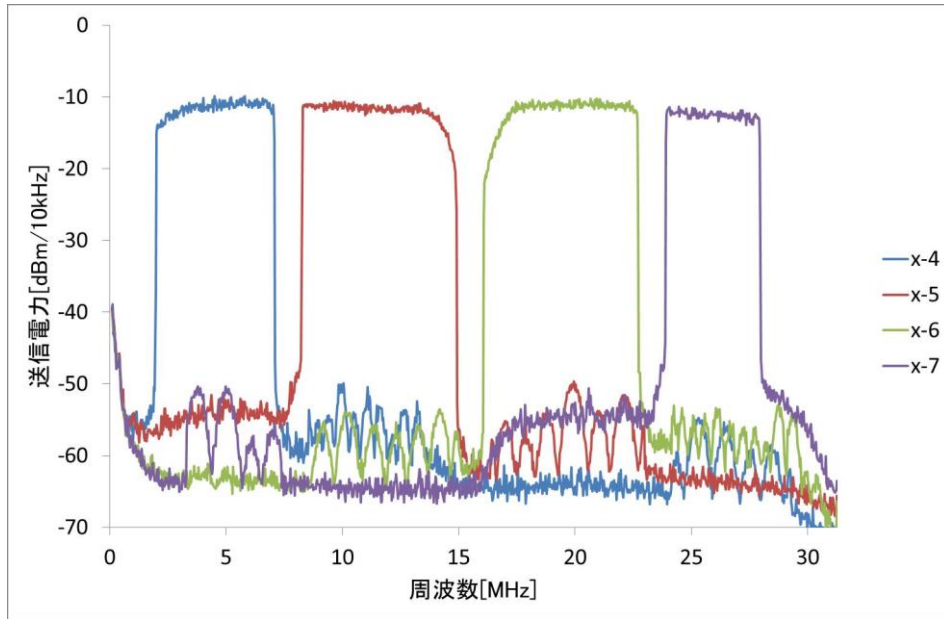


図 3.5-18 標準(1/4)モード (Channel ID : x-4~x-7)

C-2 通信速度測定 (静特性)

静的環境での通信速度の測定系を図 3.5-19 に示す。

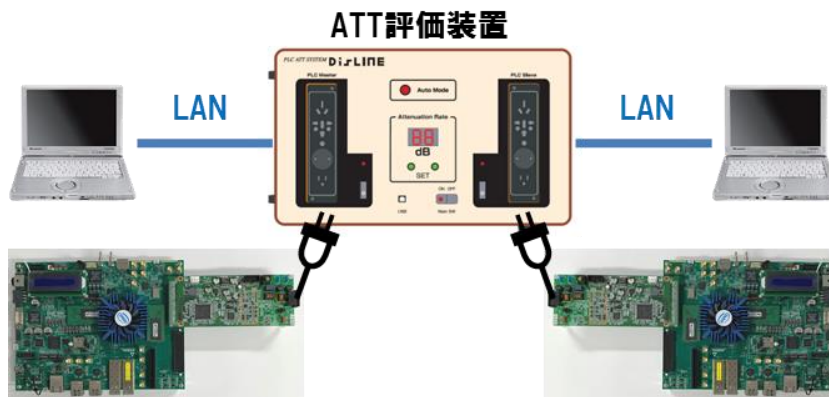


図 3.5-19 通信速度測定系 (静的環境)

ATT 評価装置で FPGA ボード間の減衰量を変化させながら、UDP および TCP プロトコルを使用した場合の通信速度の測定を行った。標準モード、1/2 モード、1/4 モードの代表的な Channel ID (x-1, x-2, x-5) における測定結果を図 3.5-20~図 3.5-22 に示す。横軸が減衰量[dB]、縦軸が通信速度[Mbps]を表しており、Master→Terminal、Terminal→Master の双方向で測定を行った。

フラット領域 (最大速度の領域) において、標準モードを基準とした時に、1/2 モードで

約 1/2、1/4 モードで約 1/4 の速度になっていることが確認できた。また、減衰領域（速度低下の領域）においては、ATT 評価装置がほぼフラットな減衰特性を有するため、いずれのモードにおいても減衰量が約 50dB を上回る辺りから速度が低下し始め、減衰量が 80dB の時にはほぼ同じ速度（10Mbps～15Mbps）となる。

今後は、実環境（海水中）の伝送路特性を把握した上で、Wavelet OFDM 方式の特長である、減衰が小さく信号が通りやすい周波数帯域（Channel）にエネルギーを集中させた場合の通信速度評価を行っていく。

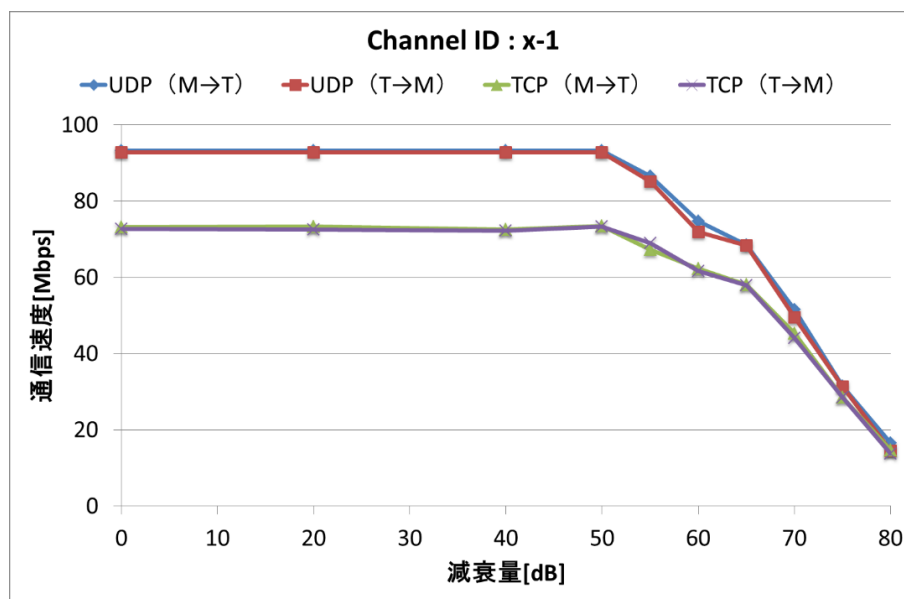


図 3.5-20 標準モード(Channel ID : x-1)

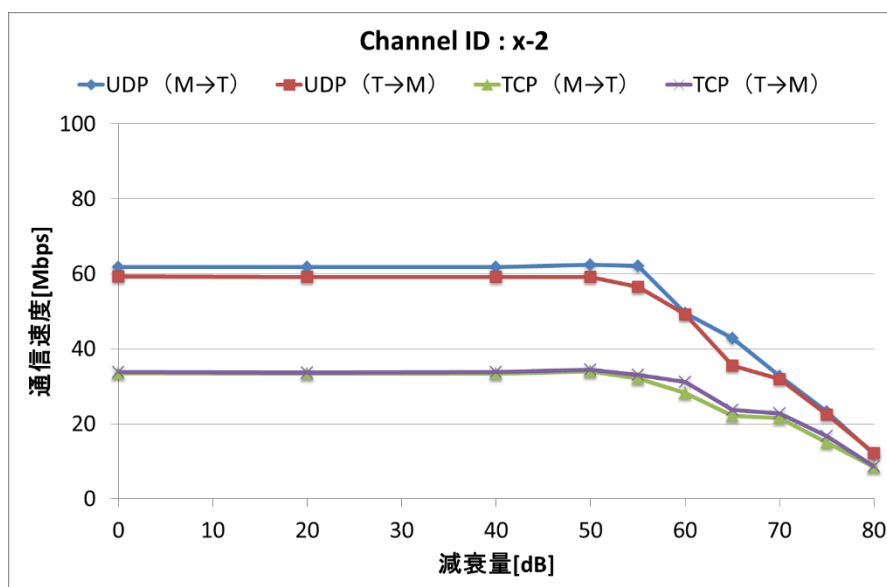


図 3.5-21 1/2 モード(Channel ID : x-2)

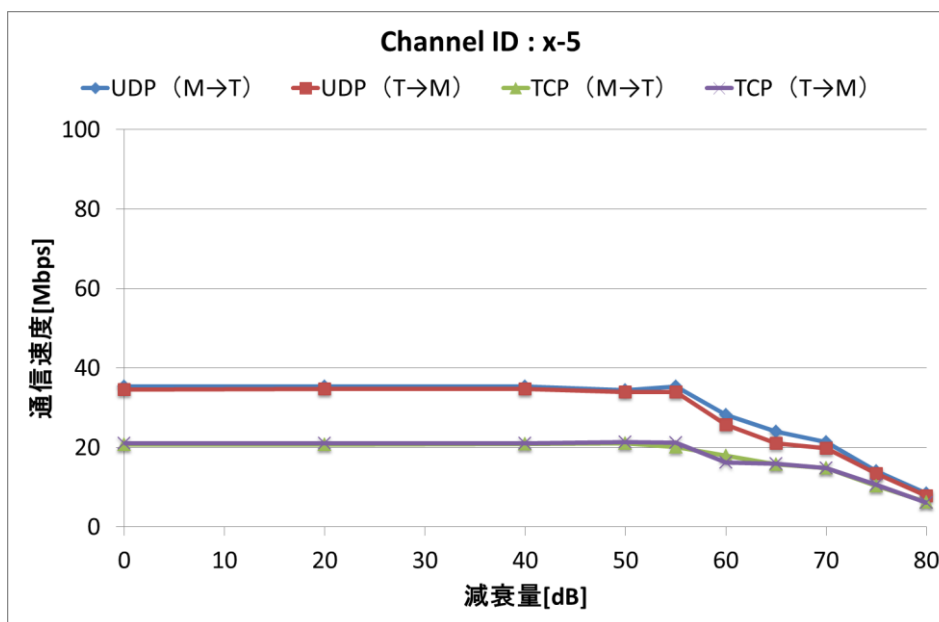


図 3.5-22 1/4 モード (Channel ID : x-5)

パナソニック株式会社の Wavelet OFDM 通信方式を基に、マルチキャリア型の通信アルゴリズムを構築するため、FPGA を用いた環境を設定する。

アンテナについては、受電コイルを通信アンテナとして適用可能か調査し、適用可能な場合は、受電コイルをアンテナとして用いる。適用できない場合は、電磁界シミュレーションにより、アンテナを選定し、必要に応じてアンテナの製作を実施する。また、水中での電波伝搬測定の実験方法を調査する。

3.5.3.2. 基礎検証フェーズ I の内容

基礎検証フェーズ I では、小型水槽を用いて塩水中の伝送路特性を測定し、Wavelet OFDM 方式のチャネル選択アルゴリズムの検討および海中通信用アンテナの設計を行った。また、このアンテナと FPGA ボードを用いて小型水槽で塩水中での通信実験を行い、通信速度と通信距離に関する特性評価を行った。

3.5.3.2.1. 海中通信用送受電アンテナ（結合器）

A 損失媒質中の固有伝搬定数

海水は Na+Cl-イオンにより導電性 σ と水分子の分極による誘電率 ϵ を持つ、このため海水中を電磁波が伝搬する場合は損失媒質での伝搬定数を検討する必要がある。損失媒質中を平面波が伝搬する場合、 $\sigma \gg \omega\epsilon$ の領域では媒質の固有インピーダンス η 、伝搬定数 α 、減衰定数 β は [18]p19 より式(3.5-1)となる。

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+j) \quad \alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (3.5-1)$$

また波長 λ 、伝搬速度 v は式(3.5-2)となる。

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = 2\pi \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}} \quad v = f\lambda = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu_0\sigma}} \quad (3.5-2)$$

図 3.5-23 で z 方向に損失媒質中を平面波が進む場合の減衰量は式(3.5-3)となる。

$$At(z) = e^{-\alpha z} \quad (3.5-3)$$

z が 1m 進むときに平面波の振幅は $e^{-\alpha}$ 減衰する。この減衰量を dB で示すと式(3.5-4)となる。

$$At = -8.686\alpha \text{ (dB)} \quad (3.5-4)$$

ここで係数は Np 単位から dB 単位への変換で $-8.686=-20/\text{Ln}10$ である。図 3.5-23 の電界の強さが $1/e$ となる厚みを表皮深さ δ と呼び式(3.5-5)となる。

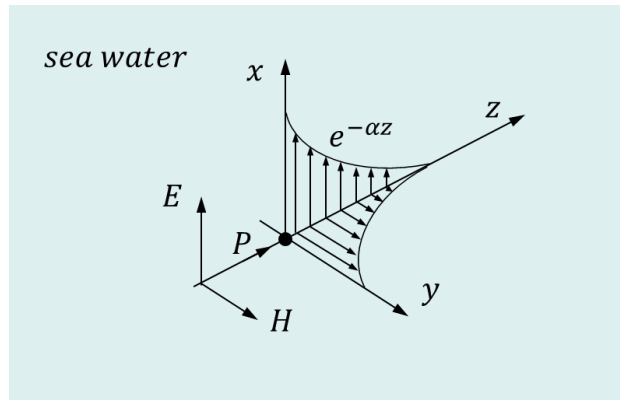


図 3.5-23 海水中の平面波の減衰

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}} \quad (3.5-5)$$

減衰定数の逆数で与えられる。高周波電流が導体を通るときにその表面に電流が集まるので、表皮効果と呼ばれている。そのときの抵抗を表皮効果抵抗と呼び次式(3.5-6)で与えられる。

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} = \frac{1}{\delta\sigma} \quad (3.5-6)$$

B 海水中の電磁波の伝搬

海水中を平面波が伝搬する場合の固有伝搬定数を表 3.5-6 に示す。海水の導電率は 5(S/m)、比誘電率は 78 として計算した。海水中では 1MHz の伝搬速度は光速 30 万 km/s に比べて 1414km/s で 約 1/200 と非常に遅くなり、波長は空間の 300m に比べて 1.41m も同じように 約 1/200 に短くなる。

表 3.5-6 海水の固有伝搬定数

	η Ω	v(km/s)	λ(m)	
			海中	空間
空間	377	299792	—	—
10kHz	0.13	141	14.14	29979
100kHz	0.40	447	4.472	2998
1MHz	1.3	1414	1.414	299.8
10MHz	4.0	4472	0.447	29.98
100MHz	12.6	14142	0.141	2.998

図 3.5-24 に式(3.5-4)より計算した海水の減衰量を示す。海水の減衰量は 1MHz で 38.6dB/m、10MHz で 121dB/m、100MHz で 369dB/m と非常に大きい。この減衰量は海水の媒質によるものでありこれに距離 r の減衰量加わる。減衰量の大きさから海中での電磁波による通信は非常に難しく音響を使った通信が主流となっている [19]。

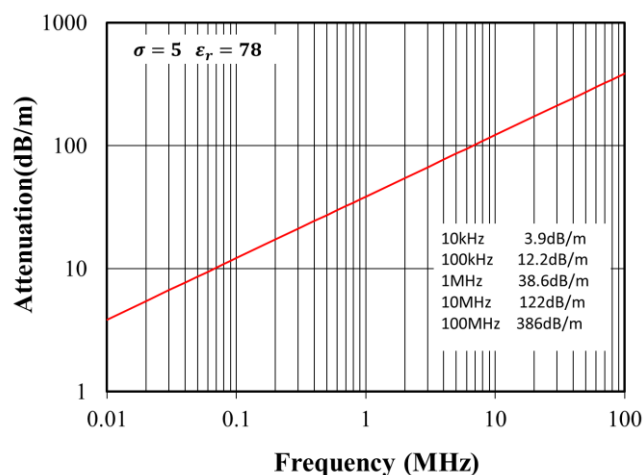


図 3.5-24 海水の減衰量

海中では電磁波を使って長距離の海中通信を行うことは容易ではないが、本研究では、海中ワイヤレス給電で AUV に充電中の充電制御やデータの転送を目的とするために数 m の距離の伝送を目標とする。そこで 2つのコイルを海中に置いて磁界結合による通信アンテナの検討を行う。本研究では 2つのコイルを近距離で結合して使うためこれを結合器と呼ぶ。

C 海中通信の結合器の目標仕様

伝送レートが数 Mbps 程度の通信速度を得るためには HF 帯以上で広帯域な通信方式が必要である。また海水は減衰量が大きいため、減衰量大きい伝送路でも高速通信が可能な Wavelet OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を用いた通信方式を用いる。本研究では海中通信アンテナはこの方式に適した仕様で検討する。今回検討するアンテナは 2つのコイルを海中に置き、結合器として磁界結合させて伝送特性を得る。表 3.5-7 に結合器の仕様を示す。タイプ A~C の結合器のいずれかで挿入損失 1 では -50dB 以下のとき 95Mbps のフルレートの海中通信が可能となる。また挿入損失 2 では -80dB 以下でも 1Mbps の伝送が可能である。

表 3.5-7 結合器の目標仕様

項目	タイプA		タイプB		タイプC	
伝送帯域	2-28MHz	全伝送帯域	2-28MHz	伝送帯域で6MHz以上の帯域を確保する	①0.5-7MHz ②8-15MHz ③16-23MHz ④24-31MHz	①~④の1つ
挿入損失1 95Mbps	-50dB以下		-50dB以下		-50dB以下	
挿入損失2 1Mbps	-80dB以下		-80dB以下		-80dB以下	
入出カインピーダンス	50Ω		50Ω		50Ω	

D コイルの近傍界でのベクトルポテンシャルと磁界強度

損失媒質中にコイルを置いた場合の近傍の磁界強度から2つのコイルの間の結合度を計算する。図 3.5-25 に示す半径 a のコイルを示す。このコイルに電流 I を流したときに座標 P のベクトルポテンシャル A_φ は以下の式(3.5-7)である。

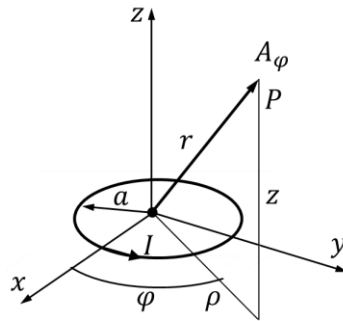


図 3.5-25 コイルに電流を流しときの磁界強度

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{\rho}} \left\{ \left(1 - \frac{m^2}{2} \right) K(m) - E(m) \right\} e^{-j\kappa r} \quad (3.5-7)$$

$$m^2 = \frac{4ar}{(a + \rho)^2 + z^2} \quad (3.5-8)$$

ここで κ は波数、 I はコイルを流れる電流、 $K(k)$ 、 $E(k)$ は第1種、第2種完全楕円積分であり m は母数(modulus)である。

$$\kappa = \beta - j\alpha \quad (3.5-9)$$

α は減衰定数、 β は伝搬定数である。ここで α 、 β は以下の式(3.5-10)となる。

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left(\frac{1}{2} \right) \sqrt{\left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right\}} \quad \beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left(\frac{1}{2} \right) \sqrt{\left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right\}} \quad (3.5-10)$$

式(3.5-10)で、導電率が高い媒質中 $\sigma/\omega\varepsilon \gg 1$ 媒質中では α 、 β は式(3.5-11)となる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (3.5-11)$$

式(3.5-10)で、導電率が低い媒質中 $\sigma/\omega\varepsilon \ll 1$ 媒質中では α 、 β は式(3.5-12)となる。

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\omega\mu}{\varepsilon}} \quad \beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \left[1 + \frac{1}{8} \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2 \right] \quad (3.5-12)$$

磁界 H はベクトルポテンシャルから式(3.5-13)となる。

$$\begin{aligned} \mu_0 H &= \nabla \times A_\varphi \\ &= \left(\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right) \hat{r} + \left(\frac{\partial A_\rho}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \hat{\varphi} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial z} - \frac{\partial A_\rho}{\partial \varphi} \right) \hat{z} \right) e^{-jkr} \end{aligned} \quad (3.5-13)$$

円筒座標系では z 軸に円対称の場合は $A_\rho = 0$ 、 $A_z = 0$ 、 $1/\partial\varphi = 0$ であるので式(3.5-14)となる。

$$H_\rho = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} e^{-jkr} \quad H_z = \frac{1}{\mu_0 r} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} e^{-jkr} \quad (3.5-14)$$

ここでコイルの z 軸方向についてのベクトルポテンシャルは [20]p213 より式(3.5-15)となる。

$$A_\varphi \approx \frac{\mu_0 I}{4} \frac{a^2 \rho}{\{(a+\rho)^2 + z^2\}^{3/2}} e^{-jkr} \quad (3.5-15)$$

式(3.5-14)、(3.5-15)より図 3.5-25 の座標 P での磁界強度は式(3.5-16)、(3.5-17)となる。

$$H_\rho = \frac{3I}{4} \frac{a^2 \rho z}{\{(a+\rho)^2 + z^2\}^{5/2}} e^{-jkr} \quad (3.5-16)$$

$$H_z = \left[\frac{a^2 I}{2\{(a+\rho)^2 + z^2\}^{3/2}} - \frac{3I}{4} \frac{a^2 \rho (a+\rho)}{\{(a+\rho)^2 + z^2\}^{5/2}} \right] e^{-jkr} \quad (3.5-17)$$

z 軸上では $\rho = 0$ より式(3.5-18)となる。

$$H_\rho = 0 \quad H_z = \frac{a^2 I}{2(a^2 + z^2)^{3/2}} e^{-jkr} \quad (3.5-18)$$

この式はビオ・サバル法則より計算した式に減衰量を掛けたものと等しくなる。

E 損失媒質中での2つのコイル間の結合係数の計算式

図 3.5-26 に平行に置いた2つのコイルの配置図を示す。コイル1に電流を流したとき発生する磁束がコイル2に鎖交することで2つのコイルが結合する。

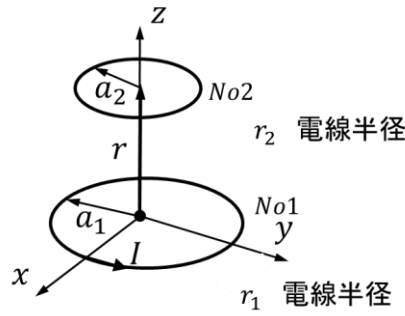


図 3.5-26 2つのコイル間の結合係数

コイル1に I の電流を流したときにコイル2に鎖交する磁束数 ψ は、ストークスの定理より式(3.5-7)のベクトルポテンシャル A_ϕ をコイル2の閉曲面で周回積分すればよいので式(3.5-19)となる。

$$\psi = \int_0^{2\pi} a_2 A_\phi d\phi = \frac{2\mu_0 I}{m} \sqrt{a_1 a_2} \left\{ \left(1 - \frac{m^2}{2} \right) K(m) - E(m) \right\} e^{-jkr} \quad (3.5-19)$$

ここで母数 m は式(3.5-20)となる。

$$m^2 = \frac{4a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2 + r^2} \quad (3.5-20)$$

コイル1に流した電流と鎖交する磁束数 ψ の比が相互インダクタンス M なので式(3.5-21)となる。

$$M = \frac{\psi}{I} = \frac{2\mu_0}{m} \sqrt{a_1 a_2} \left\{ \left(1 - \frac{m^2}{2} \right) K(m) - E(m) \right\} e^{-jkr} \quad (3.5-21)$$

また、図 3.5-26 の1ターンコイルは電線半径を r_1, r_2 とすると自己インダクタンスを L_1, L_2 とすると式(3.5-22)となる。

$$L_1 = \mu_0 a_1 \left(\text{Ln} \frac{8a_1}{r_1} - \frac{7}{4} \right) \quad L_2 = \mu_0 a_2 \left(\text{Ln} \frac{8a_2}{r_2} - \frac{7}{4} \right) \quad (3.5-22)$$

結合係数は k は式(3.5-23)となる。

$$k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{2}{m} \frac{\left(1 - \frac{m^2}{2} \right) K(m) - E(m)}{\sqrt{\left(\text{Ln} \frac{8a_1}{r_1} - \frac{7}{4} \right) \left(\text{Ln} \frac{8a_2}{r_2} - \frac{7}{4} \right)}} e^{-\alpha r} \quad (3.5-23)$$

また2つのコイルの抵抗を R_1, R_2 とすると式(3.5-24)となる。

$$Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1} \quad Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2} \quad (3.5-24)$$

F コイル間の相互インダクタンスの低下

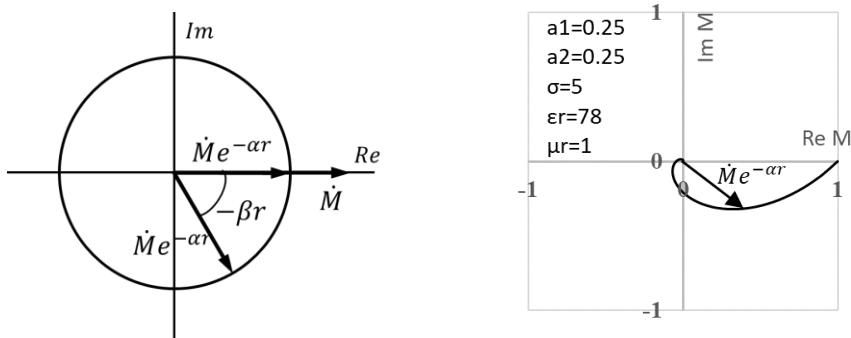
海中での相互インダクタンスは式(3.5-21)よりコイル間の距離による距離減衰にコイル間にある海水の減衰定数 α による減衰の積となる。式(3.5-21)の距離減衰による相互インダクタンスを \dot{M} とすると式(3.5-25)となる。

$$\dot{M} = \frac{2\mu_0}{m} \sqrt{a_1 a_2} \left\{ \left(1 - \frac{m^2}{2} \right) K(m) - E(m) \right\} \quad (3.5-25)$$

これは空間での相互インダクタンスと同じになる。式(3.5-22)と式(3.5-9)より式(3.5-26)となる。

$$\begin{aligned} M &= \dot{M} e^{-(\alpha+j\beta)r} = \dot{M} e^{-\alpha r} \cdot e^{-j\beta r} \\ &= \dot{M} e^{-\alpha r} (\cos(-\beta r) + j \sin(-\beta r)) \end{aligned} \quad (3.5-26)$$

図 3.5-27(a)で式(3.5-26)を説明する。距離が r で M の大きさは損失媒質の減衰定数 α により $\dot{M} e^{-\alpha r}$ と小さくなると同時に位相定数 β により $-\beta r$ だけ回転する。図 3.5-27(b)に距離 r を変えた場合の M の変化を示す。距離減衰 \dot{M} と減衰定数 α により減衰し位相定数により回転しながら r に対して指数的に小さくなることがわかる。



(a)低下説明図

(b)海水での相互インダクタンスの低下

図 3.5-27 減衰定数、位相定数による相互インダクタンスの減衰

G 損失媒質中のコイル間の伝送特性

コイル間の挿入損失はコイル間の結合係数 k とコイル Q から kQ 積により最大有能電力効率を求めることで計算できる [21]。これは海中のような損失媒質中でもよく一致することが知られている [12]。損失媒質での kQ 積は式(3.5-23)(3.5-24)でも計算できるが、回路パラメータをネットワークアナライザで測定することから Z パラメータからの計算が実用的である。 Z パラメータと kQ 積は以下の式(3.5-27)、(3.5-28)の関係である。

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \quad (3.5-27)$$

$$kQ = \frac{|Z_{21}|}{R_{11}R_{22} - R_{12}R_{21}} \quad |Z_{21}| = \sqrt{R_{21}^2 + X_{21}^2} \quad (3.5-28)$$

式(3.5-28)の kQ積は結合器あればどのようなものでも計算できる。kQ積により最大有能電力効率 は式(3.5-29)となる。

$$kQ = \tan 2\theta \quad \eta_{max} = \tan^2 \theta \quad (3.5-29)$$

2つのコイル間の理論的に最小となる挿入損失は以下の式(3.5-30)で計算できる。

$$IL_{min} = 10\text{Log}(\eta_{max}) \quad (\text{dB}) \quad (3.5-30)$$

実験やシミュレーションでは k と Q を分離して効率の寄与度を確認する必要がある。そのため 2 ポートの Z パラメータから Q を計算する式を示す。

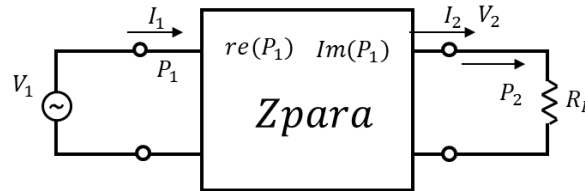


図 3.5-28 Z パラメータから Q の計算

図 3.5-28 においてポート 1 から入力される電力を P_1 とすると、回路で消費される電力は P_1 の実部であり、回路に蓄積される電力は P_1 の虚部である。またポート 2 に接続された負荷抵抗で消費される電力は P_2 の実部である。Q の定義より式(3.5-31)となる。

$$Q = \frac{\text{蓄積エネルギー}}{\text{消費エネルギー}} \quad (3.5-31)$$

ここでポート 1 から電力を入れた場合は式(3.5-32)となる。

$$P_1 = Z_{11} + \frac{Z_{21}Z_{12}}{R_L - Z_{22}} \quad P_2 = \frac{R_L|Z_{21}|^2}{|R_L - Z_{22}|^2} \quad (3.5-32)$$

ここでポート 2 から電力を入れた場合は式(3.5-33)となる。

$$P_2' = Z_{22} + \frac{Z_{12}Z_{21}}{R_L - Z_{11}} \quad P_1' = \frac{R_L|Z_{12}|^2}{|R_L - Z_{11}|^2} \quad (3.5-33)$$

Q は式(3.5-31)より式(3.5-34)となる。

$$Q_1 = \frac{\text{Im}P_1}{\text{Re}P_1 + \text{Re}P_2} \quad Q_2 = \frac{\text{Im}P_2'}{\text{Re}P_1' + \text{Re}P_2'} \quad (3.5-34)$$

ここで R_L はシミュレーションや実験で使用した値を用いる。また S パラメータから Q を計算することも有用なので合わせて式(3.5-35)に示す。

$$Q_1 = \frac{2\text{Im}S_{11}}{1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2} \quad Q_2 = \frac{2\text{Im}S_{22}}{1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2} \quad (3.5-35)$$

ここで Q の平均は相乗平均を用いて計算すると式(3.5-36)となる。

$$Q = \sqrt{Q_1 Q_2} \quad (3.5-36)$$

式(3.5-28)、式(3.5-36)より結合係数 k を計算することができる。

H 2つのコイルの相互インダクタンス、結合係数、 Q 、挿入損失の検討

図 3.5-29 に 2つのコイルで周波数や距離 r を変えた場合の結合係数を式(3.5-25)(3.5-26)を用いて計算した。

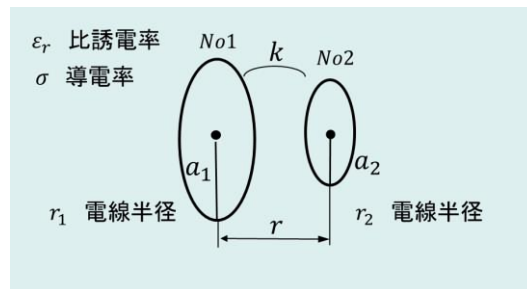
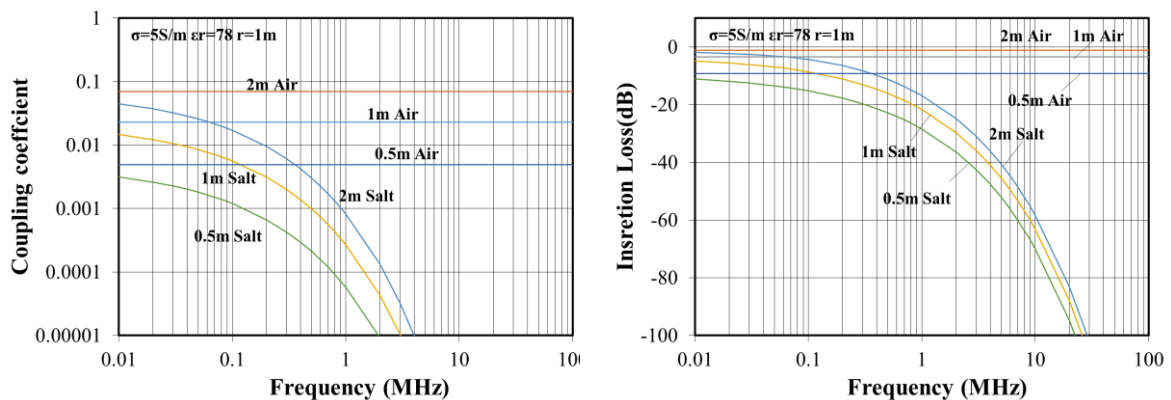


図 3.5-29 損失媒質中のコイル結合

図 3.5-30 は 2、1、0.5m の同じ直径の 2つのコイルで距離を $r = 1\text{m}$ に固定し、周波数を変えた場合の空中と塩水 3%相当の導電率 $5(\text{S/m})$ として結合係数 k と挿入損失を計算した。コイルの $Q = 50$ で周波数での変化はないものとして計算した。電線直径は 10mm とした。結合係数や挿入損失は塩水に入れただけで大幅に低下し周波数を高くすると急激に減衰することがわかる。海中通信は HF 帯以上の周波数では過酷な条件であることがわかる。



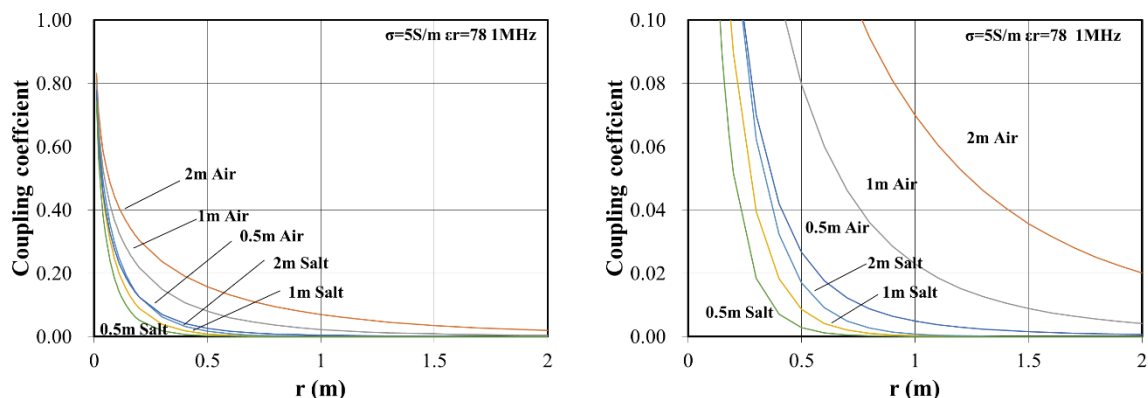
(a) 結合係数の周波数特性

(b) 挿入損失の周波数特性

図 3.5-30 損失媒質中のコイル結合係数と挿入損失

同様の条件で、周波数を 1MHz に固定してコイル間距離 r を変えた場合の結合係数と挿入損失を計算する。図 3.5-31(a)では塩水中に入れると空間に対して結合係数が大幅に低下す

ることがわかる。また図 3.5-31(b)ではコイル直径を大きくすると同じ距離では結合係数が大きくなる。



(a)コイル間距離特性

(b)コイル間距離特性 拡大図

図 3.5-31 コイル間距離を変えた場合の結合係数

図 3.5-32 に挿入損失の計算結果を示す。Q = 50のコイルで 1MHz の周波数であれば 2m の距離で-50dB の挿入損失が得られる。この値が 2つのコイルが完全に整合が取れた場合の理論限界値である。

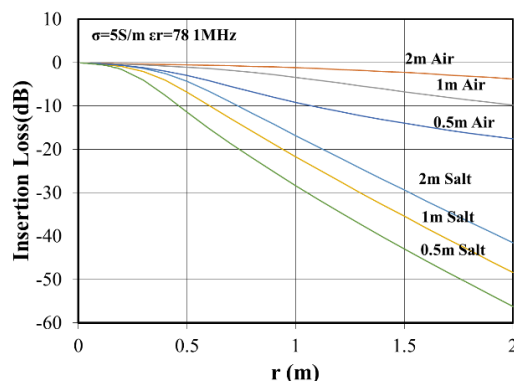
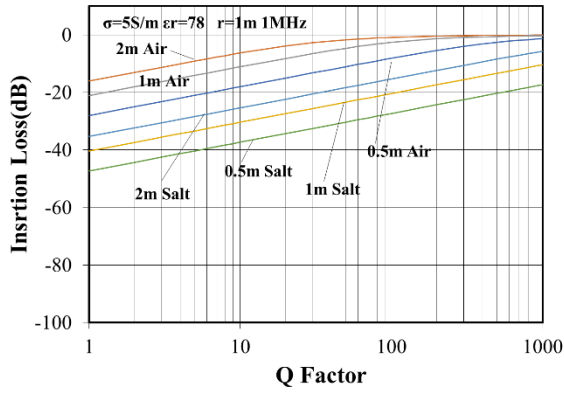
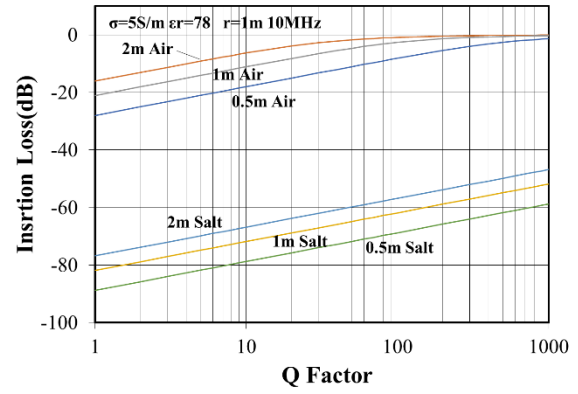


図 3.5-32 コイル間距離を変えた場合の結合係数

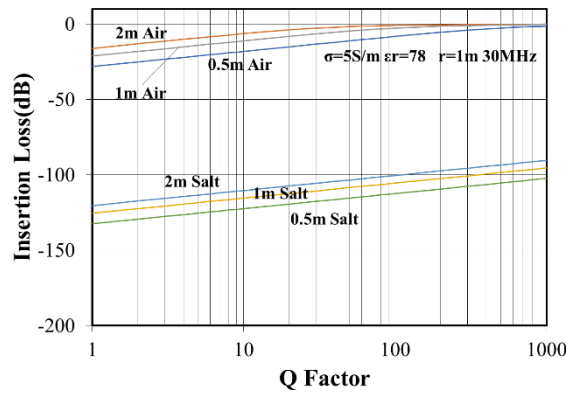
図 3.5-33 に空間、海水中で Q を変えた場合の挿入損失の理論限界を示す。周波数 1、10、30MHz である。式(3.5-29)の kQ 積の理論 [21]によれば、2つのコイルが結合している場合は、海水の減衰量が大きくてもコイルの Q を大きくすることで挿入損失は改善される。図 3.5-24 で 1MHz の減衰量は-38.6dB/m であるが、1m のコイルで Q が 100 であれば 1m の伝送距離で-20dB の理論限界の挿入損失となる。しかし周波数が 10MHz、30MHz の場合は 1m のコイルでは、それぞれ-62dB、-105dB の大きな損失となる。したがって挿入損失を小さくするには、コイルの Q を大きくし、伝送周波数をできるだけ低くすることが必要である。



(a)1MHz の伝送特性



(b)10MHz の伝送特性



(c) 30MHz の伝送特性

図 3.5-33 Q を変化させた場合の伝搬特性の変化

I 結合器の結合係数と減衰量の計算値と実験値の比較

I-1 実験システム

図 3.5-34 に実験の概念図を示す。本年度の研究では、小型の水槽を使った実験を想定して 0.7m 程度の距離について検討を行う。図 3.5-34 の実験では、2つのコイル直径を 0.5m として検討した。

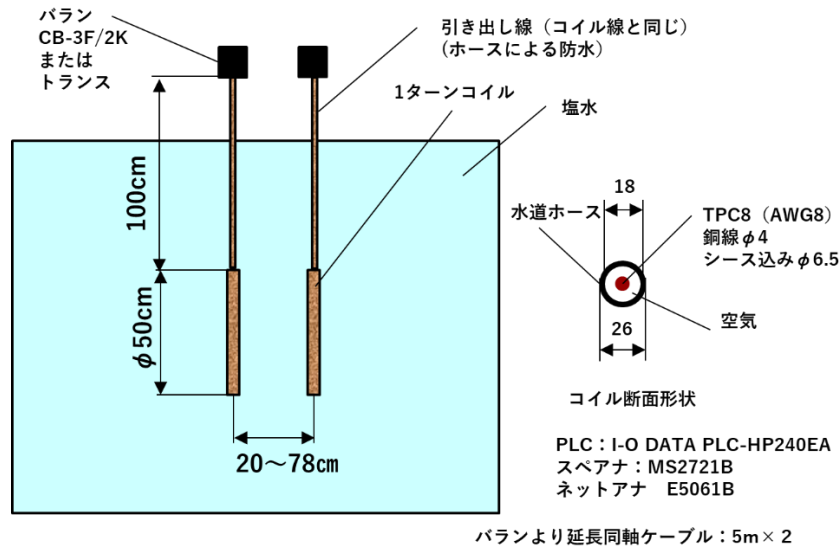


図 3.5-34 実験システム

I-2 結合係数の計算値と実験値の比較

図 3.5-36 にコイル間距離を 0.2~0.78m 動かしたときの結合係数の周波数特性を示す。実線が測定値、点線が計算値である。

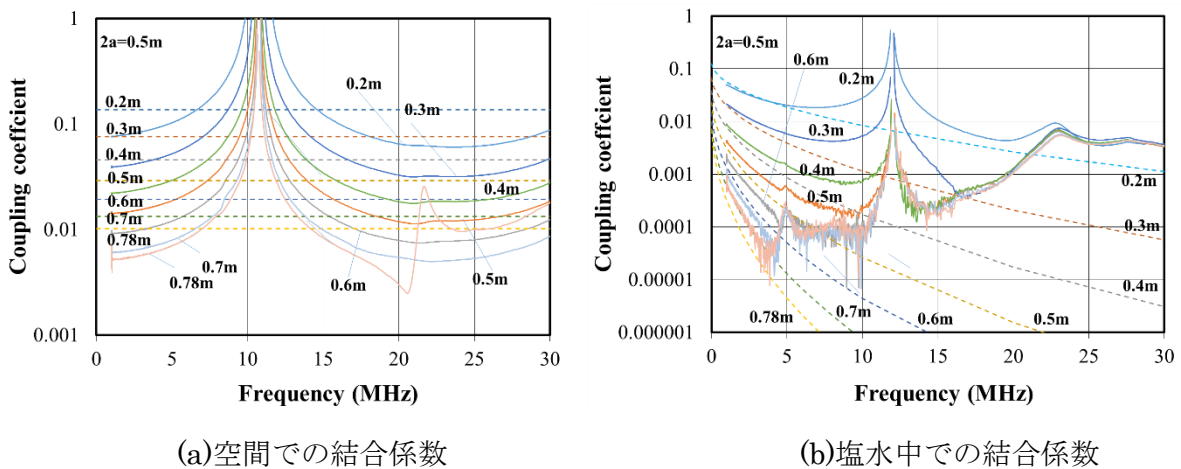
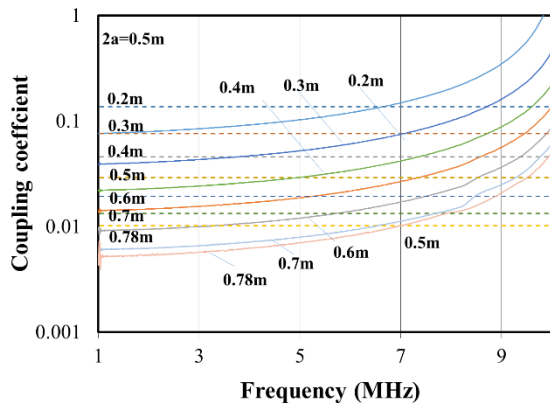
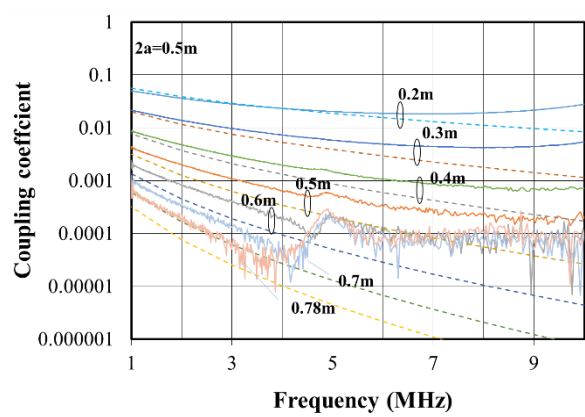


図 3.5-35 周波数と距離を変えた場合の結合係数の計算値と実験値の比較

0.5m コイルは 12MHz 付近に自己共振点があり 10MHz 以上の周波数では結合係数を測定できないため 1~10MHz について結合係数の計算値と実験値の比較を海水と空間で比較を行った。海中では 3MHz 以下では比較的良好に一致しているが、周波数が 5MHz 以上になると実験値では結合係数が大きくなる。これは自己共振の影響と考えられる。



(a)空間での結合係数

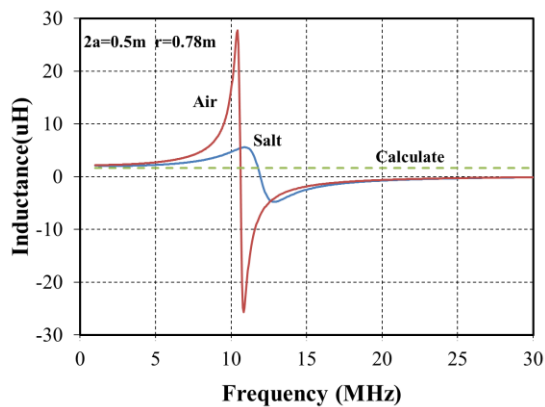


(b)塩水中での結合係数

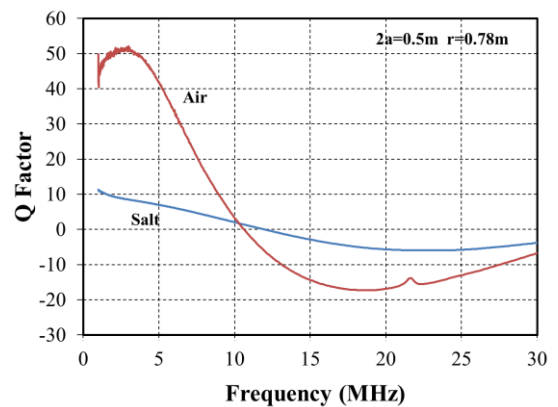
図 3.5-36 周波数と距離を変えた場合の結合係数の計算値と実験値の比較

I-3 空間、塩水中でのインダクタンス、Q

図 3.5-37 に空間、塩水中でのインダクタンスと Q の測定値を示す。12MHz 付近で自己共振している。空間から塩水に入れると自己共振の影響が少ない 1~5MHz 付近のインダクタンスの変化が小さいが Q は 1/4 以下に大幅に低下する。インダクタンスの計算値と測定値は良く一致している。



(a)インダクタンス



(b)空間での Q

図 3.5-37 空間、塩水中でのインダクタンスと Q

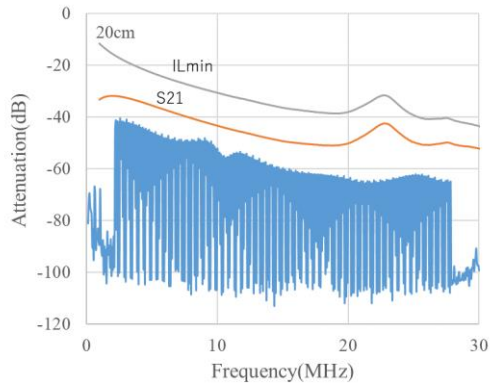
J コイル間の伝送特性の評価

図 3.5-34 の実験システムでコイル間隔を変えた場合の伝送特性の測定値を

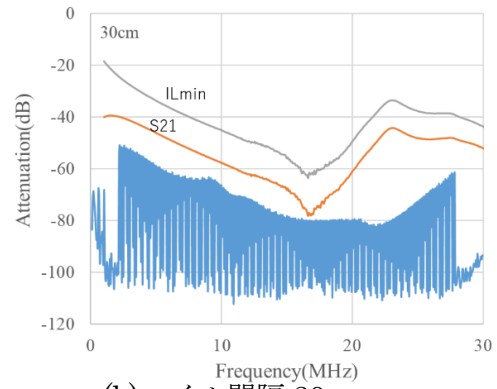
図 3.5-38 に示す。測定はベクトルネットワークアナライザ E5061B(VNA)と PLC-HP240EA を信号源としてスペクトラムアナライザ MS2721B を用いて測定した。また VNA より測定した S パラメータから Z パラメータを計算し式(3.5-29)を用いて最大有能電力効率を計算し伝送特性の最大値を求めた。 IL_{min} に対して S_{21} の特性が $10\sim 20\text{dB}$ 低くなっている。これは不整合損失によるものと考えられる。また S_{21} に対してスペクトラムアナライザのデータが 10dB 低く出ているがこれは PLC の出力電力が -10dBm のためである。この検討で表 3.5-7 の結合器タイプ C ①でフルレート伝送可能な距離 0.3m 程度である。

また例えば 0.6m の伝送においては 15MHz 以上で伝送特性が良くなっているが、本来であれば周波数が高くなると減衰量が大きくなるはずである。この実験で入出力のケーブルを塩水の外に出したために空間での結合の可能性も考えられる。

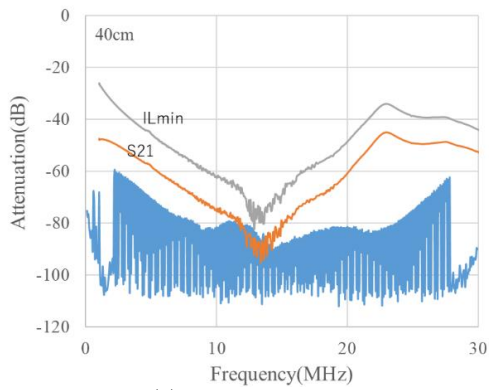
この影響を避けるため 2020 年度以降はネットワークアナライザを塩水中に沈めて測定を行っている。



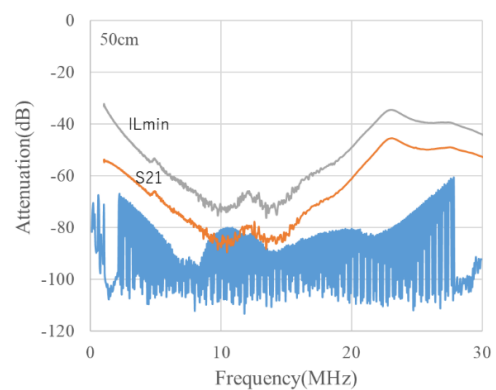
(a) コイル間隔 20cm



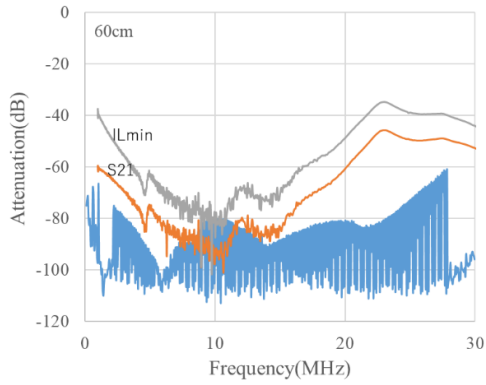
(b) コイル間隔 30cm



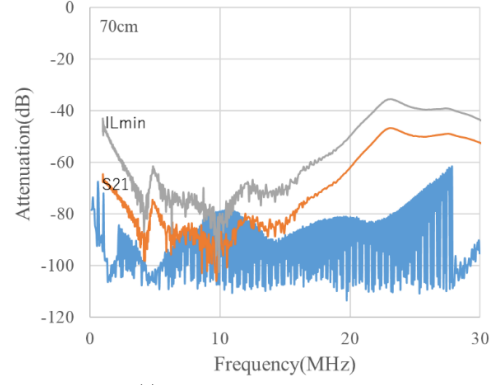
(c) コイル間隔 40cm



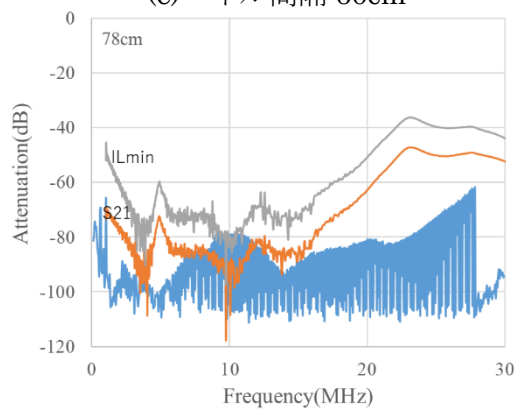
(d) コイル間隔 50cm



(e) コイル間隔 60cm



(f) コイル間隔 70cm



(g) コイル間隔 78cm

図 3.5-38 塩水中での伝送特性

この検討で表 3.5-7 の結合器タイプ C-①よりフルレート伝送可能な距離 30 cm 程度、1MHz の伝送では 50 cm 程度である。実際に図 3.5-34 の実験システムに PLC を接続したときの伝送レートを図 3.5-39 に示す。この検討ではフルレートで 0.25m、レートは落ちるが 0.5m までは伝送することができた。

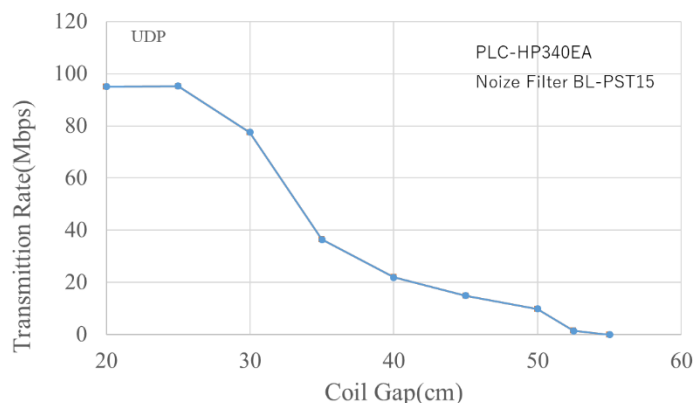


図 3.5-39 PLC での伝送レート

K 結合器の検討のまとめと課題

海中通信のための結合器として 2 つのコイル間の結合による方法を理論的な内容と実験で検討した。2 つのコイルが結合している場合の相互インダクタンスは伝送距離による損失と磁界が伝搬する損失媒質の減衰定数の積となり大きく減衰する。この場合でも kQ 積により伝送効率が決まるため、コイルの Q を上げることで伝送効率を改善できることがわかった。

本年度の実験では以下の課題抽出ができた。

- 1) 0.5m コイルでは 11MHz 付近で自己共振が起こる。この自己共振が起こる原因と対策が必要である。
- 2) コイルの $Q = 10$ (1MHz) と低いため伝送効率が低下する。コイルの Q アップのため電線の損失や塩水中での電線の回りの電磁界を解析し対策を行う。
- 3) 結合係数が小さい 2 つのコイルで広帯域に整合を取ることは非常に難しい。しかし kQ 積より計算した理論限界に対して 10~20dB も低いため有効な整合方法を調査検討する。
- 4) コイル間の測定でケーブルを水槽の外に引き出すため空間で結合している可能性があるため、完全に水没させる評価方法を検討する。
- 5) ハーフシースイアンテナなどコイル以外のアンテナの調査も行う。

3.5.3.2.2. AFE ボード

図 3.5-40 に今回使用する FPGA ボードと試作 AFE(Analog Front End)ボードを示す。FPGA は Intel 社製 Arria10 SoC チップ (型番:10AS066N2F40) を用い、これを搭載した開発キット (型番:DK-SOC-10AS066S-A) を使用する。試作 AFE ボードは、FPGA ボードの拡張用 FMC(FPGA Mezzanine Card)コネクタに接続し使用する。

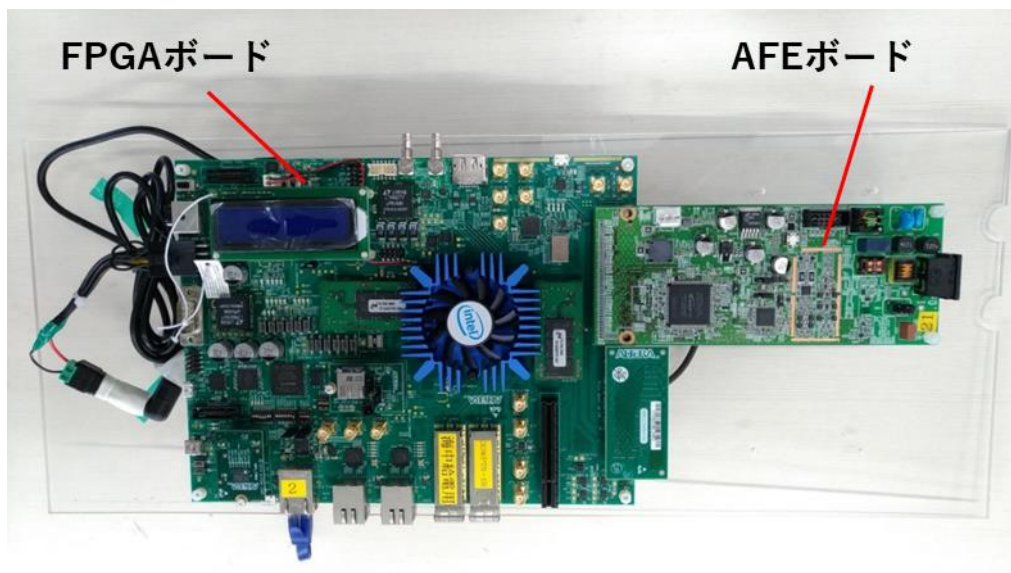


図 3.5-40 FPGA ボード + AFE ボード

図 3.5-41 に AFE ボードの信号送受信回路の構成を示す。

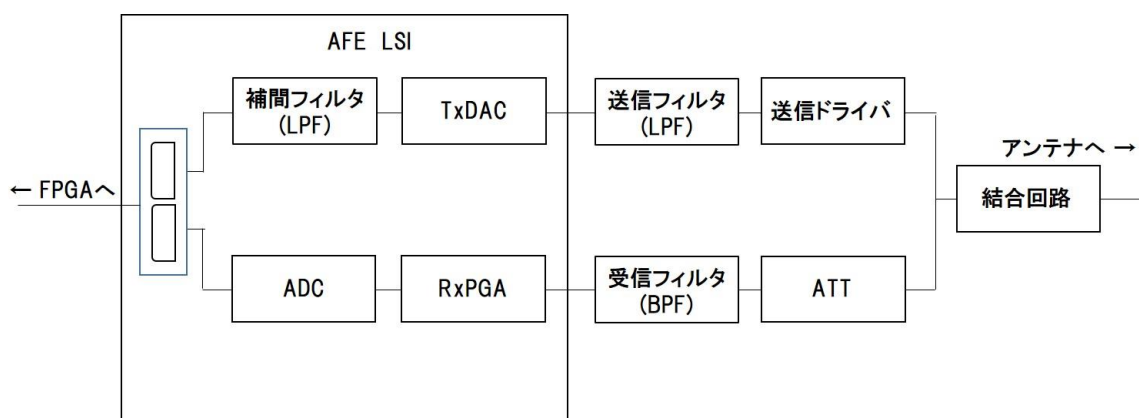


図 3.5-41 AFE ボードの信号送受信回路構成

海中通信用送受信アンテナは、AFE ボードの信号入出力端である結合回路と接続される。送信フィルタは、AFE-LSI 内部の送信デジタルフィルタで落とすきれない帯域外スペ

クトラムを減衰させるために必要であり、受信フィルタは、AFE-LSI 内部の AD コンバータへ信号帯域外のノイズ成分を減衰させるために必要である。

送信フィルタ、受信フィルタの周波数特性を図 3.5-42、図 3.5-43 に示す。

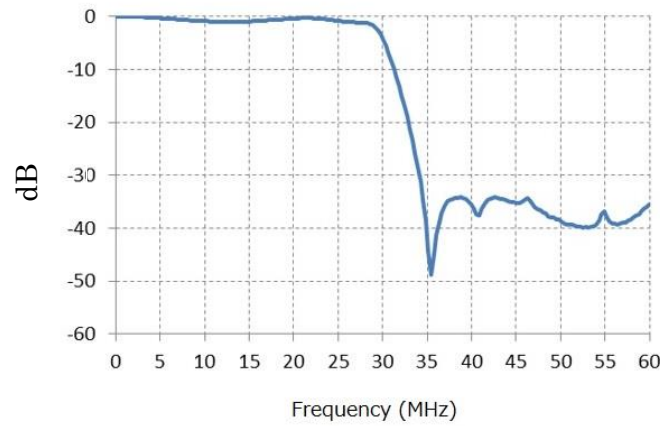


図 3.5-42 送信フィルタの周波数特性

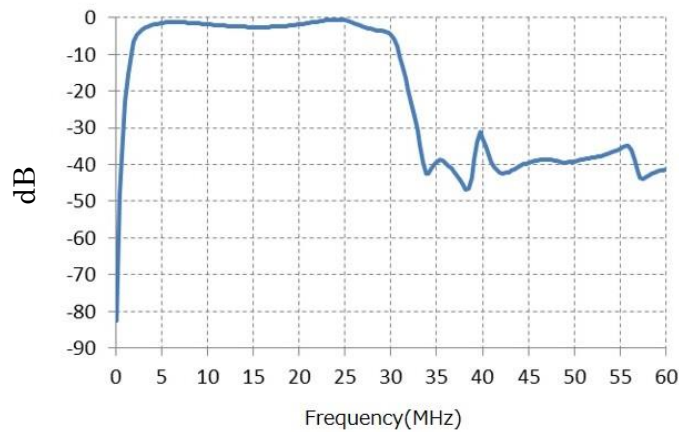


図 3.5-43 受信フィルタの周波数特性

また、送信信号は送信フィルタを通過後、送信ドライバにより増幅される。結合回路通過後、スペクトラムアナライザ直結時に信号スペクトラムが $-10\text{dBm}/10\text{kHz}$ となるように、送信ドライバのゲインと FAGA 内部のパワーコントロールパラメータ値を調整している。

3.5.3.2.3. 周辺機器

A 光ファイバーイーサ変換器

水槽での評価において、送受信機の送受信制御や通信データ取得を水槽外の測定用 PC で行うため、水槽内から陸上へデータ線を引き出す。評価においては、陸上に引き出された送受信機のデータ線間の空中結合を抑制するため、防水容器入れ水槽内に沈めた通信機から陸上に引き出すデータ線を光ファイバーとした。光ファイバーイーサ変換器(BMC-GT-M550M)を使用して、送受信機である FPGA ボードと測定用 PC 間の LAN ケーブルを光ファイバーケーブル(HKB-LL5-10K、LC コネクタ、2 芯マルチモード、10m)に変換している。

B バッテリー

水槽での評価において、海水中の防水容器内で FPGA ボードと光ファイバーイーサ変換器が動作するように電源供給元をバッテリー駆動とした。バッテリーは、LAM-BAT-0002(DC12V 出力、FPGA ボード接続)と Anker PowerCore 10000 (DC5V 出力、光ファイバーイーサ変換器接続)を使用した。なお、FPGA ボードに接続した AFE ボードは、FPGA ボードの拡張用 FMC コネクタ経由で DC12V、DC5V が電源供給される。

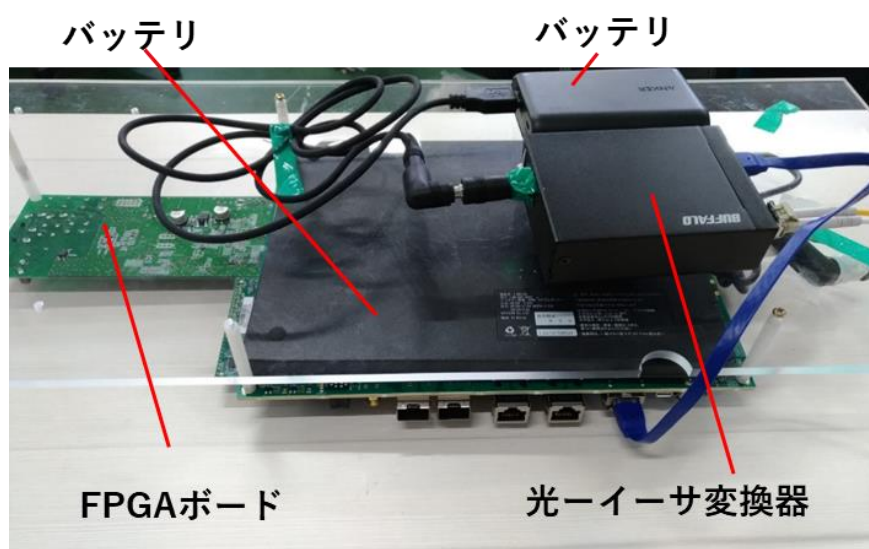


図 3.5-44 収納容器へ収容する周辺機器

3.5.3.2.4. 光イーサ変換器、バッテリー使用による ATT 通信特性確認

水槽での評価のため、光ファイバーイーサ変換器やバッテリーを使用した機器により、通信性能に変化がないか ATT 通信特性の測定を行った。測定系を図 3.5-45 に、測定結果を図 3.5-46 に示す。光ファイバーイーサ変換器・バッテリーの使用の有無による特性変化は見られなかった。

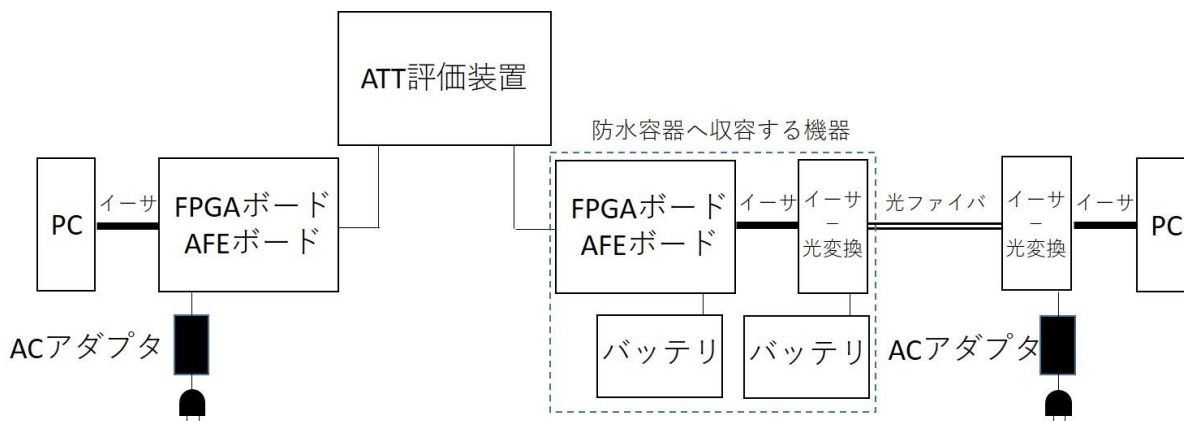


図 3.5-45 水槽評価機器構成での ATT 通信測定系

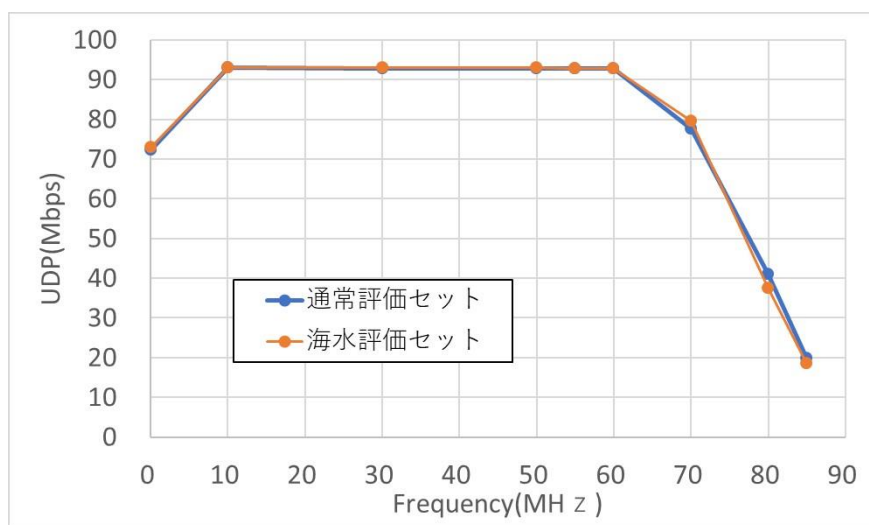


図 3.5-46 ATT 通信測定結果

3.5.3.2.5. 防水収納容器

防水収納容器の構想設計は 3D-CAD で行っており、収納する FPGA ボード・バッテリーの大きさ・水圧・強度を考慮し形状を決定した。構成は、シリンダー (×1)、フランジ (×2)、O リング G-230 (×2)、端子台 (×1)、シールプラグ (×1)、光ファイバーケーブル (×1)、送受電アンテナ接続用ケーブル (×2)。

- ・ シリンダーの材質はアクリルで厚み 5mm。

- ・ フランジ A の材質はアクリル。O リング G-230、光ファイバーケーブルを取り付けている。
- ・ フランジ B の材質はアクリル。O リング G-230、アンテナ接続用ケーブル、端子台、シールプラグを取り付けている。

防水収納容器を人工海水に水没させた場合の浮力は 29.9kgf。水没させるため、防水収納容器、FPGA ボード・バッテリーの質量を考慮し、防水収納容器の内部に 12.2kg の重り（フェライト板）を入れ、外部に 30kg の重りを吊り下げた。フランジ脱落防止のため、フランジとシリンダーの嵌合部をビニールテープで巻いて固定した。

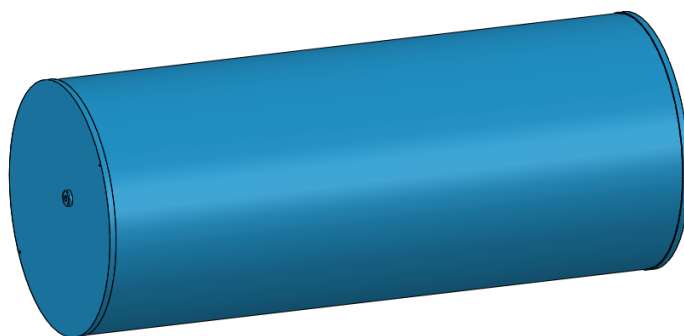


図 3.5-47 3D モデル

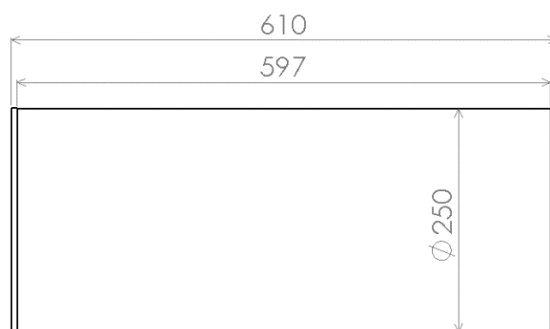


図 3.5-48 寸法(mm)

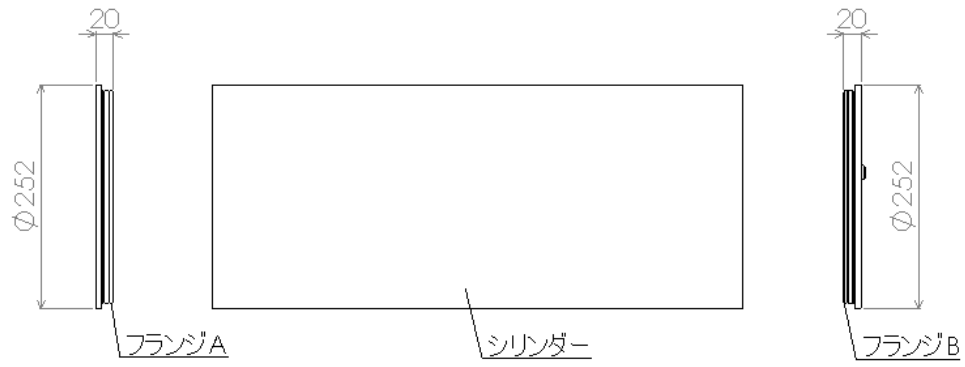


図 3.5-49 寸法(mm)・構成



図 3.5-50 防水収納容器



図 3.5-51 実験の様子 (左) 防水収納容器 (右) 送受電アンテナ

3.5.3.2.6. 塩水中の伝送路特性

伝送路特性の測定系の模式図を図 3.5-52 に、写真を図 3.5-53 にそれぞれ示す。小型水槽の外にあるネットワークアナライザ (Agilent Technologies 社製 型番：E5061B) より、同一レベル (0 [dBm])、単一周波数の信号を 5 [Hz]~60 [MHz]の範囲で掃引しながら送信し、防水容器に格納しているバッテリー駆動のスペクトラムアナライザ (Anritsu 社製 型番：MS2721B) において掃引時間を十分に長くし、受信信号の最大値を取得した。この受信信号スペクトルが各周波数における信号の減衰量、すなわち伝送路特性を示している。

また、小型水槽内の塩水の塩分濃度は 5 [%]とした。一般的に、塩分濃度が高くなると電波は伝わりにくくなる。海水の塩分濃度が約 3.5 [%]であり、ばらつきを考慮した上で実環境よりもやや劣悪な環境を構築した。

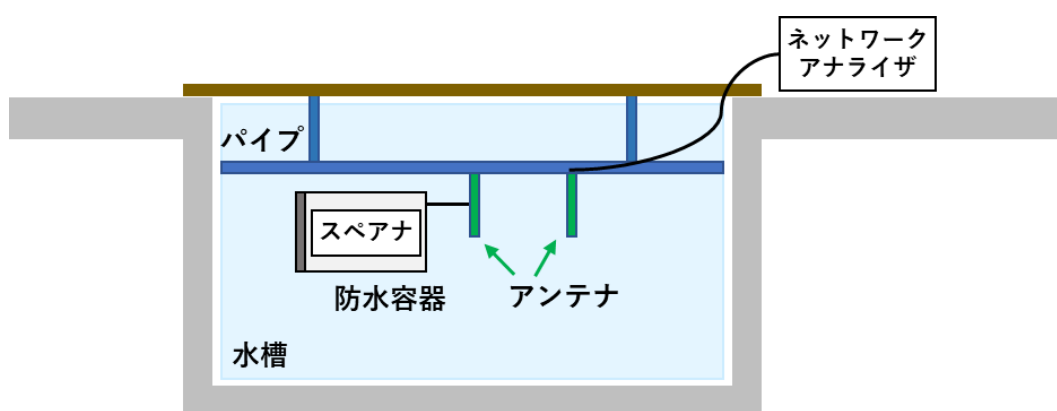


図 3.5-52 伝送路特性の測定系 (模式図)



図 3.5-53 小型水槽とネットワークアナライザ

送受信アンテナ間の距離を 20 [cm]~100 [cm]の範囲で変えた場合の測定結果を図 3.5-54 の(a)~(f)に示す。これらの結果より、アンテナ間の距離を伸ばすにつれて高い周波数帯域

の減衰が大きくなり、可用帯域が狭くなることがわかった。したがって、海中通信に狭帯域のチャンネルを活用することは有効であり、各モードにおいて最も低い周波数帯域のチャンネルを選択することで、通信距離を伸ばすことが可能である。なお、40 [cm]および 60 [cm]の結果において 50 [MHz]付近に約-80 [dBm]の信号が観測されているが、環境雑音を一時的に受信したと考えられ、チャンネル選択のアルゴリズムに影響を及ぼすものではない。

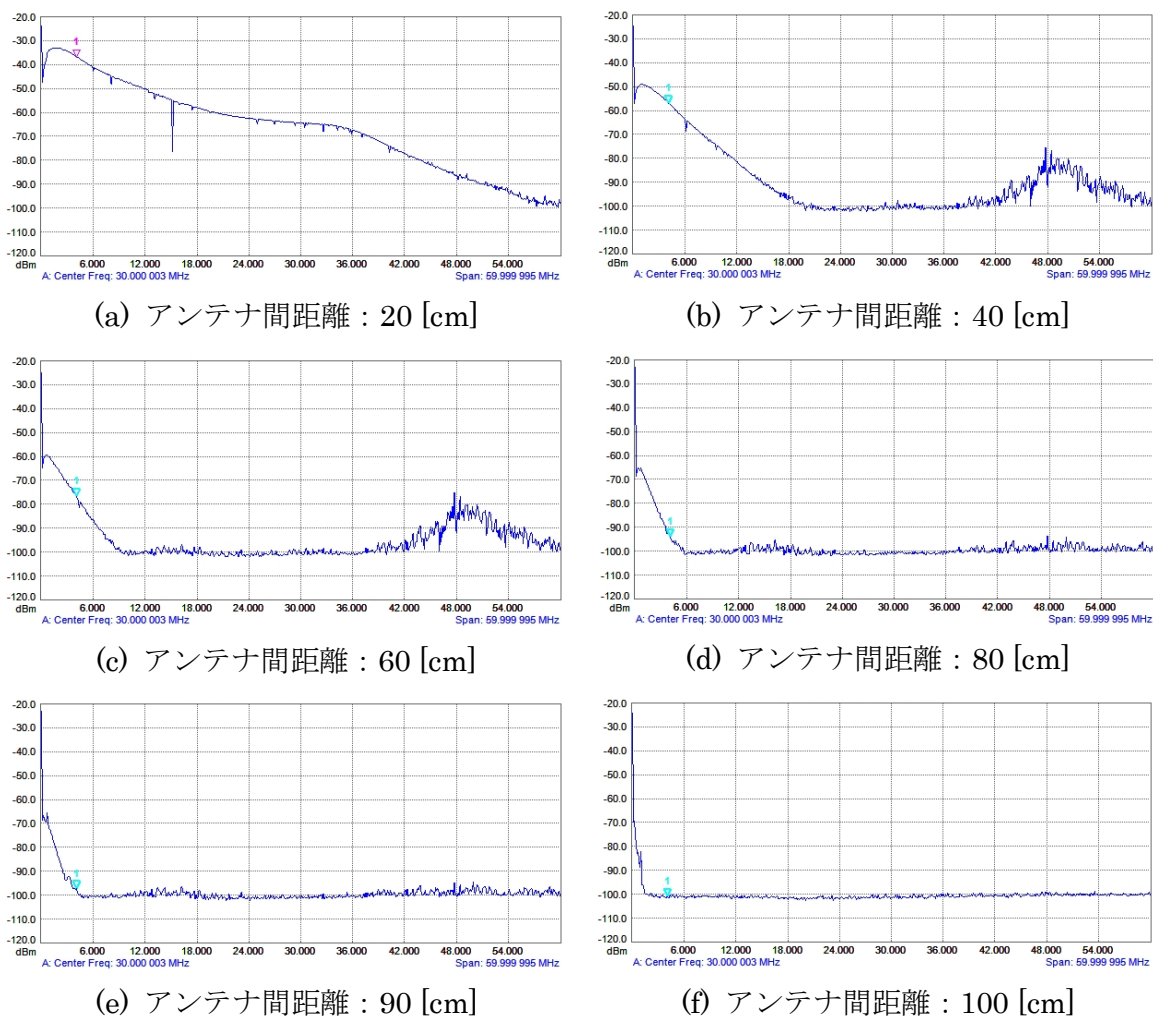


図 3.5-54 塩水中の伝送路特性

3.5.3.2.7. 通信速度測定（塩水中）

通信速度の測定系の模式図を図 3.5-55 に、写真を図 3.5-56 にそれぞれ示す。FPGA ボードを小型水槽の外と防水容器の中にそれぞれ配置し、防水容器に格納するボードはバッテリー駆動の対応を行っている。

送受信アンテナ間の距離を 20 [cm]~100 [cm]の範囲で変えながら、計測用 PC 間で UDP および TCP プロトコルによるベストエフォート型の通信を行い、受信側の速度を測定した結果を図 3.5-57 および図 3.5-58 に示す。伝送路測定の結果を踏まえ、各モードの最も低い

周波数帯域のチャンネル（Channel ID : x-1, x-2, x-4）を選択している。横軸がアンテナ間距離 [cm]、縦軸が通信速度 [Mbps] を表しており、図中の数値は、各チャンネル ID において通信不可となる直前の距離（最大通信距離） [cm] を表している。これらの距離において達成した通信速度を表 3.5-8 に示す。

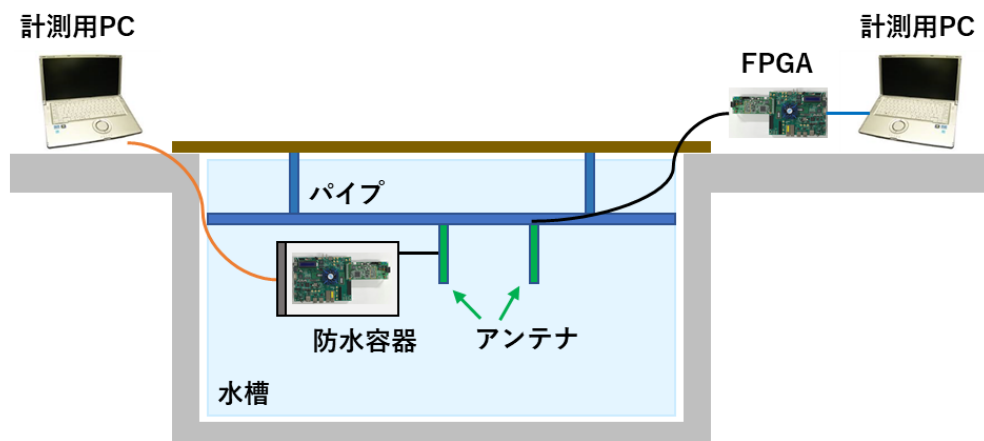


図 3.5-55 通信速度の測定系（模式図）

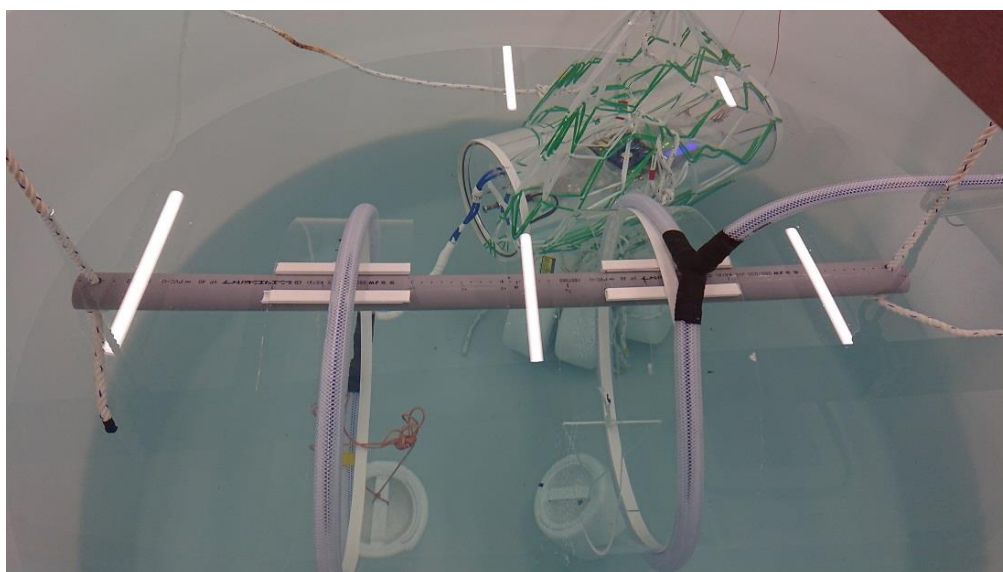


図 3.5-56 FPGA ボード（防水容器に格納）と海中通信用アンテナ

アンテナ間の距離が短い時には x-1 が最も高速（UDP：約 90 [Mbps] / TCP：約 70 [Mbps]）であるが、距離が長くなるにつれて x-2 および x-4 の速度が上回り、x-4 において最も長距離通信が可能である（UDP / TCP 共に 95 [cm]）。Wavelet OFDM 方式ではサブキャリアベースで 102 本以上の可用帯域を確保できない場合には端末間の接続が確立しない仕様となっており、サブキャリア間隔を小さくし信号の通りやすい帯域に信号のエネルギーを集中させた効果が得られている。さらに、アンテナ間の距離により最も高い速度が得られるチャンネルも変わることから、通信距離に応じて使用するチャンネルを柔軟に切り替えることも有

効である。

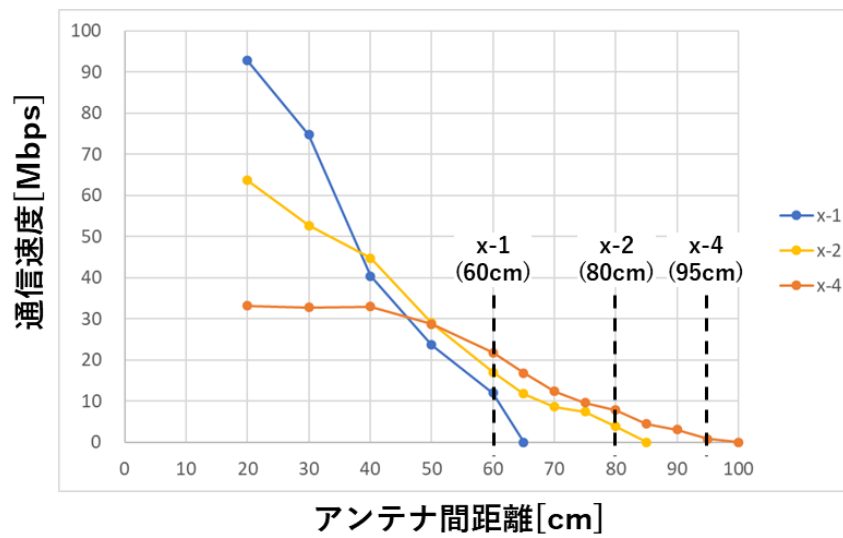


図 3.5-57 塩水中の通信速度 (UDP)

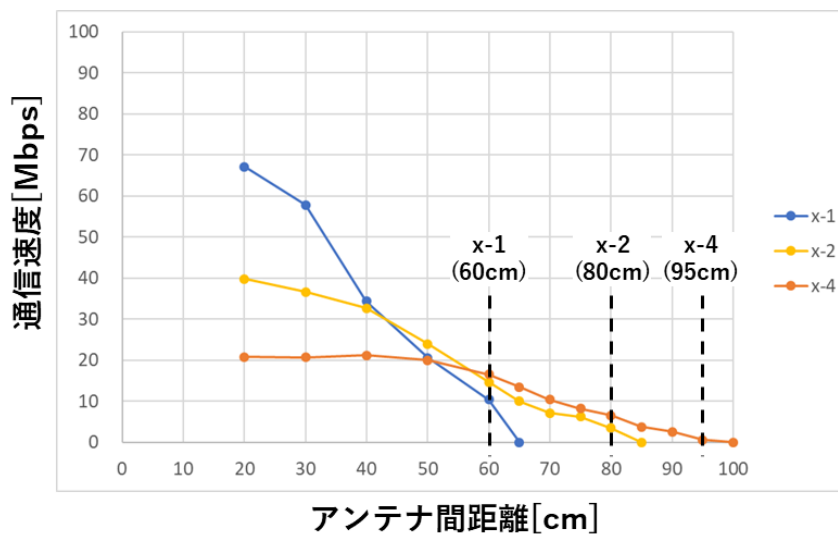


図 3.5-58 塩水中の通信速度 (TCP)

表 3.5-8 各 Channel ID における最大通信距離と通信速度

Channel ID	最大通信距離 [cm]	通信速度 [Mbps]	
		UDP	TCP
x-1	60	12.0	10.4
x-2	80	3.9	3.5
x-4	95	0.8	0.6

3.5.3.3. 基礎検証フェーズ II の内容

基礎検証フェーズ II では、海水中での通信距離向上を目的として、従来よりも狭帯域となる 1/8 モードおよび 1/16 モードの開発と共に、海中通信用アンテナの特性改善を行った。このアンテナと FPGA ボードを用いて大型水槽で海水中での通信実験を行い、通信速度と通信距離に関する特性評価を行った。

3.5.3.3.1. ハードウェア開発

A 海中通信用送受信コイル(結合器)

A-1 海中通信結合器の目標仕様

基礎検証フェーズ I では 0.5m 送受信コイルを用いて、水槽実験で 0.95m のコイル間隔で 0.8Mbps の通信ができることを確認した。基礎検証フェーズ II ではワイヤレス給電の送電コイル側に直径 2m の海中通信コイルを、AUV 側に直径 1 m 通信コイルを取付けることを想定して検討を行った。本研究では 2 つのコイルを近距離で結合して使うためこれを結合器と呼ぶ。

表 3.5-9 に、結合器の仕様を示す。通信伝送帯域は標準モードと 1/N モード (N=2, 4, 8, 16) の 1/4 の帯域幅があれば可能であるので、それぞれのモードでの通信可能伝送帯域を規定する。標準モードであれば 2-8.5MHz の帯域幅で 50dB 以下であれば 27Mbps、80dB 以下であれば 4.4Mbps の通信速度が可能である。本研究ではワイヤレス給電の送受電の状態を確認が目的であるため通信距離は 1m 以上とし、通信速度は 1Mbps 以上を目標とする。したがって表 3.5-9 の結合器の仕様において 1/4 モードで 80dB 以下を満足する 0.5-2.625MHz で 80dB 以下の S_{21} 特性を目指す。

表 3.5-9 結合器の仕様

項目	1/1モード	1/2モード	1/4モード	1/8モード	1/16モード
最大伝送帯域	2-28 MHz	1-14 MHz	0.5-7MHz	0.25-3.5MHz	0.125-1.75MHz
通信可能伝送帯域	2-8.5MHz	1-4.25MHz	0.5-2.625MHz	0.25-1.0625MHz	0.125-0.53MHz
S21特性-1	50dB以下	50dB以下	50dB以下	50dB以下	50dB以下
通信速度-1	27.0Mbps	13.5Mbps	6.7Mbps	3.3Mbps	1.6Mbps
S21特性-2	80dB以下	80dB以下	80dB以下	80dB以下	80dB以下
通信速度-2	4.4Mbps	2.1Mbps	1.0Mbps	0.5Mbps	0.25Mbps
入出力インピーダンス	50Ω	50Ω	50Ω	50Ω	50Ω

B 結合器の解析計算と電磁界シミュレーション

結合器の S_{21} 特性は、コイルのインダクタンス、結合係数 k 、品質係数 Q による決まる。結合器の定数は解析的に求めた計算式と電磁界シミュレーションの両方で計算した。なお海中でのコイルの Q を解析的に計算することは非常に難しいので、電磁界シミュレーションの計算結果のみ比較を行った。

B-1 海水中のインダクタンス、結合係数の解析計算式

海中で図 3.5-59 のような 2 つのコイル間で周波数やコイル間隔を変えた場合のインダクタンス、結合係数を計算する [22]。

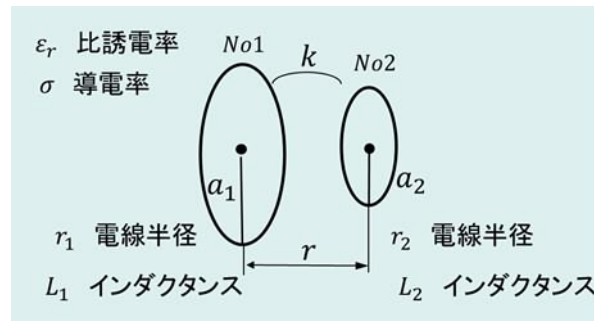


図 3.5-59 2 つのコイル間結合の構成図

図 3.5-59 の 1 ターンコイルの半径を a_1 、 a_2 、電線半径を r_1 、 r_2 とすると自己インダクタンス L_1 、 L_2 は以下の式となる。

$$L_1 = \mu_0 a_1 \left(\ln \frac{8a_1}{r_1} - \frac{7}{4} \right) \quad L_2 = \mu_0 a_2 \left(\ln \frac{8a_2}{r_2} - \frac{7}{4} \right) \quad (3.5-37)$$

また結合係数 k は、コイル間隔を r とすると式(3.5-38)となる。 ($r \geq a_1, r \geq a_2$)

$$k = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{2}{m} \frac{\left(1 - \frac{m^2}{2}\right) K(m) - E(m)}{\sqrt{\left(\ln \frac{8a_1}{r_1} - \frac{7}{4}\right) \left(\ln \frac{8a_2}{r_2} - \frac{7}{4}\right)}} e^{-\alpha r} \quad (3.5-38)$$

M は相互インダクタンスである。また α は海水の減衰定数であり以下の式で示される。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}} \quad (3.5-39)$$

ここで ω は角速度、 μ 透磁率、 σ は海水の導電率である。また、 m は第 1 種、第 2 種完全楕円積分の母数で以下の式で示される。

$$m^2 = \frac{4a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2 + r^2} \quad (3.5-40)$$

B-2 2m/1m コイルの電磁界シミュレーションモデル

図 3.5-60 に電磁界シミュレーションモデルを示す。電磁界シミュレータは、Ansys 社の HFSS の有限要素法を用いて計算した。

表 3.5-10 に計算に用いた各要素のパラメータを示す。

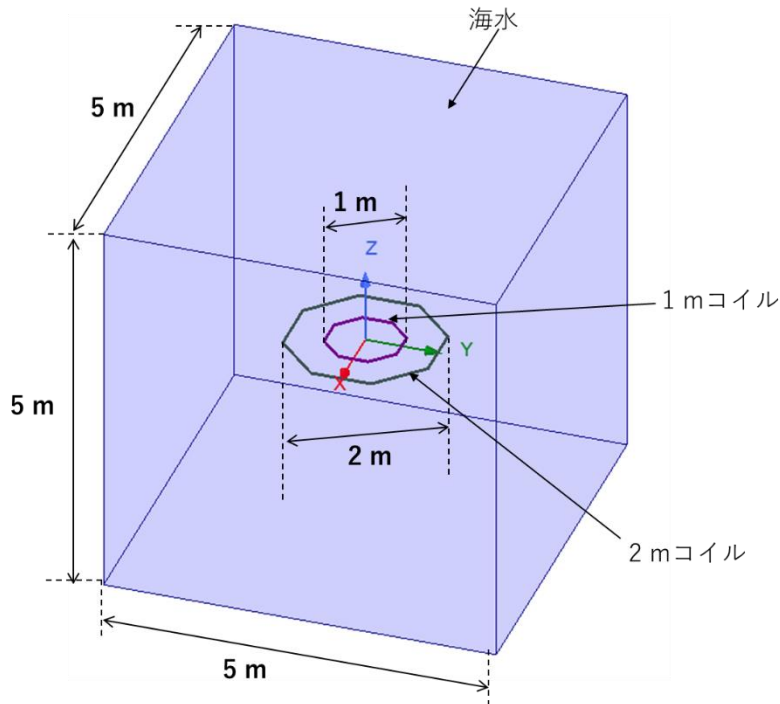


図 3.5-60 電磁界シミュレーションモデル

表 3.5-10 電磁界シミュレーションに用いたパラメータ

	導電率 (S/m)	比誘電率	比透磁率	誘電損失係数	モデル内で使用部分
空気	0	1.0	1.0	0	コイルパイプ内空間部
銅	5.8×10^7	1.0	1.0	0	コイル導体部
PVCプラスチック	0	2.7	1.0	0.007	コイルパイプ部
ゴム	1.0×10^{-15}	3.0	1.0	0	コイル被覆部
海水	5.0	78	1.0	0	解析空間

C 実験システム

C-1 実験用海水水槽とコイルの配置

図 3.5-61 に海中通信実験の概要図を示す。実験は北九州の日本サルヴェージの海水水槽を用いた。2 m コイルは水槽の中央で底から 1 m の位置に固定した。また 1 m コイルはクレーンで上下に移動できる構成となっている。なおベクトルネットワークアナライザ (VNA) による測定では PC1 台で、通信速度測定は PC2 台で測定する。

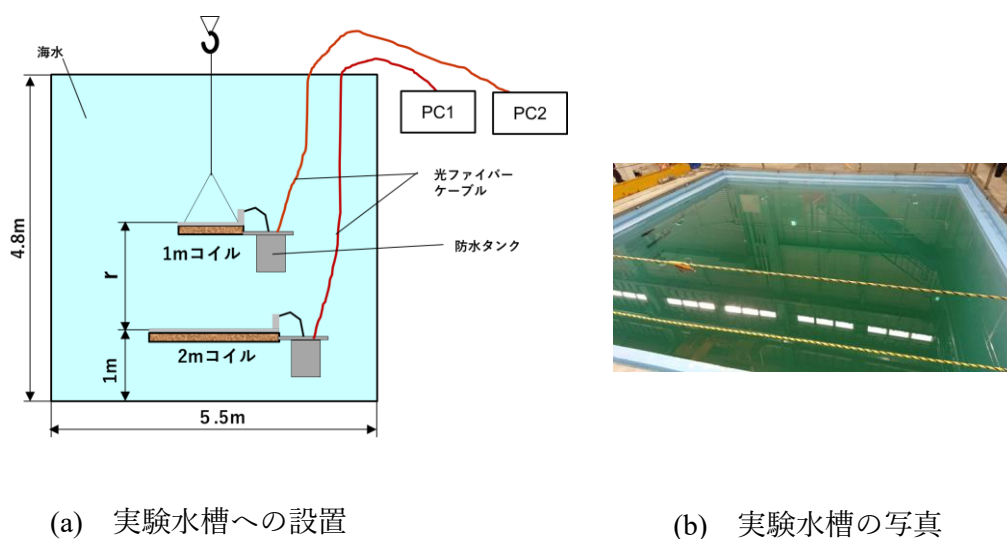


図 3.5-61 実験の概要図

C-2 1m、2 m コイルの構造

図 3.5-62(a)にコイルの構造を示す。コイルは直径 26mm の塩ビパイプを正 8 角形にして、パイプ中に $\phi 6.5$ mm の電線を 1 ターン巻いた構成とした。また塩ビパイプは防水構造として気密を取るために防水タンクの接続は水中コネクタを用いた。

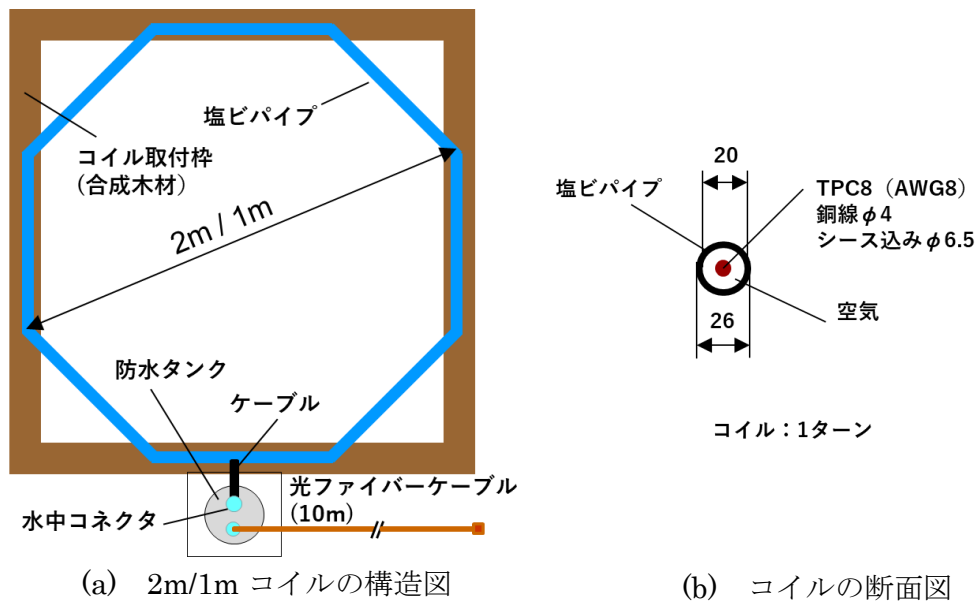


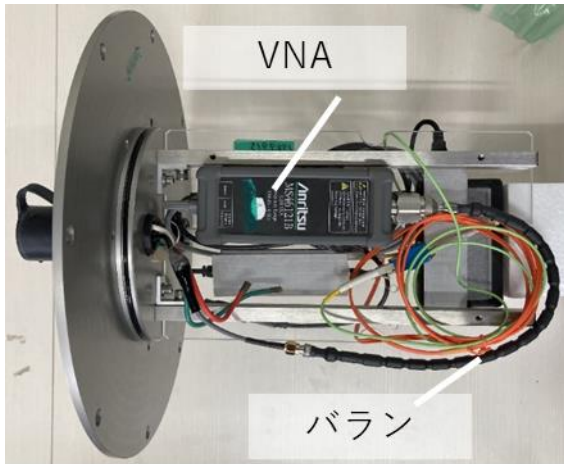
図 3.5-62 実験用コイルの構造図

C-3 水槽に沈めるためのベクトルネットワークアナライザ構成

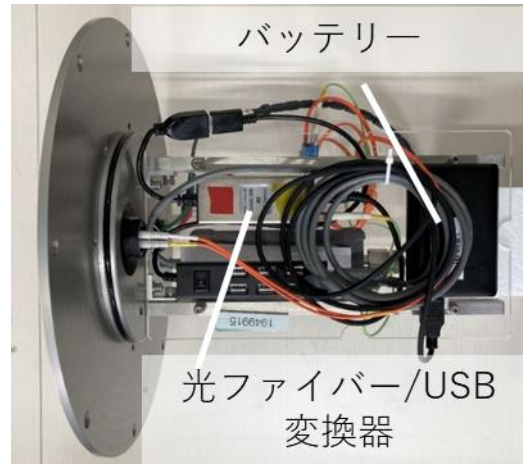
水槽にコイルを沈めた場合の結合器の電気特性の測定には、1 ポートのベクトルネットワークアナライザ (VNA : MS46121B、アンリツ) を 2 台使用し S パラメータを測定する。

図 3.5-63(a) に使用した VNA を示す。VNA の RF 入出力ポートは、バランを介して結合器に接続される。VNA での測定は、アンリツの専用ソフトウェア (Shockline) [23] を用いて PC により表示、保存等を行う。

図 3.5-63(b) に防水容器内へ収納する VNA 周辺機器を、図 3.5-64 に海水測定での VNA 測定ブロック図を示す。防水容器に接続する測定ケーブル間での結合を抑制するため、測定ケーブルは光ファイバーを用いた。そのため VNA の出力データを USB-光ファイバー変換器 (SSA02-200) により変換している。また、電源線からの信号の漏れを防ぐため防水容器内の電源はバッテリー Anker PowerCore 10000 (DC5V 出力) を使用している。



(a) VNA と balan



(a) 光ファイバー/USB変換器

図 3.5-63 防水容器内の VNA 構成

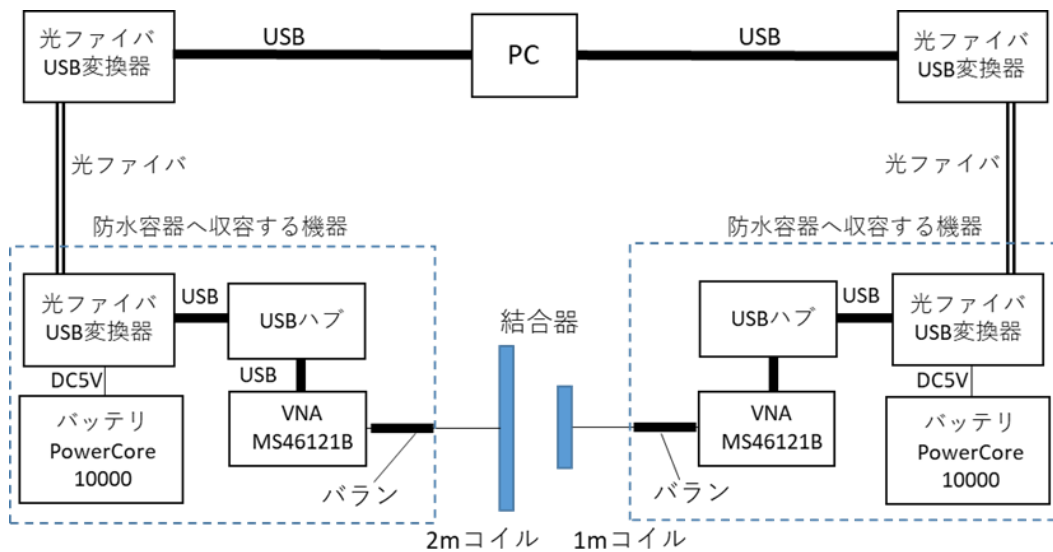
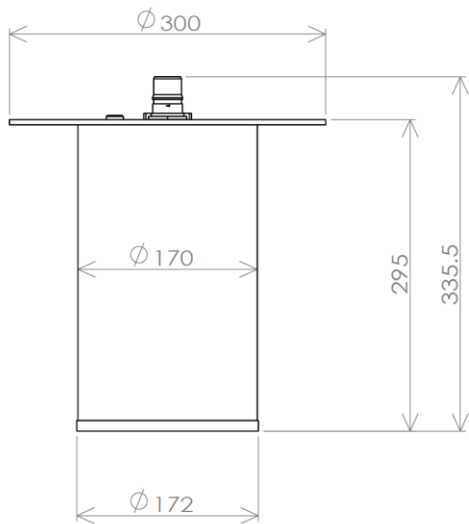


図 3.5-64 海水測定での VNA 測定ブロック図

C-4 防水容器

防水容器は VNA と FPGA ボードを収納する二種類を製作した。図 3.5-65 に VNA 用を、図 3.5-66 に FPGA 防水容器の寸法と写真を示す。材質はアルミで、防水容器表面は絶縁保護のためアルマイト処理を行っている。また上面に光ファイバー用防水コネクタ、送受信コイル接続用防水コネクタを取付けている。

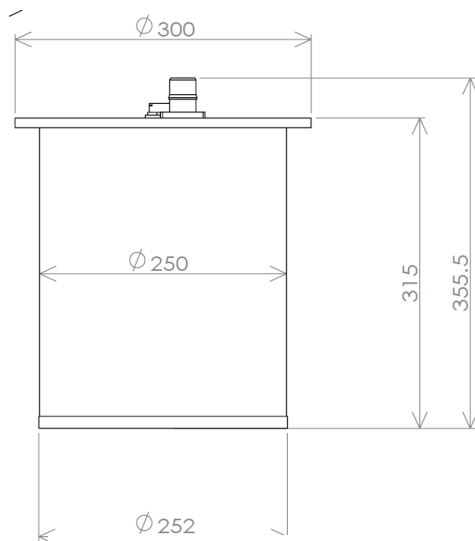


(a) 寸法図



(b) 外観写真

図 3.5-65 VNA 用防水容器



(a)寸法図



(b)外観図

図 3.5-66 FPGA 用防水容器

C-5 実験用コイルの実装

図 3.5-67 に 1m コイルをコイル取付け枠へ実装した写真を示す。FPGA 用防水容器をコイル取付け枠に固定し、1m コイルと光ファイバーケーブルを水中コネクタを介して防水容器中の FPGA 基板に接続している。

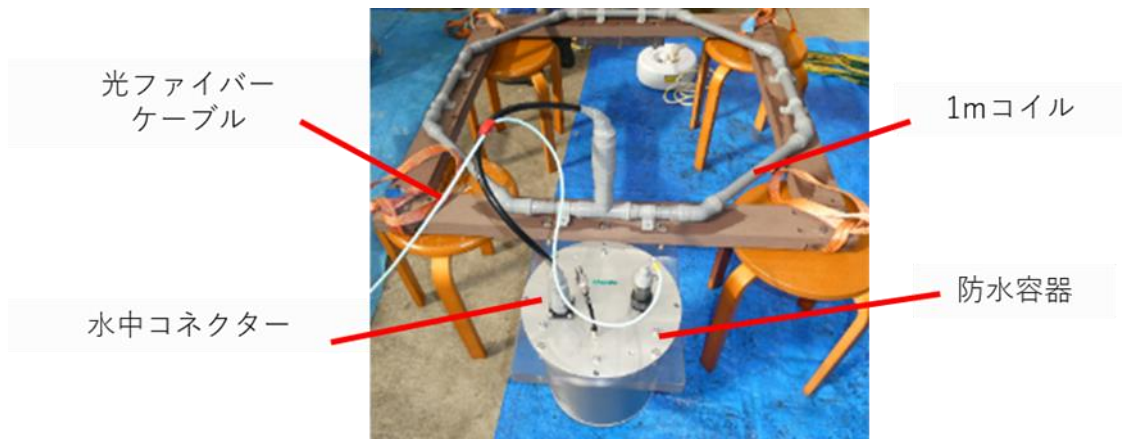


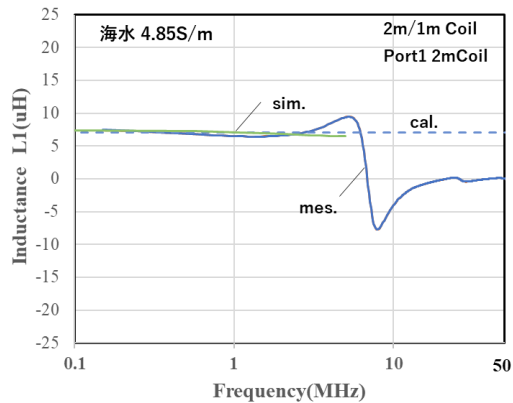
図 3.5-67 コイル取付け枠へ実装写真

D インダクタンス、Q、結合係数、減衰特性の計算値と実験値の比較

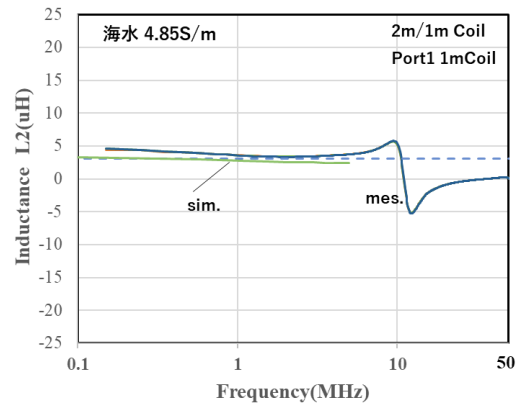
図 3.5-61、図 3.5-62 に示す 2m、1m コイルのインダクタンス、Q、結合係数の測定値と計算値を示す。

D-1 インダクタンス計算値と実験値の比較

図 3.5-68 にインダクタンスの式(3.5-37)による解析計算と電磁界シミュレーションの計算結果を示す。1MHzで2m コイルでは解析計算 7.07 μ Hと電磁界シミュレーション値 7.06 μ Hはほぼ一致している。測定値は 6.46 μ Hであり解析計算と電磁界シミュレーションともにと9%の差がある。0.15MHz~3MHzの範囲では測定値と計算値は10%程度の差で一致している。また1m コイルでは、解析計算 3.10 μ Hと電磁界シミュレーション値 2.76 μ Hは13%程度の差である。測定値は 3.49 μ Hであり電磁界シミュレーションに対して26%程度の差である。2m コイルでは6.8MHzに、1m コイルでは11MHzに自己共振点がありこの前後では計算値と測定値の差が大きい。



(a) 2m コイル L1

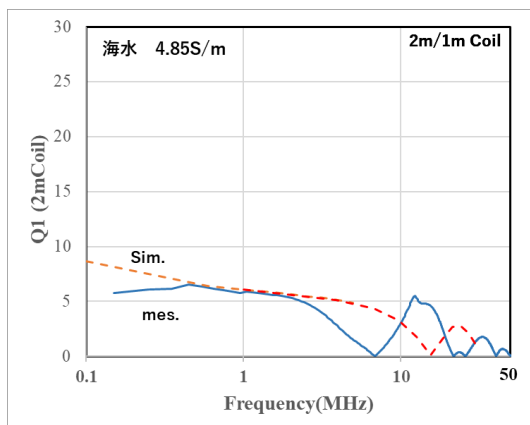


(b) 1m コイル L2

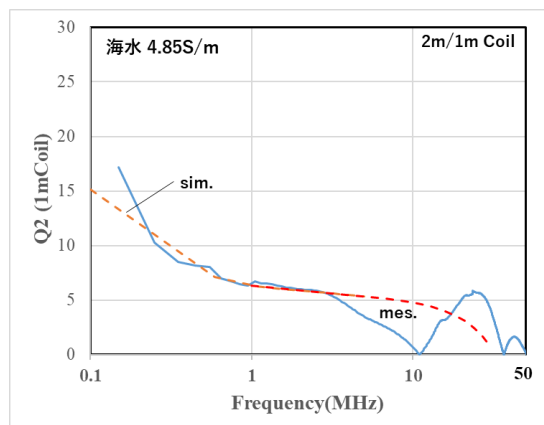
図 3.5-68 コイルのインダクタンス

D-2 Q の計算値と実験値の比較

図 3.5-69 に 2m コイルと 1m コイルの Q の測定値と電磁界シミュレーションによる計算値と比較を示す。1 MHz で 2m コイルの場合は電磁界シミュレーションでは 6.1 に対して測定値は 5.9 でありほぼ一致している。また 0.6MHz 以下では差が大きくなり、0.15MHz では計算値が 8.1 に対して測定値は 5.8 である。1 MHz で 1m コイルの場合は、電磁界シミュレーションでは 6.4 に対して測定値は 6.7 でありほぼ一致している。また周波数が 0.6MHz 以下では Q が大きくなる傾向は一致しているが、0.15MHz で測定値は 17 に対して計算値は 14 となり 20%程度の誤差がある。また 2m、1m コイルとも 4MHz 以上ではコイルの自己共振の影響で計算値と測定値の差が大きくなっている。



(a) 2m コイル Q1



(b) 1m コイル Q2

図 3.5-69 2m、1m コイルの Q

D-3 結合係数の計算値と実験値の比較

図 3.5-70 (a)にコイル間隔 r を 0.1~2m に動かしたときの解析計算と実測値の比較を示す。点線が式(3.5-38)より解析的計算した値、実線が測定値である。周波数が 1MHz で測定値と計算値を比較するとコイル間隔が 0.1m の場合は計算値が 0.0740、測定値が 0.0174 で 76%の差がある。式(3.5-38)はコイル半径 a_1 、 a_2 に対してコイル間距離 r が($r \geq a_1, r \geq a_2$)の条件を満たしていないため差が大きいと考えられる。コイル間距離が 0.5m の場合は計算値 0.00845、測定値 0.00512 で差は 39%、コイル間隔が 1m の場合は計算値が 0.00044、測定値が 0.00064 で差は 45%である。また VNA のダイナミックレンジは 80dB 程度でコイル間隔が 2m の場合は、1 MHz では測定限界に近く測定値の信頼性が低いと考えられる。

図 3.5-70 (b)にコイル間隔 r を 0~2m に動かしたときの電磁界シミュレーションと実測値の比較を示す。点線が電磁界シミュレーションにより計算した値、実線が測定値である。周波数が 1MHz で測定値と計算値を比較するとコイル間隔が 0m の場合は計算値が 0.0165、測定値が 0.0219 で 33%の差である。コイル間距離が 0.5m の場合は計算値 0.00503、測定値 0.00512 で差は 2%、コイル間隔が 1m の場合は計算値が 0.00056、測定値が 0.00064 で差は 14%である。

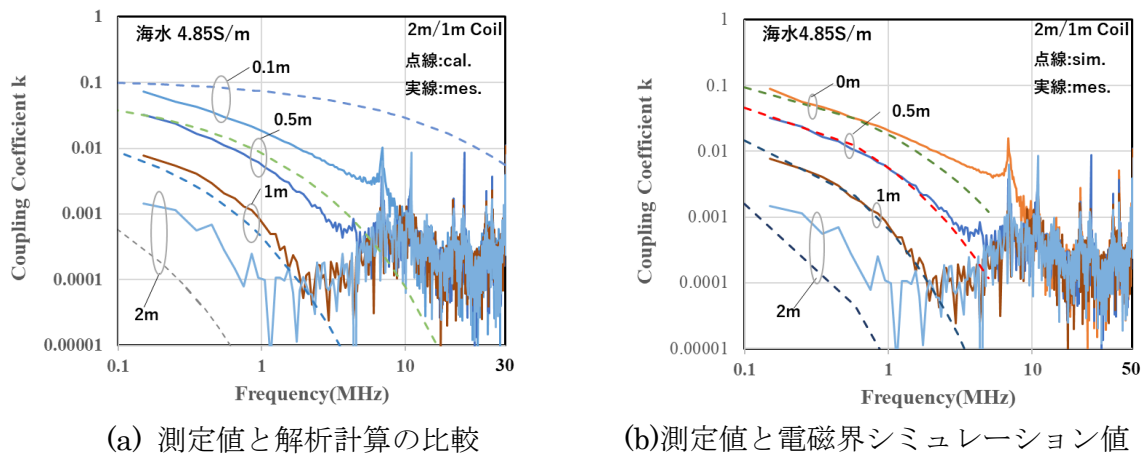


図 3.5-70 2つのコイル間の結合係数

D-4 結合器の S_{21} 特性の計算値と実験値の比較

図 3.5-71(a)に 2m コイルの中央に 1m コイルを配置した場合の S_{21} の測定値(実線)と電磁界シミュレーションでの計算値(点線)の S_{21} 特性を示す。1MHz では 2つのコイル間隔が 0m の測定値は 36.4dB であり、電磁界シミュレーションでは 38.8dB である。同様にコイル間隔が 0.5m の場合の測定値は 47.0 dB で電磁界シミュレーションは 49.1dB、1m では 66.1dB で電磁界シミュレーションは 68.1dB あり測定値と電磁界シミュレーションは良く一致している。2m の距離では VNA のダイナミックレンジが 80dB 程度であるため測定誤差が大きくなっており測定値と計算値の差が大きい。図 3.5-71(b)に 2m コイルの中央から

0.5m横にずらし距離を変えた場合の 1m コイル間の S_{21} の測定値を示す。周波数 1MHz においてコイル間が 0m の場合は、中央が 34.6dB に対して 33.5dB でほぼ変化はない。距離が 1m の場合は中央が 66.1dB に対して 68.4dB で 2dB 程度の変化である。中心位置がずれた場合でも S_{21} 特性の変化は小さいためポジションフリーの通信が可能と考えられる。

今回の検討では、1m において 0.5-2.625MHz で 80dB 以下の S_{21} 特性を目標であり図 3.5-71 より目標値を達成することができた。

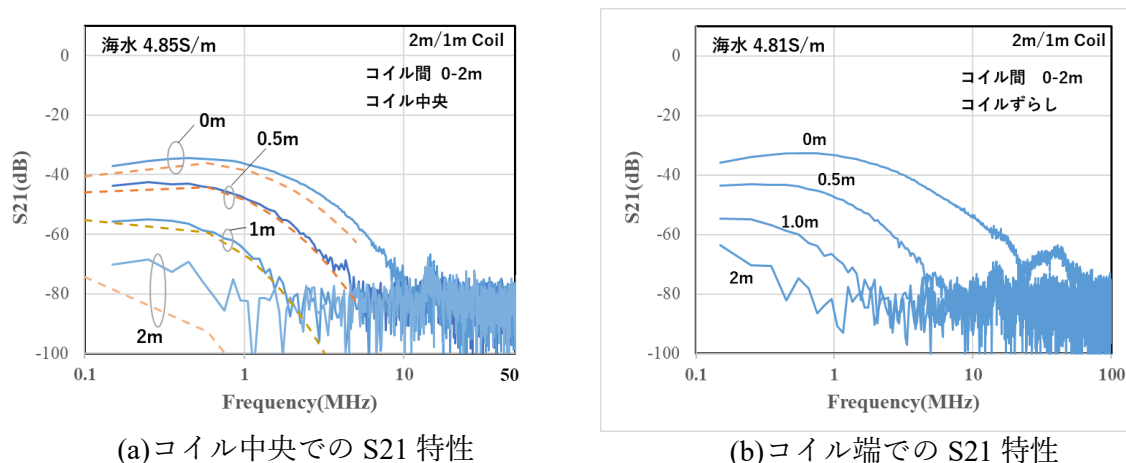


図 3.5-71 結合器の S_{21} 特性

3.5.3.3.2. FPGA ボード + AFE ボード

図 3.5-72 に今回使用する FPGA ボードと試作 AFE(Analog Front End)ボードを示す。FPGA は Intel 社製 Arria10 SoC チップ (型番:10AS066N2F40) を用い、これを搭載した開発キット (型番:DK-SOC-10AS066S-A) を使用する。試作 AFE ボードは、FPGA ボードの拡張用 FMC(FPGA Mezzanine Card)コネクタに接続し使用する。また、今回これらのボードを収納する防水容器の小型化に向け、FPGA ボードと AFE ボードは、フラットケーブル(HDR-153514-01)を介して接続している。防水収納容器の小型化は、海水での浮力が減少し、容器外部の重りの削減など測定装置全体の取り回しを改善し、測定効率化に寄与する

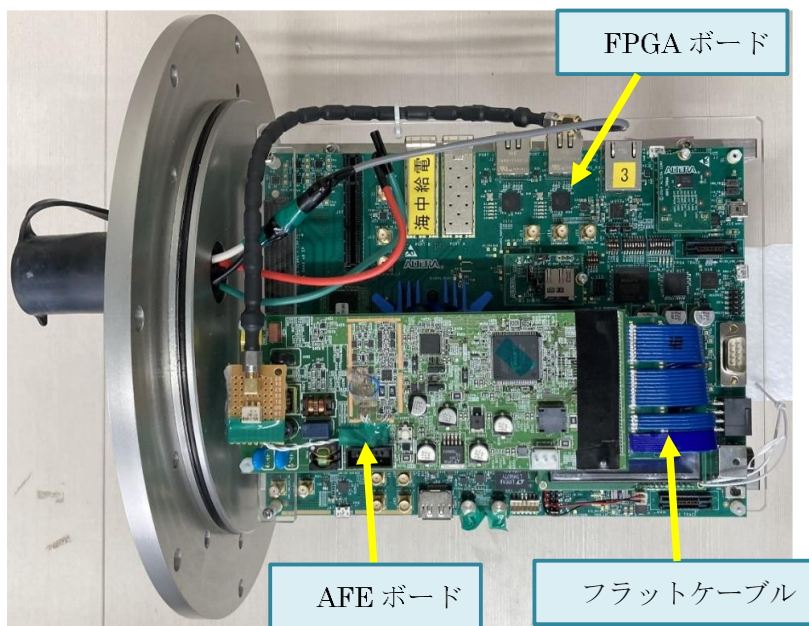


図 3.5-72 FPGA ボード + AFE ボード

図 3.5-73 に AFE ボードの信号送受信回路の構成を示す。

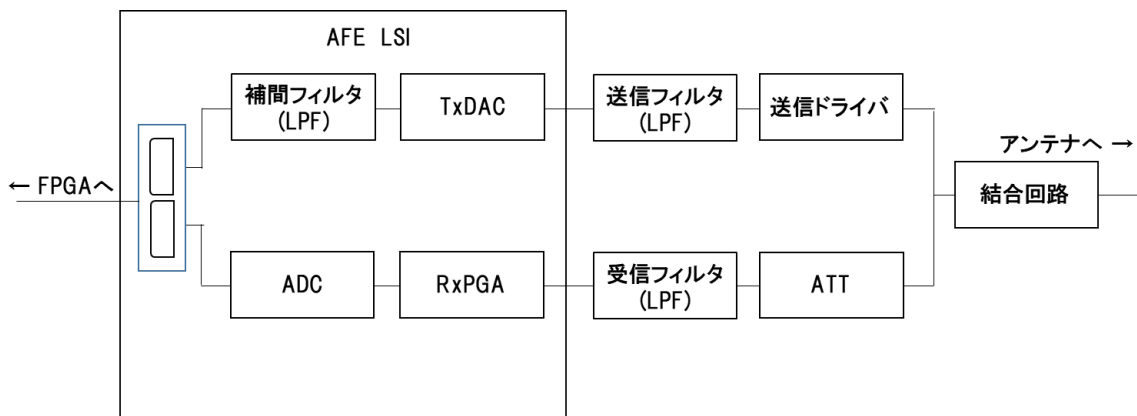


図 3.5-73 AFE ボードの信号送受信回路構成

海中通信用結合器は、AFE ボードの信号入出力端である結合回路と接続される。送信フィルタは、AFE-LSI 内部の送信デジタルフィルタで落としきれない帯域外スペクトラムを減衰させるために必要であり、受信フィルタは、AFE-LSI 内部の AD コンバータへ信号帯域外のノイズ成分を減衰させるために必要である。

受信フィルタ(LPF)の信号周波数特性を図 3.5-74 に示す。Wavelet OFDM の使用周波数帯域である 125kHz~28MHz において、損失は 1dB 以下となっている。

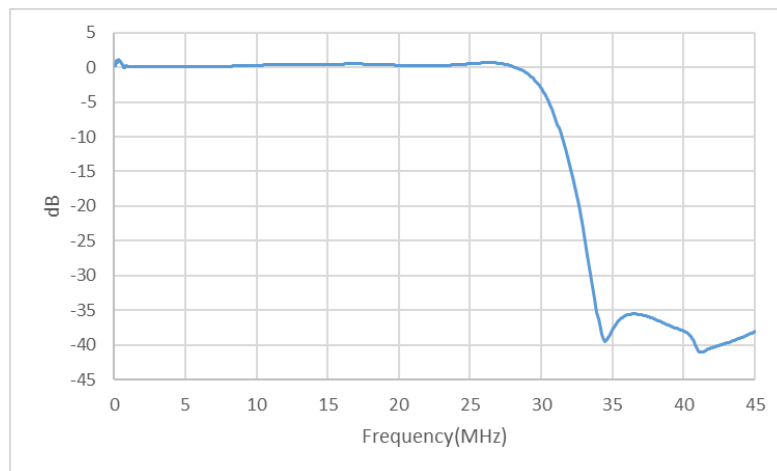


図 3.5-74 受信フィルタの周波数特性

また、送信信号は送信フィルタを通過後、送信ドライバにより増幅される。結合回路通過後、スペクトラムアナライザ直結時に信号スペクトラムが $-10\text{dBm}/10\text{kHz}$ となるように、送信ドライバのゲインと FPGA 内部のパワーコントロールパラメータ値を調整している。

図 3.5-75 に防水収納容器へ收容する FPGA 周辺機器を、図 3.5-76 に海水測定での FPGA 通信測定ブロック図を示す。海水での評価において、送受信機の通信データ取得を海水外の測定用 PC で行うため、海水内から陸上へデータ線を引き出す。陸上に引き出された送受信機のデータ線間の空中結合を抑制するため、防水収納容器に入れ海水内に沈めた通信機から陸上に引き出すデータ線は光ファイバーとしている。送受信機である FPGA ボードに接続されたイーサケーブルを光ファイバーイーサ変換器(BMC-GT-M550M)を介して、光通信に変換している。

また、防水容器内で FPGA ボードと光ファイバーイーサ変換器が動作するように電源供給元をバッテリー駆動としている。バッテリーは、BTL-RDC12N(DC12V 出力、FPGA ボード接続)と Anker PowerCore 10000 (DC5V 出力、光ファイバーイーサ変換器接続)を使用している。なお、FPGA ボードに接続した AFE ボードは、FPGA ボードの拡張用 FMC コネクタ経由で DC12V、DC5V が電源供給される。

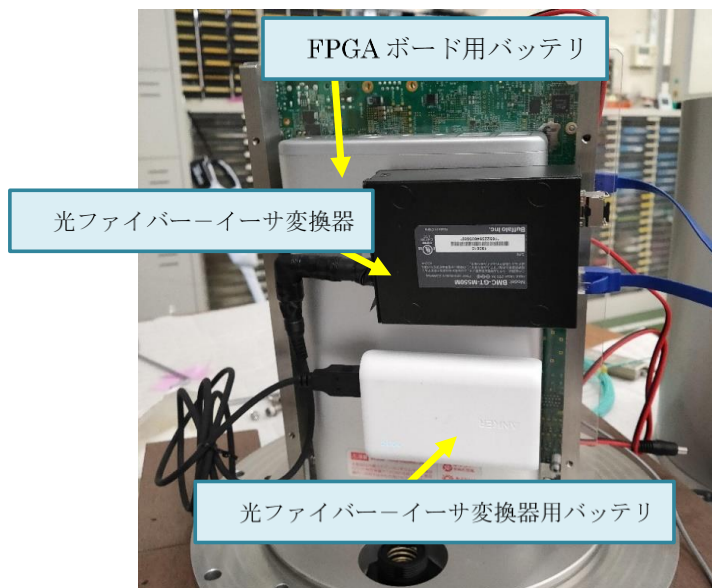


図 3.5-75 収納容器へ収容する FPGA 周辺機器

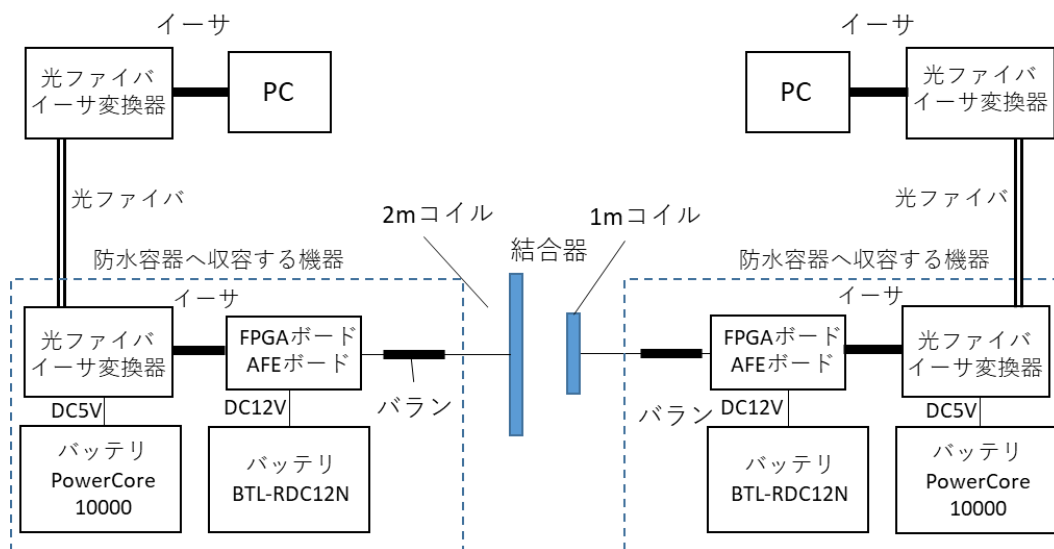


図 3.5-76 海水測定での FPGA 通信測定ブロック図

3.5.3.3.3. 海水中の伝送路特性

2020 年度は、実際の海中環境に近づけるため、縦 5.5 [m]×横 5.5 [m]×深さ 4.8 [m]の大型水槽内（図 3.5-77）に海水を充填し評価を行った。この時の塩分濃度は約 3%である。

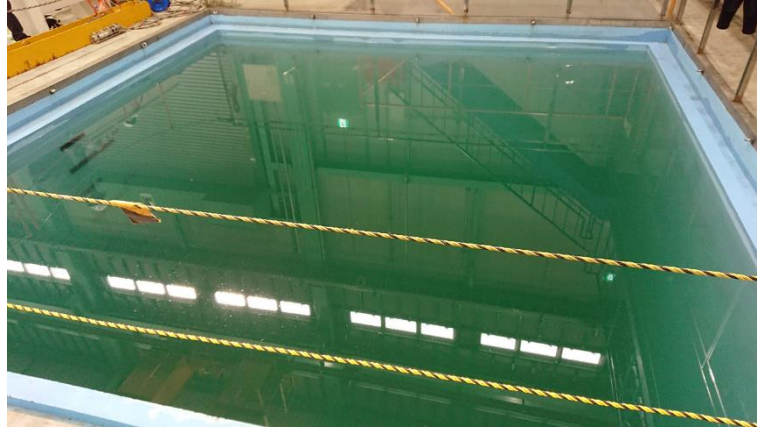


図 3.5-77 大型水槽の外観

伝送路特性の測定系の模式図を図 3.5-78 に、測定の様子を図 3.5-79 の(a)~(c)にそれぞれ示す。2台のベクトルネットワークアナライザ（Anritsu 社製 型番：MS46121B）を防水容器に格納し、2つのアンテナ（アンテナ A およびアンテナ B）にそれぞれ固定している。図 3.5-78 の状態をアンテナ間距離 0 [cm] と定義し、アンテナ A を吊り上げることでアンテナ間の距離を変化させる。この時、陸上にある計測用 PC で測定値を取得した。

アンテナ A は AUV に搭載することを想定し、直径が 1 [m] と 0.5 [m] のものを用意し、アンテナ B は海中に固定することを想定し、直径を 2 [m] に固定した。組合せとしては、(A, B) = (1 [m], 2 [m])、(0.5 [m], 2 [m]) の 2 通りであり、それぞれの組合せにおいて、図 3.5-78 のように各アンテナの中心を一致させた場合と、中心をずらしアンテナの一边を重ねた場合の 2 通りについて測定を行った。

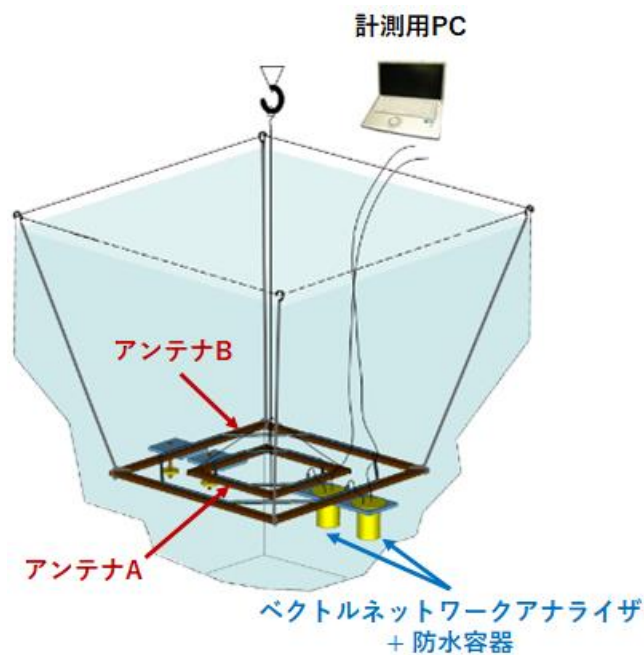


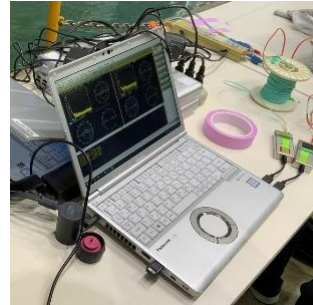
図 3.5-78 伝送路特性の測定系（模式図）



(a) アンテナ (奥 : アンテナ A、手前 : アンテナ B)



(b) ベクトルネットワークアナライザ



(c) 計測用 PC

図 3.5-79 日本サルヴェージでの実験機材

アンテナ A とアンテナ B の間の距離を変えた時の伝送路特性の測定結果を図 3.5-80 の (a)~(d)にそれぞれ示す。ベクトルネットワークアナライザの仕様としてダイナミックレンジが 80 [dB] (Typ) であるため、測定可能な下限値は -80 [dB] である。

これらの結果より、実際の海中環境に近い大型水槽の環境においても、アンテナ間の距離が長くなるにつれて高い周波数帯域の減衰が大きくなり、可用帯域が狭くなることを確認できた。したがって、海中通信に狭帯域の信号を活用し、各モードにおいて最も低い周波数帯域のチャンネルを選択する方針は有効である。

また、アンテナの中心をずらした場合、一致させた場合よりも可用帯域が広がっている。これは、中心が一致している場合にアンテナ間の空間距離が最も大きく、中心をずらすことで空間距離が小さくなり、垂直方向の距離が小さい程その傾向が顕著であるためと考えられる。

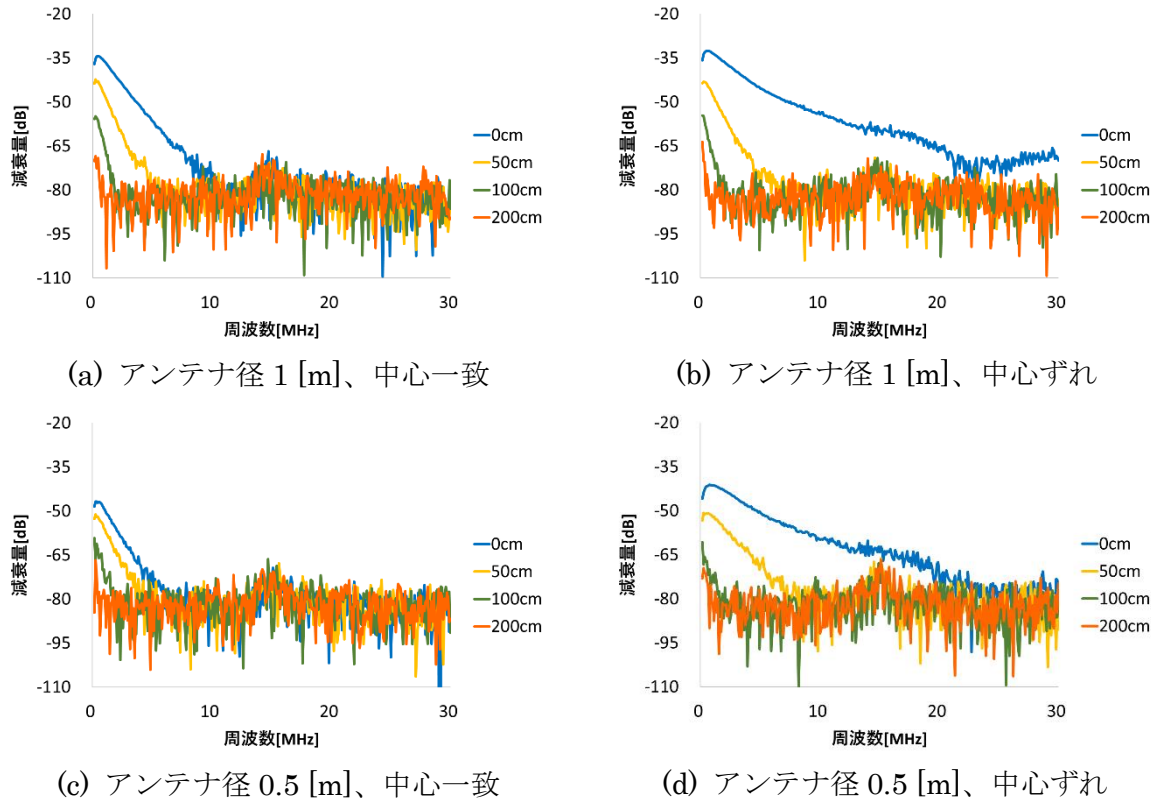


図 3.5-80 海水中の伝送路特性

3.5.3.3.4. 通信速度測定（海水中）

通信速度の測定系の模式図を図 3.5-81 に、測定に用いた機材を図 3.5-82 の(a)~(d)に示す。2 台の FPGA ボードをそれぞれ防水容器に格納し、送信側と受信側のアンテナに固定している。図 3.5-81 の状態をアンテナ間距離 0 [cm]と定義し、送信側のアンテナを吊り上げることでアンテナ間の距離を変化させる。陸上にある計測用 PC 間で UDP および TCP プロトコルによるベストエフォート型の通信を行い、受信側の速度を測定した。送受信アンテナの組合せ、および中心をずらした場合の位置関係については、伝送路特性の測定と同じ条件で実施している。

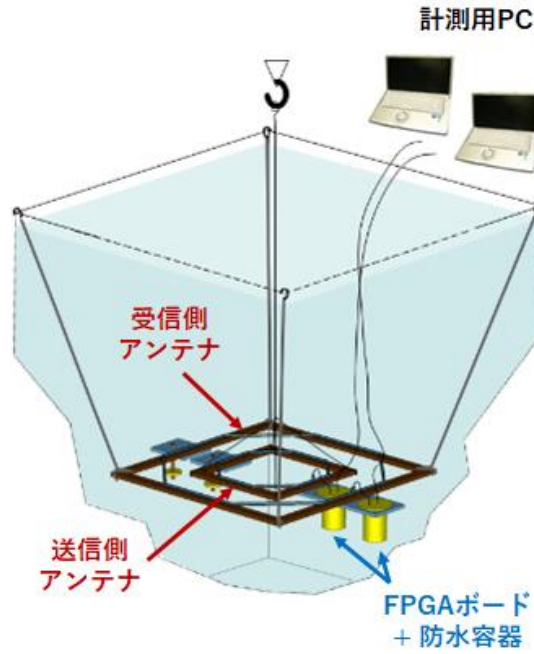
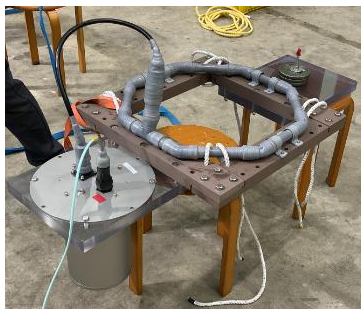
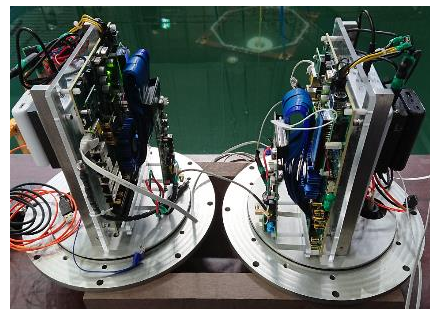


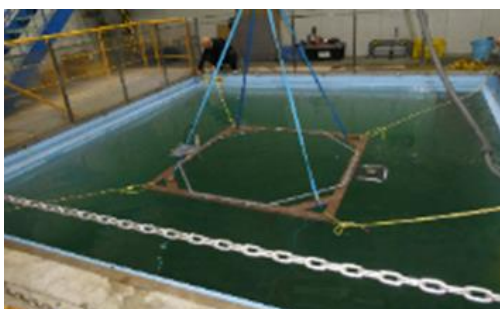
図 3.5-81 通信速度の測定系（模式図）



(a) 送信側アンテナ+防水容器



(b) FPGA ボード



(c) 受信側アンテナの設置



(d) 計測用 PC

図 3.5-82 日本サルヴェージでの測定状況

送受信アンテナ間の距離を変化させた時の通信速度を図 3.5-83 および図 3.5-84 にそれぞれ示す。図 3.5-83 は送信側のアンテナ径が 1[m]、図 3.5-84 はアンテナ径が 0.5[m]の場合の結果であり、それぞれ UDP および TCP プロトコルで通信を行っている。伝送路特性

の測定結果を踏まえ、各モードにおいて最も低い周波数帯域の Channel ID (x-1, x-2, x-4, x-8, x-16) を選択した。

アンテナ間の距離が短い場合は標準モード (x-1) が最も高速であるものの、距離が長くなるにつれて他のモード (x-2, x-4, x-8, x-16) の速度が上回り、x-16 において最も長距離の通信が可能である。アンテナ間の距離が長くなるにつれて、高い周波数帯域の減衰が大きくなり可用帯域が狭くなるという海水中の伝送路特性を踏まえ、サブキャリア間隔を小さくし、狭帯域にエネルギーを集中するモード (x-8, x-16) を追加した効果が得られている。

アンテナ径 1 [m] の場合の最大通信距離は 220 [cm] であり、Mbps 級の通信速度を達成可能な距離という点においても、200 [cm] (UDP: 1.3 [Mbps]、TCP: 1.0 [Mbps]) という結果が得られた。また、アンテナ径 0.5 [m] の場合においても、最大通信距離 170 [cm]、Mbps 級を達成可能な距離 160 [cm] (UDP: 2.0 [Mbps]、TCP: 1.6 [Mbps]) という結果が得られており、AUV に搭載するアンテナの小型化に向けた影響を把握することができた。

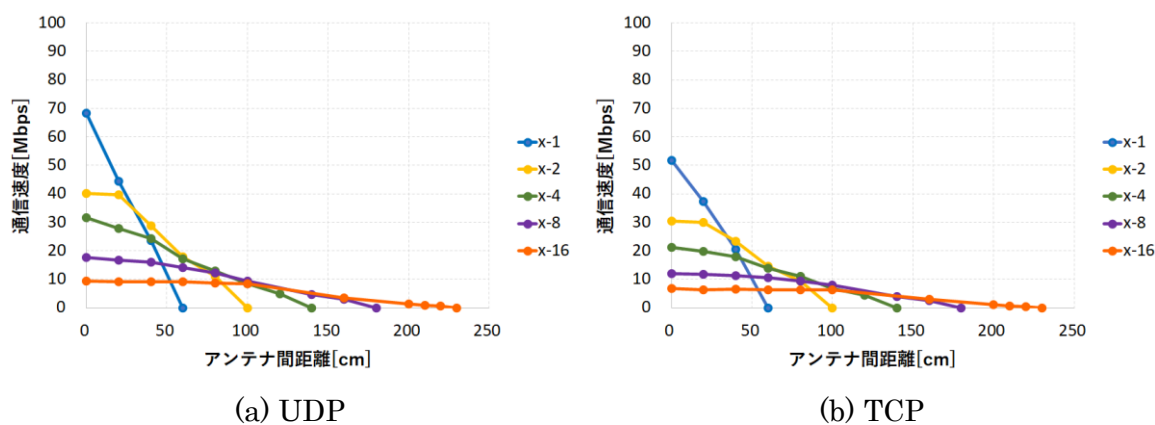


図 3.5-83 通信速度 (アンテナ径: 1 [m])

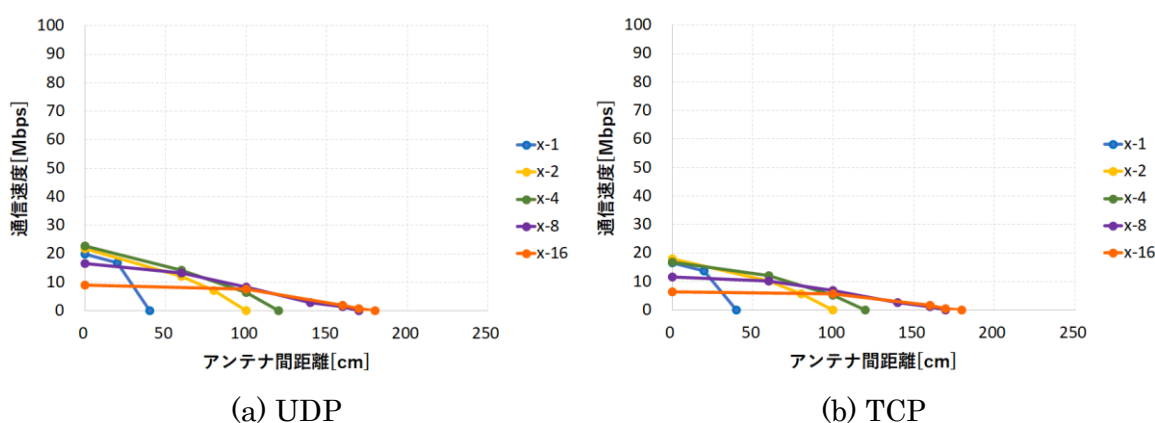


図 3.5-84 通信速度 (アンテナ径: 0.5 [m])

さらに、送信側のアンテナ径が 1 [m] の時に受信側のアンテナとの中心をずらした状態でアンテナ間の距離を変化させた場合の通信速度 [Mbps] を表 3.5-11 に示す。各モードにおい

て、中心がずれた場合でも、一致している場合と比べて同等以上の速度を達成できている。この結果は、伝送路特性の結果と整合が取れており、ポジションフリーな通信への見通しを立てることができた。

表 3.5-11 送受信アンテナの中心をずらした場合の通信速度（アンテナ径：1 [m]）

(a) UDP

距離[cm]	x-1		x-2		x-4		x-8		x-16	
	一致	ずれ	一致	ずれ	一致	ずれ	一致	ずれ	一致	ずれ
0	68.3	93.0	40.1	59.3	31.6	37.0	17.6	18.7	9.3	9.3
100	-	-	-	-	8.4	8.2	9.5	9.1	8.4	8.3
200	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3	1.2

(b) TCP

距離[cm]	x-1		x-2		x-4		x-8		x-16	
	一致	ずれ	一致	ずれ	一致	ずれ	一致	ずれ	一致	ずれ
0	51.8	60.6	30.4	38.5	21.3	23.3	11.9	12.8	6.7	6.7
100	-	-	-	-	6.9	6.9	7.9	7.6	6.3	6.3
200	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	0.9

3.5.3.4. 実機検証フェーズ I の内容

実機検証フェーズ I では、基礎検証フェーズ II で実施した Wavelet OFDM 方式のマルチキャリア通信において、通信モードを 1/2 モード～1/16 モードに切替えることができる通信回路とアルゴリズムを通信モジュールに組込んだ。この通信モジュールを使ってベースステーションと AUV 間での通信速度および充電制御実験を大型水槽と実海域で実施する。本検討により通信性能の確認し課題抽出を行う。

通信システムを充電スタンドと AUV に組み込み縦 5.5m×横 5.5m×深さ 4.8m の北九州の日本サルヴェージの海水大型水槽と日本サルヴェージの岸壁前の実海域で通信実験を実施した。通信実験では、実際に海中ワイヤレス充電を実施しながら通信モードを変えた場合の通信速度を測定した。さらに海中通信を介して充電制御を行い、本システムの有効性を確認した。

3.5.3.4.1. 通信システム構成

A 通信システムの概要

図 3.5-85 に通信システムのブロック図を示す。ベースステーション側は無線モジュールにハイパスフィルタ (HPF) とバランを通してベースステーションアンテナに接続している。また無線モジュールのデータ信号は光ファイバーケーブルを使って陸上の PC と接続している。AUV 側も無線モジュールに HPF とバランを通して AUV アンテナに接続している。

データ信号は、AUV の Ether HUB に接続し、AUV との通信をおこなっている。

HPF は、ワイヤレス充電による 10kHz 帯の妨害波により、通信モジュールの受信側の初段アンプの飽和を防ぐためにカットオフ周波数を 100kHz とし、10kHz で 80dB の減衰量を確保している。

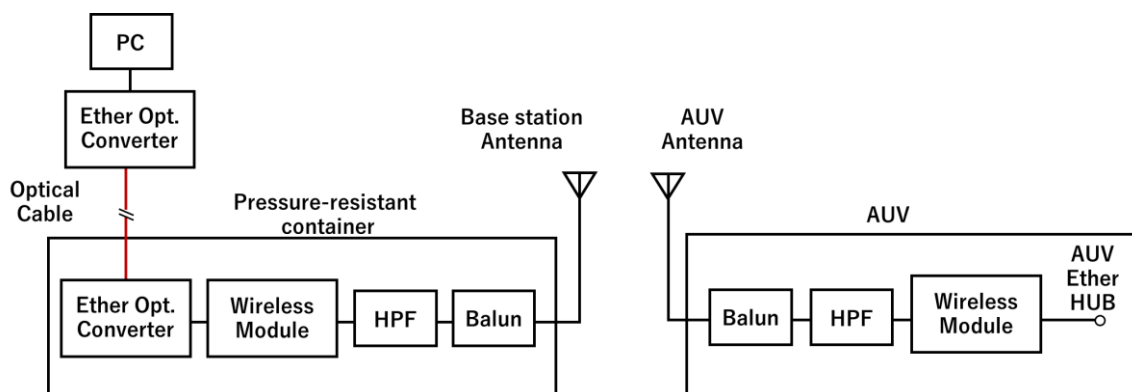


図 3.5-85 通信システムのブロック図

B ベースステーションアンテナと AUV アンテナの構造と特性

B-1 アンテナの構造と寸法

図 3.5-86 にベースステーションアンテナと AUV アンテナの構造と寸法を示す。両方のアンテナとも 1 ターンのループアンテナを用いた。ケーブルは OFC パワーケーブルで素線 0.12 mm×665 本、水中コネクタはベースステーション側が JOWO 8819 を、AUV 側は BIRNS TC を用いた。またアンテナ部は $\phi 26$ mm の塩ビパイプで作ったシースで覆っている。

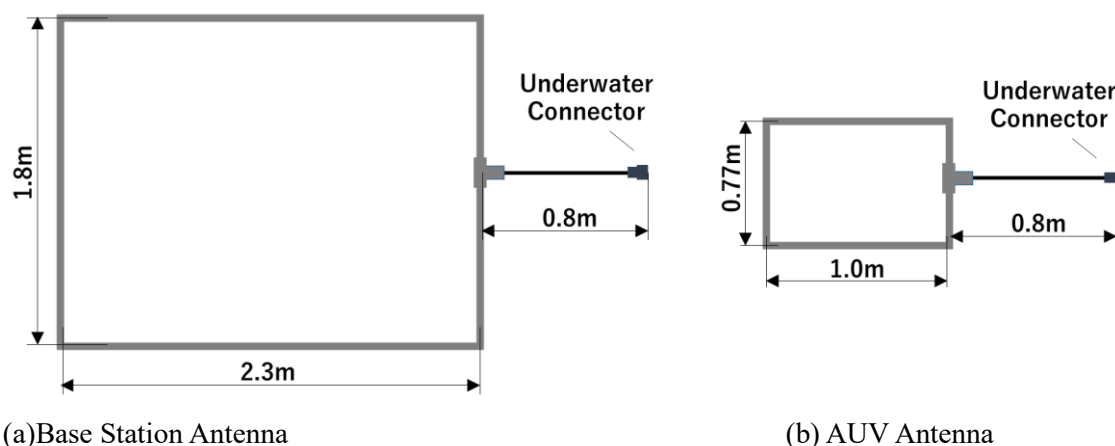


図 3.5-86 アンテナの構造と寸法

B-2 アンテナの特性

本実験で用いたベースステーションアンテナは、長手方向で 2.3m あり、直径 1.6m の小型水槽での実験ができないため、電磁界シミュレーションによる検討を行った。図 3.5-87 に図 3.5-86 の 2 つのアンテナ間隔を 1m とした場合の伝送特性 S_{21} (dB) を示す。0.1MHz で 55dB、1 MHz で -70dB である。また 3MHz 以上では 100dB を超えている。表 3.5-2 と図 3.5-4 各モードの UDP 通信速度の通信モードの周波数と通信可能な S_{21} 特性が 85dB 以下であることから、通信可能なモードは 1/8 モード(0.25-3.5MHz)と 1/16 モード(0.15-1.75MHz)である。

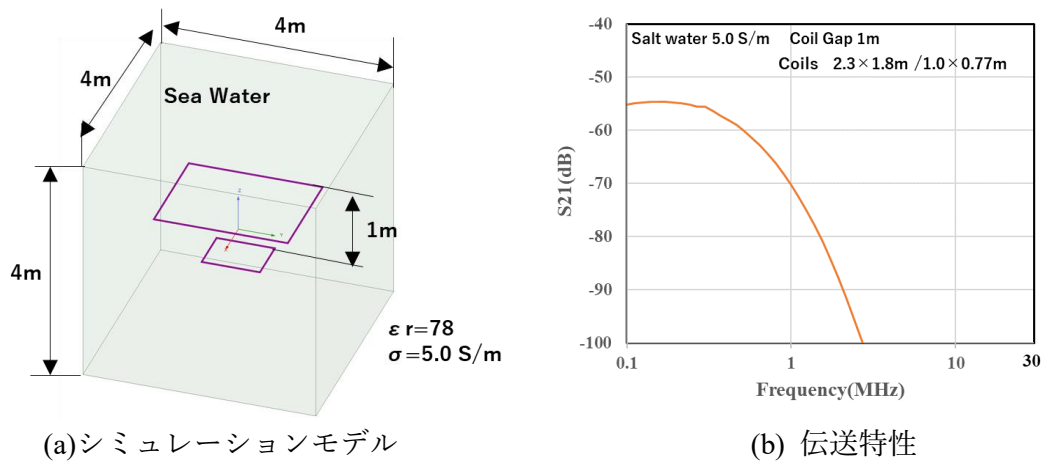


図 3.5-87 アンテナの特性シミュレーション

3.5.3.4.2. 充電スタンドと AUV への通信システムの実装

A ベースステーション通信システムの耐圧容器への組込

図 3.5-88 にベースステーション側の通信システムを耐圧容器に組込んだ写真を示す。電源はバッテリーを用いている。また光ファイバーケーブル用コネクタを介して光ケーブルで地上の PC との通信を行っている。

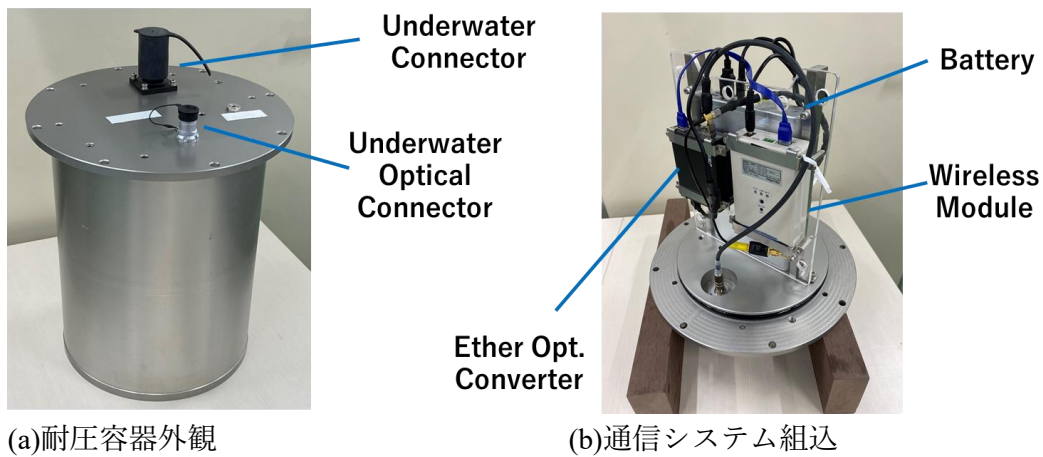


図 3.5-88 耐圧容器への組み込み

B 充電スタンドへのベースステーションアンテナの取付

図 3.5-89 に充電スタンドにベースステーションアンテナと耐圧容器を取付け図と水槽に沈めた写真を示す。アンテナは充電スタンドから発生する磁束に対して直交するように、充電スタンドの上部に取付けた。

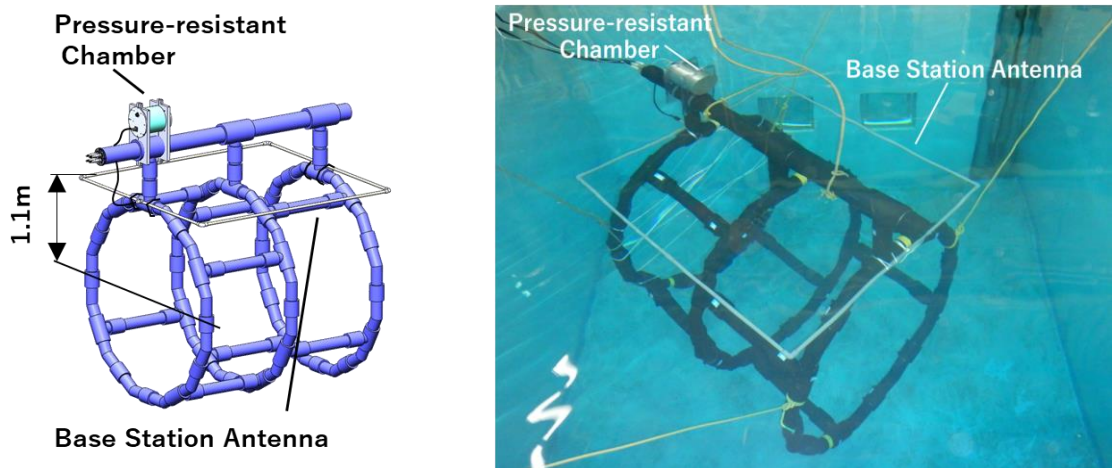


図 3.5-89 充電スタンドへのベースステーションアンテナへの取付

C AUV 通信システムの AUV 耐圧容器への組み込み

図 3.5-90 に AUV 側の通信システムを耐圧容器に組込写真を示す。電源は DC12V を AUV 側よりノイズフィルタ介して供給している。通信モジュールに入出力されるデータは、ハブを通して AUV のイーサネットに接続している。AUV を ROV モードで動作させる場合は、AUV に接続した光ファイバーケーブルを通して通信モジュールの動作状況をモニターすることができる。

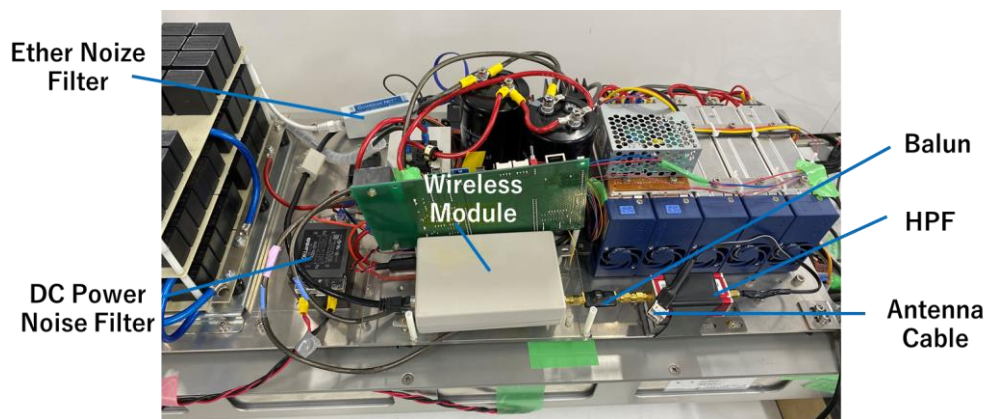


図 3.5-90 AUV へ通信モジュールの組み込み

D AUV へのアンテナの取付

図 3.5-91 に AUV へアンテナ取付を取付けた写真を示す。アンテナは AUV フレームの上面に取付け水中コネクタにより AUV へ接続している。

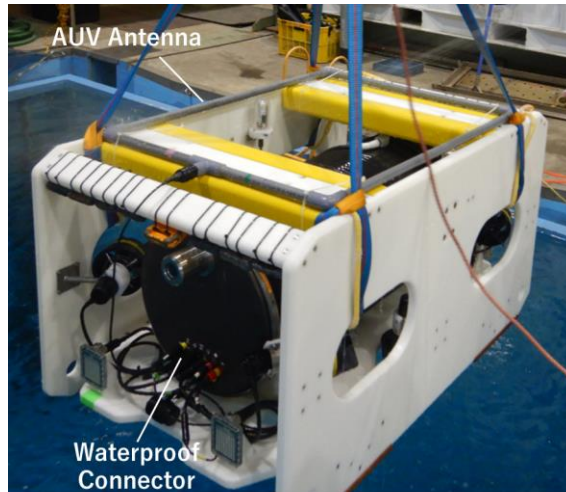


図 3.5-91 AUV へのアンテナ取付

3.5.3.4.3. 通信実験結果

A 大型水槽での実験

A-1 実験用大型水槽

実験場は 2.3.4.3 章で記載の北九州市の日本サルヴェージの海水水槽でサイズは幅 5.5m × 奥行 5.5m × 深さ 4.8m である。実験は 2022 年 2 月 17 日に実施した。当日の水温は 11.8°C、塩分濃度 3.10%、導電率は 4.95 S/m (25°C換算) である。

A-2 大型水槽での実験システム

図 3.5-92 に大型水槽に充電スタンドと AUV を入れた場合の実験システムを示す。ベースステーション側の耐圧容器を充電スタンドの上部に取付、PC1 から光ファイバーケーブルで接続している。AUV と船上局も光ファイバーケーブルで接続し、船上局内のイーサネットとハブを介して PC2 に接続している。このシステムにより PC1 と PC2 間での通信速度等を測定が可能となる。

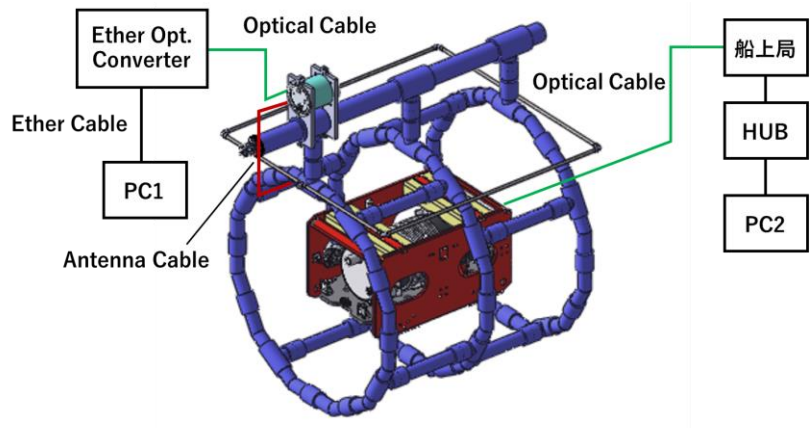


図 3.5-92 実験システム

図 3.5-93 にベースステーションアンテナと AUV アンテナの位置関係を示す。図 3.5-93 のように xyz 座標を決めて基準点 $(x,y,z)=(0,0,0)$ はベースステーションアンテナの中心とする。z 座標はベースステーションアンテナから AUV が離れると大きくなるように下向きとする。本検討では、図 3.5-93 の位置 $(x,y,z)=(0m, 0m, 0.72m)$ の位置で、ワイヤレス給電の影響を調べるため、ワイヤレス給電なしの場合と送電電力と通信モードを変化させてデータを取得した。また AUV を x 方向に動かして充電スタンドの端の位置内 $(x,y,z)=(0.3m, 0m, 0.72m)$ で通信速度を測定した。

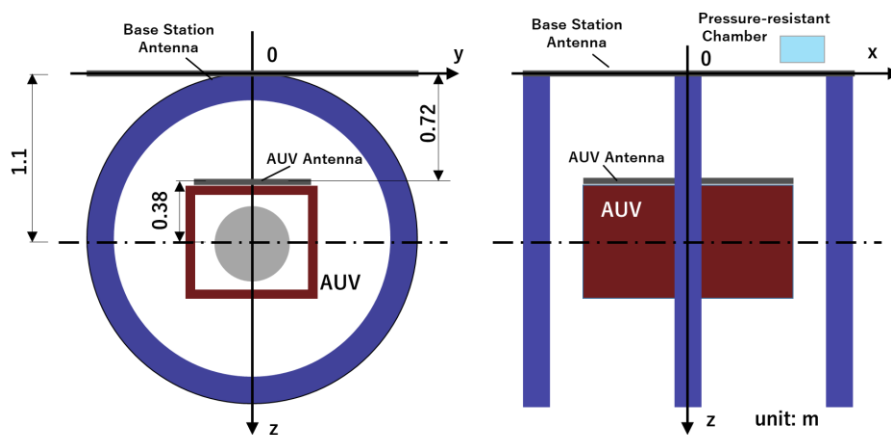


図 3.5-93 ベースステーションアンテナと AUV アンテナの位置関係

A-3 大型水槽での実験結果

A-3-1 大型水槽での通信速度の測定

図 3.5-94、図 3.5-95 に 1/8 モード、1/16 モードでワイヤレス給電電力を 0、1.5、2.7、3.5kW に変化させたときの UDP、TCP での通信速度を示す。図 3.5-87 にアンテナ特性が

3MHz 以上で 80dB 以上あるため、表 3.5-1 に示した標準モード、1/2 モード、1/4 モードの通信は出来なかった。図 3.5-94(a)UDP において、AUV からベースステーションへの通信（上り通信）は、給電電力を変えても 1~2 Mbps と比較的安定しているが、ベースステーションから AUV への通信（下り通信）は給電電力を増加すると 0.4Mbps から 0.05Mbps と低下がみられる。1 Mbps 以下で通信速度が遅い状態は、通信限界に近く伝送路やノイズの影響を大きく受けるためと考えられる。図 3.5-94(b)TCP では、双方向ともに給電電力を増やすと若干の通信速度の低下がみられる。これも通信限界に近いための現象と考えられる。

また、図 3.5-94(a)、(b)ともに上り通信に比べて下り通信が速度大幅に低下している。原因は以下の章で示す CINR 特性の解析から AUV 内で発生しているノイズが AUV の通信モジュールの受信アンプに入り、S/N を低下させていると考えられる。

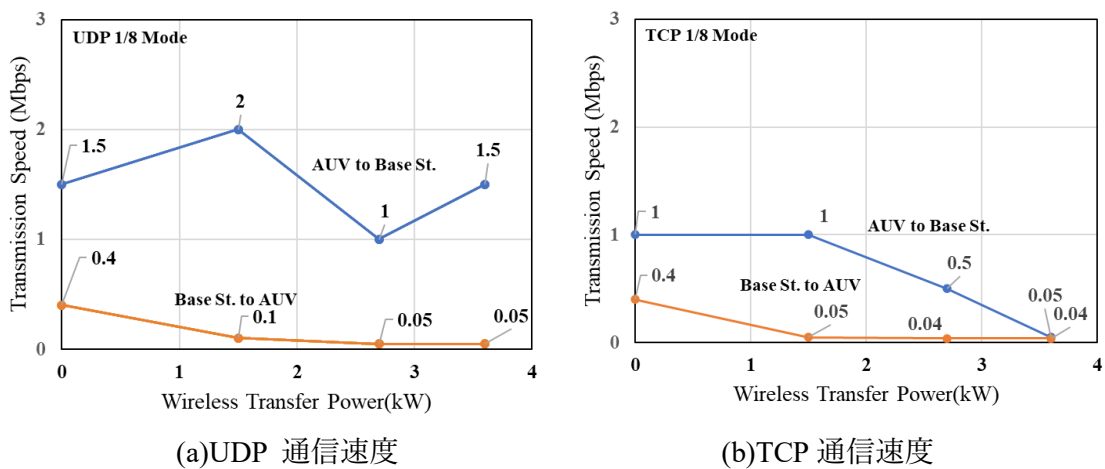
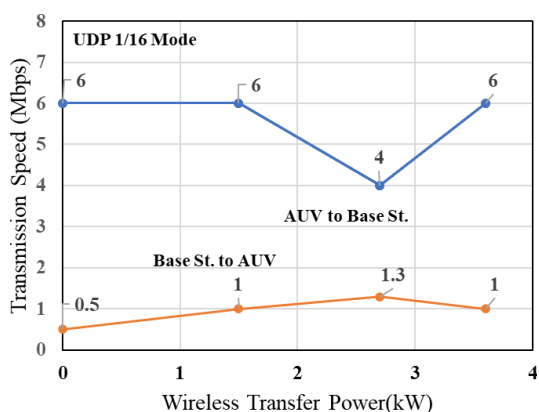
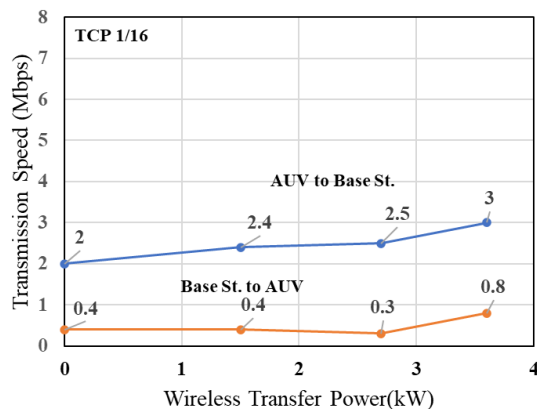


図 3.5-94 1/8 モードでの通信速度の測定

図 3.5-94 と図 3.5-95 を比較すると、図 3.5-95(a)の下り通信で概ね 1Mbps、上り通信で 5.5Mbps 程度の通信速度である。図 3.5-95(b)では下り通信で概ね 0.5Mbps、上り通信で 2Mbps 程度の通信速度である。グラフでは給電電力を変えても通信速度は安定しているため、影響は少ないと考えられる。図 3.5-94(a)、(b)と同様に上り通信に比べて下り通信が速度大幅に低下しており、AUV 内で発生しているノイズ影響と考えられる。



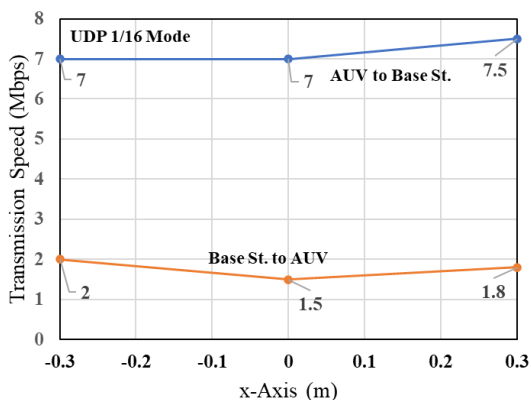
(a)UDP 通信速度



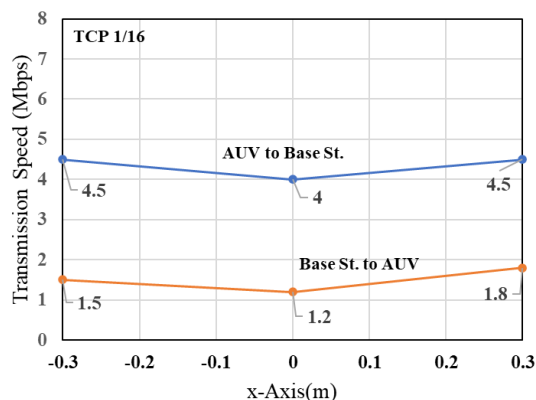
(b)TCP 通信速度

図 3.5-95 1/16 モードでの通信速度の測定

図 3.5-93 で $y=0\text{m}$ 、 $z=0.72\text{m}$ で $x=-0.3$ 、 0 、 0.3m に動かした場合の、通信速度の変化を示す。 $x=\pm 0.3\text{m}$ は、AUV の前後と充電スタンドの両端が一致する位置である。図 3.5-96 では、UDP の上りで 0.5Mbps 程度、下りで 0.5Mbps の変化であり、TCP でも上りでは 0.5Mbps 程度、下りで 0.6Mbps x 方向の位置に関する変化は少ないと考えられる。



(a)UDP 通信速度



(b)TCP 通信速度

図 3.5-96 AUV を x 方向に動かした場合の通信性能の評価

A-3-2 AUV 内に発生するノイズによる CINR 特性の低下

上り通信と下り通信での伝送特性 S_{21} は同じ値となるため、ワイヤレス給電を停止した場合の上り下り通信の速度はほぼ同じ速度となる。今回のケースのように下り通信で通信速度が大幅に低下するのは、AUV 側の通信モジュールの受信機がノイズ影響を受けている。上り通信で通信速度が低下していないことから、ノイズ発生源は AUV 内と考えられる。

本研究の通信モジュールは CINR (Carrier to Interference and Noise Ratio) の測定が可能である。CINR は通信帯域内のサブキャリアごとの受信電力とノイズの S/N を測定しその S/N に

重みを付けた総和で、通信キャリアの S/N を推定する方法である。

図 3.5-97 に 1/16 モードの上り下り通信の CINR 特性を示す。上り下り通信で、例えば 1.26MHz の CINR の値を比較すると、上りが約 38dB、下りが 8dB である。信号レベルが上り下り同じとするとこの周波数でノイズレベルが約 28dB 増加していることがわかる。概略計算を実施すると 0.16MHz~2.35MHz で上りに対して下り通信は CINR が約 30dB 程度低下してる。これによる PHY レートの低下は 10Mbps から 1Mbps である。

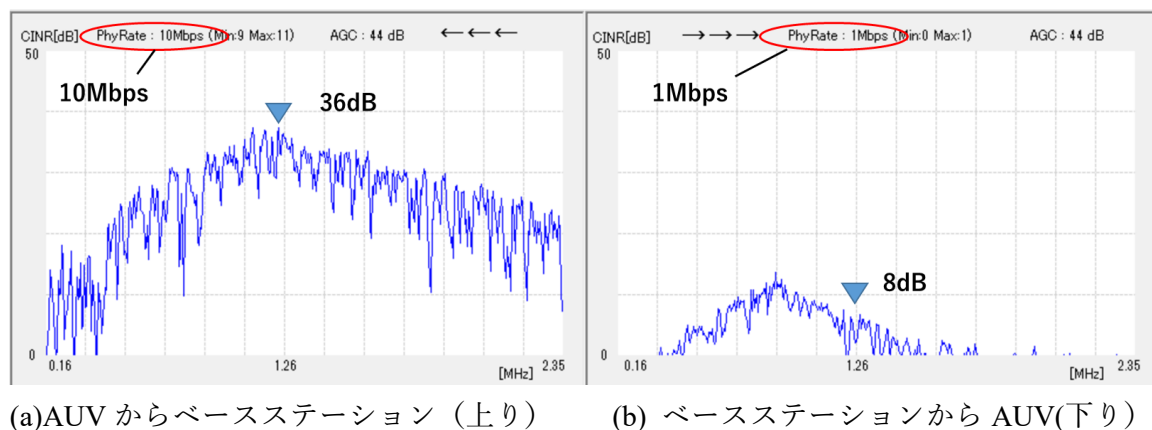


図 3.5-97 1/16 モードの CINR

B 実海域での通信実験

B-1 実海域の実験場概要

実験場は 2.3.4.3.章で記載の北九州市の日本サルヴェージの岸壁で水深は 3m 以上である。実験は 2022 年 2 月 22 日に実施した。水温は 9.2℃、塩分濃度 5.26%、導電率は 3.39S/m (25℃換算) である。実験作業等については 2.3.4.3.4.章に記載している。

B-2 実海域での実験システム

実験システムは、3.5.3.4.1 に示した大型水槽と同じシステムである。図 3.5-98 に岸壁での充電ステーションと AUV を海中に投入する写真を示す。



図 3.5-98 充電スタンドと AUV の海中への投入

B-3 実海域での実験結果

水槽実験での 1/16 モード通信が安定であることがわかったので、実海域ではこのモードを使って通信実験を行った。

図 3.5-99 に 1/16 モードでワイヤレス給電電力を 0、1.5、2.7、3.5kW に変化させたときの UDP、TCP での通信速度を示す。AUV は(x, y, z)=(0m, 0 m, 0.73m) を基準位置としているが、実海域であるため潮流の影響で数十cm程度位置が変化しており完全に固定することができなかった。図 3.5-99 (a)UDP において、AUV からベースステーションへの通信（上り通信）は、給電電力を変えても 3~5 Mbps と比較的安定しているが、ベースステーションから AUV への通信（下り通信）は給電電力を増加すると 0.3Mbps から 0.5Mbps と低下がみられる。上り下り通信の速度差は、上記 A-3-2 で示したように AUV 内のノイズ影響と考えられる。

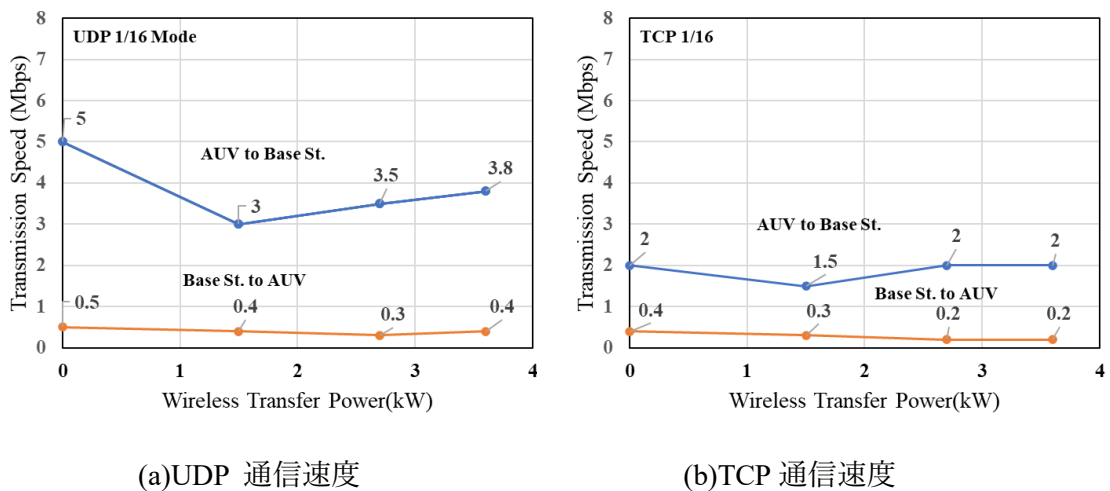


図 3.5-99 1/16 モードでの通信速度の測定

3.5.3.5. 実機検証フェーズ II の内容

実機検証フェーズ II では実海域での充電制御とデータ伝送実験を行う。実機検証フェーズ I で抽出した AUV のノイズ原因を特定し対策を実施した。AUV ノイズの原因は AUV の耐圧タンク内の CPU 基板等より発生するノイズ影響を WaveletOFDM 通信装置が受けて受信感度が低下していることがわかった。この対策は、WaveletOFDM 通信装置を別タンクとして AUV タンク内のノイズを受けないようにした。本対策で 2022 年 7 月に OKI コムエコーズで通信実験を実施した。その結果 AUV のスラスタが動作しないときは、良好な通信ができるものの AUV スラスタが動作すると通信速度が低下する新たな問題が発生した。

この課題を解決するために、スラスタを単独で動作させノイズ発生の要因を検証した。その結果、スラスタケーブルより発生するノイズにより通信装置の受信感度が低下していることがわかった。この対策としてスラスタケーブルへのフェライトクランプおよびノイズ対策用金属シートの装着により対策を実施した。本対策を実施した AUV による通信実験を 2022 年 12 月に鹿児島県の口之島の実海域実験で実施し良好な通信性能を得た。さらに充電制御と海中カメラによるデータ伝送実験を行い当初の目標を達成することができた。

3.5.3.5.1. AUV ノイズ対策

実機検証フェーズ I で実施したときの通信装置は図 3.5-85 であり、AUV 耐圧タンク内に通信装置を組込んでいた。そのため AUV を動作させると通信速度が低下した。この原因は通信装置が AUV タンク内の CPU で発生したノイズの影響を受け受信感度が低下したためである。この対策として図 3.5-100 に示すように、通信装置を別タンクに入れることで AUV ノイズを遮断する対策を行った。本システムを用いて 2022 年 7 月に OKI コムエコーズで実海域実験を行った。

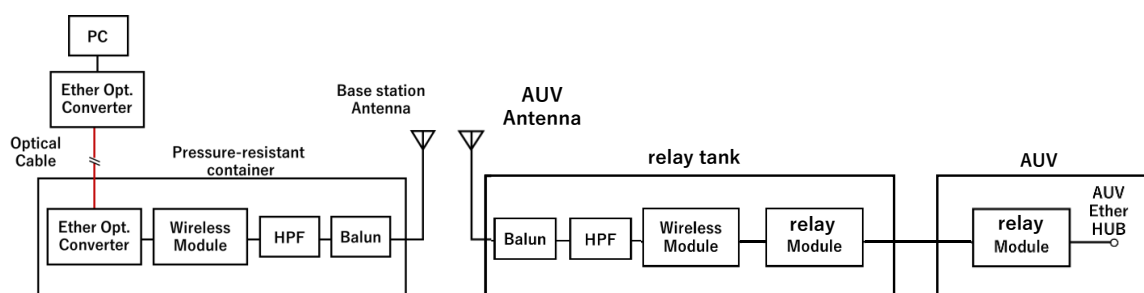


図 3.5-100 通信システムのブロック図

3.5.3.5.2. OKI コムエコーズでの実海域通信実験

A 実海域での実験システム

実験に使用する通信システムとアンテナを図 3.5-100、図 3.5-101 に示す。これらのシステムを用いて OKI コムエコーズで実海域実験を実施した。送受信の実験システムを図 3.5-102 に示す。送信側は通信装置と光ケーブルで接続している。受信側は AUV に実装された光ケーブルを介して通信を行った。

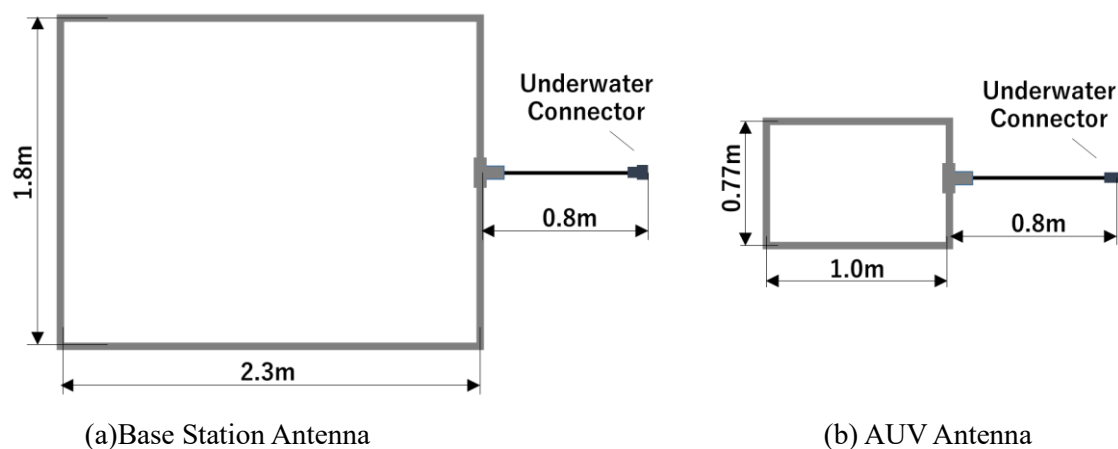


図 3.5-101 アンテナの構造と寸法

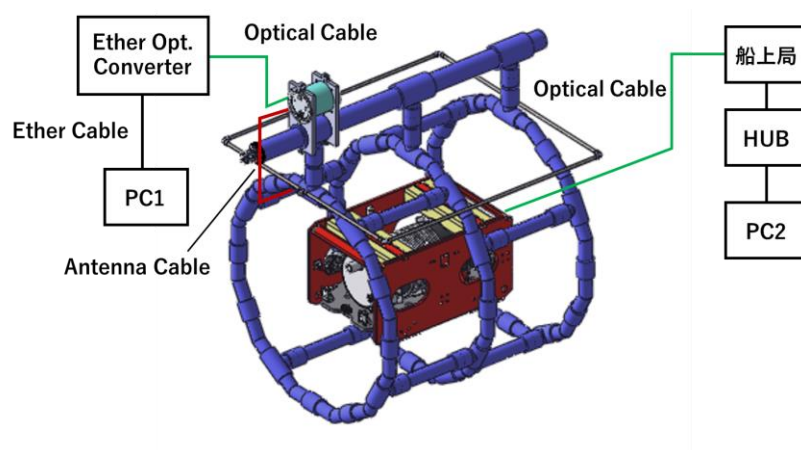


図 3.5-102 実験システム

B 実験結果

B-1 AUV の位置や向きを変えた場合の通信速度測定

充電ステーション内に AUV を入れて位置や向きを変えて通信速度を測定した。さらに、給電中と給電なしの通信速度を比較した。測定位置を図 3.5-103 に示す。

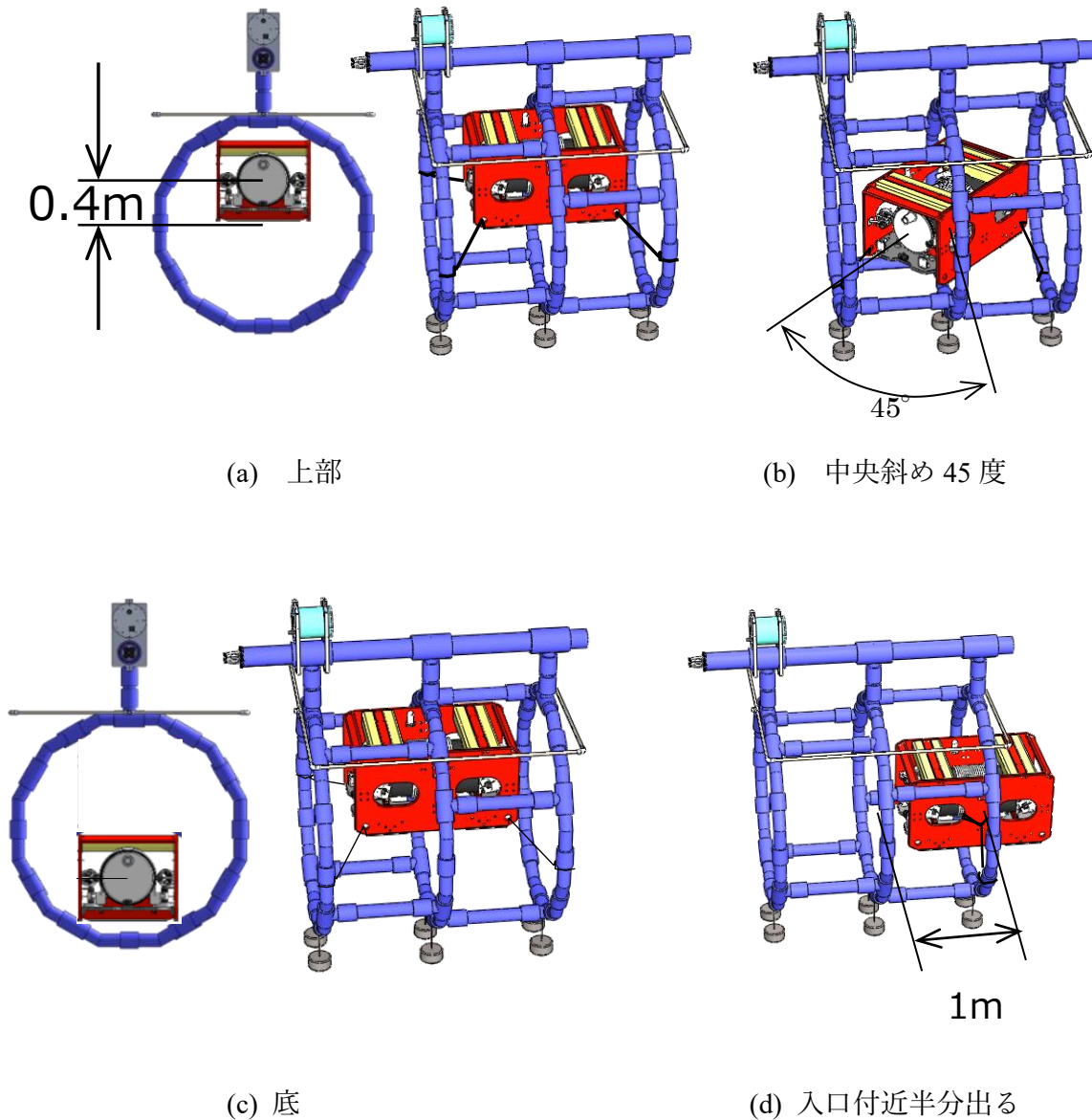


図 3.5-103 AUV の場所

充電ステーションでのそれぞれの位置での測定結果を表 3.5-12～表 3.5-15 に示す。表中の BASE は充電ステーション側に設置した通信システムのことである。

表 3.5-12 充電ステーション上部での通信速度（給電あり／なし）

モード	給電なし				給電中 送電3kW 受電2.4kW			
	Base ⇒ AUV		AUV ⇒ Base		Base ⇒ AUV		AUV ⇒ Base	
	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP
1	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2	5.5	4	5.5	4	5.4	4.1	5.3	4
1/4	8.5	6.8	7.5	6.8	8.5	6.7	7.5	6.7
1/8	8	6.5	7	6	8	6.6	7	6
1/16	5.5	4.2	5	4	5.5	4.1	5	4

単位 Mbps

表 3.5-13 充電ステーション中央斜め 45 度での通信速度（給電あり／なし）

モード	給電なし				給電中 送電3kW 受電2.2kW			
	Base ⇒ AUV		AUV ⇒ Base		Base ⇒ AUV		AUV ⇒ Base	
	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP
1	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2	0	0	0	0	0	0	0	0
1/4	0	0	0	0	0	0	0	0
1/8	2.1	1.8	1.8	1.4	2	1.8	1.7	1.3
1/16	2.6	1.5	2	1.2	2.5	1.5	1.9	1.3

単位 Mbps

表 3.5-14 充電ステーション底部での通信速度（給電あり／なし）

モード	給電なし				給電中 送電3kW 受電2.2kW			
	Base ⇒ AUV		AUV ⇒ Base		Base ⇒ AUV		AUV ⇒ Base	
	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP
1	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2	0	0	0	0	0	0	0	0
1/4	0	0	0	0	0	0	0	0
1/8	0	0	0	0	0	0	0	0
1/16	0	0	0	0	0	0	0	0

単位 Mbps

表 3.5-15 充電ステーション入口付近半分出た状態での通信速度（給電あり／なし）

モード	給電なし				給電中 送電3kW 受電2.2kW			
	Base ⇒ AUV		AUV ⇒ Base		Base ⇒ AUV		AUV ⇒ Base	
	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP
1	0	0	0	0	0	0	0	0
1/2	0	0	0	0	0	0	0	0
1/4	0.3	0.2	0.8	0.3	0	0	0	0
1/8	0.5	0.1	0.1	0.1	0.8	0.4	0.5	0.3
1/16	0.8	0.5	0.5	0.3	1	0.5	0.5	0.3

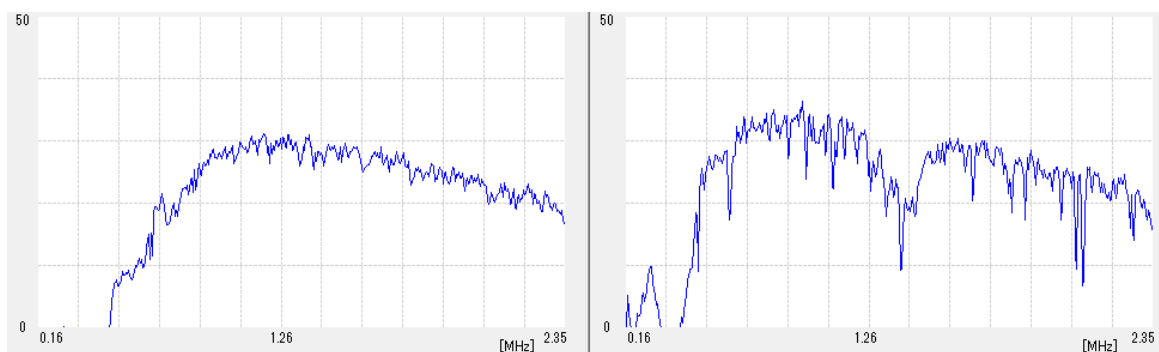
単位 Mbps

表 3.5-12 より、充電ステーション上部においては、1/4 モードの通信速度が UDP で 8.5Mbps と 1 番高い。表 3.5-12～表 3.5-15 より、充電ステーション内部で送受信アンテナの距離が変わると、通信速度に変化が生じることがわかる。底部は送受信アンテナ間距離が離れるため通信できないが、入口付近では充電ステーションから AUV が半分出た状態でも通信可能であった。また給電なし状態と給電中では、通信速度に顕著な差はみられなかった。

表 3.5-12～表 3.5-15 より、充電ステーションから AUV と AUV から充電ステーションにおいて、図 3.5-97 で見られたような、通信速度の顕著な差はみられなかった。これは、図 3.5-100 のように、通信装置を AUV 外の別タンクに移したため、AUV 内で発生しているノイズを直接うけることなく通信ができていることを示している。図 3.5-100 の通信システムにより、AUV 内で発生するノイズ対策の効果を確認した。

B-2 AUV スラスタによるノイズ影響

AUV のスラスタの動作によるノイズについて検証を実施した。スラスタ ON/OFF 時の、CINR の測定結果を、図 3.5-104 に示す。



(a) スラスタ OFF AUV ⇒ Base

(b) スラスタ OFF Base ⇒ AUV

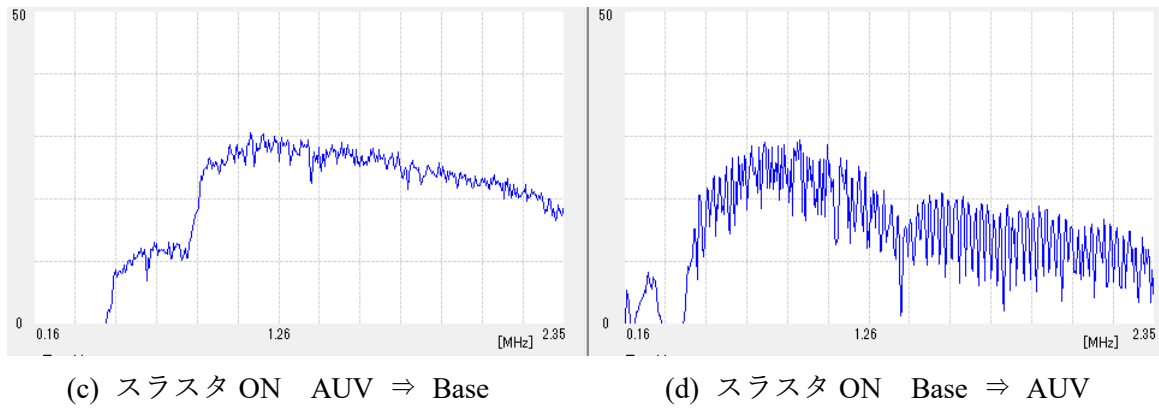


図 3.5-104 スラスタ ON/OFF 時の CINR の変化

図 3.5-104 (d)より、スラスタ ON 時の、Base⇒AUV の CINR の劣化が大きく楯状のノイズが重畳している。このノイズはスラスタが原因からである。図 3.5-104(b)と(d)の結果を表 3.5-16 に示す。表 3.5-16 より CINR の劣化に加えて、PHY 速度、UDP 速度、TCP 速度も低下している。そのためスラスタ動作時に発生するノイズ対策が必要である。

表 3.5-16 1/16 モード Base⇒AUV 通信速度

	スラスタOFF	スラスタON
PHY	11	7
UDP	5.5	3.5
TCP	4.2	3

3.5.3.5.3. スラスタノイズ原因調査と対策

A 原因調査と対策

スラスタから発生するノイズ原因を調査するため、スラスタを AUV から取外しスラスタ単体で動作させた場合のノイズ測定を行った。図 3.5-105 に実験方法を図 3.5-106 に写真を示す。

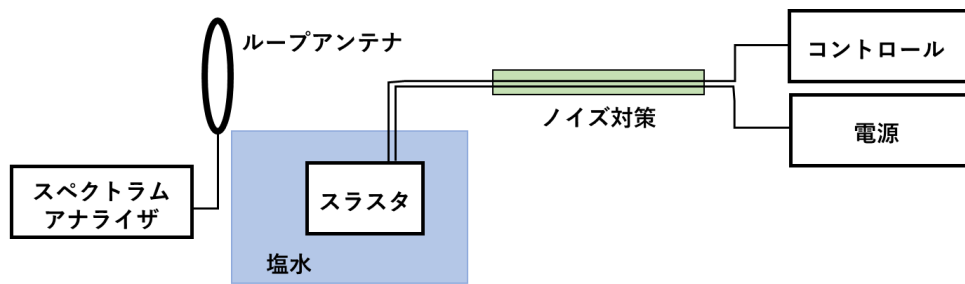


図 3.5-105 スラスタノイズ測定方法

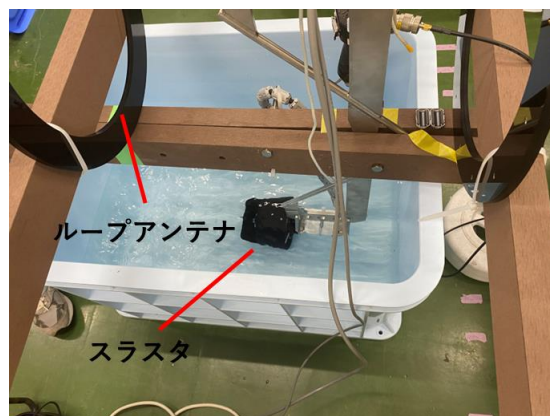


図 3.5-106 スラスタノイズ測定写真

図 3.5-107 に、スラスタをオン／オフした場合にループアンテナで受けたノイズレベルを示す。スラスタをオンにするとノイズレベルが大きくなるのでスラスタよりノイズが発生している。ノイズ発生源はスラスタ内部のインバータ回路と考えられる。しかしスラスタを分解してノイズ対策部品を取付けるのは防水性の観点から難しいので、今回は図 3.5-105 に示すように、スラスタケーブルにノイズ対策部材を取付けることで対策する。

図 3.5-105 のスラスタのケーブルにフェライトとアルミシートによるノイズ対策を行った。フェライト部品は以下である。

クランプフィルタケーブルコード用 ZCAT シリーズ (TDK ZCAT2235-1030)

アルミシートは

ノイズプロテクトチューブ スナップタイプ (興和化成 KATS-40)

フェライト部品およびアルミシートを装着した場合の漏洩電磁界を図 3.5-107 に示す。フェライト部品は 7 個、アルミシートは電線全体に 2 重巻きした。測定結果はフェライト部品でも一定のノイズ対策効果はあるが、アルミシートを巻くとさらにノイズ低減することがわかった。

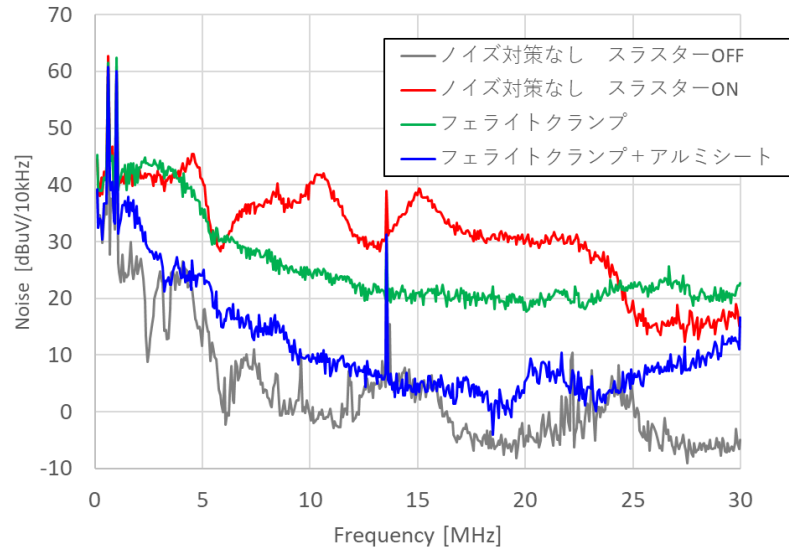


図 3.5-107 スラスタノイズ対策

B AUV スラスタにノイズ対策を行った場合の通信速度

図 3.5-105 のノイズ測定システム近傍での 0.5m コイル間で通信実験を行い、ノイズ対策部品の有りなしで CINR 性能善を検証した。図 3.5-108 に 1 倍モードと 1/16 モードとの測定結果を示す。図 3.5-108 より、スラスタのノイズ対策として、フェライト部品とアルミシート両方の対策することで CINR 改善効果が高い。本対策を AUV スラスタで行い、実海域での海中通信実験にて検証する。

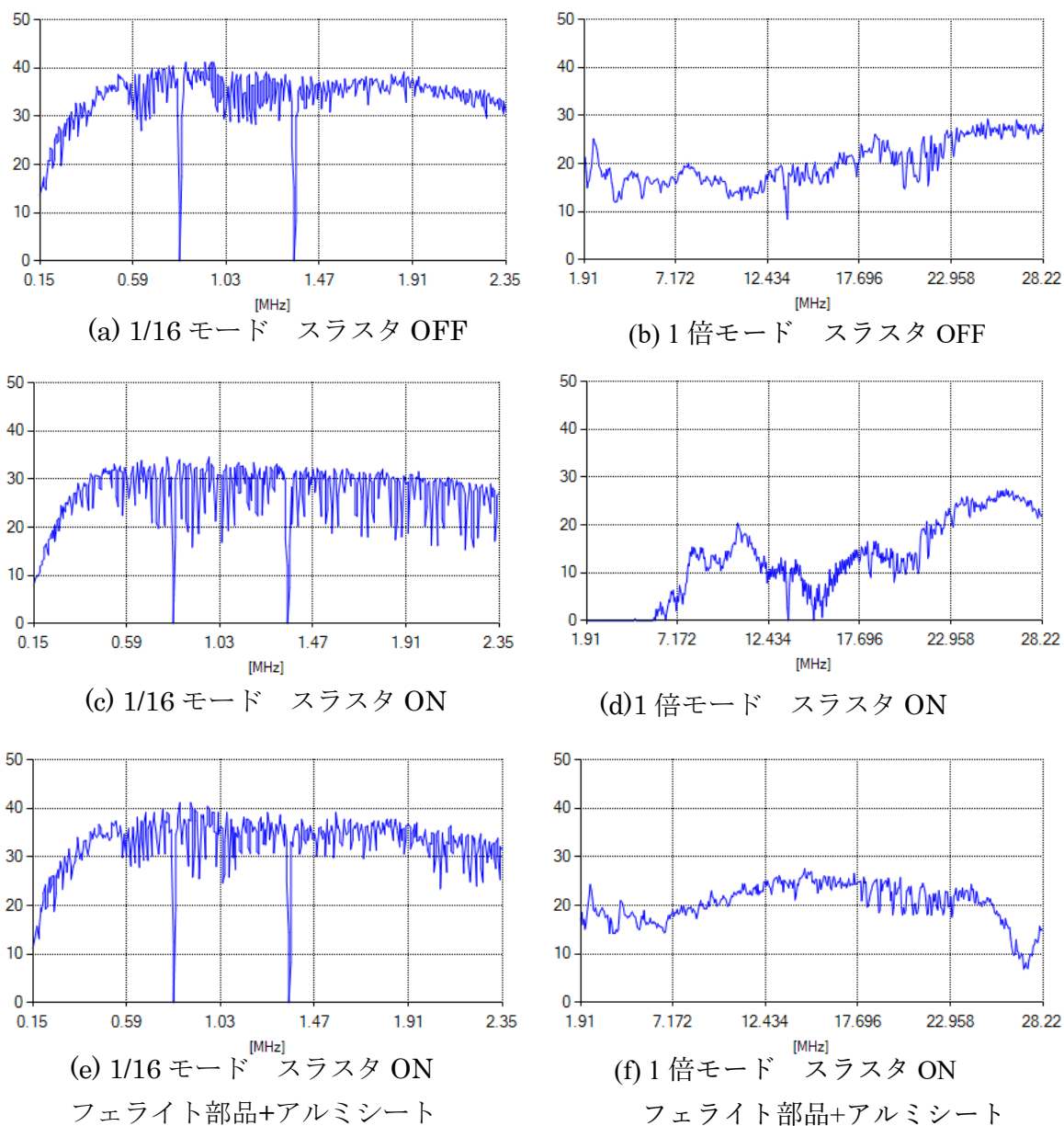


図 3.5-108 スラスタノイズ対策時の CINR

3.5.3.5.4. 実海域での通信実験 2

A 通信システム

実海域での通信実験を 2022 年 12 月に鹿児島県の口之島岸壁にて実施した。AUV のスラスタノイズ対策はフェライト部品およびアルミシートを AUV にある 6 台のスラスタケーブルに取付けた。また中継タンクから直接 Ether ケーブルを AUV に接続することを実現したので、中継器は使用していない。本実験で使用する通信システムを図 3.5-109 に示す。

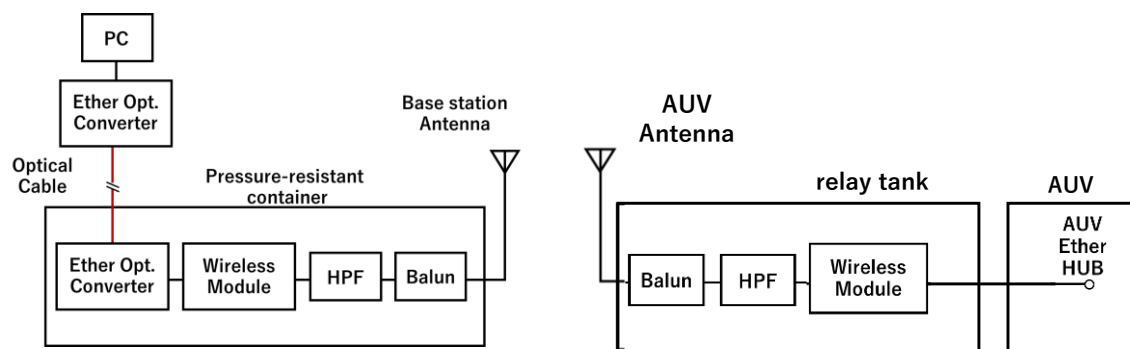


図 3.5-109 通信システム

今回の実海域実験では、AUV に搭載したカメラ映像を地上で視聴する実験も実施する。そのシステム構成を図 3.5-110 に示す。

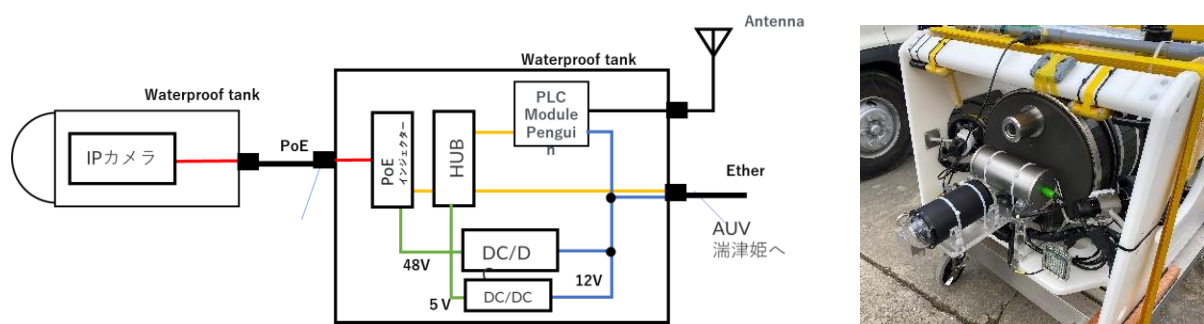


図 3.5-110 AUV 搭載カメラのシステム構成

B 実験結果

B-1 ノイズ対策を行った海中通信実験

今回の実海域実験の構成を図 3.5-111 に示す。口之島の岸壁に充電スタンドを沈め、その中に AUV を配置し、通信速度の測定、およびカメラ映像の視聴実験を行った。

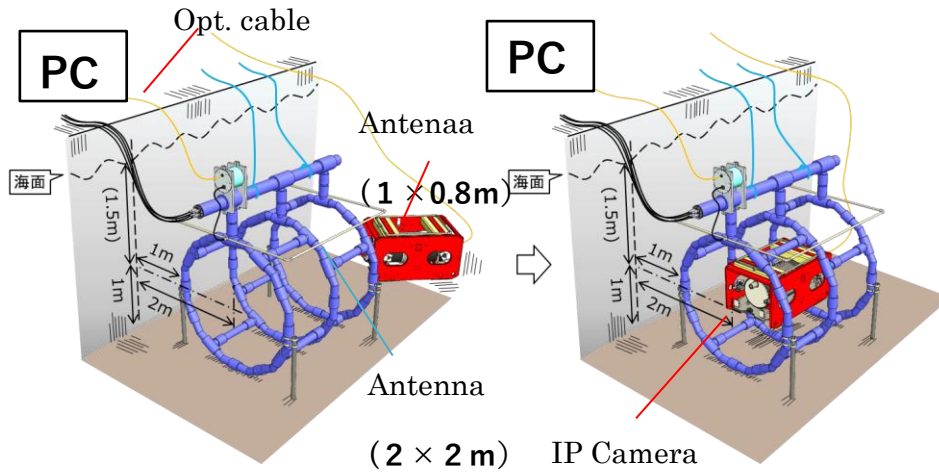


図 3.5-111 口之島実海域での実験構成図

表 3.5-17 に 1/16 モードでスラストオンの場合の OKI と口之島実験の通信速度の比較を示す。表 3.5-17 で PHY、UDP、TCP とともに口之島実験で通信速度が改善した。また図 3.5-112 に CINR の測定結果を示す。CINR からは信号レベルが高くスラストノイズ対策の効果を確認できる。これらの結果からスラストノイズ対策により実海域でも十分に海中電波通信が可能なことを明らかにした。

表 3.5-17 1/16 モードでの通信速度

	OKI実験	口之島実験
PHY	7	11
UDP	3.5	4.5
TCP	3	3.3

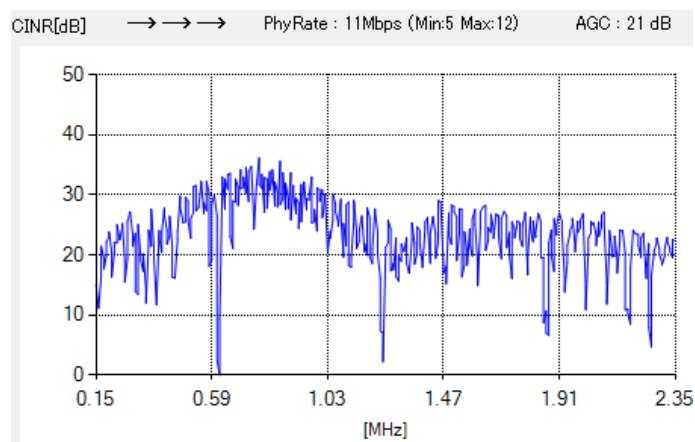


図 3.5-112 1/16 モードの CINR

B-2 AUV 搭載カメラによる画像データの伝送と充電制御

AUV 搭載カメラ映像データ伝送実験を行った。カメラ画像を図 3.5-113 であるが実際は動画データである。伝送速度は TCP で 1 Mbps 程度である。本実験により、海中電波通信によるカメラ映像伝送実験に成功した。本実験と同時に海中電波通信を介した充電制御実験を行い本通信路でも充電制御できることを確認した。



図 3.5-113 水中カメラの映像

3.5.4. まとめ

海中でワイヤレス給電による電池の充電では、送受信システムの動作状況を逐一確認しながら充電制御を行う必要がある。本研究では Wavelet OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を用いた海中電波通信技術を確立し充電制御およびデータ伝送の研究開発を行った。

海水の物性は電波の周波数が高くなると減衰が大きくなる。そのため本技術は、2~28 [MHz]の周波数帯域を標準モードとし、その周波数の 1/2~1/16 モードを生成することで海中電波通信に適した電波利用を行う。Wavelet OFDM では帯域内に複数のモードとチャンネルを導入することでロバスト性の向上と通信長距離化を実現する。

第一に小型水槽を用いて塩水中の伝送路特性を測定した結果、アンテナ間距離を伸ばすにつれて高い周波数帯域の減衰が大きくなり、可用帯域が狭くなることがわかった。海中電波伝搬の特性を有効利用するため、Wavelet OFDM 方式の各モードで最も低い周波数帯域のチャンネルを選択し、海中通信用のアンテナと FPGA ボードを用いて通信実験を行った。その結果、アンテナ間の距離が短い時には標準モードで高速通信が可能 (TCP 通信で約 70Mbps) であり、距離が長い時には狭帯域のモードを使用することで、通信距離を伸ばすことが可能 (Channel ID : x-4 選択時に最長 95cm) となった。

第二に大型水槽を用いて海水中の伝送路特性を測定した。実際の海中環境に近い環境でも、アンテナ間の距離を伸ばすにつれて高い周波数帯域の減衰が大きくなり、可用帯域が

狭くなることを確認できた。そこで、Wavelet OFDM 方式において従来よりも狭帯域となる 2 つのモードを新たに追加し、海中通信用のアンテナと FPGA ボードを用いて通信実験を行った。その結果、新たに追加したモードを使用することで通信距離を伸ばすことが可能となり、アンテナ径が 2m と 1m の組合せにおいて Channel ID : x-16 を使用した場合に、最大通信距離 220cm を達成することができた。また、アンテナの位置がずれても通信速度の低下は見られず、ポジションフリーな通信への見通しを立てることができた。

第三にベースステーションと AUV に通信モジュールを組み込み、ループアンテナを用いて電磁波による海中無線通信に成功した。通信速度は UDP で 3 Mbps、TCP で 1.5 Mbps である。この通信を用いて、本研究の目標である実海域での充電制御実験を行い安定に動作することを確認した。しかし AUV からベースステーションへの通信（上り通信）は、ベースステーションから AUV への通信（下り通信）は通信速度が水槽実験の UDP の平均で 4.2 Mbps も低下している。この原因は AUV 内でのノイズ影響であるため、AUV ノイズ対策を実施した。AUV のノイズ対策としては、Wireless Module を AUV 外の外付けの別タンクに収納し、AUV 内ノイズが、直接 Wireless Module に飛び込んでこないように対策を実施した。本システムを OKI コムエコースでの実海域にて実験した結果、対策なしのときは、通信装置の上り通信と下り通信で顕著な速度差が生じていたが、その差が小さくなっていた。これは AUV 内ノイズの影響を軽減できたことを示している。しかし、CINR の波形においては、下り通信で楕状の劣化が見られた。これはスラスタ動作によるノイズの影響と考えられるため、この対策として AUV からスラスタに繋がるケーブルに、フェライトコアとアルミシートを装着しノイズ軽減を図った。この対策行った通信システムを口之島の実海域で実験した結果、CINR の楕状のノイズは軽減されており、スラスタノイズ対策の効果を確認できた。さらに、AUV に搭載したカメラ映像を海中電波通信経由で地上データ伝送することにも成功した。

以上のように、海中における電波通信を実現し、ノイズ対策等その性能向上を図り、充電制御と AUV からの海底画像の伝送を確認した。

3.6. 強電磁界での魚類等の生態系への影響調査

魚類の行動特性、育成状況やストレス指標（ATP 関連物質や血液検査等）等について、強電磁界の有り無しで比較することで、強電磁界を海中で発生させた場合の魚類に対する影響を調査した環境影響試験の内容について本章で説明する。

3.6.1. 電力 100 W 印加実験

3.6.1.1. 実験の概要

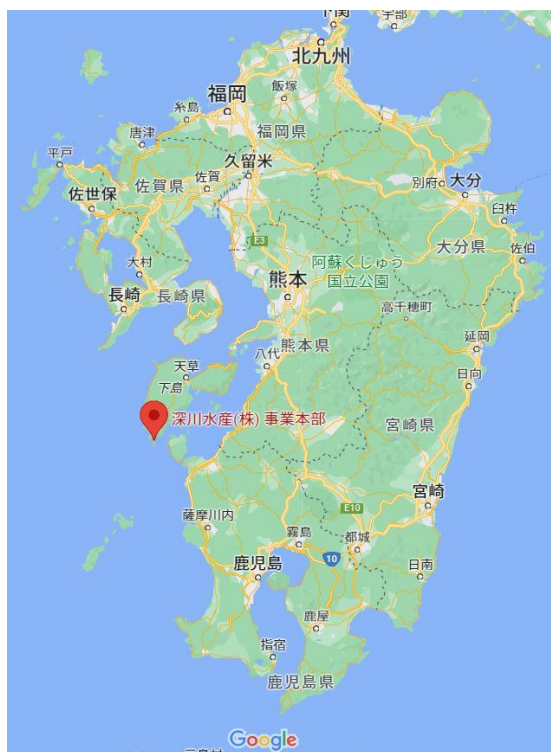
海中移動体へ大電力をワイヤレス給電する際、コイル内に発生する電磁界が魚類に与える影響を調査した。現在、日本で養殖量の多い魚類の内、マダイ *Pagrus major* とシマアジ *Pseudocaranx dentex* を対象魚種とし、実験用陸上生簀（長さ 2.9 m×幅 2.8 m×水深 0.7 m）を用いて、魚類への電磁界影響試験を実施した。魚類への電磁界の影響指標については、ビデオ撮影による行動観察、ストレス指標（血中乳酸濃度、血中コルチゾル濃度、ATP 関連物質）の生化学分析を行い、評価した。

なおワイヤレス給電の条件は、伝送電力を 100 W、共振周波数を 1 kHz とした。この時点で最終的に使用する周波数は検討中であり、1 kHz 前後が有望であったことから、暫定的に 1 kHz とした。

【実験期間】2019 年 2 月 18 日～3 月 1 日（コイル作製、環境構築、実験）

3.6.1.2. 実験場所

試験魚の入手と管理、水質、設備の面から熊本県天草市牛深にある深川水産株式会社に協力いただき、陸上生簀を借用した。実験場所の地図と外観を図 3.6-1 に示す。陸上生簀には常に新鮮な海水を取水して常時循環することができるため、長時間の魚の飼育については全く問題ない。また、実験に使用するマダイとシマアジのそれぞれ稚魚と中間魚は深川水産にて育成しており、活きのいい状態で試験魚を入手できる。



(a) 実験場所の地図



(b) 陸上生簀外観



(c) 陸上生簀内部

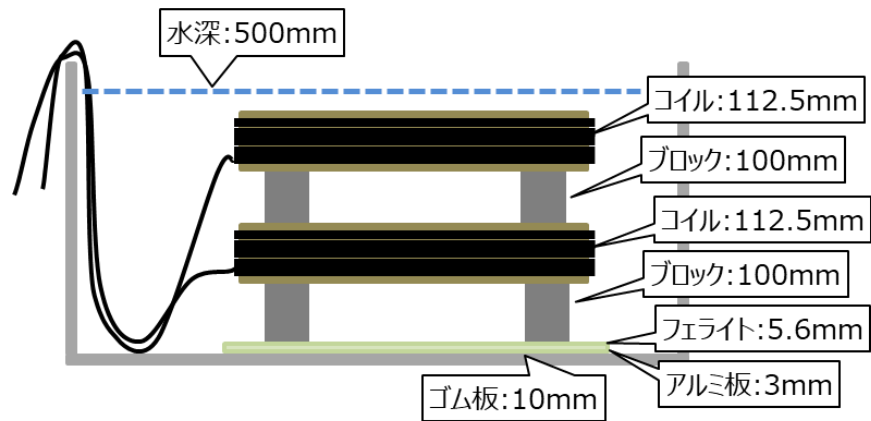
図 3.6-1 実験場所と陸上生簀の写真

3.6.1.3. 実験用ワイヤレス給電システム

環境影響試験のためのワイヤレス給電システムの設計製作を行った。さらにこのシステムの磁界強度を計算し、海水中の磁界強度の絶対値を得るとともに、ICNIRP のガイドラインと比較検討も行った。

3.6.1.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要

図 3.6-2 は生簀にコイルを設置した様子を示している。直径 1 m、4 層 5 段で 20 巻したコイルを 10 cm の間隔で 2 つ配置した。電線は導体の断面積が 38 mm^2 のキャブタイヤケーブルを用いた。コイルの配置は下側が送電コイル、上側が受電コイルである。生簀底面コンクリート内の鉄筋影響を受けないようアルミ板を敷いた上にフェライトを敷き詰め、その上に設置した (のちに鉄筋影響はほぼないことを確認して、アルミ板とフェライトは以降の年度の実験から使用していない)。



(a) コイル設置図



(b) 生簀の中のコイルの様子

図 3.6-2 コイル設置状態 (2019年2月)

3.6.1.3.2. シミュレーションによる磁界強度確認

図 3.6-3 はシミュレーションモデルで、解析空間は $2.6\text{ m} \times 2.6\text{ m} \times 1.9\text{ m}$ であり媒質は海水である。図 3.6-3 (b)、(c) にコイル構造の詳細を示す。コイルは4層5段で構成している。また電線は導体面積 38 mm^2 、導体直径 8.7 mm 、被覆厚 4.0 mm である。電磁界シミュレーションには CST の MW-Studio を用いた。なお実験前のシミュレーションのためコイル間隔が 15 cm と実際より広く、フェライトも敷いていない。シミュレーションにより求めたコイル特性と整合回路定数および実測値を表 3.6-1 に、整合回路図を図 3.6-4 示す。

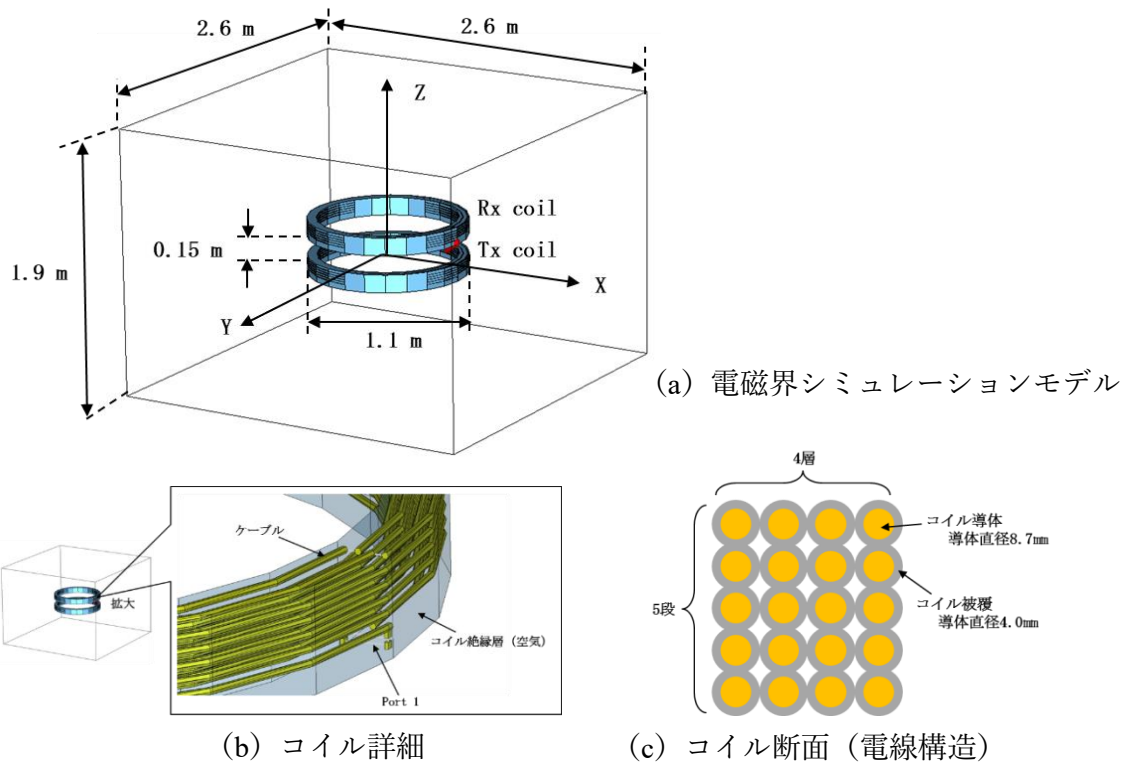


図 3.6-3 電磁界シミュレーションモデル

表 3.6-1 コイル特性と整合回路定数

@1 kHz	シミュレーション	実測値
L_Tx (μH)	762	845
Q_Tx	53	63
L_Rx (μH)	762	769
Q_Rx	53	100
k	0.33	0.39
Cs_Tx (μF)	23.9	25.0
Cp_Tx (μF)	26.3	20.0
Cs_Rx (μF)	23.9	30.0
Cp_Rx (μF)	26.3	25.0

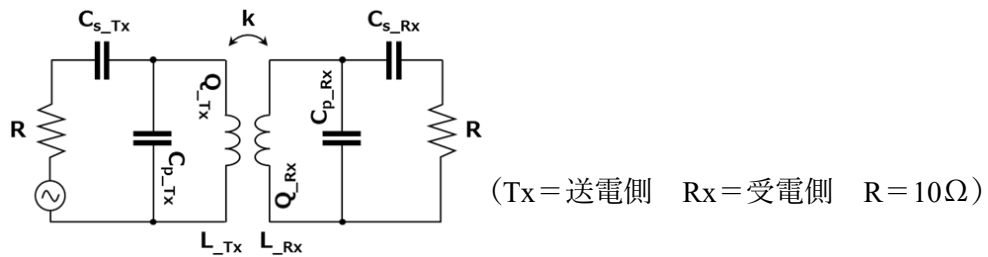


図 3.6-4 整合回路図

このシミュレーション上で送電側コイルに 1 W の電力を入れたときのコイル周辺部の磁界強度分布図を図 3.6-5 に示す。コイル周辺部に磁界が集中し、磁界強度の値も大きいことがわかる。このとき送電側入力電流 0.314 A、電圧 3.19 V、受電側電流 0.297 A、電圧 2.97 V、受電電力 0.887 W となっていた。

図 3.6-3 (a) の X 軸上の磁界強度のシミュレーション結果を図 3.6-6 に示す。X = 500 mm で最大値 60 A/m であった。ちょうど送電コイルと受電コイルに挟まれた部分で最大になっていることがわかる。

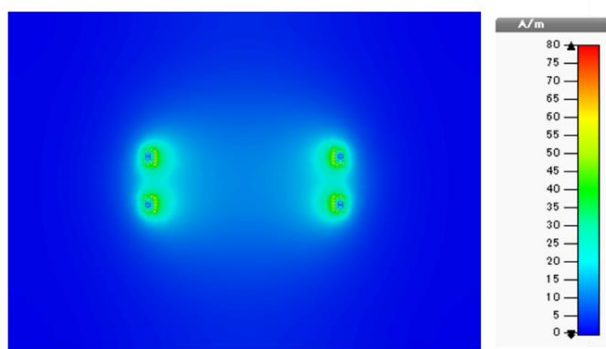


図 3.6-5 1 W 入力時の磁界強度分布シミュレーション結果

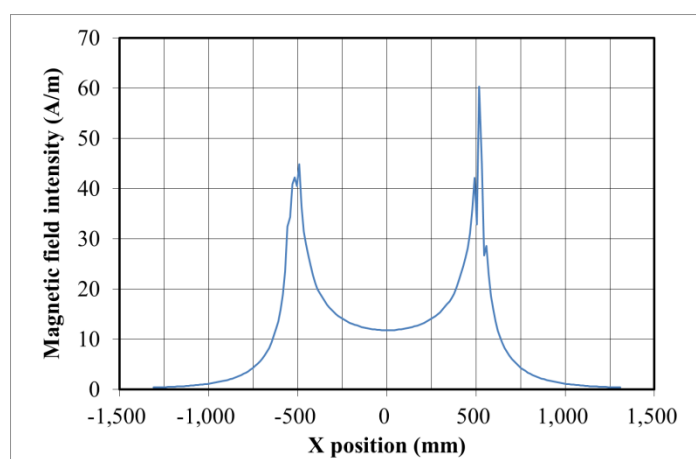


図 3.6-6 X 軸上の磁界強度グラフ (入力 1 W のとき)

実際には電力 100 W を実験で用いるため、1 W のときの磁界強度シミュレーション結果から 100 W のときの磁束密度を計算した結果を図 3.6-7 に示す。磁界強度は電流に比例することから、100 W のシミュレーションの電流が 3.7 A だったことより 11.8 倍の磁界強度になり、また磁界 (A/m) と磁束密度 (T) の間には $1 \text{ A/m} = 1.254 \mu\text{T}$ の関係があることから求めた結果である。

磁束密度で規定されている ICNIRP ガイドライン (図 3.6-8) [24] で定められた 1 kHz における職業的暴露レベルは $300 \mu\text{T}$ 、公衆暴露レベルは $80 \mu\text{T}$ なので、実験中はコイル端から少なくとも 250 mm 以上、できれば 715 mm 以上離れたほうがよいことがわかった。

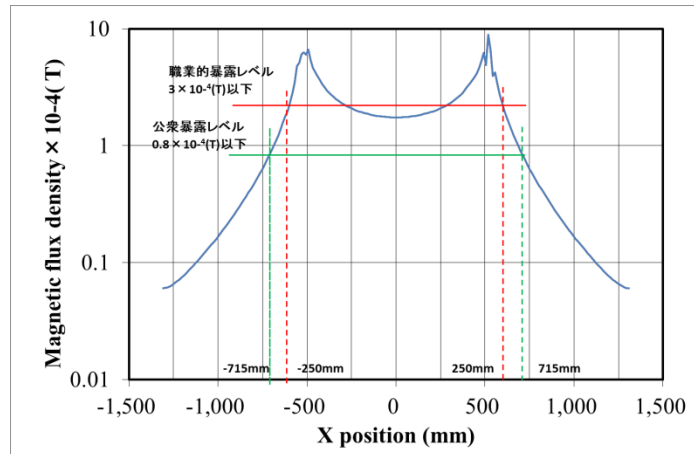


図 3.6-7 磁束密度の計算結果（入力 100 W）

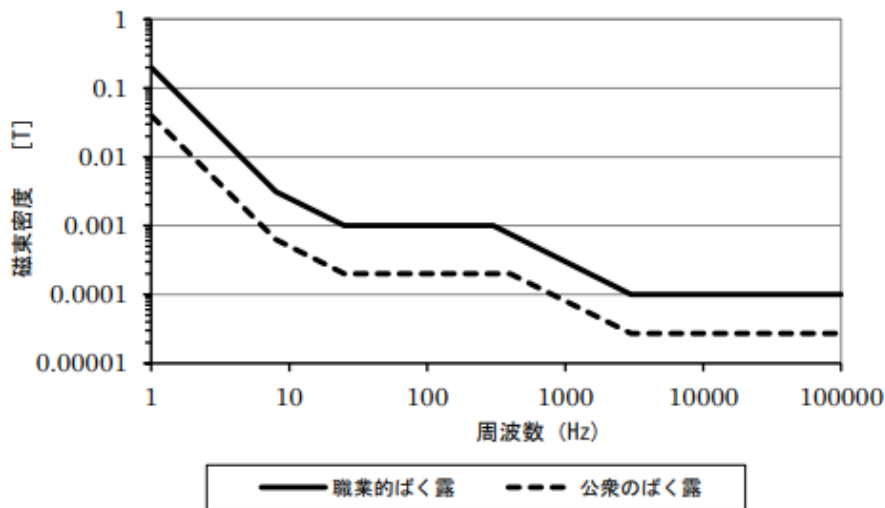


図 3.6-8 ICNIRP ガイドライン参考レベル

3.6.1.3.3. 電力伝送と磁界強度の実測結果

図 3.6-9、図 3.6-10 のように実験系を構築し、受電電力 100 W のときの海水中での電力伝送の実測結果を図 3.6-11 に示す。効率（図中の Efficiency PH2/PH1 の欄）約 89% で電力伝送できていることが確認できた。海水コンディションは表 3.6-2 に示す。

NARDA 製 EHP-50F を用いて磁界強度を測定した結果を図 3.6-12 と表 3.6-3 に示す。シミュレーションとほぼ近い結果であった。試験エリアでは職業的暴露レベルを超えていて、測定エリアでは公衆暴露レベル以下であることも確認できた。なお実験にはコイルを設置した生簀を 2 つ用意し、片方は磁界あり、もう片方には磁界なしとして、比較実験を行う実験系を構築している。

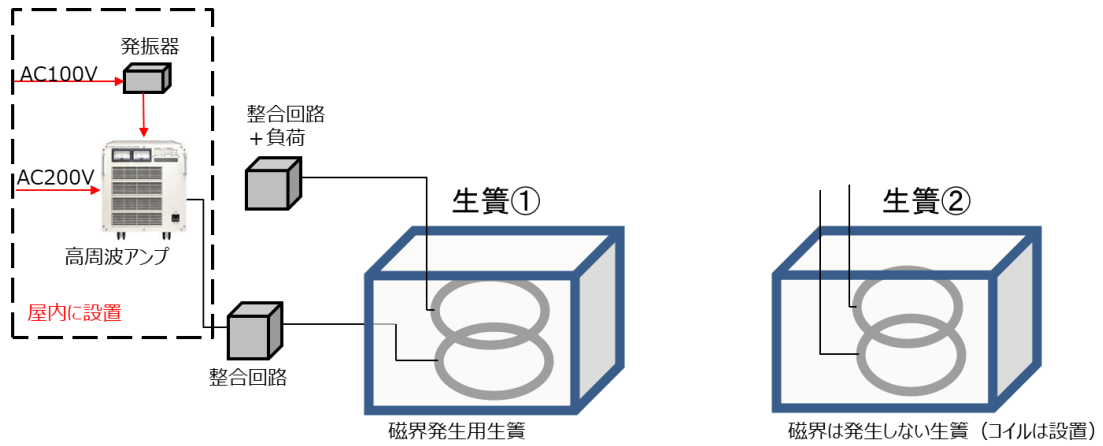


図 3.6-9 環境影響試験用ワイヤレス給電システム実験系 (電力 100 W 印加用)

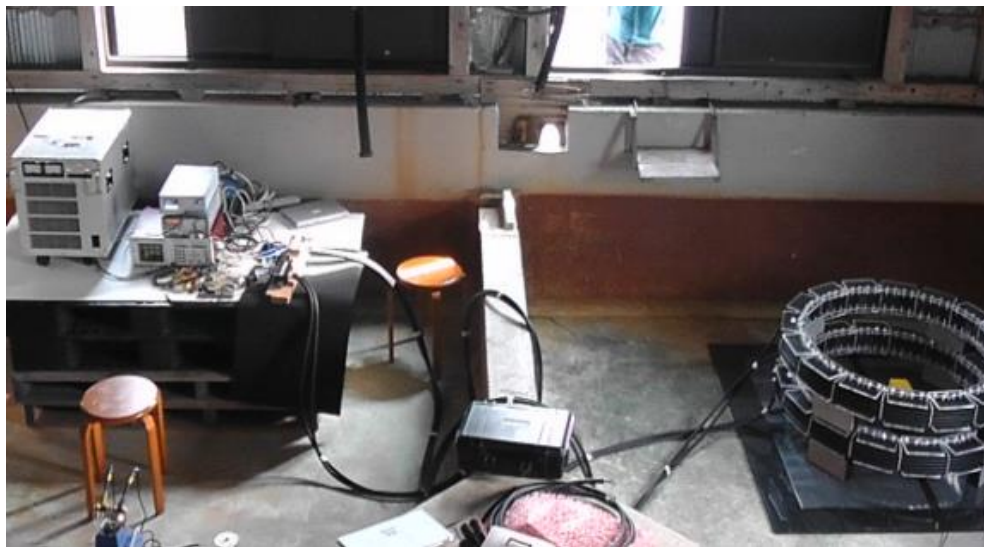


図 3.6-10 100 W 印加用実験系と磁界あり生簀の外観



図 3.6-11 海水中で 100 W 伝送中のパワーアナライザ画面表示

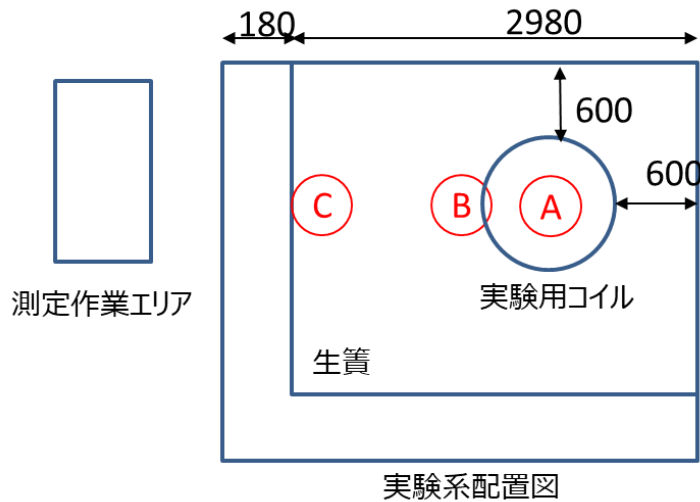


図 3.6-12 磁界測定地点 A～C の位置図（距離単位は mm）

表 3.6-2 陸上生簀の海水コンディション

水温	導電率 (25°C換算)	塩分濃度 (25°C換算)
15.7 °C	5.08 S/m	3.3%

表 3.6-3 磁界強度測定結果と ICNIRP ガイドライン参考レベル (@1 kHz)

測定位置	A	B	C	職業的暴露 レベル	公衆暴露 レベル
値 (μT)	260.4	311.9	5.33	300	80

3.6.1.4. 実験方法

深川水産の陸上生簀に図 3.6-2 のように電磁界発生コイル（直径 1 m×高さ 0.52 m）を設置し、サンプリング領域を内側・外側に設定した（図 3.6-13）。伝送電力を 100 W とし電磁界の有り無し以外は同条件にするため、対照区にも同様のコイルを設置し、通電させなかった。対象魚種（マダイ、シマアジ）を養殖生簀網から実験用陸上生簀に移した後、3 時間馴致し、通電開始からの行動変化を記録するため生簀上部からのビデオ撮影、ストレス指標を測定するため経過時間ごとに血液約 1 mL、背側可食部位約 5 g を採取した。1 度につき実験区・対照区から 5 検体（コイル内側：3 検体、コイル外側：2 検体）ずつサンプリングを行った。

通電時間は 5 時間、サンプリングは 3 回（試験開始 5 分後、2.5 時間後、5 時間後）行い、1 検体ずつタモ網を用いて捕獲した。これらの検体番号を表 3.6-4 に示し、以下に行動観察、血中乳酸濃度、血中コルチゾル濃度、ATP 関連物質について方法を示す。



図 3.6-13 生簀内のサンプリング領域

表 3.6-4 検体番号

実験日	検体番号	電磁界	サンプリング時間	魚種	
2月26日	1~5	有り	5分後	マダイ中間魚 (750g~1000g)	
	6~10	無し			
	11~15	有り	2.5時間後		
	16~20	無し			
	21~25	有り	5時間後		
	26~30	無し			
2月27日	31~35	有り	5分後	マダイ稚魚 (200g~300g)	
	36~40	無し			
	41~45	有り	2.5時間後		
	46~50	無し			
	51~55	有り	5時間後		
	56~60	無し			
	2月28日	61~65	有り	5分後	シマアジ稚魚 (300g~450g)
		66~70	無し		
		71~75	有り	2.5時間後	
		76~80	無し		
		81~85	有り	5時間後	
		86~90	無し		
2月28日	91~95	有り	5分後	シマアジ中間魚 (750g~900g)	
	96~100	無し			
	101~105	有り	2.5時間後		
	106~110	無し			
	111~115	有り	5時間後		
	116~120	無し			

3.6.1.4.1. 行動観察

ビデオカメラ（パナソニック株式会社製、HDC-Z1000）を実験用陸上生簀上部に図 3.6-14 のように設置し、通電時間中（5 時間）録画し続けた。



図 3.6-14 記録用カメラ設置状況

3.6.1.4.2. 血中乳酸濃度の分析

1 検体につき血液約 1 mL を尾柄部からシリンジ（5 mL、注射針 22G）を用いて採取しラクテート・プロ 2（アークレイ社製）を用いて血中乳酸濃度を分析した（図 3.6-15）。

採血時間はハンドリングによる血中成分の上昇を防ぐため、5 分以内とした。5 分以上経過した個体は実験対象外とした。

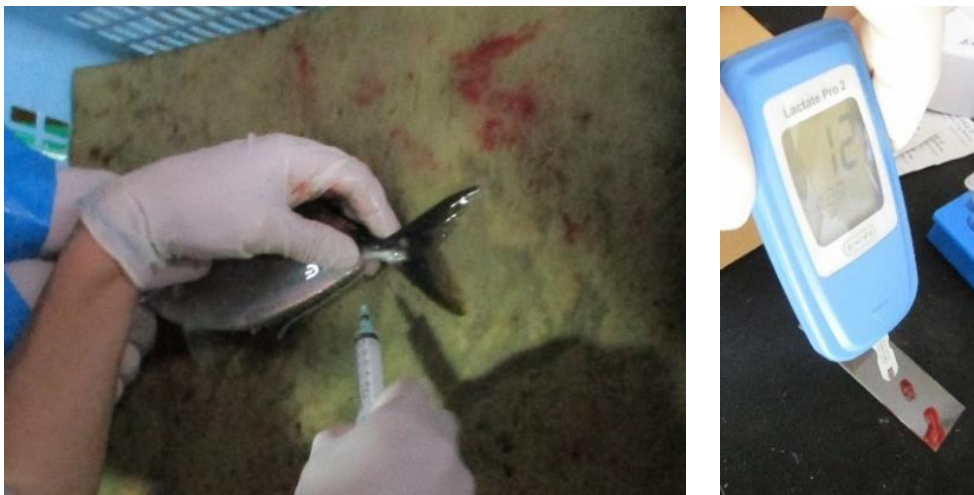


図 3.6-15 尾柄部からの採血および血中乳酸測定

3.6.1.4.3. 血中コルチゾル濃度の分析

3.6.1.4.2 が終了した後、血液を遠心分離（6800 rpm、15 分）して、得られた上澄み（血漿）を凍結（ -20°C ）保存した（図 3.6-16）。これらサンプルを使用し、北海道工業技術センターにて Cortisol Enzyme Immunoassay Kit（Arbor Assay 社製）を用いて血中コルチゾル濃度を分析した。



図 3.6-16 遠心分離した血液サンプルおよび血漿サンプル

3.6.1.4.4. ATP 関連物質の分析

血液を採取した検体を延髄刺殺し、1 検体につき背側可食部位約 5g を、メスを用いて採取、ドライアイスによる凍結を行った（図 3.6-17）。凍結したサンプルを用いて、北海道立工業技術センターにて液体クロマトグラフィーにより凍結サンプル中の ATP 関連物質を分析した。



図 3.6-17 背側可食部位の採取およびドライアイスによる凍結

3.6.1.5. 実験結果と考察

3.6.1.5.1. 行動観察

行動観察の記録の一部を図 3.6-18 と図 3.6-19 に示す。

マダイ稚魚、中間魚およびシマアジ稚魚、中間魚において、通電 3 時間までは全種で電磁界有り無しによる行動変化は確認されなかった。

一方、通電 3～5 時間後の行動観察ではマダイ稚魚、シマアジ稚魚、シマアジ中間魚において行動変化はなかったが、マダイ中間魚の一部検体では行動変化（開口し、背鰭を展開させたまま静止）が確認された（図 3.6-20）。

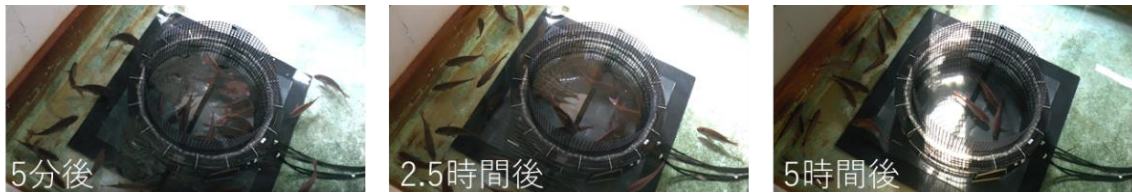


図 3.6-18 電磁界あり (マダイ中間魚)

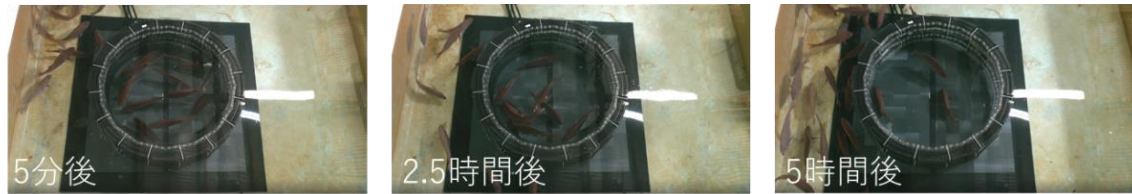


図 3.6-19 電磁界なし (マダイ中間魚)

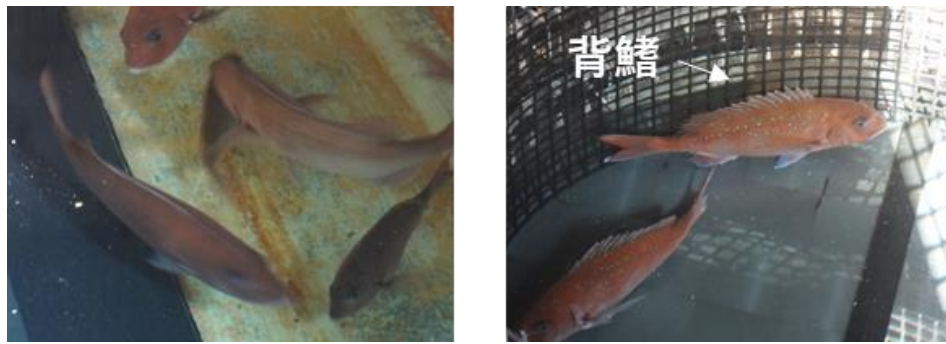


図 3.6-20 行動変化時の様子 (左：正常時 右：行動変化時)

3.6.1.5.2. 血中乳酸濃度の測定

マダイ稚魚、中間魚およびシマアジ稚魚、中間魚の全種で血中乳酸濃度は、一部検体を除いて、 1.0 mmol/L 以下であった。 1.0 mmol/L 以上の特異点は、マダイ中間魚 5 分後に 4.6 、 6.7 、 5.0 mmol/L (図 3.6-21)、マダイ稚魚 5 分後に 1.3 、 2.1 mmol/L (図 3.6-22)、シマアジ稚魚 5 分後および 5 時間後に 1.1 、 2.3 mmol/L (図 3.6-23)、シマアジ中間魚 5 分後および 2.5 時間後、5 時間後に 1.1 、 1.2 、 2.3 mmol/L であった (図 3.6-24)。

水揚げ直後の血中乳酸濃度はシログス *sillago japonika* で約 3.0 mmol/L との報告があり [25]、本結果と比較すると、上述した特異点を除き、全種で血中乳酸濃度は低かった。なお、特異点は通電開始直後に多く、馴致不足もしくは取り上げ手法が影響していると考えられる。

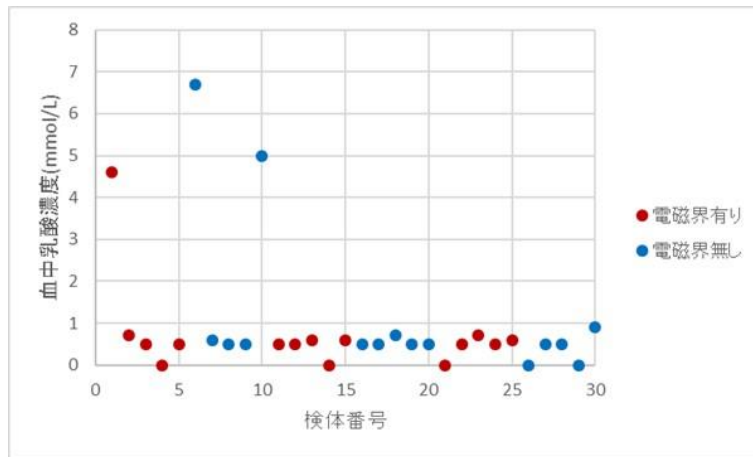


図 3.6-21 マダイ中間魚 (n=30) の血中乳酸濃度

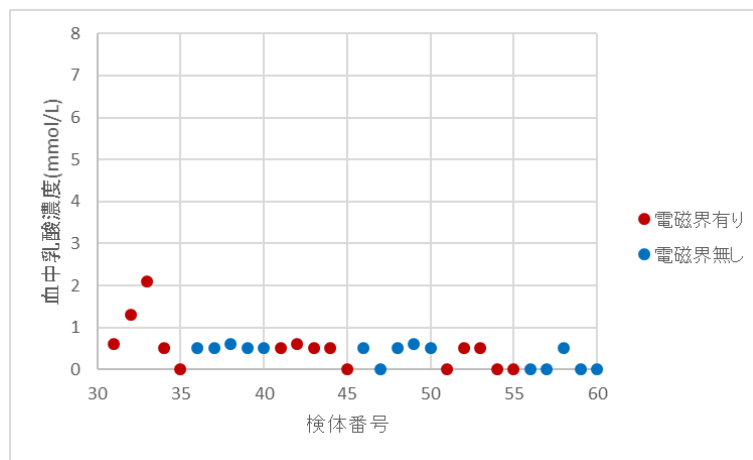


図 3.6-22 マダイ稚魚 (n=30) の血中乳酸濃度

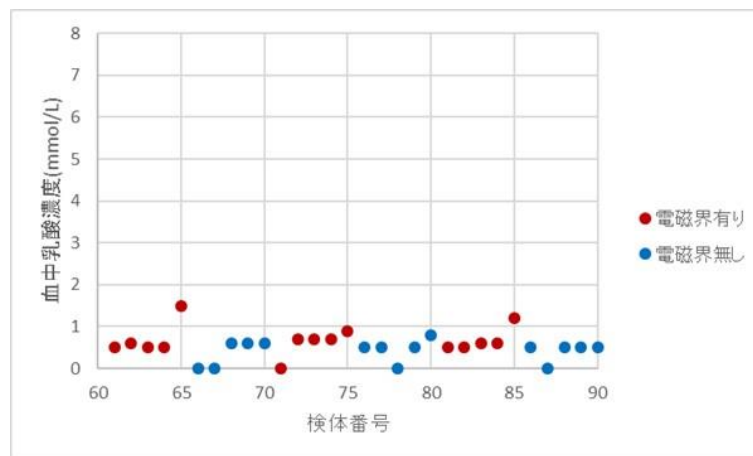


図 3.6-23 シマアジ稚魚 (n=30) の血中乳酸濃度

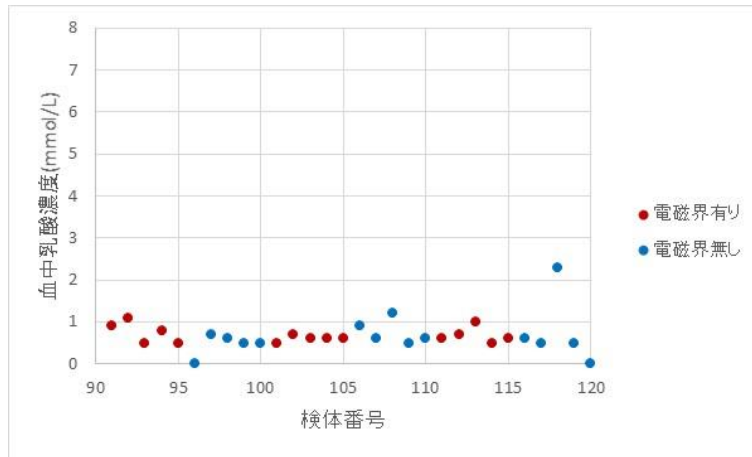


図 3.6-24 シマアジ中間魚 (n=30) の血中乳酸濃度

3.6.1.5.3. 血中コルチゾル濃度の測定

マダイ中間魚の血中コルチゾル濃度は平均 33.6 ± 0.5 ng/mL、稚魚は平均 32.9 ± 1.3 ng/mL、シマアジ中間魚は平均 32.7 ± 1.5 ng/mL、稚魚は平均 32.8 ± 1.1 ng/mL であった (図 3.6-25～図 3.6-28)。

平穏時の血中コルチゾル濃度は、シロギスで 10ng/mL 以下、マダイでは 20ng/mL 以下との報告がある [26][27]。引用報告と本結果を比較するとマダイ、シマアジ共にシロギス、マダイの平穏時以上の血中コルチゾル濃度となった。しかし、実験を通して電磁界の有無およびコイルの内側と外側によるコルチゾル濃度の差は少なく、その影響は少ないと評価できる。

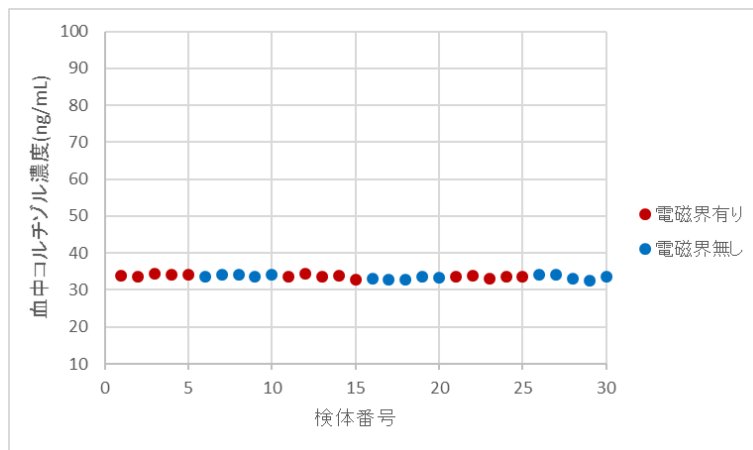


図 3.6-25 マダイ中間魚 (n=30) の血中コルチゾル濃度

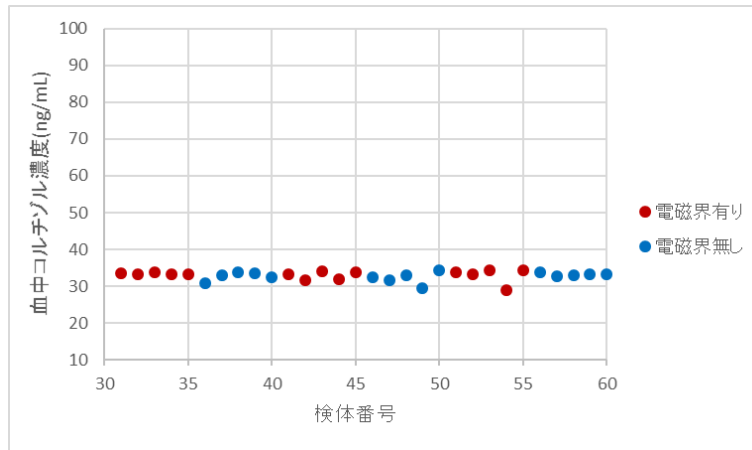


図 3.6-26 マダイ稚魚 (n=30) の血中コルチゾル濃度

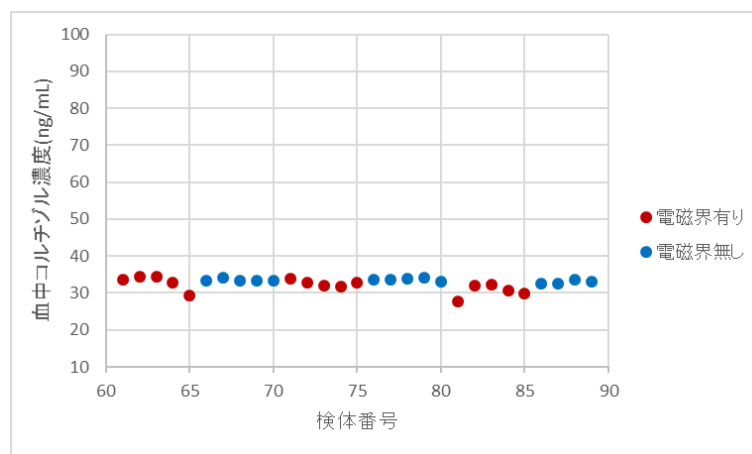


図 3.6-27 シマアジ稚魚 (n=30) の血中コルチゾル濃度

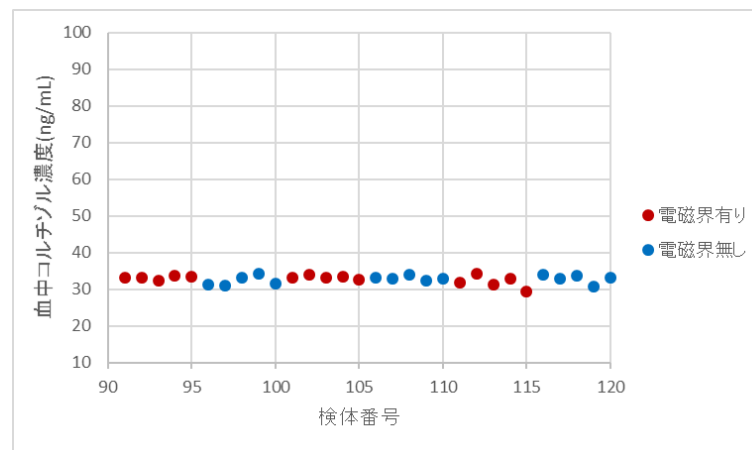


図 3.6-28 シマアジ中間魚 (n=30) の血中コルチゾル濃度

3.6.1.5.4. ATP 関連物質の測定

採取した背側可食部位 5 g に含まれる ATP 関連物質中の ATP 含量の割合は、マダイ稚魚

と中間魚でばらつきがみられ、シマアジ稚魚と中間魚ではその差は少なかった（図 3.6-29～図 3.6-32）。マダイ稚魚と中間魚では、電磁界有の方が ATP 含量の割合が少なくなる（消費する量が多い）ケースが見られる。

一方、鮮度指標である K 値はマダイ中間魚約 0.6%、マダイ稚魚約 0.5%、シマアジは中間魚および稚魚では 0%であった。一般的に生食可能な K 値の上限は 20%、魚水揚げ時の K 値は 10%以下であり、本試験の結果は全般的に極めて低い K 値（極めて鮮度が良い）と評価できる。これらのことから、マダイ稚魚と中間魚の ATP 含量の割合にばらつきがみられた点は、鮮度評価に影響を与えるレベルにないと考えられる。

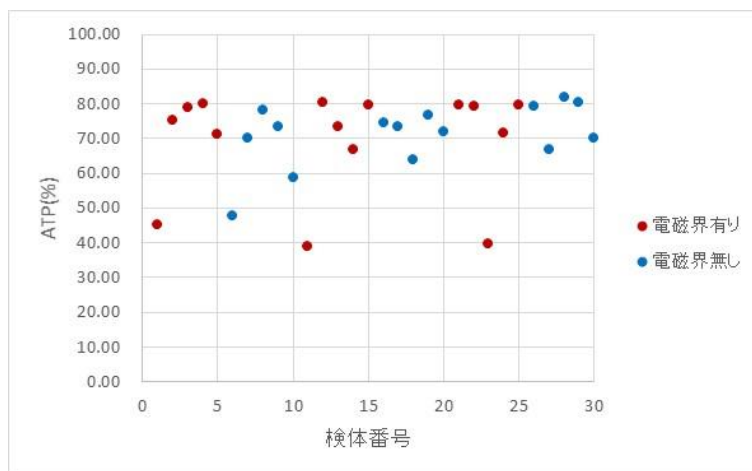


図 3.6-29 マダイ中間魚 (n=30) の ATP の割合

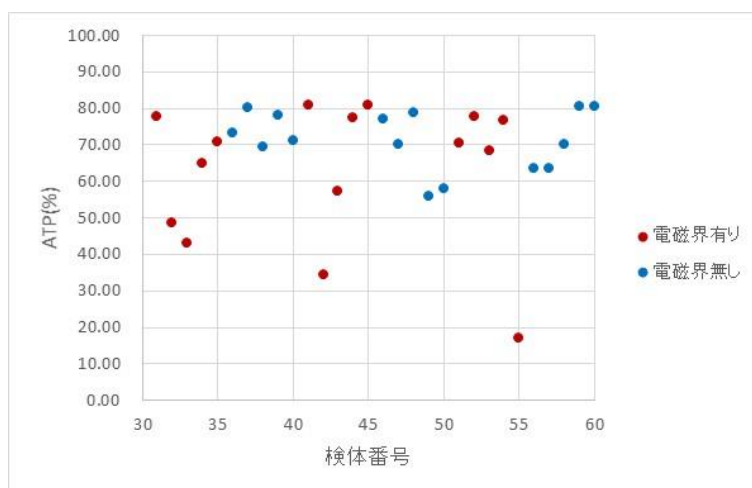


図 3.6-30 マダイ稚魚 (n=30) の ATP の割合

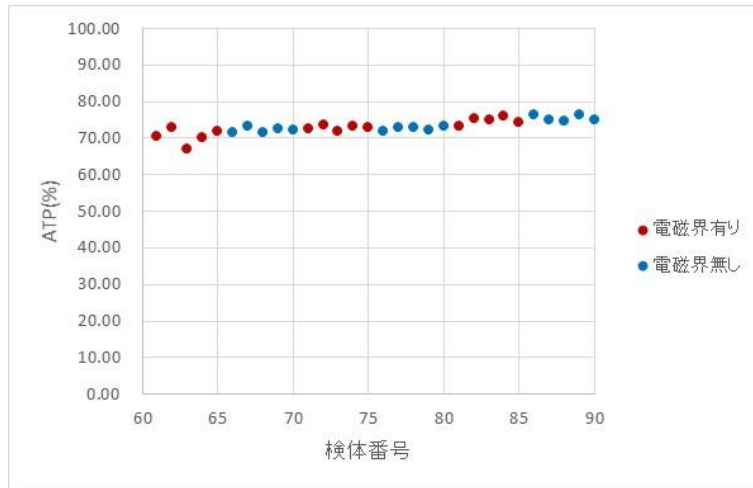


図 3.6-31 シマアジ稚魚 (n=30) の ATP の割合

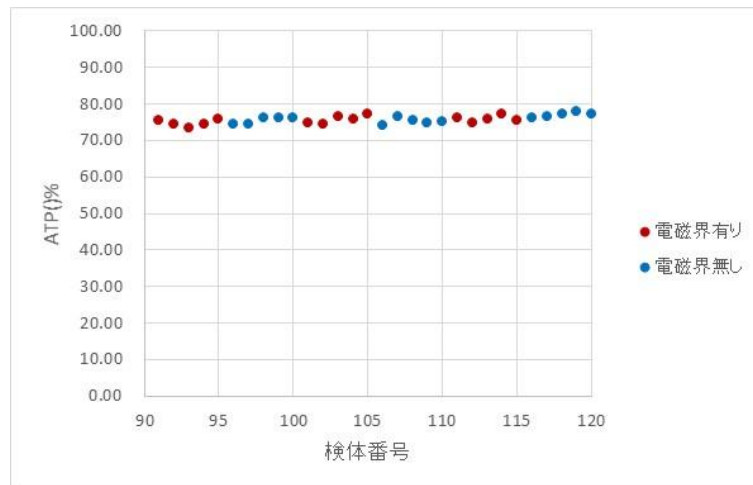


図 3.6-32 シマアジ中間魚 (n=30) の ATP の割合

3.6.1.6. まとめ

電磁界の有無に応じたストレスを評価するために行動観察、血中の乳酸濃度とコルチゾル濃度および可食部位の ATP 関連物質における ATP 含量の割合と K 値を測定した。

行動観察において通電 3 時間までは実験に用いた供試魚に変化は見られなかった。しかし、マダイの中間魚のみ 3~5 時間後に変化が見られた (図 3.6-20)。そのため、通電時間を 24 時間まで延長して、その行動を観察するとともに、24 時間後に後述する血中の乳酸濃度とコルチゾル濃度および可食部位の ATP 関連物質における ATP 含量の割合と K 値を測定した。その結果、行動変化の再現性はなく、血中の乳酸濃度とコルチゾル濃度および可食部位の ATP 関連物質における ATP と K 値の値にも有意な差は見られなかった。そのため、マダイ中間魚に発生した行動変化は電磁界の影響によるものと特定はできず、経過時間による生物学的な現象 (例えば定位または休息に相当する) と推測できる。

血中の乳酸濃度は一部において高い値を示したが、コルチゾル濃度においては全般的に

差が少なかった。乳酸濃度の高い値は実験開始直後や取り上げ手法による差に起因すると考えられる。一方、その起因要素もコルチゾル濃度に差が少なかったことから大きなストレスに至っていないと推測できる。

また、ATP 関連物質における ATP 含量の割合は、マダイ稚魚・中間魚においてばらつき（一部消費割合が高い）が見られ、シマアジ稚魚・中間魚においては変化が見られなかった。魚類の ATP 含量は、対象とした魚類の健康状態にも影響を受けることが知られている。実験終了後、養殖業者からマダイの健康状態はシマアジと比べてばらつきが大きいと指摘されていることから、個体間による健康状態が影響している可能性は高い。しかし、結果でも述べたように鮮度指標である K 値は極めて低いことから、ATP 含量のばらつきが鮮度に及ぼす影響も少ないと考えられる（商品として流通できるレベルとも言える）。

以上のように今回の実験における電磁界がマダイ稚魚・中間魚およびシマアジ稚魚・中間魚に与える影響を行動観察、血中の乳酸濃度とコルチゾル濃度および可食部位の ATP 関連物質における ATP 含量の割合と K 値により評価した結果、一部において行動の変化や測定値にばらつきが見られたものの、行動においては 24 時間通電の結果から、血中の乳酸濃度の特異点はコルチゾル濃度の評価から、ATP 含量の割合がばらついた点は K 値の評価からみて、総合的に影響は少ないと評価できる。

今後、電磁界が魚類に及ぼす影響を詳細に確認するためには、電磁界の大きさや魚種を変えた実験が有効となると考えられる。なお、実験に用いる対象魚については健康状態を考慮することも求められる。

3.6.2. 1 kW 電力印加実験（暖水系魚類）

3.6.2.1. 実験の概要

3.6.1 で実施した印加電力 100 W から 1 kW に増やして影響を調査した。暖水系魚類として 3.6.1 と同じくマダイ *Pagrus major* とシマアジ *Pseudocaranx dentex* を対象魚種とし、陸上において海水水槽（生簀）2 つを準備して、それぞれの水槽（生簀）内にコイル（直径 1.0m × 高さ 0.52m）を設置するとともに対象魚種を投入して、片方のコイルにのみ 1 kW の電力を 1 kHz の周波数で一定時間通電したときの、対象魚種の行動、ストレス指標および肉質に及ぼす変化を通電の有無に対して比較した（比較実験）。ストレス指標は、血中乳酸濃度、血中コルチゾル濃度および背側可食部の ATP（アデノシン三リン酸）含量とした。また、肉質に及ぼす変化は、背側普通筋の弾力（圧縮強度）とその普通筋を食した際の官能で評価した。

【実験期間】2019 年 10 月 24 日～11 月 1 日（環境構築、実験、撤収）

3.6.2.2. 実験場所

3.6.1 と同じく天草市牛深の深川水産株式会社所有の陸上生簀（図 3.6-1）を実験場所に選定した。同じ場所にするすることで、条件の違いを電力差だけにできる。

3.6.2.3. 実験用ワイヤレス給電システム

電力伝送に用いるコイルは 3.6.1 と同じものを用い、印加電力の増大に合わせて改めてコイル特性の測定および磁界強度のシミュレーションと実測を実施した。

3.6.2.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要

図 3.6-33 に実験系を示す。ファンクションジェネレーター（FG）で正弦波をつくり、アンプで増幅する。入出力インピーダンスのマッチングのため、コイルの間に整合回路をつなげ、受電コイルの後段に整流器、電子負荷を設置した。

ファンクションジェネレーターはエヌエフ回路設計ブロック（NF）製の WF1973 を、アンプは NF 製の 4520A、電子負荷は菊水製の PLZ1004WH・2004WHB を用いた。また、電力・電圧・電流の測定には N4L 製の PPA5530 を、整流器には整流器試作 No.2（詳細は 3.4.1.3.4 を参照）を用いた。図 3.6-34、図 3.6-35 に実際の試験環境の写真に掲載する。

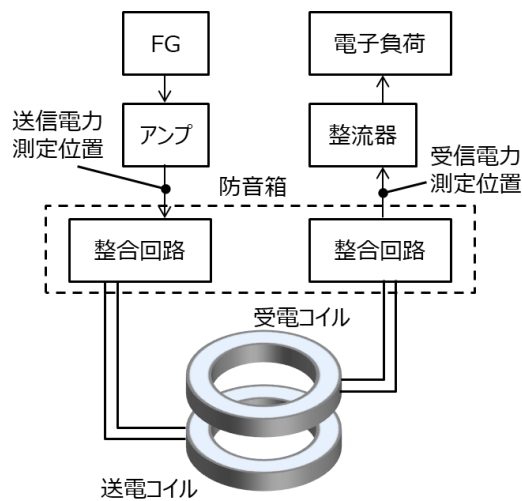


図 3.6-33 1 kW 印加用実験系

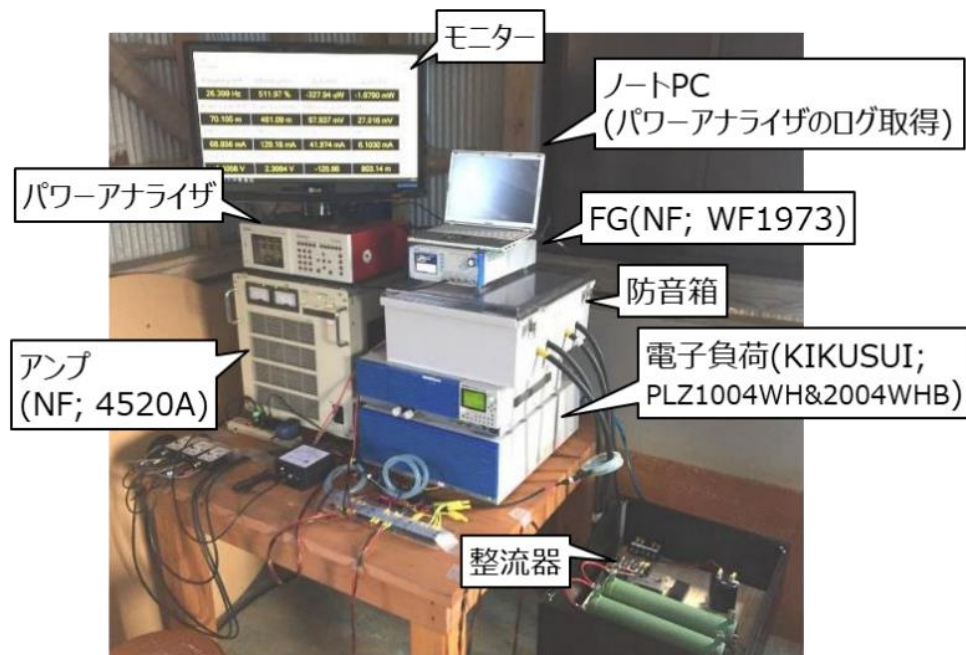


図 3.6-34 試験時の機器配置 (1 kW 印加用)



図 3.6-35 実験系全景

図 3.6-36 は生簀と送受電コイルの位置関係 (上面図) である。生簀の大きさは 2.98 m × 2.98 m で、生簀の中央に送受電コイルを配置した。送電コイル下部には黒色のゴム板を敷いている。

図 3.6-37 は生簀とコイルの位置関係 (側面図) を示す。直径 1 m の送電コイルと受電コイルはコイル間距離 100 mm 離して設置した。地面およびコイルと距離を離すためにコンクリートブロックを用いた。生簀には水深 500 mm になるまで海水を入れた。実際に生簀にコイルを配置した様子が図 3.6-38 である。

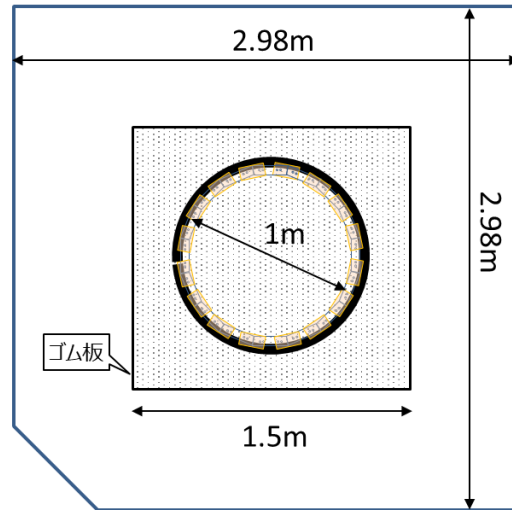


図 3.6-36 生簀と送受電コイルの位置（上面図）

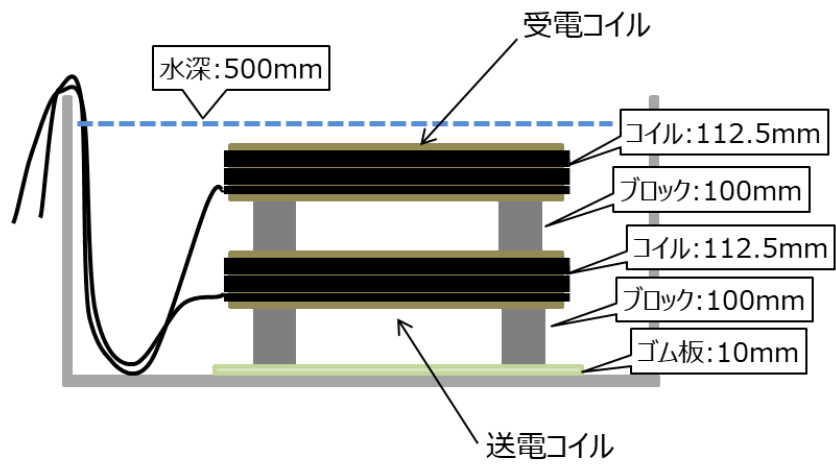


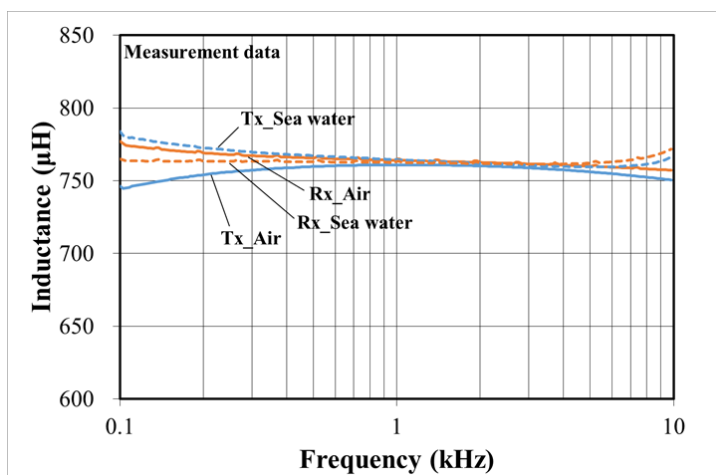
図 3.6-37 生簀と送受電コイルの位置（側面図）



図 3.6-38 送受電コイルを配置した様子（海水注入前）

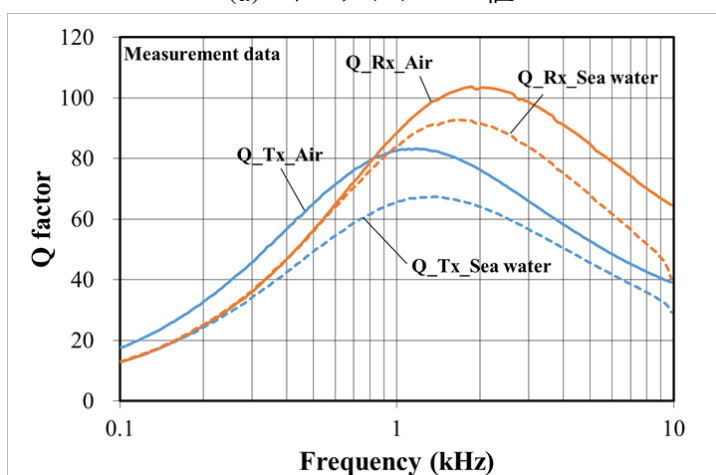
3.6.2.3.2. コイル特性の測定と伝送電力の確認

設置後の送受電コイル特性の測定にはキーサイト・テクノロジー製のベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA) E5061B を使用した。その結果を図 3.6-39 に示す。



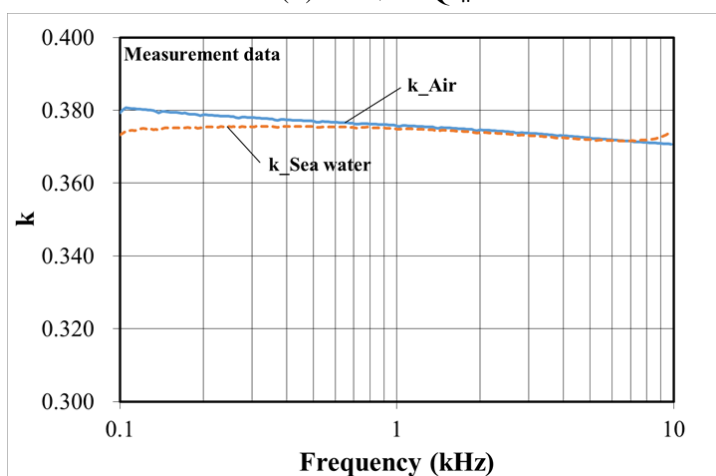
Tx : 送電側
Rx : 受電側

(a) インダクタンス値



Tx : 送電側
Rx : 受電側

(b) コイル Q 値



(c) 結合係数 (k)

図 3.6-39 送受電コイル特性

図 3.6-39 (a) は送電コイル、受電コイルのインダクタンス値である。送電コイルと受電コイルは同じ構造で、直径 1 m のアクリル製ボビンに導体断面積 38 mm² の 6600 V 耐圧一般電線 EM-LMFC (古河電線) を 20 回巻いて作製しており、3.6.1 で使用したものと同一である。それぞれ空気中と海水中で測定した。インダクタンス値に空気中と海水中で大きな差はない。

図 3.6-39 (b) は送電コイルと受電コイルの Q 値である。送電コイルが下側の構造物に近いいため受電コイルよりも Q 値が低下している。コイルが海水中にある場合は、空気中にある場合と比べて Q 値が低下し、Q 値が最大となる周波数もやや低い側にシフトしていることがわかる。

図 3.6-39 (c) は送電コイル、受電コイルの結合係数である。結合係数は VNA を用いて S パラメータを測定し Z パラメータに変換して計算することによって求め、約 0.375 であることが確認できた。結合係数は、この周波数では空気中と海水中でほとんど同じ値であった。なお、このときの海水コンディションは表 3.6-5 に示すとおりである。

この結果をもとに設定した整合回路定数を表 3.6-6 に示す (回路記号は図 3.6-4 参照)。

実際に 1 kW の電力を印可してパワーアナライザで測定した結果を図 3.6-40 に示す。送電電力 1 kW、コイル間効率 90.6% で電力伝送できていることが確認できた。

表 3.6-5 陸上生簀の海水コンディション

水温	導電率 (25°C換算)	塩分濃度 (25°C換算)
23.6 °C	4.71 S/m	3.05%

表 3.6-6 コイル特性と整合回路定数 (1 kW 印加用)

@1 kHz	
L_Tx (μH)	764.5
Q_Tx	65.8
L_Rx (μH)	763.4
Q_Rx	83.8
k	0.375
Cs_Tx (μF)	30
Cp_Tx (μF)	25
Cs_Rx (μF)	30
Cp_Rx (μF)	25

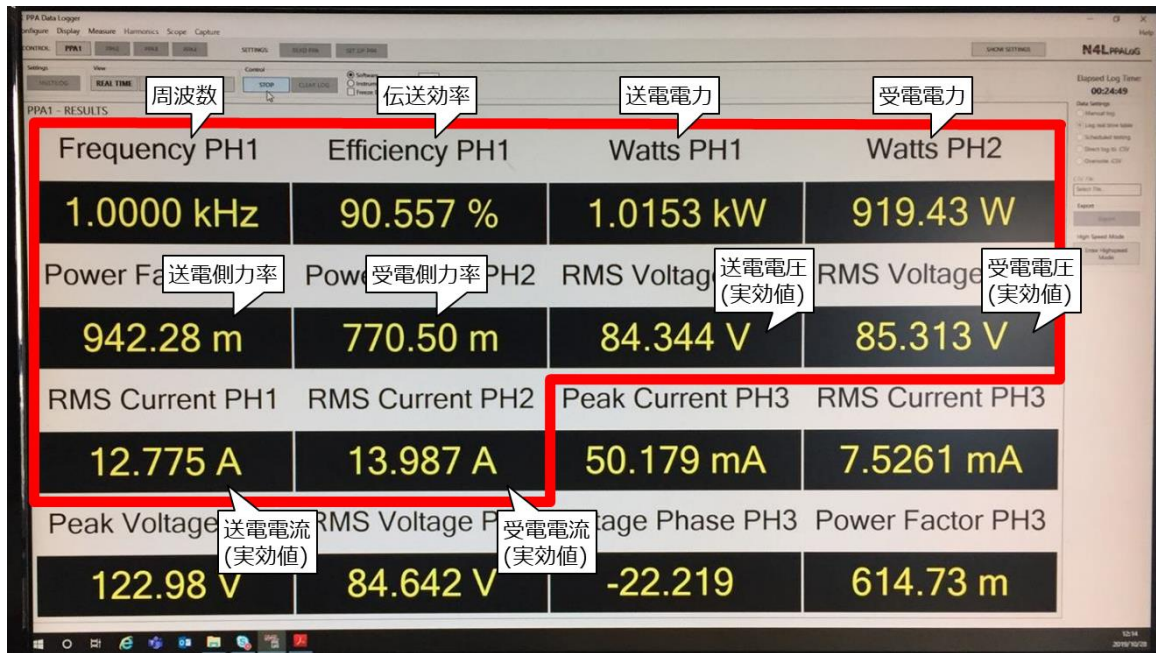


図 3.6-40 1 kW 送電時のパワーアナライザ測定画面表示

3.6.2.3.3. 磁界強度のシミュレーション

海水内の磁界強度測定は測定器を防水構造に改造する必要があり容易ではない。そのため、電磁界シミュレーションを行って海水内の磁界強度を計算する。電磁界シミュレーションには ANSYS Maxwell を使用した。

図 3.6-41 は送電コイル、受電コイルの実験環境をモデリングしたものである。計算時は Z 軸の周りを回転し、電磁界の計算を行う。送電コイルおよび受電コイルは、半径 500 mm で 5 段、4 層の 20 巻である。コイルの線材は実際に用いた 6600 V 耐圧の EM-LMFC の導体断面積 38 mm² の仕様に合わせてモデリングしている。送受電コイルは海水中にあり、コイル間距離は 100 mm とし、海水の周囲には空気を設けた。海水は比誘電率 78、比透磁率 1、導電率 5.0 S/m の電気特性を使用した。

シミュレーションした磁界強度分布を図 3.6-42 に示す。図 3.6-43 は x 軸上の磁束密度である。海水あり、なしでプロットしているが、ほぼ重なっていることから海水の有無で差がないことがわかる。周波数が低く、近傍解であり、海水による減衰がほとんどない領域であるためだと考えられる。従って、磁界強度の実測は海水がない状態で実施しても問題ないと判断できる。

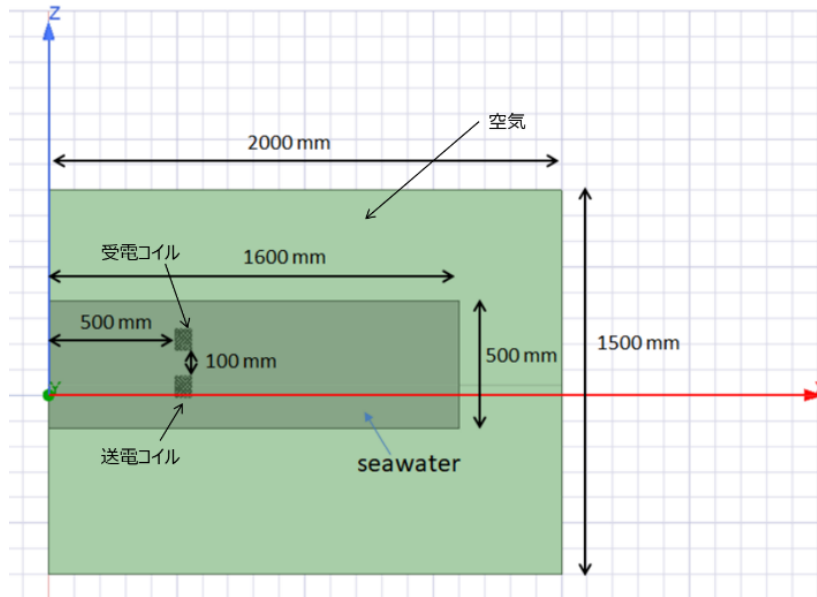


図 3.6-41 1 kW 印加実験のコイルモデル

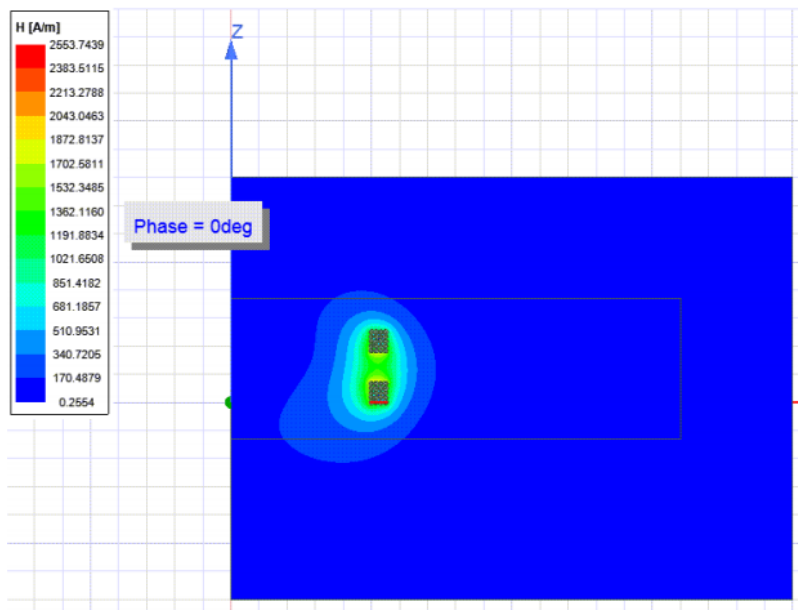


図 3.6-42 1 kW 印加実験の磁界強度分布

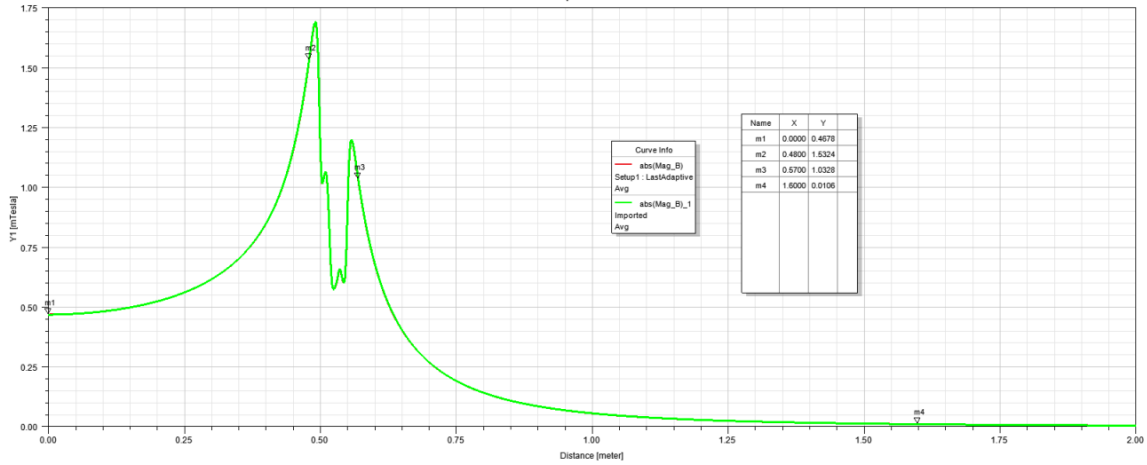
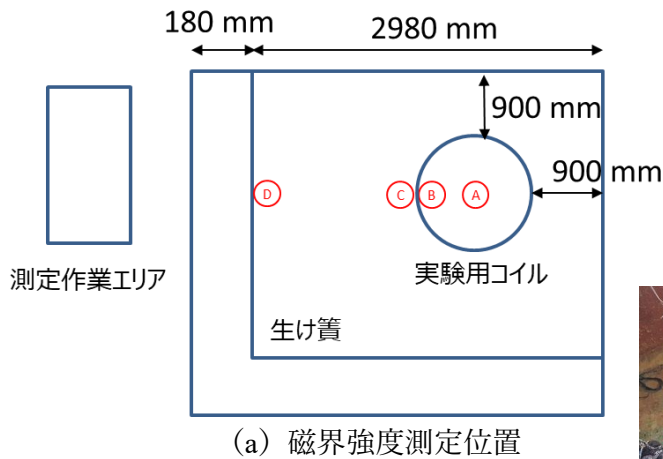


図 3.6-43 x 軸上の磁束密度

3.6.2.3.4. 磁界強度の測定

コイルに通電した状態で磁束密度測定器（HIOKI 製 FT3470）を用い、コイル中央（A 地点）、コイル端（B 地点および C 地点）と作業エリア境界（D 地点）の磁束密度を測定した（図 3.6-44）。試験周波数は 1 kHz、投入電力は 1 kW とした。

表 3.6-7 に測定結果とシミュレーション結果および 1 kHz における ICNIRP ガイドライン参考レベルを示す。コイル端では職業的暴露指針の 300 μ T を超えるため、通電時は生簀への立ち入りを禁止し、魚の採取作業時は投入電力を 1 W 以下（公衆暴露以下）に下げて実施することとした。また、実測値とシミュレーション値は近いことから、シミュレーションによる磁界強度推定が有効であることも確認できた。



(b) A 地点測定時の様子

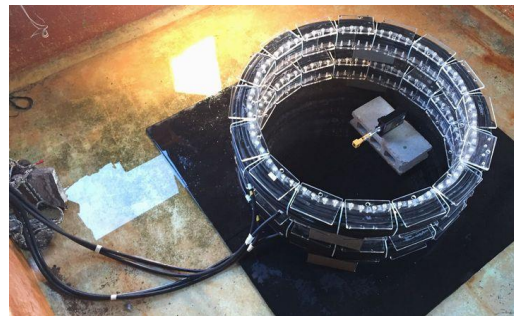


図 3.6-44 磁界強度測定位置

表 3.6-7 磁界強度測定結果と ICNIRP ガイドライン参考レベル

測定位置	実測値 (海水なし)	シミュレーション (海水なし)	シミュレーション (毎水あり)
A	508	470	470
B	1374	1530	1530
C	1364	1030	1030
D	19.6	11	11
職業的暴露レベル	300		
公衆暴露レベル	80		

単位：μT

3.6.2.4. 実験方法

暖水系魚類に対する比較実験では、陸上生簀（長さ 2.9 m×幅 2.8 m×水深 0.7 m）を 2 つ用意して、それぞれにコイルを設置して、対象魚種として養殖マダイ（図 3.6-45 (a)）の稚魚と中間魚、養殖シマアジ（図 3.6-45 (b)）の稚魚と中間魚を用いた。対象魚種として選定した養殖マダイと養殖シマアジは、平成 30 年度における生産量がそれぞれ 60,736 トンと 4,763 トンであり、我が国で養殖される魚類の内、養殖生産量の第 2 位と第 5 位を占める主要な養殖魚である [28]。なお、比較実験は、対象魚種の生簀に対する馴致を考慮して、投入 12 時間後に実施した。



(a) マダイ

学名：*Pagrus major*

英名：Red seabream



(b) シマアジ

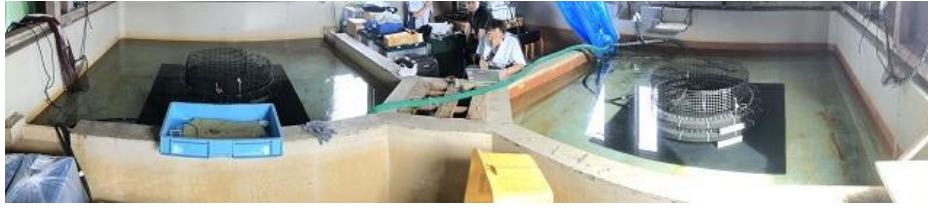
学名：*Pseudocaranx dentex*

英名：White trevally

図 3.6-45 暖水系魚類の比較実験で用いた対象魚種

コイルへ通電する生簀を「通電あり区」、コイルへ通電しない生簀を「通電なし区」とした（図 3.6-46）。通電あり区のコイルへの通電時間は 1 日 5 時間（300 分）として、表 3.6-8 に示す対象魚種の組成および環境条件において、その魚種の行動観察、各計測および各分析に用いるサンプルを採取した。

また行動観察として、2 つの生簀における対象魚種の行動をビデオカメラ（パナソニック株式会社製、HDC-Z1000）を設置して、通電時間（300 分）中、全て撮影し記録した（図 3.6-47）。



通電なし区

通電あり区

図 3.6-46 暖水系魚類の比較実験における通電なし区と通電あり区

表 3.6-8 暖水系魚類の比較実験における対象魚種の組成と環境条件

実験日	魚種	通電	サンプリング	気温	水温	D0	塩分濃度
令和元年10月28日	マダイ稚魚 体重:200~300g 尾叉長:200~230mm	あり	5分後	22.3℃	24.0℃	6.3mg/L	3.0%
		なし	150分後				
		あり	300分後				
令和元年10月29日	マダイ中間魚 体重:800~1100g 尾叉長:330~360mm	あり	5分後	23.2℃	23.6℃	5.7mg/L	3.0%
		なし	150分後				
		あり	300分後				
令和元年10月30日	シマアジ中間魚 体重:700~1000g 尾叉長:330~360mm	あり	5分後	20.6℃	23.5℃	5.5mg/L	3.0%
		なし	150分後				
		あり	300分後				
令和元年10月31日	シマアジ稚魚 体重:200~300g 尾叉長:220~240mm	あり	5分後	19.6℃	23.1℃	5.3mg/L	2.9%
		なし	150分後				
		あり	300分後				



図 3.6-47 行動観察に用いたビデオカメラの設置位置

3.6.2.4.1. サンプルング方法

通電開始 5 分後、150 分後、300 分後に、対象魚種のストレス指標の計測と分析に用いるサンプル作成および官能試験に用いるサンプルを作成するために、2 つの生簀からそれぞれ 5 検体、タモ網を用いて 1 検体ずつサンプルングした。なお、サンプルングはコイルの内側から 3 検体、外側から 2 検体とした。図 3.6-48 にコイル内側、外側の区分を示す。



図 3.6-48 サンプルング採取の領域の区分

3.6.2.4.2. 血中乳酸濃度

検体の血中乳酸濃度は、シリンジ (2.5 mL、注射針 22G) を用いて各検体の尾柄部から血液約 1 mL を採取した後、ラクテート・プロ 2 (アークレイ社製、LT - 1730) を用いて計測した (図 248)。なお、作業による計測誤差を避けるため、サンプルングから血液の採取完了までに 3 分以上要した検体については実験対象から除外した。



(a) 尾柄部からの血液採取



(b) 血中乳酸濃度の計測

図 3.6-49 対象魚種からの血液採取と血中乳酸濃度の計測

3.6.2.4.3. 血中コルチゾル濃度、ATP 含量

血中コルチゾル濃度の分析用サンプルは、上述した血液において 13,500 rpm、15 分間の遠心分離 (図 3.6-50) を行い、上澄み (血漿) を -20°C の保冷庫で凍結して作成した。

背側可食部中 ATP 含量の分析用サンプルは、延髄刺殺 (延髄部分を包丁などで刺し、脳

脊髄を断つこと)した検体から背側可食部を約5g採取した後、ドライアイスを用いて凍結し(図 3.6-51)、 -20°C の保冷庫で保蔵した。

血中コルチゾル濃度と背側可食部の ATP 含量の分析用サンプルは、公益財団法人・函館地域産業振興財団・北海道立工業技術センターへ冷凍搬送した後、血中コルチゾル濃度は DetectX Cortisol EIA Kit (Arbor Assay 社製、K003-H1) を用いた ELISA 法(酵素結合免疫吸着法/競合法)で、ATP 含量は HPLC (高速液体クロマトグラフ) でそれぞれ分析した。



図 3.6-50 遠心分離した血液と血漿



(a) 背側可食部の採取



(b) 背側可食部サンプルの凍結

図 3.6-51 対象魚種からの筋肉採取

3.6.2.4.4. 背側普通筋の弾力

背側普通筋の弾力は、検体から厚さ約1cmのサンプルを採取して、皮および中骨は取り除いた後、デジタルフォースゲージ(株式会社イマダ製、DSV-50N、平型アタッチメント)を用いて圧縮強度として計測した(図 3.6-52) [29] [30]。圧縮強度は、サンプルに初期圧力(装置において約3mmの押し込み)を加えた後、3mm押し込んだときの強度として計測した。なお、圧縮強度の計測に用いた検体はマダイ、シマアジともに、厚さ1cmのサンプルを作成できる中間魚に限定した。



図 3.6-52 背側普通筋の弾力（圧縮強度）計測

3.6.2.4.5. 官能評価（官能試験）

普通筋を食した際の官能評価（以下、官能試験と呼ぶ）は、通電あり区と通電なし区のコイル内側の3検体を用いて、表 3.6-9 に示した評価項目 [31] [32]についてテスター7名で行った。7名の年齢内訳は、20歳代が2名、40歳代が3名、50歳代が2名で、性別は7名とも男性である。なお、官能試験に用いた検体は弾力の計測と同様、可食サンプルが作成できるマダイ、シマアジの中間魚に限定した。

表 3.6-9 官能試験に用いた評価表

						気づき点
味の濃さ	薄い	普通			濃い	
	1	2	3	4	5	
食感	柔らかい	普通			硬い	
	1	2	3	4	5	
脂ののり	悪い	普通			良い	
	1	2	3	4	5	
色	淡い	普通			濃い	
	1	2	3	4	5	
臭み	臭くない	普通			臭い	
	1	2	3	4	5	
その他気づき点						

3.6.2.5. 実験結果

3.6.2.5.1. 通電が対象魚種の行動に及ぼす影響

通電開始から 300 分後まで撮影した結果、マダイの稚魚と中間魚およびシマアジの稚魚と中間魚の行動に変化はなかった（図 3.6-53～図 3.6-56）。また、通電時間中に目視でも行動を観察していたが、変化は見られなかった。



図 3.6-53 マダイ稚魚の行動観察（上から通電 5 分後、150 分後、300 分後）

通電あり区

通電なし区

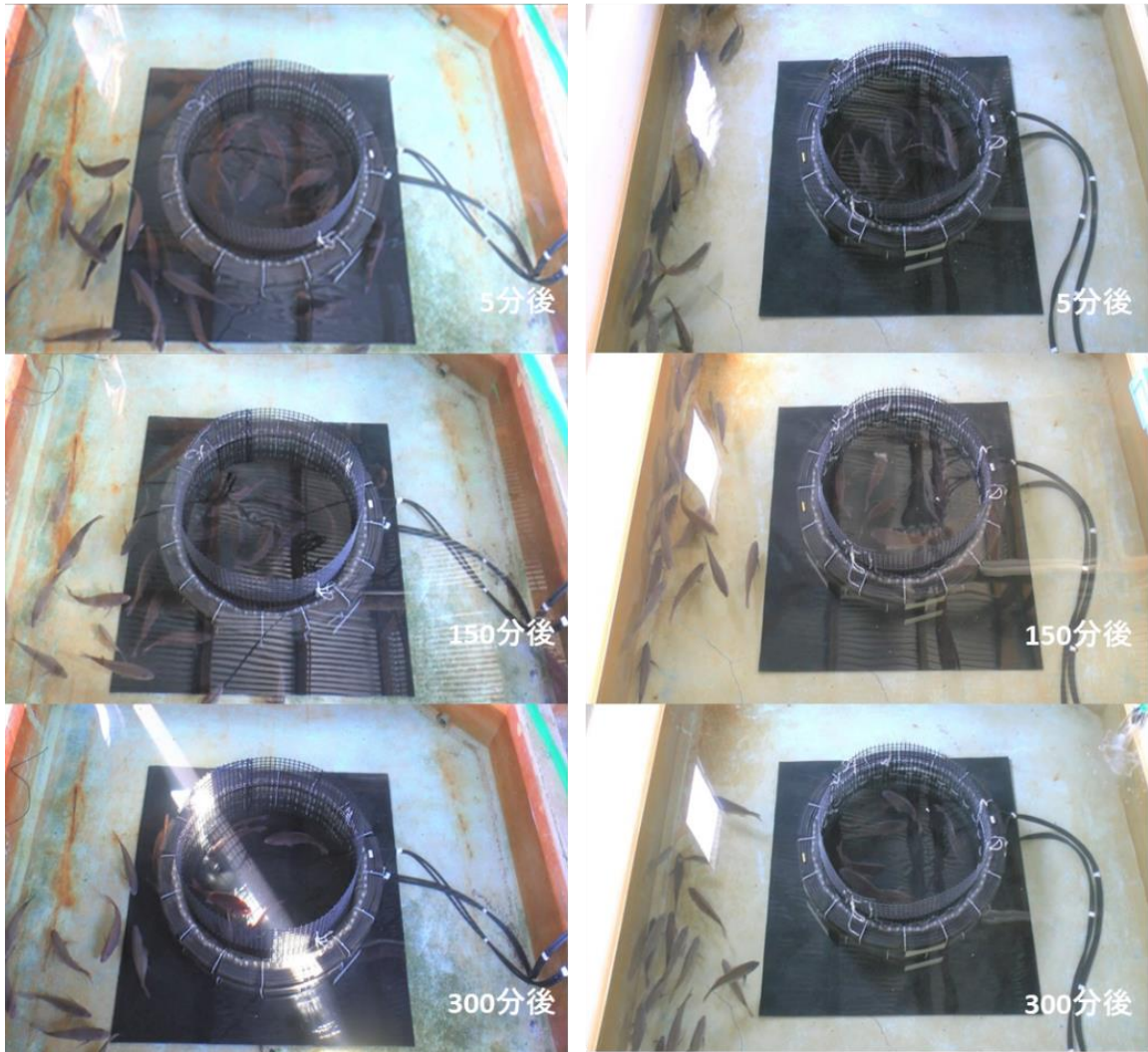


図 3.6-54 マダイ中間魚の行動観察（上から通電 5 分後、150 分後、300 分後）



図 3.6-55 シマアジ稚魚の行動観察（上から通電 5 分後、150 分後、300 分後）

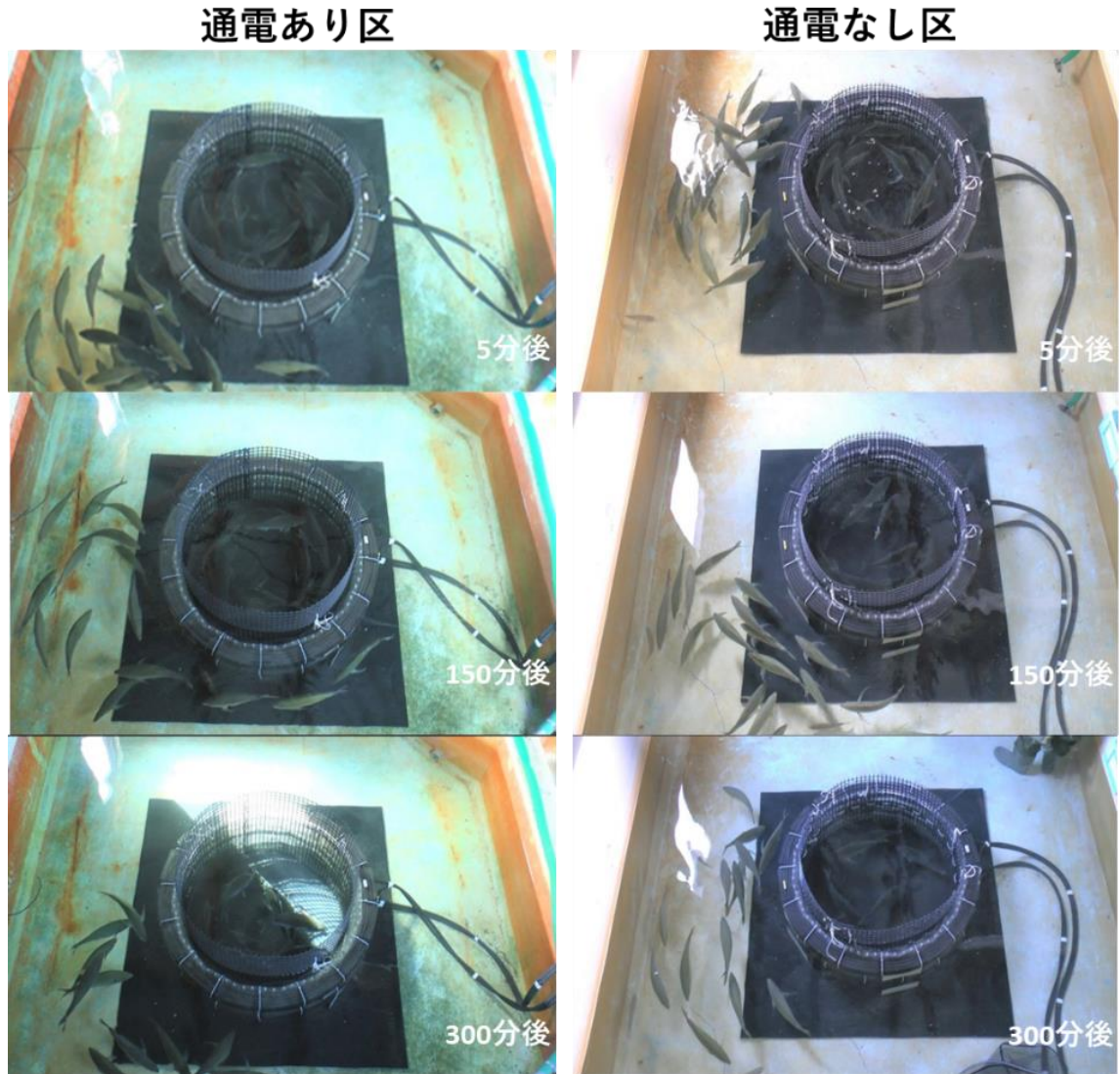


図 3.6-56 シマアジ中間魚の行動観察（上から通電 5 分後、150 分後、300 分後）

3.6.2.5.2. 血中乳酸濃度

A 養殖マダイ

魚類の血中乳酸濃度は、一般的に外部からの刺激や環境変化などによって、行動が大きくまたは激しければ値は高くなる。

計測したマダイ稚魚の血中乳酸濃度に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られず、通電あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった(図 3.6-57 (a))。マダイ稚魚の血中乳酸濃度の平均値は、通電 5 分後のあり区で 1.34 mmol/L、なし区で 1.10 mmol/L、150 分後のあり区で 1.06 mmol/L、なし区で 1.04 mmol/L、300 分後のあり区で 0.92 mmol/L、なし区で 0.86 mmol/L であり、通電ありの方が僅かに高

い値となった。

計測したマダイ中間魚の血中乳酸濃度に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られず、通電あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-57 (b))。計測したマダイ中間魚の血中乳酸濃度の平均値は通電 5 分後のあり区で 0.90 mmol/L、なし区で 0.76 mmol/L、150 分後のあり区で 0.50 mmol/L、なし区で 0.32 mmol/L、300 分後のあり区で 0.76 mmol/L、なし区で 0.54 mmol/L であり、通電ありの方が僅かに高い値となった。

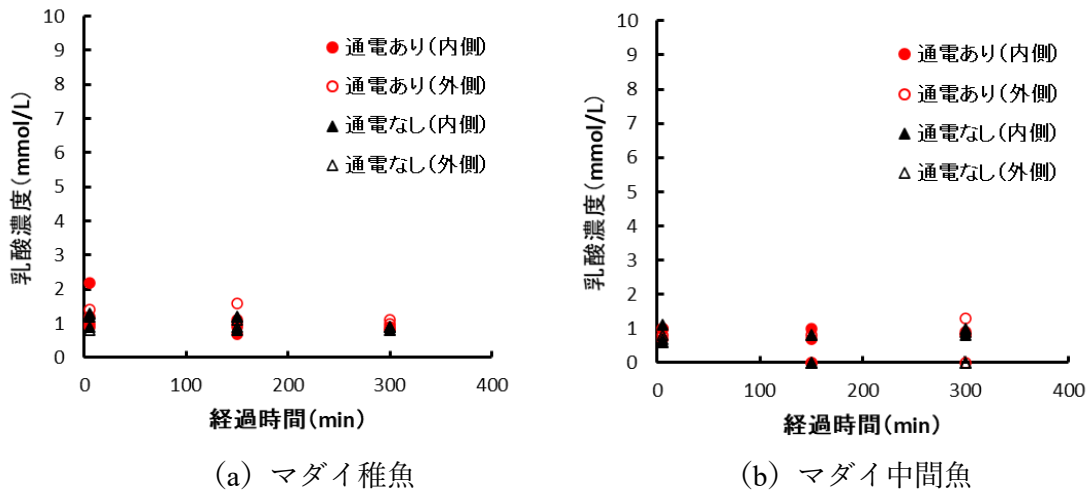


図 3.6-57 マダイの稚魚と中間魚の通電時間に対する血中乳酸濃度

B 養殖シマアジ

計測したシマアジ稚魚の血中乳酸濃度は通電時間が短いほどばらつきが大きいですが、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られず、通電あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-58 (a))。シマアジ稚魚の血中乳酸濃度の平均値は通電 5 分後のあり区で 3.80 mmol/L、なし区で 2.98 mmol/L、150 分後のあり区で 3.12 mmol/L、なし区で 2.78 mmol/L、300 分後のあり区で 0.76 mmol/L、なし区で 0.54 mmol/L であり、通電ありの方が僅かに高い値となった。

計測したシマアジ中間魚の血中乳酸濃度は通電時間が長いほどばらつきが大きいですが、稚魚と同様に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られず、通電あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-58 (b))。シマアジ中間魚の血中乳酸濃度の平均値は通電 5 分後のあり区で 0.94 mmol/L、なし区で 1.04 mmol/L、150 分後のあり区で 2.16 mmol/L、なし区で 1.76 mmol/L、300 分後のあり区で 2.12 mmol/L、なし区で 2.10 mmol/L であり、通電ありの方が僅かに高い値となった。

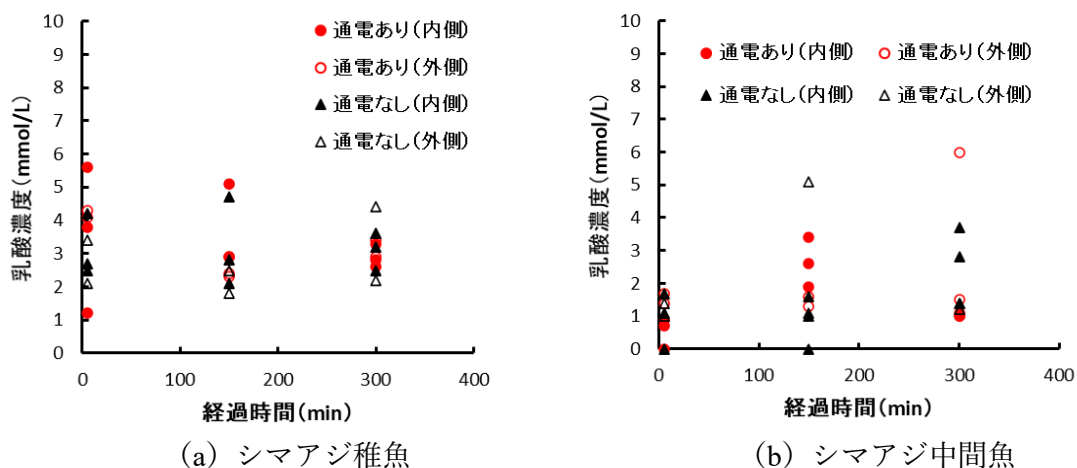


図 3.6-58 シマアジの稚魚と中間魚の通电時間に対する血中乳酸濃度

3.6.2.5.3. 血中コルチゾル濃度の分析

A 養殖マダイ

魚類の血中コルチゾル濃度は、血中乳酸濃度と同様に一般的に外部からの刺激や環境変化などによって、行動が大きくまたは激しくければ値は高くなる。

分析したマダイ稚魚の血中コルチゾル濃度は、通电開始 5 分後と 300 分後に通电なしの検体が高い値を示したが、血中乳酸濃度と同様に通电有無と通电時間による異なる傾向は見られず、通电あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-59 (a))。マダイ稚魚の血中コルチゾル濃度の平均値は通电 5 分後のあり区で 48.2 ng/mL、なし区で 100.4 ng/mL、150 分後のあり区で 41.3 ng/mL、なし区で 46.1 ng/mL、300 分後のあり区で 22.7 ng/mL、なし区で 55.5 ng/mL であり、通电時間に関係なく、通电なしの方が大きかった。

分析したマダイ中間魚の血中コルチゾル濃度は、通电開始後 150 分後に通电なしの検体が高い値を示したが、稚魚と同様に通电有無と通电時間による異なる傾向は見られず、通电あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-59 (b))。マダイ中間魚の血中コルチゾル濃度の平均値は通电 5 分後のあり区で 45.4 ng/mL、なし区で 62.7 ng/mL、150 分後のあり区で 35.1 ng/mL、なし区で 89.1 ng/mL、300 分後のあり区で 56.3 ng/mL、なし区で 72.6 ng/mL であり、通电時間に関係なく、通电なしの方が大きかった。

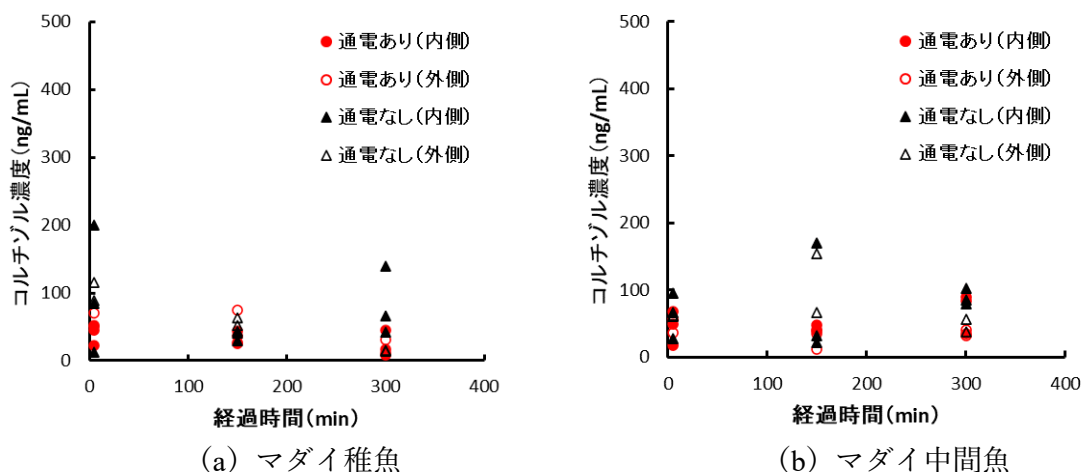


図 3.6-59 マダイの稚魚と中間魚の通電時間に対する血中コルチゾル濃度

B 養殖シマアジ

分析したシマアジ稚魚の血中コルチゾル濃度は、通電開始 300 分後に通電有無でばらつきが見られるが、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られず、通電あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-60 (a))。シマアジ稚魚の血中コルチゾル濃度の平均値は通電 5 分後のあり区で 48.8 ng/mL、なし区で 25.1 ng/mL、150 分後のあり区で 16.5 ng/mL、なし区で 7.6 ng/mL、300 分後のあり区で 75.2 ng/mL、なし区で 70.0 ng/mL であり、通電有無や通電時間に関係しない傾向を示した。

分析したシマアジ中間魚の血中コルチゾル濃度は、通電開始 5 分後、150 分後、300 分後で通電有無にばらつきが見られるが、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られず、通電あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-60 (b))。シマアジ中間魚の血中コルチゾル濃度の平均値は通電 5 分後のあり区で 108.6 ng/mL、なし区で 127.4 ng/mL、150 分後のあり区で 75.2 ng/mL、なし区で 42.8 ng/mL、300 分後のあり区で 49.0 ng/mL、なし区で 73.0 ng/mL であり、通電有無や通電時間に関係しない傾向を示した。

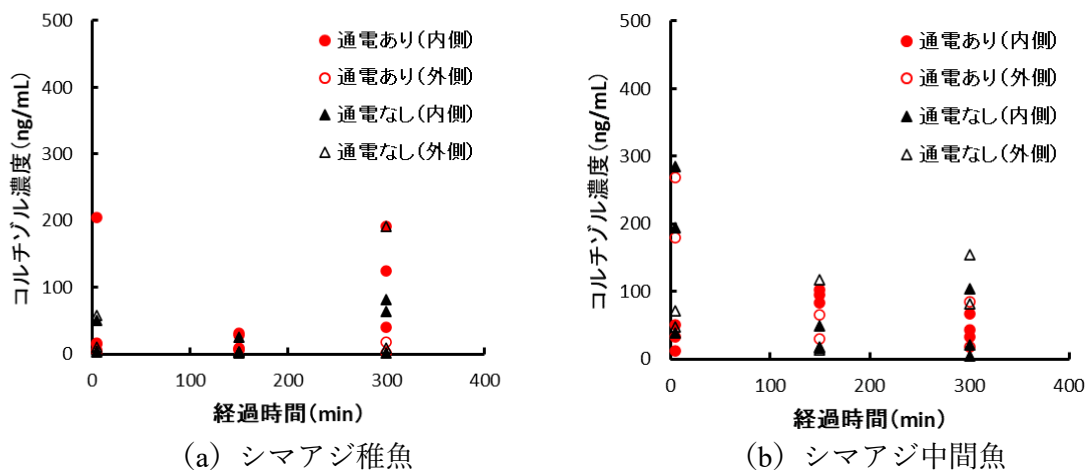


図 3.6-60 シマアジの稚魚と中間魚の通電時間に対する血中コルチゾル濃度

3.6.2.5.4. 背側可食部の ATP 含量の分析

A 養殖マダイ

背側可食部の ATP 含量は、一般的に外部からの刺激や環境変化などによって、行動が大きくまたは激しければ値は小さくなる [33]。

分析したマダイ稚魚の ATP 含量は、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られず、通電あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-61 (a))。マダイ稚魚の ATP 含量の平均値は通電 5 分後のあり区で $7.78 \mu\text{mol/g}$ 、なし区で $7.30 \mu\text{mol/g}$ 、150 分後のあり区で $9.03 \mu\text{mol/g}$ 、なし区で $8.40 \mu\text{mol/g}$ 、300 分後のあり区で $7.63 \mu\text{mol/g}$ 、なし区で $8.55 \mu\text{mol/g}$ であり、通電有無や通電時間に起因する傾向は示さなかった。

マダイ中間魚の ATP 含量は、通電なしの検体に低い値が見られるが、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られず、通電あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-61 (b))。マダイ中間魚の ATP 含量の平均値は、通電 5 分後のあり区で $8.23 \mu\text{mol/g}$ 、なし区で $7.03 \mu\text{mol/g}$ 、150 分後のあり区で $8.97 \mu\text{mol/g}$ 、なし区で $7.94 \mu\text{mol/g}$ 、300 分後のあり区で $8.07 \mu\text{mol/g}$ 、なし区で $8.05 \mu\text{mol/g}$ であり、通電なしの方が低い値を示した。

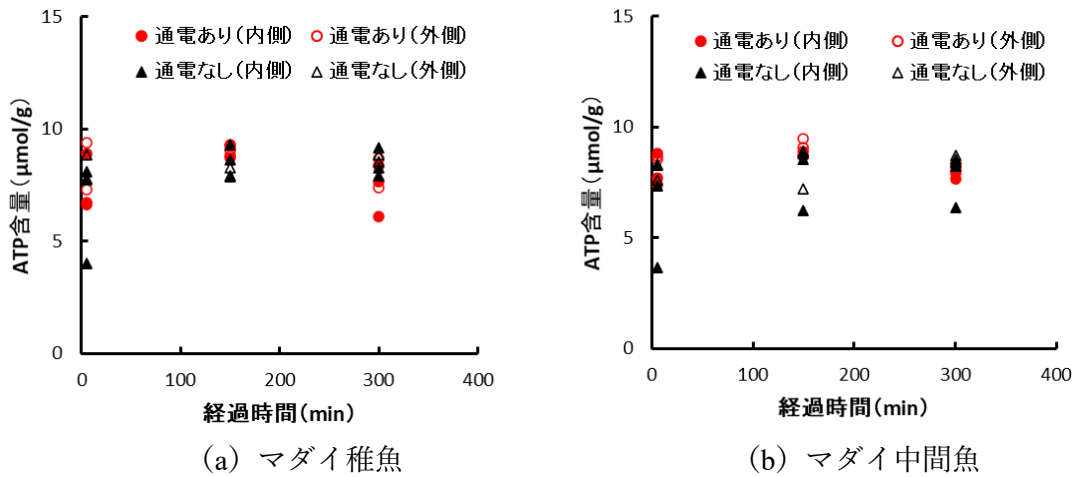


図 3.6-61 マダイの稚魚と中間魚の通电時間に対する背側可食部の ATP 含量

B 養殖シマアジ

分析したシマアジ稚魚の ATP 含量は、通电開始 5 分後に通电なしの検体に低い値が見られるが、通电有無と通电時間による異なる傾向は見られず、通电あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-62 (a))。シマアジ稚魚の ATP 含量の平均値は通电 5 分後のあり区で 6.96 μmol/g、なし区で 6.89 μmol/g、150 分後のあり区で 7.57 μmol/g、なし区で 7.67 μmol/g、300 分後のあり区で 8.05 μmol/g、なし区で 6.08 μmol/g であり、通电有無や通电時間に起因する傾向は示さなかった。

分析したシマアジ中間魚の ATP 含量は、通电開始 5 分後と 300 分後に通电ありの個体に低い値が見られるが、通电有無と通电時間による異なる傾向は見られず、通电あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった (図 3.6-62 (b))。シマアジ中間魚の ATP 含量の平均値は、通电 5 分後のあり区で 5.91 μmol/g、なし区で 7.28 μmol/g、150 分後のあり区で 6.66 μmol/g、なし区で 6.93 μmol/g、300 分後のあり区で 6.34 μmol/g、なし区で 6.99 μmol/g であり、通电ありの方が低い値を示した。

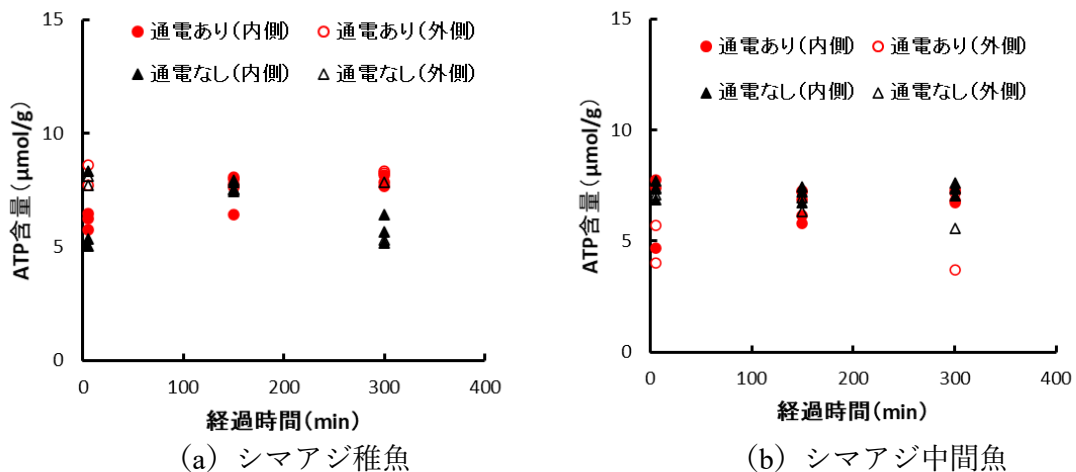


図 3.6-62 シマアジの稚魚と中間魚の通電時間に対する背側可食部の ATP 含量

3.6.2.5.5. 背側普通筋の弾力（圧縮強度）

背側普通筋の弾力は、それを可食したときの歯応えを示す。弾力は圧縮強度で評価され、ストレスが多い場合には小さく（柔らかく）、非ストレスにおいては大きく（堅く）なることが知られている [34]。

計測したマダイ中間魚の圧縮強度は、通電時間が 300 分後のコイル内側が大きい結果を示した。一方、それを除く条件においては通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった（図 3.6-63 (a)）。マダイ中間魚の圧縮強度の平均値は通電 5 分後のあり区で 498.8 g、なし区で 540.6 g、150 分後のあり区で 465.3 g、なし区で 486.4 g、300 分後のあり区で 497.0 g、なし区で 418.4 g であった。

計測したシマアジ中間魚の圧縮強度は、通電時間に関係なくばらつきが見られるが、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られず、通電あり区のコイル内側と外側でそれぞれサンプリングした検体に異なる傾向も見られなかった（図 3.6-63 (b)）。シマアジ中間魚の圧縮強度の平均値は、通電 5 分後のあり区で 728.7 g、なし区で 995.0 g、150 分後のあり区で 914.3 g、なし区で 813.4 g、300 分後のあり区で 936.1 g、なし区で 937.4 g であった。平均値は、通電有無や通電時間に起因する傾向は示さなかった。

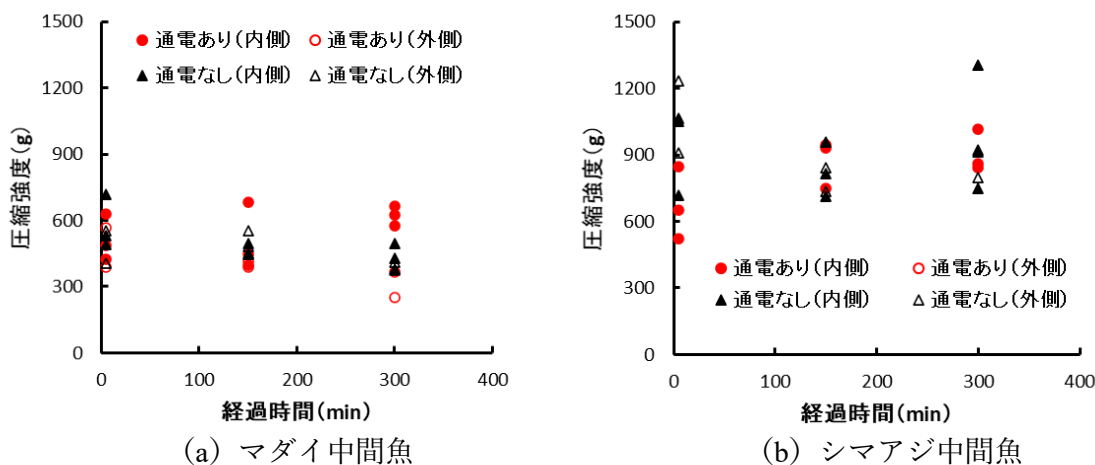


図 3.6-63 マダイ中間魚とシマアジ中間魚の通電時間に対する背側普通筋の圧縮強度

3.6.2.5.6. 官能試験

マダイ中間魚とシマアジ中間魚の筋肉を 7 名のテスターで味の濃さ、食感、脂ののり、色、臭みに関する官能試験を 5 段階評価で行った結果、すべての評価項目において通電有無と通電時間に異なる傾向は見られなかった（図 3.6-64、図 3.6-65）。5 段階の評価は 1～5 で、中間評価は 3 となる。

マダイ中間魚の各評価課題における通電有無に対する平均値は、味の濃さは有りが2.9～3.3、無しが3.1～3.2、食感は有りが3.3～3.7、無しが2.8～3.6、脂ののりは有りが2.9～3.2、無しが2.9～3.2、色の有りが2.8～2.9、無しが2.7～2.9、臭みの有りが1.8～2.2、無しが1.8～2.4であった。食感以外の評価課題と比べて高い値を示した。

シマアジ中間魚の各評価課題における通電有無に対する平均値は、味の濃さは有りが2.8～3.1、無しが2.8～3.2、食感は有りが3.2～3.7、無しが3.2～3.4、脂ののりは有りが2.9～3.1、無しが2.8～3.0、色の有りが2.9～3.2、無しが2.7～3.2、臭みの有りが2.1～2.4、無しが2.3～2.4であった。食感はマダイ中間魚と同様に、他の評価課題と比べて高い値を示した。

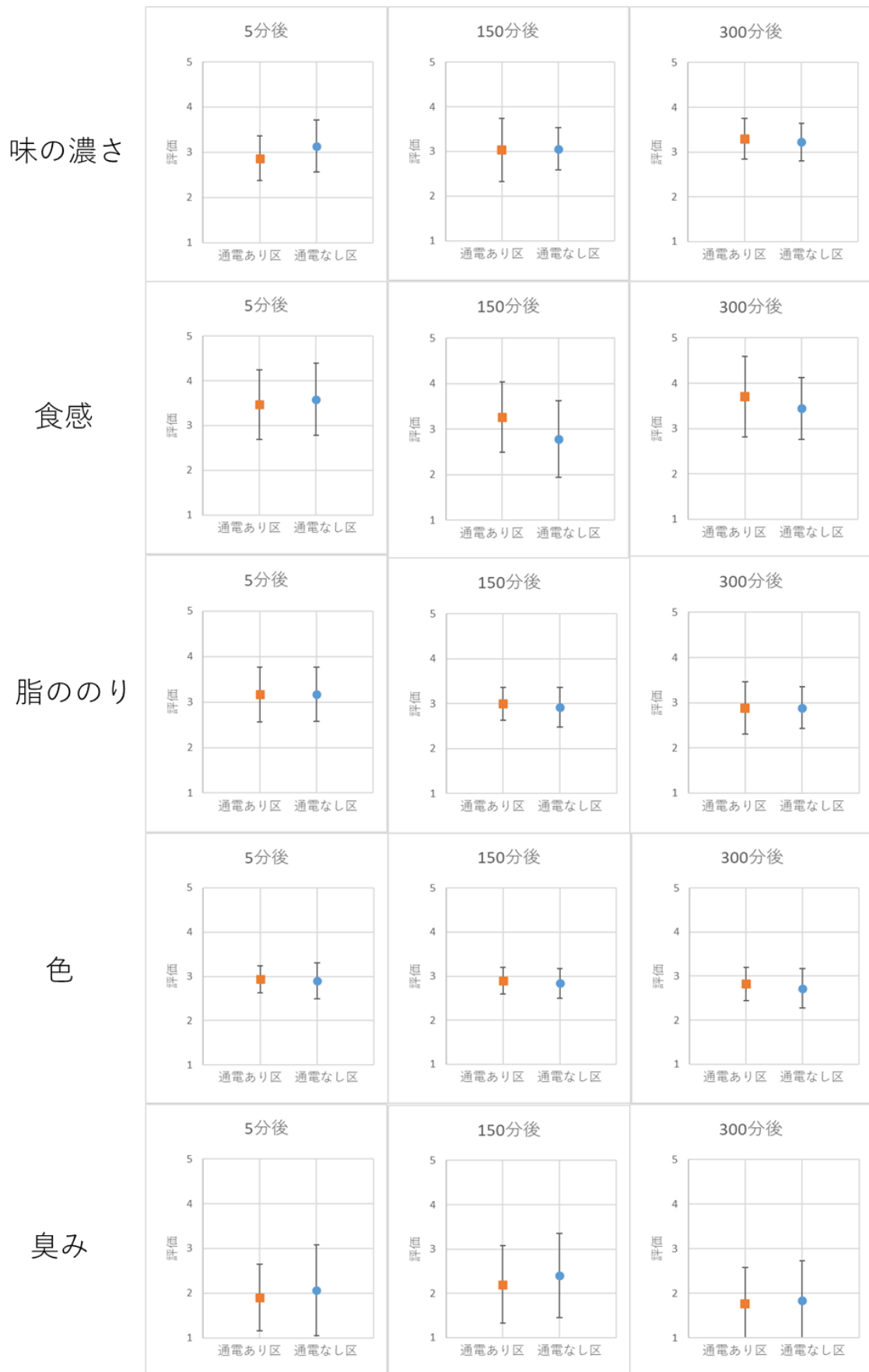


図 3.6-64 養殖マダイ中間魚の通電時間に対する官能評価

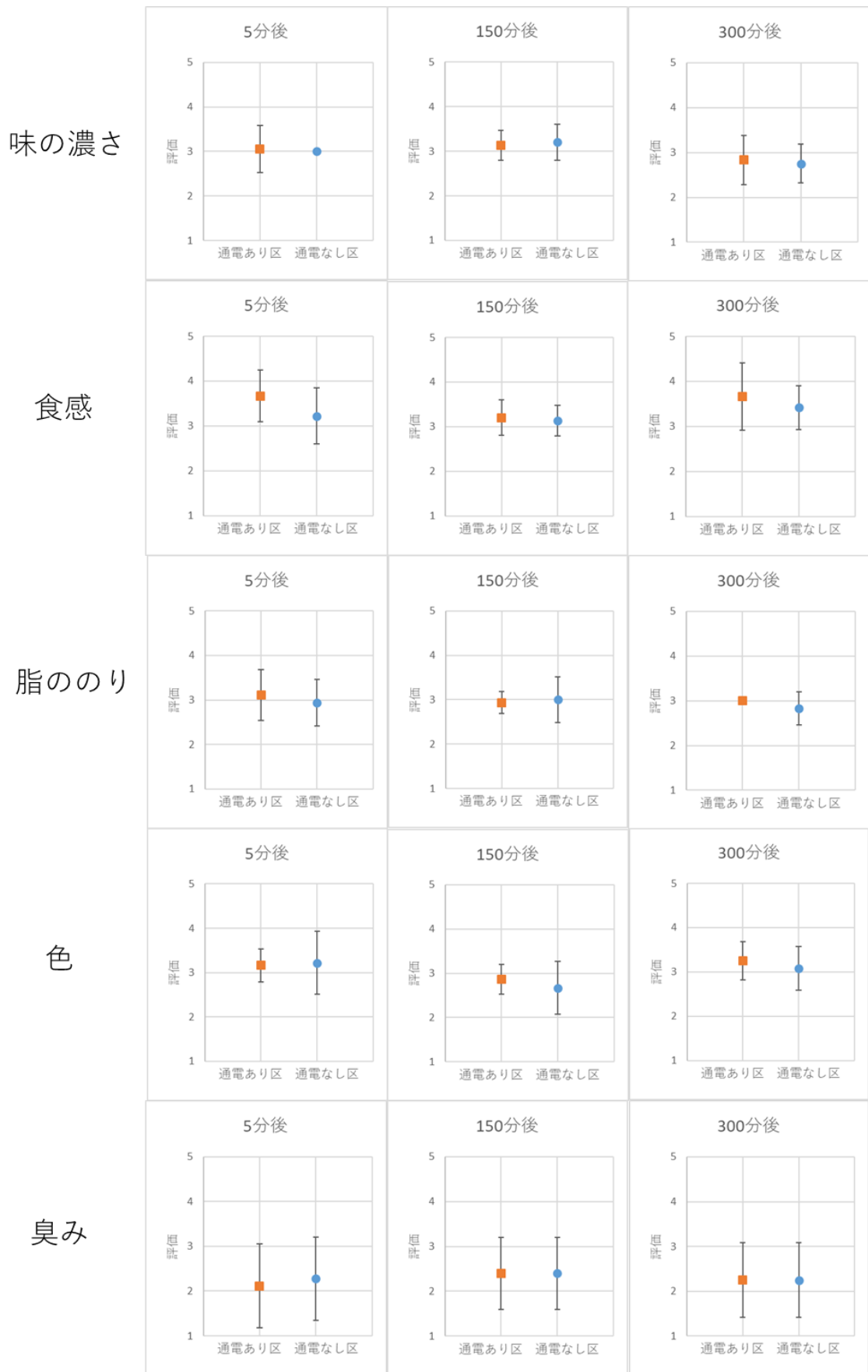


図 3.6-65 養殖シマアジ中間魚の通電時間に対する官能評価

3.6.2.6. 考察

海中ワイヤレス給電を行う際、通電したコイル周辺に発生することが予想される電磁界が魚類に与える影響について調査するために、暖水性魚種に対する比較実験を行った。比較実験では、陸上において海水生簀 2 つを準備して、それぞれの生簀内にコイルを設置するとともに対象魚種を投入して、片方のコイルにのみ通電したときの、対象魚種の行動、ストレス指標および肉質に及ぼす変化を通電の有無に対して比較した。結果、本実験で用いた暖水系魚類が通電有無と通電時間によって受ける影響は、全ての評価項目において小さかった。

ビデオカメラを用いた行動観察において、通電開始から 300 分後までに変化が見られた対象魚種は確認できなかった。一般に魚類の行動変化が発生した場合、その行動によるエネルギー消費は ATP 含量の減少につながる。本実験で評価した対象魚種の ATP 含量は、通電有無および通電時間に対して変化は少なかった。これらの結果を含めて評価しても通電が行動へ及ぼす影響は極めて少ないと考えられる。

ストレス指標として計測した血中乳酸濃度と分析した血中コルチゾル濃度は、通電有無と通電時間に対して大きな影響がなかったことを結果で述べた。全対象魚種の血中乳酸濃度は、通電あり区と通電なし区におけるそれぞれの検体に有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。

血中乳酸濃度の計測結果と血中コルチゾル濃度の分析結果を比較すると、血中コルチゾル濃度の方のばらつきが大きかった。この原因は血液を遠心分離して得た血漿サンプルの作製と保管方法にあると考えられる。サンプル作製が実験現場（屋外）で行われ、保管温度は -20°C の保冷庫で凍結した後、一般の搬送会社の冷却便（ヤマト運輸のクール宅急便）に委託した。ばらつきを抑制するためには、サンプルの作製は本実験が漁業・養殖現場で行われるため致し方ないものの、サンプルの凍結はさらに低い温度で凍結時間を短縮し、搬送も極力低い温度での搬送が必要となると考えられる。凍結や搬送時の温度は -40°C 以下が望ましいと言える。

背側可食部の ATP 含量は、シマアジ稚魚を除いた対象魚種では、通電あり区と通電なし区におけるそれぞれの検体に有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。シマアジ稚魚は通電開始 300 分後で通電あり区と通電なし区に有意差が認められた。しかし、シマアジ稚魚の事例は通電あり区の方が低い値、すなわちストレスが少なかったことを示すものであった。

マダイ中間魚とシマアジ中間魚における背側普通筋の圧縮強度は、通電あり区と通電なし区におけるそれぞれの検体に有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。官能試験の結果から食感における評価は中間評価の 3 より高く、その傾向は圧縮強度と若干の相関が認められた。その傾向は本圧縮強度の計測の妥当性を示すものである。一方、蓄養したゴマサバを対象に漁獲後の蓄養期間によって魚肉の圧縮強度が 1.6 倍程度に高まり、その倍率が蓄養による肉質改善の指標として示されている [34]。その倍率は本実験の結果でも一部のケースで見られた。これは通電によって肉質を改善できる可能性を示唆するもので、今後、検

体を増やして通電による効果を検証することも有効と言える。

テスター7名で行った官能試験では、通電有無と通電時間による影響は少ないと評価した。しかし、食感と臭みの評価指標は実験に用いたマダイ中間魚とシマアジ中間魚のそれぞれでばらつきが大きかった。今後、テスターの範囲を広げる、例えば女性および若年齢層を加えて評価することが望まれる。

暖水性魚類に対する比較実験結果は、3.6.1と同様な結果であり、通電による影響が少ないことを再現するものである。この2度の実験で用いた養殖魚はマダイとシマアジであったが、我が国における養殖生産量の第1位はブリ類で [28]、その経営体数も最も多い。海中ワイヤレス給電装置を沿岸域で設置することを考慮する場合、対象魚種としてブリ類を選定した実験も検討する必要があるだろう。

3.6.3. 1 kW 電力印加実験（冷水系魚類）

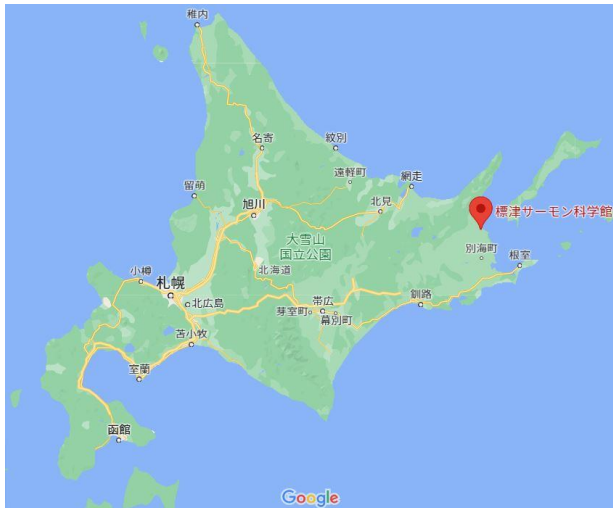
3.6.3.1. 実験の概要

3.6.2と同じく印加電力1kWで影響を調査した。冷水系魚類としてシロザケ、ハタハタ、ヌマガレイ、アメマス、ニジマス、ウグイの6種を対象魚種とし、陸上において海水水槽（アクリル製、直径1.4m×高さ0.8m）2つを準備して、それぞれの水槽内にコイルを設置するとともに対象魚種を投入して、片方のコイルにのみ1kWの電力を1kHzの周波数で一定時間通電したときの、対象魚種の行動、ストレス指標を通電の有無に対して比較した（比較実験）。ストレス指標は、血中乳酸濃度、血中コルチゾル濃度および背側可食部のATP（アデノシン三リン酸）含量とした。

【実験期間】2020年1月14日～1月18日（環境構築、実験、撤収）

3.6.3.2. 実験場所

試験魚（サケ類）の入手性、海水の水槽、実験への理解・協力が得られる場所として、北海道標津郡標津町にある標津サーモン科学館を選定した。場所および施設外観を図3.6-66に示す。沿岸の定置網で捕獲した試験魚を鮮度の良い状態で搬入し、専門家のもとで飼育することができる利点がある。なお実験期間中は休館期間のため、一般客の立ち入りはない。



(a) 北海道標津郡標津町



(b) 施設外観

図 3.6-66 標津サーモン科学館の場所および外観

3.6.3.3. 実験用ワイヤレス給電システム

電力伝送に用いるコイルは 3.6.1、3.6.2 と同じものを用い、コイル間隔と周囲環境の変更に合わせて改めてコイル特性の測定および磁界強度のシミュレーションと実測を実施した。

3.6.3.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要

図 3.6-67 と図 3.6-68 に実験系を示す。KIKUSUI の交流電源 PCR6000WE2R を入力に用いた。整合回路、整流器、電子負荷は図 3.6-33 と同じとした。

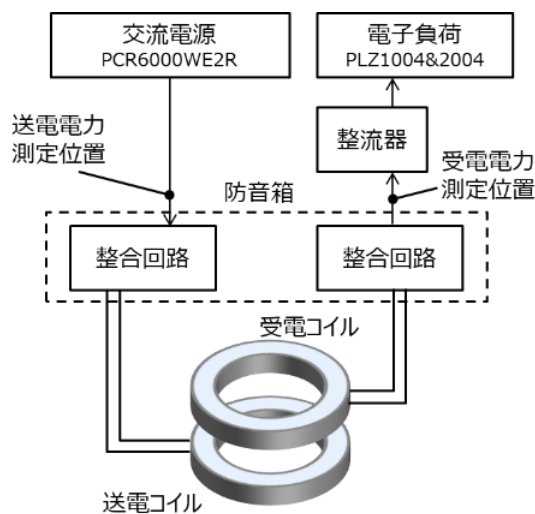
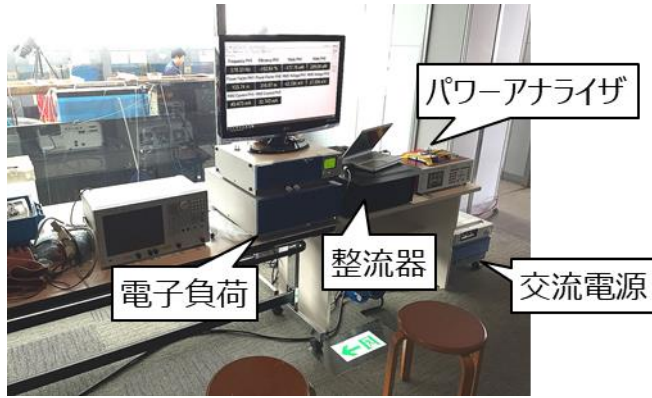


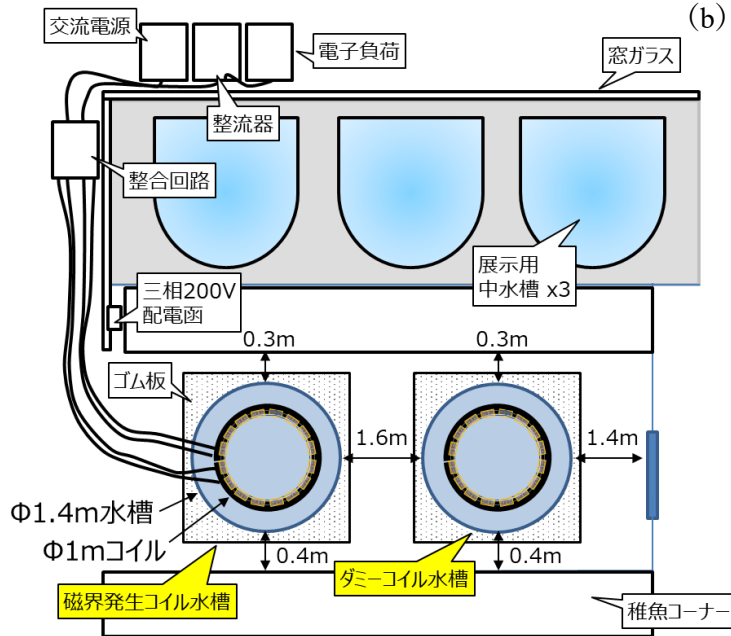
図 3.6-67 1 kW 印加用実験系（冷水系魚類）



(a) 機器設置状況



(b) 水槽とコイルの設置状況



(c) 機器配置 (上面図)

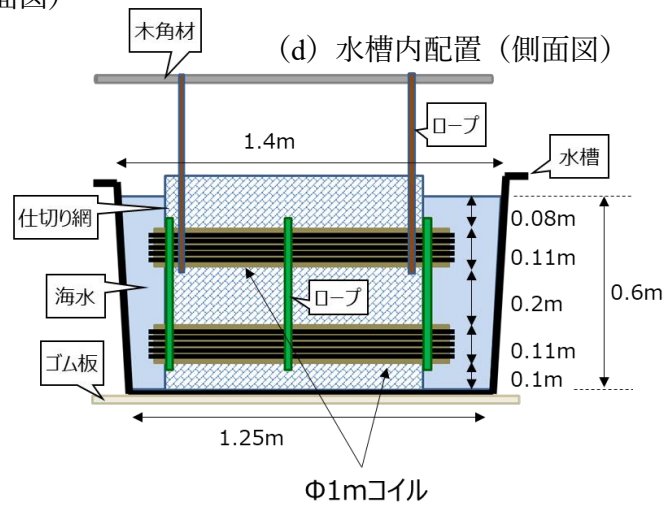


図 3.6-68 実験機器の配置

水槽の底面に負荷をかけないようにコイルを吊り下げる方式とし、コイル間隔は水深に合わせて 20 cm に広げた。コイル間の磁界が最も強くなるため、磁界が強い範囲を広げたかったからである。また、水槽は稚魚コーナー（図 3.6-69）に設置し、他の実験機器類は水濡れしないよう隣の展示室内に設置した。稚魚コーナーは普段から多数の水槽が設置されていて水を取り扱うことができ、床面もコンクリートのため万が一水槽内の海水がこぼれても大丈夫な場所である。



図 3.6-69 稚魚コーナー（引用：標津サーモン科学館ホームページ）

3.6.3.3.2. コイル特性の測定と伝送電力の確認

設置後の送受電コイル特性の測定にはキーサイト・テクノロジー製のベクトル・ネットワーク・アナライザ（VNA）E5061B を使用した。その結果を図 3.6-70 に示す。

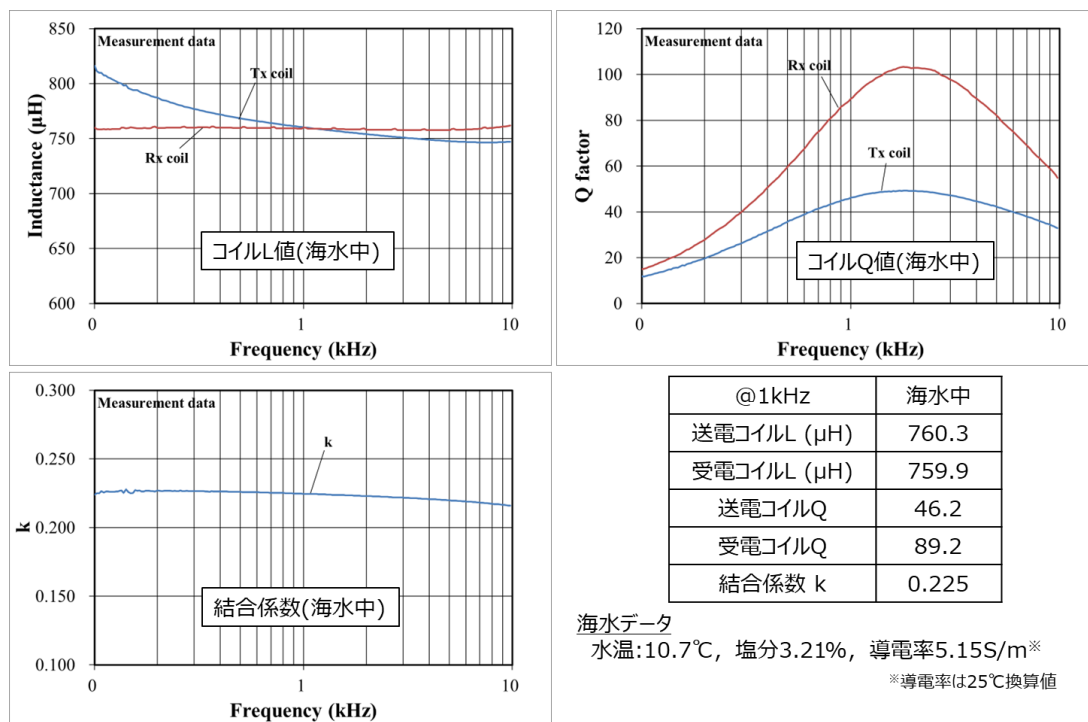


図 3.6-70 送受電コイル特性

この結果をもとに整合回路定数を表 3.6-10（回路記号は図 3.6-4 参照）のように定めて電力伝送を確認した結果を図 3.6-71 に示す。コイル間隔が広がったため 3.6.2.3.2 より効率は落ちたものの、86%の高効率で 1 kW の電力伝送ができる環境を構築できた。

表 3.6-10 整合回路定数（冷水系魚類実験時）

Cs_Tx (μF)	17.4
Cp_Tx (μF)	25
Cs_Rx (μF)	17.4
Cp_Rx (μF)	25

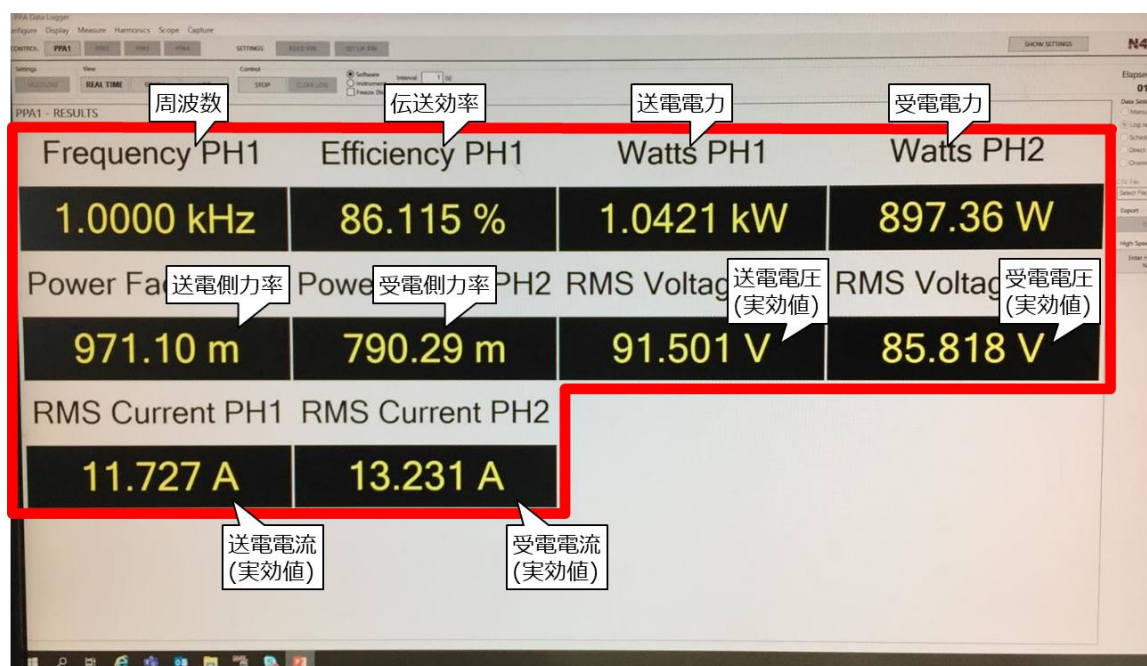


図 3.6-71 1 kW 送電時のパワーアナライザ測定画面表示（冷水系魚類実験時）

3.6.3.3.3. 磁界強度のシミュレーションと実測

3.6.2.3.3 と同様にシミュレーションで磁界強度分布を確認した結果を図 3.6-72 に示す。コイル間に強い磁界が発生している状況を確認できる。x 軸上の磁束密度を求めたグラフを図 3.6-73 に、測定ポイントと実測中の状況を図 3.6-74 に、各測定ポイントにおける値を表 3.6-11 に示す。実測はセンサーの都合上水槽の外側だけとしたが、シミュレーションと実測はほぼ一致することから水槽内には 400 μT 以上の磁界があると推測できる。

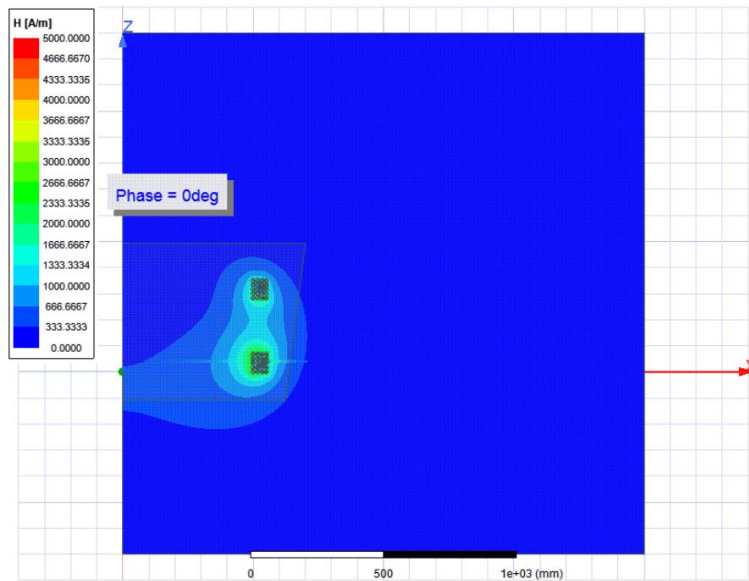


図 3.6-72 磁界強度分布（冷水系魚類実験）

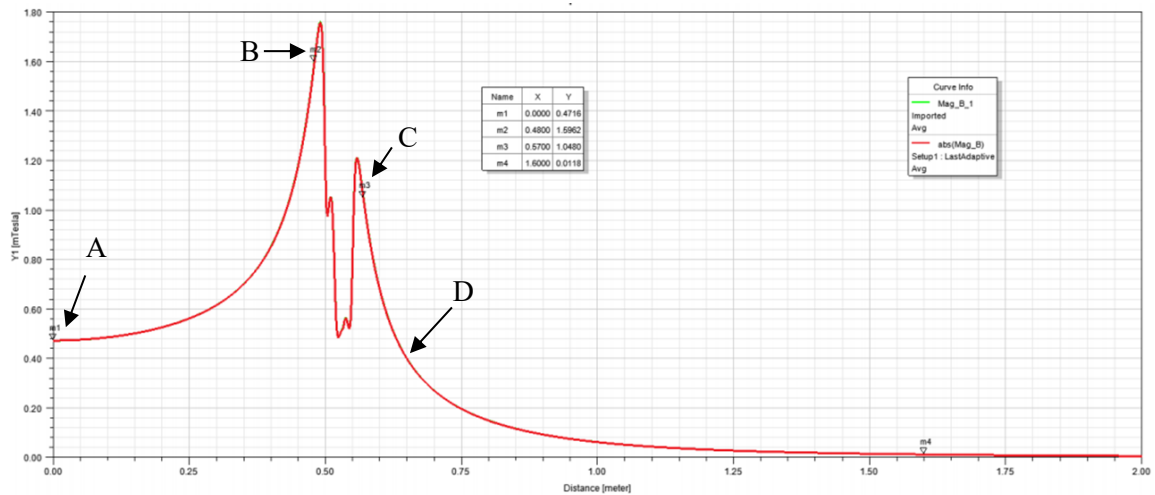


図 3.6-73 磁束密度分布（x 軸上）

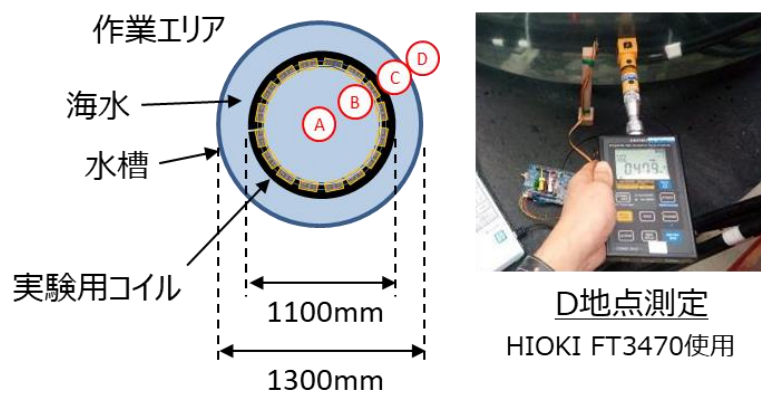


図 3.6-74 磁界強度（磁束密度）測定ポイントと実測のようす

表 3.6-11 磁界強度測定結果（冷水系魚類実験時）

測定位置	実測値	シミュレーション
A	-	470
B	-	1600
C	-	1050
D	479	400
職業的暴露レベル	300	
公衆暴露レベル	80	

単位： μT

3.6.3.4. 実験方法

冷水系魚類に対する比較実験は、対象魚種としてシロザケ（図 3.6-75 (a)）、ハタハタ（図 3.6-75 (b)）、ヌマガレイ（図 3.6-75 (c)）、アメマス（図 3.6-75 (d)）、ニジマス（図 3.6-75 (e)）、ウグイ（図 3.6-75 (f)）を用いた。シロザケとハタハタおよびヌマガレイは海産性である。平成 30 年度において、シロザケはサケ類として北海道、東北海域で 83,952 トン漁獲されるうちの大半を占め、ハタハタは主に日本海側で 6,458 トン漁獲される主要な漁獲対象魚種である [35]。ヌマガレイは北海道の一部で漁獲される重要な底魚である。シロザケとハタハタは紡錘形で海洋において表層または中層に分布し、ヌマガレイは縦扁形で底層に分布する。アメマス、ニジマスおよびウグイは紡錘形で生息域は主に淡水なるもアメマスは降海型、ニジマスとウグイは汽水域でも分布する。昨今、これらの魚種は海水における養殖が検討されている魚種で、特にニジマスの平成 30 年度の陸上養殖生産量は 4,732 トンとウナギに次ぐ第 2 の主要養殖魚種でもある [36]。比較実験は、暖水系魚類に対する比較実験と同様、対象魚種の水槽に対する馴致を考慮して、投入後、12 時間後に実施した。

片方のコイルへの通電時間は 1 日 5 時間（300 分）として、表 3.6-12 に示す対象魚種の組成および環境条件において、その魚種の行動観察、各計測および各分析に用いるサンプルを採取した。コイルへ通電した水槽を「通電あり区」、コイルへ通電しない水槽を「通電なし区」とした（図 3.6-76）。なお、本比較実験では、上述した対象魚種に対して対象魚種の行動とストレス指標についてのみ評価した。

通電開始後、2 つの水槽における対象魚種の行動をビデオカメラ（パナソニック株式会社製、HDC-Z1000）を設置して、通電時間（5 時間）中、全て撮影した。

通電開始 5 分後、150 分後、300 分後に、対象魚類のストレス指標の計測と分析に用いるサンプルを作成するために、2 つの水槽からそれぞれ 3 検体、タモ網を用いて 1 検体ずつサンプリングした。なお、本比較実験でのサンプリングはコイルの内側からのみとした。また、対象魚種のヌマガレイについては、他魚種への攻撃（追い廻し、噛み付き、捕食など）を避けるためにプラスチック製のカゴ（高さ 0.36m×幅 0.61m×奥行き 0.41m）をコイル内に設置した。さらに、ハタハタについては、検体数の都合により、2.5 時間後のサンプ

リングを実施しなかった。

検体に対する血中乳酸濃度の計測、血中コルチゾル濃度の分析用サンプルと背側可食部
中 ATP 含量の分析用サンプルの作成方法、分析手法は 3.6.2.4 と同様な手順とした。



(a) シロザケ

学名：*Oncorhynchus keta*

英名：Chum salmon



(b) ハタハタ

学名：*Arctoscopus japonicus*

英名：Sailfin sandfish



(c) ヌマガレイ

学名：*Platichthys stellatus*

英名：Starry flounder



(d) アメマス

学名：*Salvelinus leucomaenis leucomaenis*

英名：White-spotted char



(e) ニジマス

学名：*Oncorhynchus mykiss*

英名：Rainbow trout



(f) ウグイ

学名：*Tribolodon hakonensis*

英名：Japanese dace

図 3.6-75 冷水系魚類の比較実験で用いた対象魚種

表 3.6-12 冷水系魚類の比較実験における対象魚種の組成と環境条件

実験日	魚種	通電	サンプリング	室温	水温	DO	塩分濃度
令和2年1月15日	・ニジマス 体重：40～100g 尾叉長：170～200mm	あり なし	5分後	12.0 ℃	10.1℃	9.9mg/L	3.5%
	・シロザケ 体重：50～200g 尾叉長：200～270mm	あり なし	150分後				
	・アメマス 体重：50～300g 尾叉長：200～360mm	あり なし	300分後				
令和2年1月16日	・ヌマガレイ 体重：100～800g 尾叉長：210～370mm	あり なし	5分後	13.8 ℃	10.6℃	9.9mg/L	3.5%
	・ウグイ 体重：50～500g 尾叉長：200～350mm	あり なし	150分後				
	・ハタハタ 体重：30～50g 尾叉長：170～190mm	あり なし	300分後				

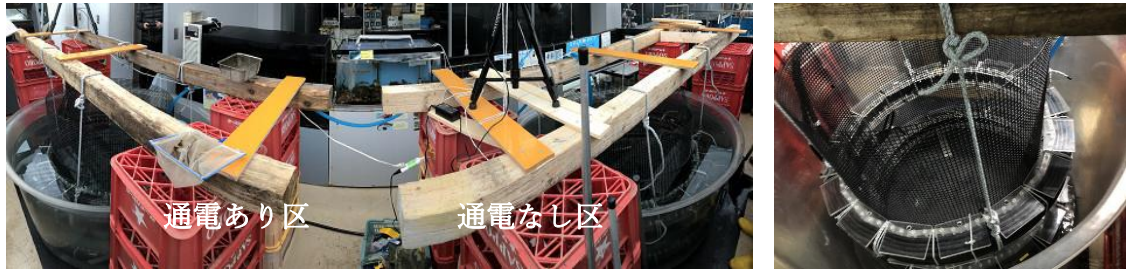


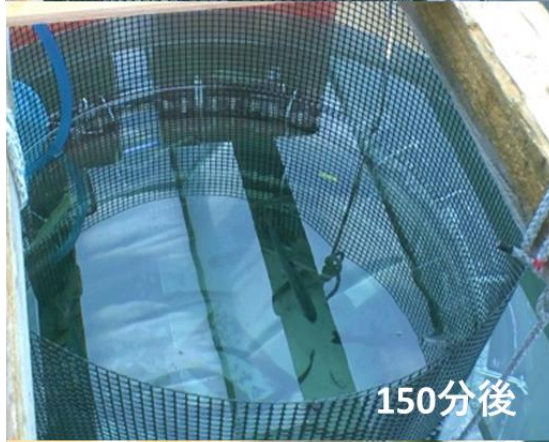
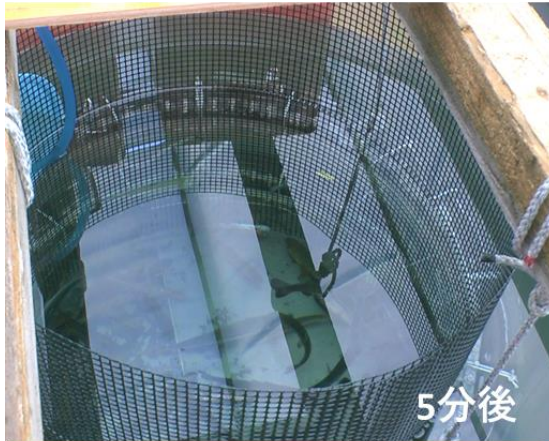
図 3.6-76 冷水系魚類の比較実験における通電あり区と通電なし区

3.6.3.5. 実験結果

3.6.3.5.1. 通電が対象魚種の行動に及ぼす影響

通電開始から 300 分後までの撮影結果から、シロザケ、ハタハタ、ヌマガレイ、アメマス、ニジマス、ウグイの行動に変化はなかった（図 3.6-77、図 3.6-78）。また、通電時間中に目視でも行動を観察していたが、変化は見られなかった。

通電あり区



通電なし区

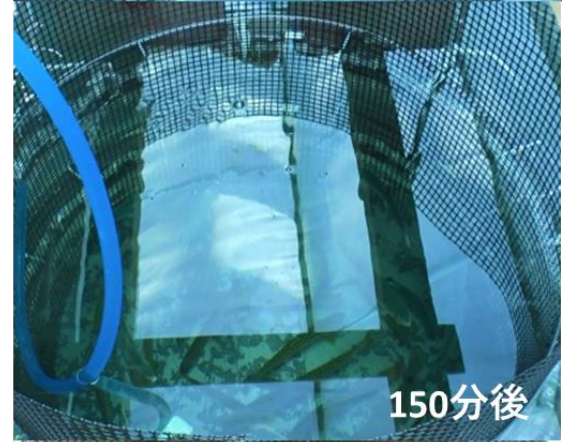
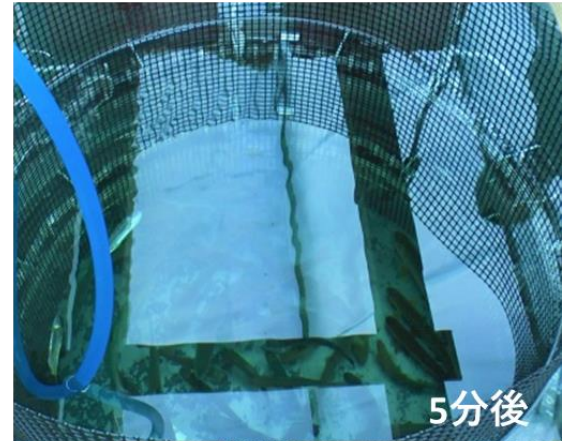


図 3.6-77 ニジマス、シロザケ、アメマスの通電5分後、150分後、300分後の様子

通電あり区



通電なし区



図 3.6-78 ヌマガレイ、ウグイ、ハタハタの通電5分後、150分後、300分後の様子

3.6.3.5.2. 血中乳酸濃度の計測

A シロザケ

計測したシロザケの血中乳酸濃度に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなか

った(図 3.6-79)。シロザケの血中乳酸濃度の平均値は、通電5分後のあり区で1.33 mmol/L、なし区で1.7 mmol/L、150分後のあり区で0.87 mmol/L、なし区で1.67 mmol/L、300分後のあり区で1.47 mmol/L、なし区で2.03 mmol/Lであり、通電あり区の方が僅かに低い値を示した。

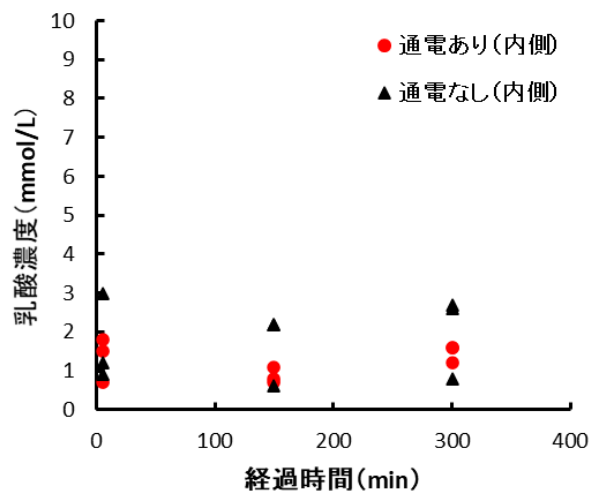


図 3.6-79 シロザケの通電時間に対する血中乳酸濃度

B ハタハタ

計測したハタハタの血中乳酸濃度に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった(図 3.6-80)。ハタハタの血中乳酸濃度の平均値は、5分後のあり区で0.50 mmol/L、なし区で0.55 mmol/L、300分後のあり区で0.17 mmol/L、なし区で0.17 mmol/Lであり、通電有無や通電時間に関する傾向は見られなかった。

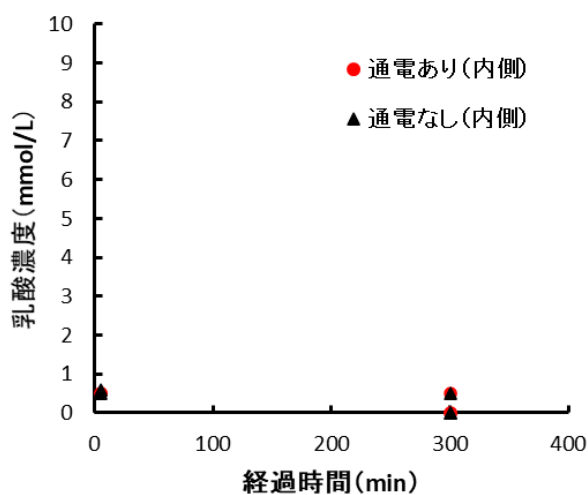


図 3.6-80 ハタハタの通電時間に対する血中乳酸濃度

Cヌマガレイ

計測したヌマガレイの血中乳酸濃度に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった(図 3.6-81)。ヌマガレイの血中乳酸濃度の平均値は、5分後のあり区で 0.33 mmol/L、なし区で 0.53 mmol/L、150分後のあり区で 0.50 mmol/L、なし区で 0.50 mmol/L、300分後のあり区で 0.00 mmol/L、なし区で 0.02 mmol/L であり、通電有無や通電時間に関する傾向は見られなかった。

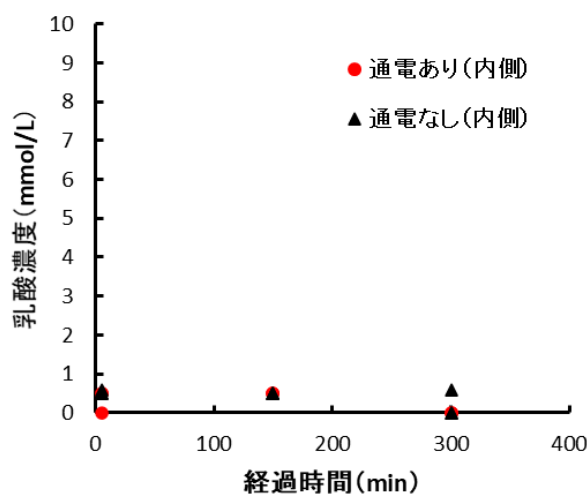


図 3.6-81 ヌマガレイの通電時間に対する血中乳酸濃度

D アメマス

計測したアメマスの血中乳酸濃度に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった(図 3.6-82)。アメマスの血中乳酸濃度の平均値は、5分後のあり区で 0.60 mmol/L、なし区で 1.37 mmol/L、150分後のあり区で 0.83 mmol/L、なし区で 1.13 mmol/L、300分後のあり区で 0.63 mmol/L、なし区で 1.10 mmol/L であり、通電あり区の方が僅かに低い値を示した。

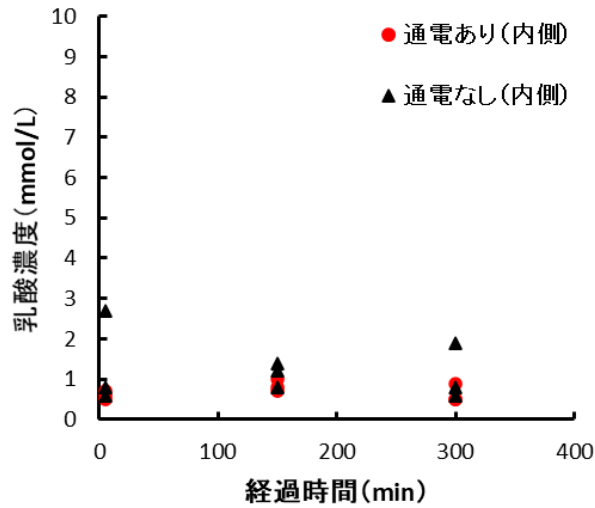


図 3.6-82 アメマスの通电時間に対する血中乳酸濃度

E ニジマス

計測したニジマスの血中乳酸濃度に通电有無と通电時間による異なる傾向は見られなかった (図 3.6-83)。ニジマスの血中乳酸濃度の平均値は、5分後のあり区で 0.90 mmol/L、なし区で 1.00 mmol/L、150 分後のあり区で 1.60 mmol/L、なし区で 1.43 mmol/L、300 分後のあり区で 1.43 mmol/L、なし区で 0.93 mmol/L であり、5 分後を除き、通电あり区の方が僅かに高い値を示した。

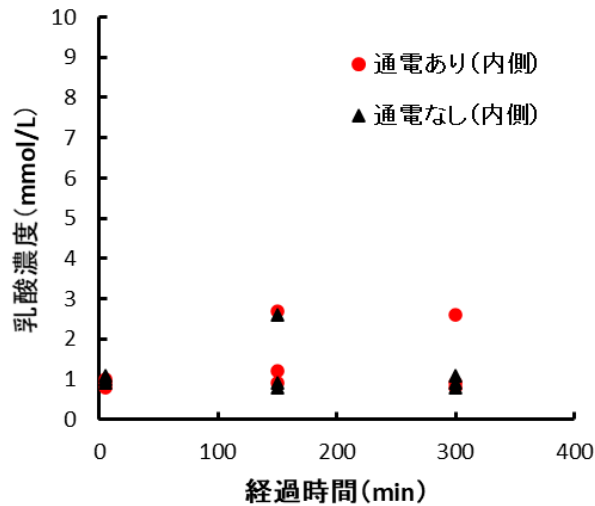


図 3.6-83 ニジマスの通电時間に対する血中乳酸濃度

F ウグイ

計測したウグイの血中乳酸濃度に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった(図 3.6-84)。ウグイの血中乳酸濃度の平均値は、5 分後のあり区で 1.40 mmol/L、なし区で 1.10 mmol/L、150 分後のあり区で 0.93 mmol/L、なし区で 1.57 mmol/L、300 分後のあり区で 1.23 mmol/L、なし区で 0.87 mmol/L であり、通電有無や通電時間に関する傾向は見られなかった。

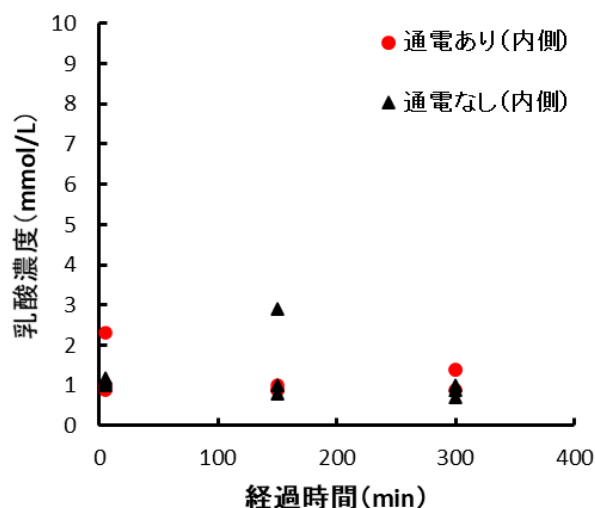


図 3.6-84 ウグイの通電時間に対する血中乳酸濃度

3.6.3.5.3. 血中コルチゾル濃度の分析

A シロザケ

分析したシロザケの血中コルチゾル濃度は、通電開始 5 分後に通電有無でばらつきが見られるが、血中乳酸濃度と同様に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった(図 3.6-85)。シロザケの血中コルチゾル濃度の平均値は、5 分後のあり区で 92.7 ng/mL、なし区で 189.8 ng/mL、150 分後のあり区で 19.8 ng/mL、なし区で 45.6 ng/mL、300 分後のあり区で 24.5 ng/mL、なし区で 46.1 ng/mL であり、通電あり区の方が低い値を示した。

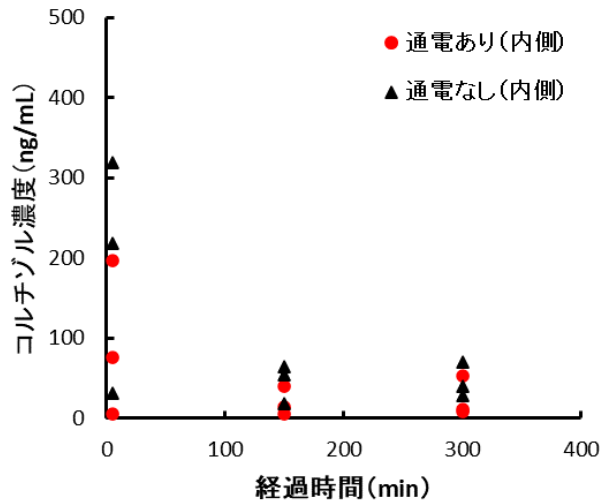


図 3.6-85 シロザケの通电時間に対する血中コルチゾル濃度

B ハタハタ

分析したハタハタの血中コルチゾル濃度は、通电時間が長いほど高い値を示したが、通电有無と通电時間による異なる傾向は見られなかった (図 3.6-86)。ハタハタの血中コルチゾル濃度の平均値は、5 分後のあり区で 192.4 ng/mL、なし区で 307.7 ng/mL、300 分後のあり区で 327.8 ng/mL、なし区で 408.3 ng/mL であり、通电開始 5 分後および 300 分後で通电なしの方が大きい値を示した。

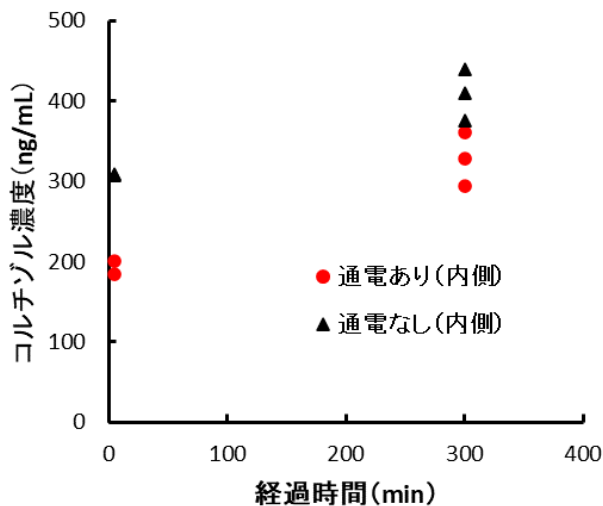


図 3.6-86 ハタハタの通电時間に対する血中コルチゾル濃度

C ヌマガレイ

分析したヌマガレイの血中コルチゾル濃度は、通电開始 150 分後、300 分後に通电有無

でばらつきが見られるが、血中乳酸濃度と同様に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった(図 3.6-87)。ヌマガレイの血中コルチゾル濃度の平均値は、5分後のあり区で 36.8 ng/mL、なし区で 80.7 ng/mL、150 分後のあり区で 170.2 ng/mL、なし区で 95.7 ng/mL、300 分後のあり区で 170.8 ng/mL、なし区で 181.0 ng/mL であり、通電有無や通電時間に関係する傾向は見られなかった。

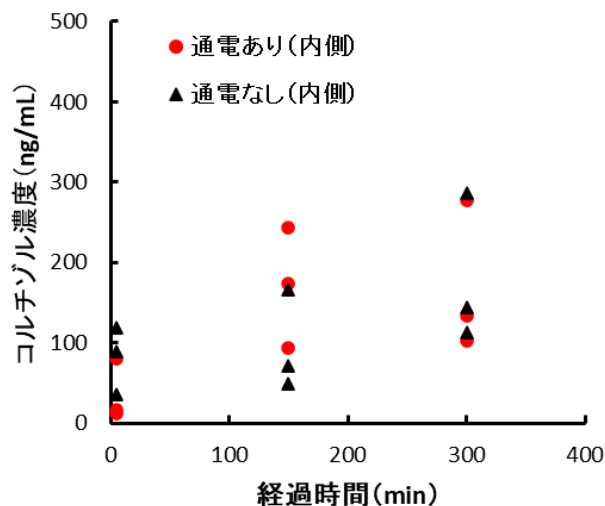


図 3.6-87 ヌマガレイの通電時間に対する血中コルチゾル濃度

D アメマス

分析したアメマスの血中コルチゾル濃度は、通電開始 300 分後の通電ありの検体が高い値を示したが、血中乳酸濃度と同様に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった(図 3.6-88)。アメマスの血中コルチゾル濃度の平均値は、5分後のあり区で 85.1 ng/mL、なし区で 49.8 ng/mL、150 分後のあり区で 17.7 ng/mL、なし区で 10.0 ng/mL、300 分後のあり区で 64.1 ng/mL、なし区で 2.1 ng/mL であり、通電時間に関係なく、通電あり区の方が大きかった。

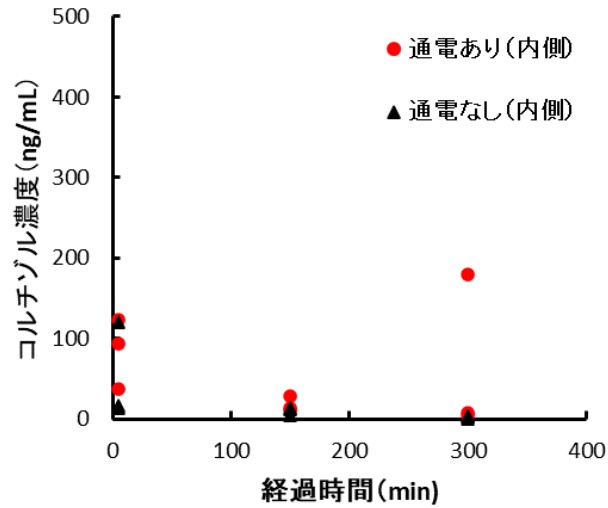


図 3.6-88 アメマスの通电時間に対する血中コルチゾル濃度

E ニジマス

分析したニジマスの血中コルチゾル濃度は、通电開始 5 分後の通电なしの検体、300 分後の通电ありの検体が高い値を示したが、血中乳酸濃度と同様に通电有無と通电時間による異なる傾向は見られなかった（図 3.6-89）。ニジマスの血中コルチゾル濃度の平均値は、5 分後のあり区で 77.9 ng/mL、なし区で 154.2 ng/mL、150 分後のあり区で 123.8 ng/mL、なし区で 100.8 ng/mL、300 分後のあり区で 109.8 ng/mL、なし区で 19.2 ng/mL であり、通电有無や通电時間に関係する傾向は見られなかった。

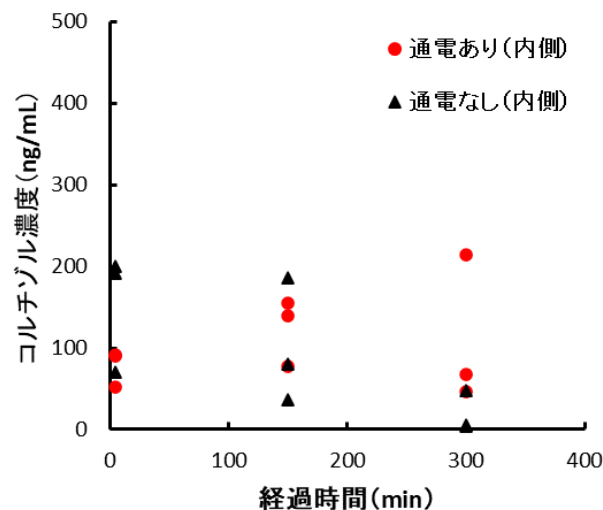


図 3.6-89 ニジマスの通电時間に対する血中コルチゾル濃度

F ウグイ

分析したウグイの血中コルチゾル濃度は、通電開始 5 分後の通電なしの検体、150 分後の通電ありの検体が高い値を示したが、血中乳酸濃度と同様に通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった (図 3.6-90)。ウグイの血中コルチゾル濃度の平均値は、5 分後のあり区で 192.4 ng/mL、なし区で 319.4 ng/mL、150 分後のあり区で 306.2 ng/mL、なし区で 228.2 ng/mL、300 分後のあり区で 180.1 ng/mL、なし区で 209.0 ng/mL であり、通電有無や通電時間に関する傾向は見られなかった。

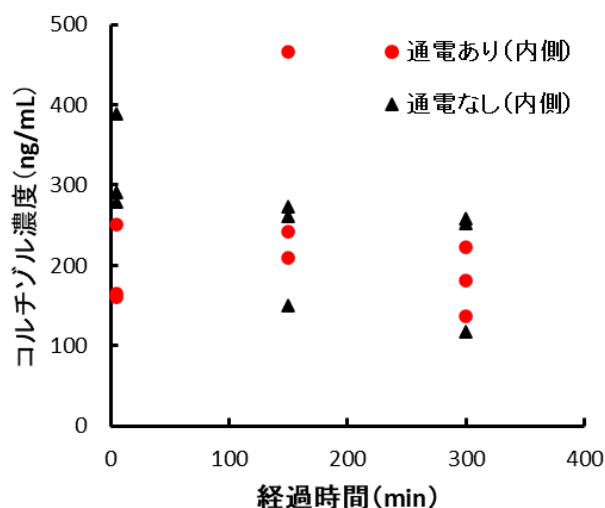


図 3.6-90 ウグイの通電時間に対する血中コルチゾル濃度

3.6.3.5.4. 背側可食部の ATP 含量の分析

A シロザケ

分析したシロザケの ATP 含量は、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった (図 3.6-91)。シロザケの ATP 含量の平均値は、5 分後のあり区で 6.31 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 6.39 $\mu\text{mol/g}$ 、150 分後のあり区で 6.63 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 6.51 $\mu\text{mol/g}$ 、300 分後のあり区で 6.75 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 6.86 $\mu\text{mol/g}$ であり、通電有無や通電時間に関する傾向を示した。

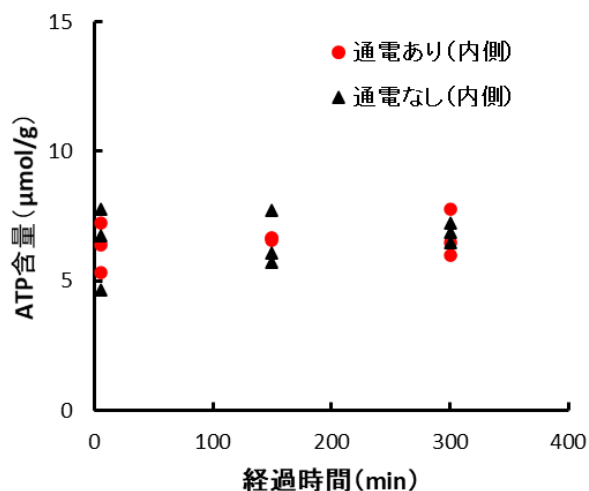


図 3.6-91 シロザケの通电時間に対する背側可食部の ATP 含量

B ハタハタ

分析したハタハタの ATP 含量は、他の対象魚種と比べて低い値を示したが、通电有無と通电時間による異なる傾向は見られなかった (図 3.6-92)。ハタハタの ATP 含量の平均値は、5 分後のあり区で $2.68 \mu\text{mol/g}$ 、なし区で $1.78 \mu\text{mol/g}$ 、300 分後のあり区で $2.92 \mu\text{mol/g}$ 、なし区で $3.04 \mu\text{mol/g}$ であり、通电有無や通电時間に関係しない傾向を示した。

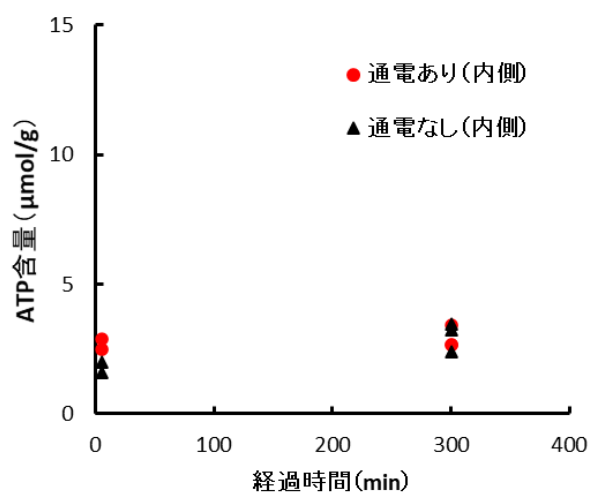


図 3.6-92 ハタハタの通电時間に対する背側可食部の ATP 含量

C ヌマガレイ

分析したヌマガレイの ATP 含量は、他の対象魚種と比べて低い値を示したが、通电有無と通电時間による異なる傾向は見られなかった (図 3.6-93)。ヌマガレイの ATP 含量の平

均値は、5 分後のあり区で 3.34 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 3.83 $\mu\text{mol/g}$ 、150 分後のあり区で 3.75 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 2.86 $\mu\text{mol/g}$ 、300 分後のあり区で 3.30 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 2.41 $\mu\text{mol/g}$ であり、通電有無に関係なく、通電時間が長いほど低くなる傾向を示した。

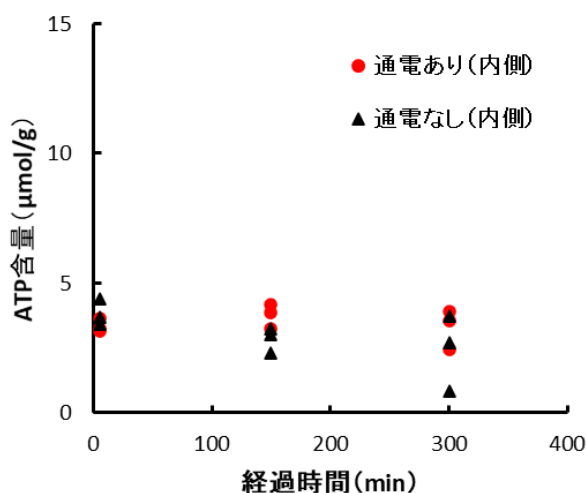


図 3.6-93 スマガレイの通電時間に対する背側可食部の ATP 含量

D アメマス

分析したアメマスの ATP 含量は、通電時間が長いほどばらつきが大きいですが、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった (図 3.6-94)。アメマスの ATP 含量の平均値は、5 分後のあり区で 6.73 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 7.45 $\mu\text{mol/g}$ 、150 分後のあり区で 6.15 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 6.27 $\mu\text{mol/g}$ 、300 分後のあり区で 6.00 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 4.79 $\mu\text{mol/g}$ であり、通電有無や通電時間に関係しない傾向を示した。

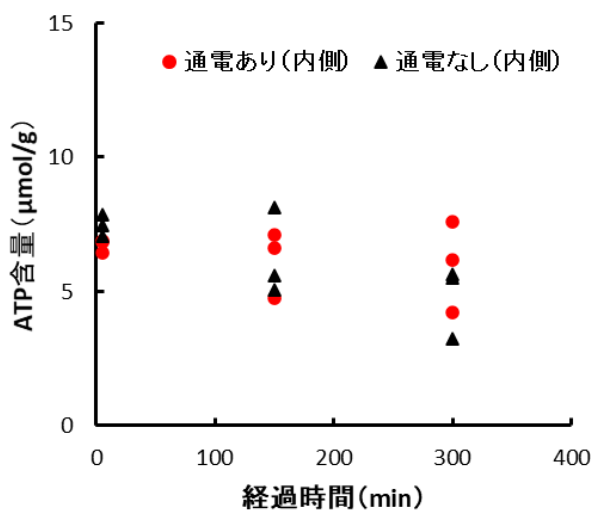


図 3.6-94 アメマスの通電時間に対する背側可食部の ATP 含量

E ニジマス

分析したニジマスの ATP 含量は、通電開始 150 分後の通電ありの検体が低い値を示したが、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった (図 3.6-95)。ニジマスの ATP 含量の平均値は、5 分後のあり区で 7.24 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 7.51 $\mu\text{mol/g}$ 、150 分後のあり区で 5.40 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 7.87 $\mu\text{mol/g}$ 、300 分後のあり区で 7.09 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 7.78 $\mu\text{mol/g}$ であり、通電あり区の方が低い値を示した。

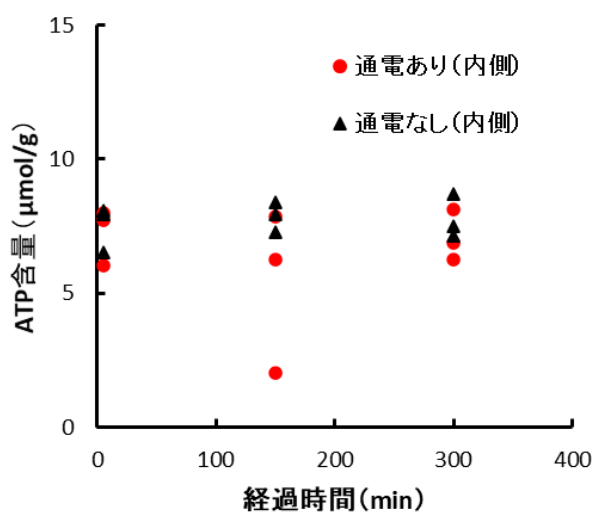


図 3.6-95 ニジマスの通電時間に対する背側可食部の ATP 含量

F ウグイ

分析したウグイの ATP 含量は、通電開始 300 分後の通電ありの検体が低い値を示したが、通電有無と通電時間による異なる傾向は見られなかった (図 3.6-96)。ウグイの ATP 含量の平均値は、5 分後のあり区で 4.35 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 4.75 $\mu\text{mol/g}$ 、150 分後のあり区で 4.28 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 4.85 $\mu\text{mol/g}$ 、300 分後のあり区で 3.21 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 5.02 $\mu\text{mol/g}$ であり、通電あり区の方が低い値を示した。

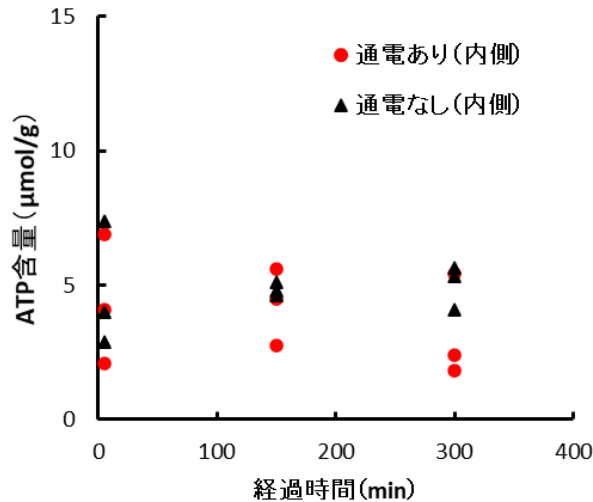


図 3.6-96 ウグイの通电時間に対する背側可食部の ATP 含量

3.6.3.6. 考察

海中ワイヤレス給電を行う際、通电したコイル周辺に発生することが予想される電磁界が魚類に与える影響について調査するために、冷水性魚種に対する比較実験を行った。比較実験では、陸上において海水水槽 2 つを準備して、それぞれの水槽内にコイルを設置するとともに対象魚種を投入して、片方のコイルにのみ通电したときの、対象魚種の行動、ストレス指標および肉質に及ぼす変化を通电の有無に対して比較した。結果、本実験で用いた冷水系魚類が通电有無と通电時間によって受ける影響は、全ての評価項目において小さかった。

ビデオカメラを用いた行動観察において、通电開始から 300 分後までに変化が見られた対象魚種は確認できなかった。一般に魚類の行動変化が発生した場合、その行動によるエネルギー消費は ATP 含量の減少につながる。本実験で評価した対象魚種の ATP 含量は、通电有無および通电時間に対して変化は少なかった。これらの結果を含めて評価しても通电が行動へ及ぼす影響は極めて少ないと考えられる。

ストレス指標として計測した血中乳酸濃度と分析した血中コルチゾル濃度は、通电有無と通电時間に対して大きな影響がなかったことを結果で述べた。全対象魚種の血中乳酸濃度は、通电あり区と通电なし区におけるそれぞれの検体に有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。一方、血中コルチゾル濃度は、冷水性魚種として用いたハタハタとウグイを除いた対象魚種では、通电あり区と通电なし区におけるそれぞれの検体に有意差は認められなかった ($p > 0.05$)。ハタハタは通电開始 5 分後および 300 分後で、ウグイは通电開始 5 分後で、通电あり区と通电なし区に有意差が認められた。しかし、ハタハタとウグイの事例はともに通电あり区の方が低い値、すなわちストレスが少なかったことを示すものであった。

血中乳酸濃度の計測結果と血中コルチゾル濃度の分析結果を比較すると、血中コルチゾ

ル濃度の方のばらつきが大きかった。この原因は血液を遠心分離して得た血漿サンプルの作製と保管方法にあると考えられる。サンプル作製が実験現場（屋外）で行われ、保管温度は -20°C の保冷庫で凍結した後、一般の搬送会社の冷却便（ヤマト運輸のクール宅急便）に委託した。ばらつきを抑制するためには、サンプルの作製は本実験が漁業・養殖現場で行われるため致し方ないものの、サンプルの凍結はさらに低い温度で凍結時間を短縮し、搬送も極力低い温度での搬送が必要となると考えられる。凍結や搬送時の温度は -40°C 以下が望ましいと言える。

背側可食部の ATP 含量は、通電あり区と通電なし区におけるそれぞれの検体に有意差は認められなかった ($p>0.05$)。

冷水系魚類に対する比較実験で用いたシロザケ、アメマス、ニジマスはサケ科魚類に分類される。サケ科魚類は体内に磁気感覚を有し、地磁気を利用して回遊行動を行っている報告があるが [37]、本実験のコイルへの通電条件（電力 1 kW、周波数 1 kHz）では、行動およびストレス指標に変化は見られなかった。そこで、冷水系魚類に対する比較実験が終了した後、コイルへの通電周波数を変更した追加実験を実施した。対象魚種は検体数の都合により、サケ科のアメマスのみとした。追加実験ではコイルへの通電周波数を 1 Hz、25 Hz、50 Hz、75 Hz、100 Hz に変更し、各周波数で 1 分間の行動観察（目視およびビデオ撮影）を行った。結果として、周波数に関係なく行動変化は見られなかった。そのため、今後、魚類に影響を及ぼすコイルへの通電条件を調査する必要があると考えられる。

また、冷水性魚類に対する比較実験で使用したシロザケは体重 20~200 g、尾叉長 200~270 mm であった。シロザケの性機能および感覚機能が成熟している成魚は、体重 2,000~5,000 g、全長 500~800 mm と言える。そのため、今回の比較実験で使用したシロザケの検体は未成魚であり、十分に感覚機能が発達していなかったことが考えられる。今後、サケ科魚類については成魚を用いて磁気感覚を有する魚類への影響を明らかにすることが有効と言える。

3.6.4. 1~3 kW 電力印加実験（ブリ・マアジ、24 時間）

3.6.4.1. 実験の概要

本研究における海中ワイヤレス給電は、海中に設置されたコイルへ通電することで行われる。そのコイルへ通電するとき、コイル周辺に強電磁界が発生することが予想される。ここでは、海中において発生する強電磁界が魚類へ与える影響を調べた。

ニチモウ株式会社研究開発室に設置している海水水槽（水量 32.4 立方メートル、以下、陸上海水角水槽）を 2 つに区分けし、2 つの実験区を設け、それぞれの試験区の中央にコイル（直径 1.0 m×高さ 0.52 m）を設置した。そこに対象魚を投入して、一方のコイルのみに一定時間通電した。このときの対象魚の行動、ストレス指標などに及ぼす変化を通電の有無について比較した（以下、比較実験）。対象魚種として、ブリおよびマアジを選定した。

令和元年における養殖生産量はブリが 136,367 トン、マアジが 839 トンであり、それぞれ我が国の養殖生産量の第 1 位と第 9 位を占める主要な養殖魚である [38]。

ストレス指標に関する分析項目は、血中乳酸濃度、血中コルチゾル濃度、背側可食部の ATP (アデノシン 3 リン酸) 含量および背側可食部の遊離アミノ酸組成とした。ただしブリについては、水槽規模に対する尾数・尾叉長の都合により、ストレスを受けてホルモン分泌が活性化することが考えられたため、血中コルチゾル濃度の分析は実施しなかった。

魚類の血中乳酸濃度は一般に、外部刺激や環境変化などによって変化し、行動（運動）が大きく、または、激しいときに値が大きくなる [39]。魚類の血中コルチゾル濃度は、血中乳酸濃度と同様に、一般に外部からの刺激や環境変化などによって変化し、行動が大きくまたは激しければ値は高くなる [40]。背側可食部の ATP 含量は、一般的に外部からの刺激や環境変化などによって変化し、行動が大きくまたは激しければ値は小さくなる [33]。

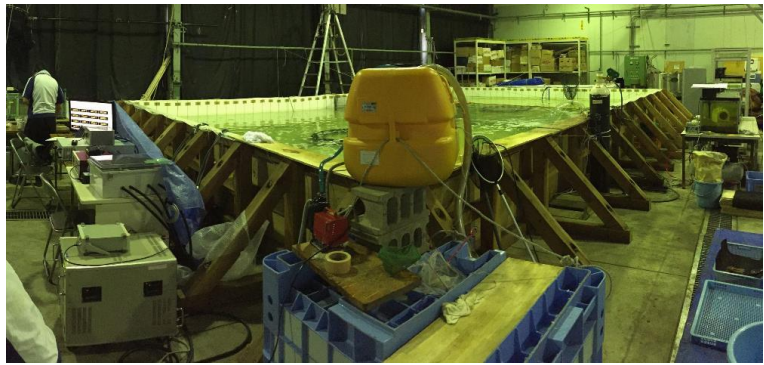
遊離アミノ酸とは、アミノ酸の集合体であるタンパク質から、1 つ 1 つ離れた状態で生体内に存在しているアミノ酸のことである。人間が感じる「味」はこれに関係し、舌（味蕾）に遊離アミノ酸（タンパク質の状態ではない）が触れることで感じるものである。遊離アミノ酸は、魚肉の旨味成分としてイノシン酸と同様に重要な成分であり、魚肉における科学的な呈味性の検証方法として遊離アミノ酸分析が行われている [41] [42]。よって、コイルへ通電することの呈味への影響を検証するために、遊離アミノ酸を分析項目とした。各遊離アミノ酸で呈味が異なり、一般的に旨味はグルタミン酸、アスパラギン酸、甘味はアラニン、グリシン、プロリン、セリン、スレオニン、苦みはアルギニン、システイン、ヒスチジン、イソロイシン、ロイシン、リジン、メチオニン、フェニルアラニン、チロシン、バリンである [43]。

【実験期間】 2020 年 7 月 14 日～7 月 17 日（ブリ、環境構築、実験、撤収）

【実験期間】 2020 年 8 月 24 日～8 月 28 日（マアジ、環境構築、実験、撤収）

3.6.4.2. 実験場所

ニチモウ株式会社研究開発室（山口県下関市小月）の陸上海水角水槽を使用した。場所と水槽外観を図 3.6-97 に示す。ニチモウ株式会社敷地内で実験することで 24 時間管理することができる。



(b) 研究開発室の陸上海水角水槽の外観

(a) 下関市小月の位置

図 3.6-97 実験場所と水槽外観

3.6.4.3. 実験用ワイヤレス給電システム

コイルは 3.6.1、3.6.2、3.6.3 と同じものを用い、コイル間隔は 3.6.1、3.6.2 と同じ 10 cm とした。

3.6.4.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要

伝送電力の大きさ別に 2 種類の実験系を準備した。1 kW 用の実験系を図 3.6-98 に、1～3 kW 用の実験系を図 3.6-99 に示す。送電コイルに電力供給する機器が違い、NF 製アンプ 4520A では 3 kW の出力ができず、3 kW の系では KIKUSUI 製 PCR6000WE2R を使用した。

ブリを使った実験には電力 1 kW の条件だけとして図 3.6-98 の実験系を用い、マアジを使った実験には電力 1 kW と 3 kW の 2 条件として図 3.6-99 を用いた。

コイルの設置状況を図 3.6-100 に示す。コイルの積み重ね仕様については 3.6.2 と同じとし、水槽中央に設置した仕切り網で区分された 2 つの区画のそれぞれ中央に配置している。なお磁界をかける方の区画を「通電あり区」、磁界をかけずにコイルを置いているだけの区画を「通電なし区」と名付けた。

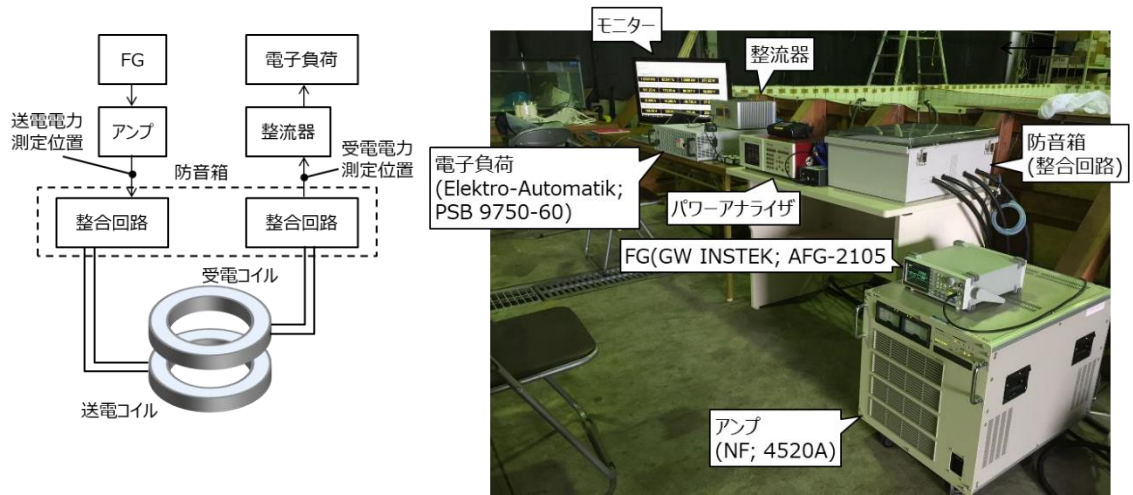


図 3.6-98 1 kW 用実験系

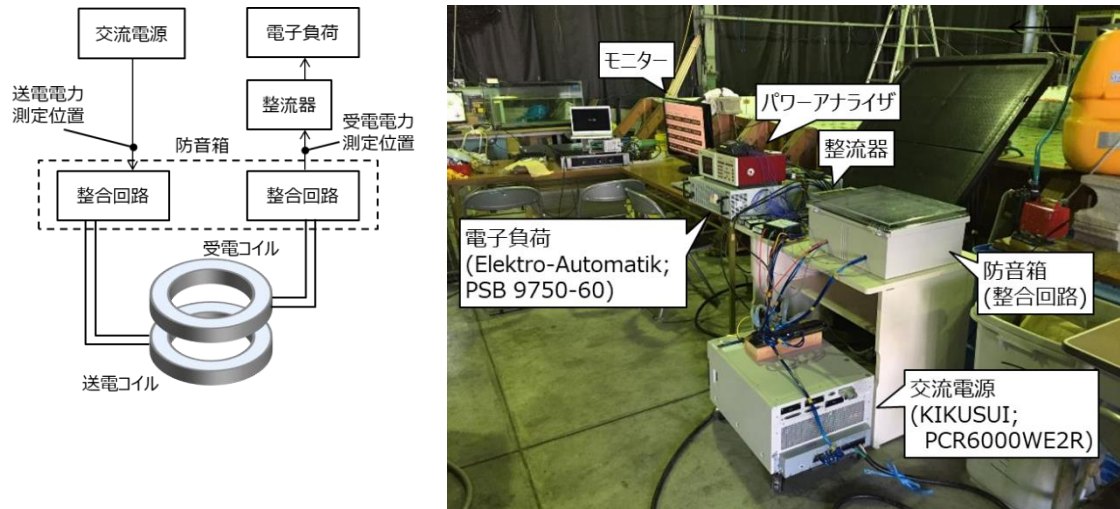


図 3.6-99 1~3 kW 用実験系

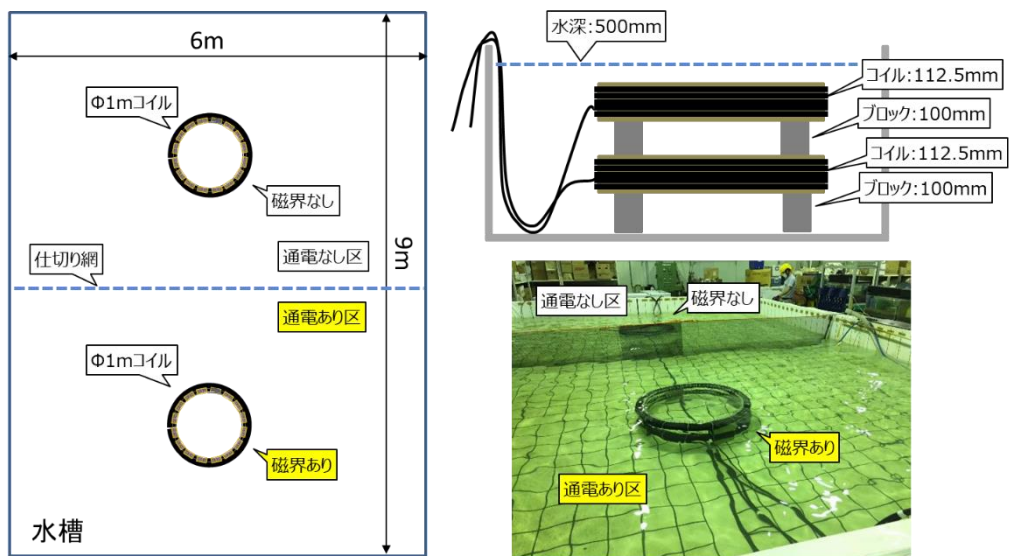


図 3.6-100 コイル設置状況

3.6.4.3.2. コイル特性の測定と伝送電力の確認

設置後の送受電コイル特性の測定にはキーサイト・テクノロジー製のベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA) E5061B を使用した。その結果を図 3.6-101 に示す。

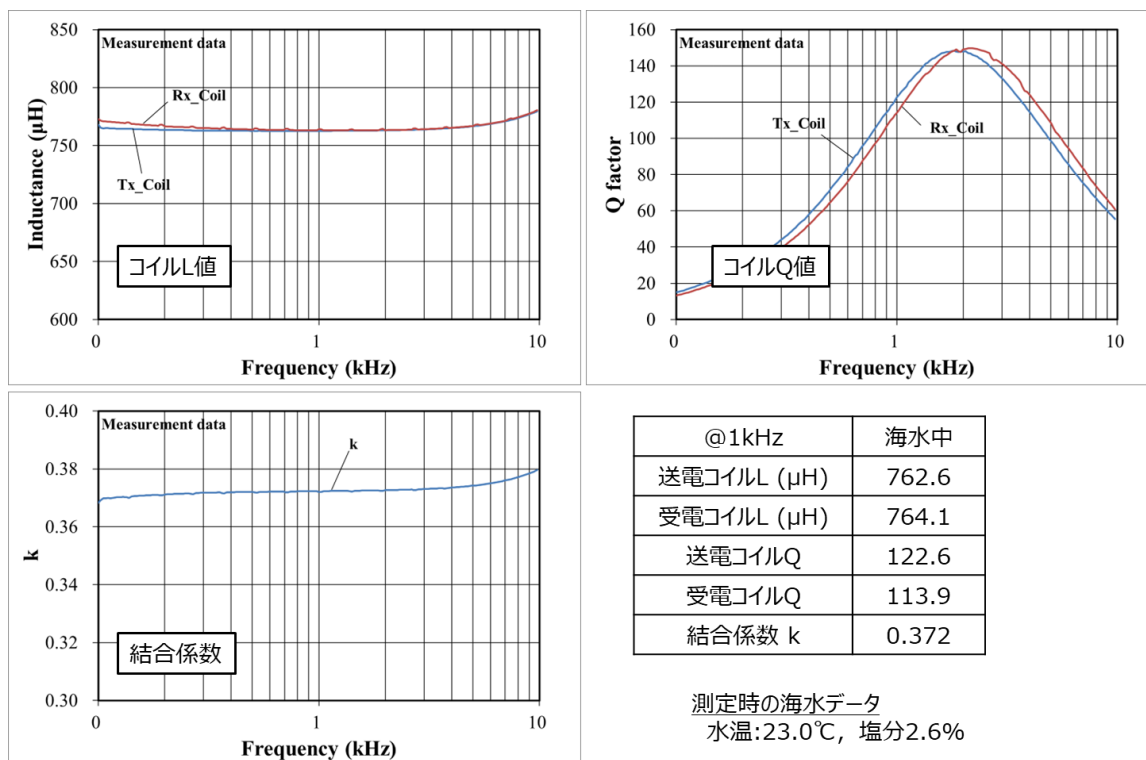


図 3.6-101 送受電コイル特性

この結果をもとに整合回路定数を表 3.6-13 (回路記号は図 3.6-4 参照) のように定めた。コイル間隔が同じで条件が似ているため 3.6.2.3.2 と同じ整合回路定数となった。電力伝送を確認した結果を図 3.6-102、図 3.6-103 に示す。1 kW および 3 kW の電力伝送ができる環境が構築できた。

表 3.6-13 整合回路定数 (ブリ・マアジ実験時)

Cs_Tx (μF)	30
Cp_Tx (μF)	25
Cs_Rx (μF)	30
Cp_Rx (μF)	25

周波数	伝送効率	送電電力	受電電力
Frequency PH1	Efficiency PH1	Watts PH1	Watts PH2
1.0000 kHz	91.884 %	1.0057 kW	924.07 W
Power Factor PH1	Power Factor PH2	RMS Voltage PH1	RMS Voltage PH2
送電側力率	受電側力率	送電電圧 (実効値)	受電電圧 (実効値)
940.20 m	758.60 m	83.573 V	86.486 V
RMS Current PH1	RMS Current PH2	Peak Current PH3	RMS Current PH3
12.799 A	14.085 A	40.565 A	29.234 A
Peak Voltage PH1	RMS Voltage PH1	Phase Phase PH3	Power Factor PH3
送電電流 (実効値)	受電電流 (実効値)		
178.57 V	124.57 V	-255.20	254.03 m

図 3.6-102 1 kW 印加時のパワーアナライザ測定画面表示

周波数	伝送効率	送電電力	受電電力
Frequency PH1	Efficiency PH1	Watts PH1	Watts PH2
1.0000 kHz	91.771 %	3.0308 kW	2.7814 kW
Power Factor PH1	Power Factor PH2	RMS Voltage PH1	RMS Voltage PH2
送電側力率	受電側力率	送電電圧 (実効値)	受電電圧 (実効値)
942.54 m	759.39 m	144.72 V	149.63 V
RMS Current PH1	RMS Current PH2	Peak Current PH3	RMS Current PH3
22.219 A	24.479 A	70.244 A	50.696 A
Peak Voltage PH1	RMS Voltage PH1	Phase Phase PH3	Power Factor PH3
送電電流 (実効値)	受電電流 (実効値)		
307.04 V	215.91 V	-255.20	254.08 m

図 3.6-103 3 kW 印加時のパワーアナライザ測定画面表示

3.6.4.3.3. 磁界強度の実測

磁界センサ (Narda 製 EHP50-TS) を用いて通電あり区のコイル中央、およびコイル内側 10 cm の場所の磁界強度 (磁束密度) を測定した。その結果を表 3.6-14 に示す。3 kW ではコイル内側の全域で 1 kW のときの最大磁束密度より大きい磁界があることが確認できた。

表 3.6-14 磁界強度測定結果 (@1 kHz)

測定位置	電力 1 kW	電力 3 kW
コイル中央	595.0-	1019.0
コイル内側 10 cm	999.8	1715.8
職業的暴露レベル	300	
公衆暴露レベル	80	

単位：μT

3.6.4.4. 実験方法

3.6.4.4.1. ブリに対する比較実験の方法

ブリ（体重 1,900～2,500 g/尾，尾叉長 500～560 mm）を用いて，比較実験をニチモウ株式会社 研究開発室（山口県下関市小月小島 2-3-17）において、令和 2 年 7 月 16 日（木）～17 日（金）に実施した。実験開始時の気温は 24.7℃，水温は 23.0℃，溶存酸素計の値は 14.6 mg/l，塩分濃度は 2.6%であった。

比較実験は陸上海水角水槽（長さ 9.0 m×幅 6.0 m×水深 0.6 m）の中央にプラスチック製網（トリカルネット）を設置し，水槽を 2 つに区分して実施した。それぞれの区の中央にコイルを設置し（図 3.6-104），対象魚としてブリを各区に投入した。実験に供したブリは（図 3.6-105），深川水産株式会社（熊本県天草市牛深町 1535-25）にて天然種苗を約 2 年間養殖したものを令和 2 年 7 月 15 日（水）に水揚げし，活魚車（4 トン）にてニチモウ研究開発室へ輸送した。対象魚の水槽に対する馴致を考慮して，水槽への投入後，20 時間後に実験を開始した。

通電は電力 1 kW・周波数 1 kHz で行い，このときコイル中心の磁界強度は 595μT、コイル近傍 10 cm の場所で 1,000 μT であった。なお ICNIRP ガイドラインでは周波数 1 kHz における職業暴露レベルは 300 μT であり，コイル周辺および内側ではレベル以上の磁界が発生している環境を作り出している。

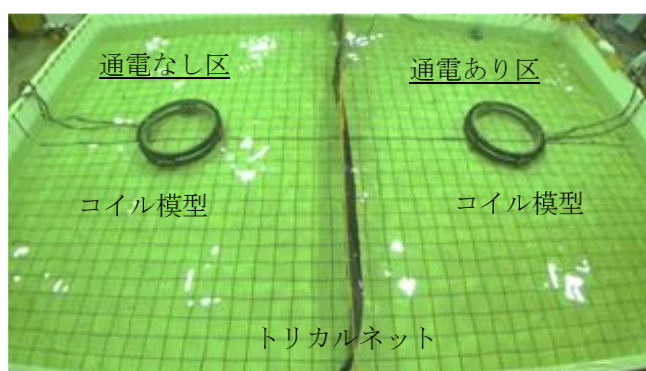


図 3.6-104 ブリの比較実験における通電なし区と通電あり区



学名： *Seriola quinqueradiata*

英名： Japanese amberjack

図 3.6-105 ブリの比較実験の対象魚

比較実験におけるコイルへの通電時間は 1440 分間（24 時間）として、対象魚の行動観察、血中乳酸濃度の計測および各科学分析に用いるサンプルを採取した。つまり、コイルの通電時間有無それぞれの実験区において、通電開始の 5 分後、120 分（2 時間）後、240 分（4 時間）後、360 分（6 時間）後、1440 分（24 時間）後に分析するためのサンプルを採取した。サンプル採取においては、2 つの区からそれぞれ 3 尾（検体）をタモ網により 1 尾ずつ取り上げた。ブリがコイルに対して忌避行動を示すかを確認するため、および、生存のための遊泳範囲の確保のために、本実験においてブリの投入範囲はコイルの外側とした（図 3.6-106）。

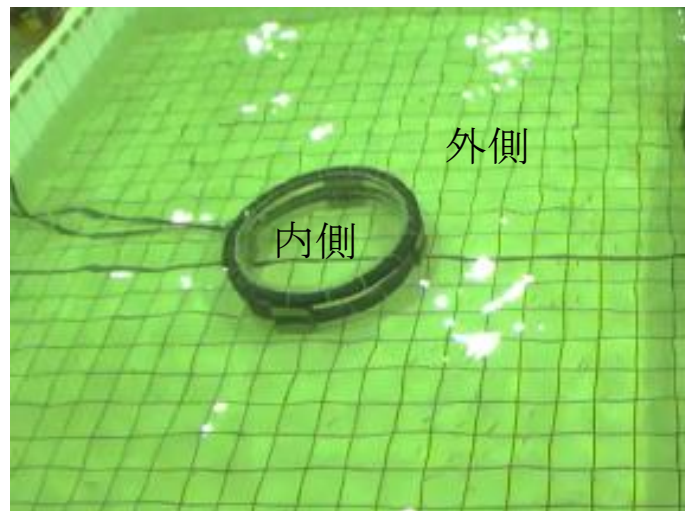


図 3.6-106 コイルの内側と外側

A 行動観察

通電開始後、2 つの区における対象魚の行動をビデオカメラ（SONY、HDR-CX680）により、通電時間（1440 分）中、各サンプリング前に約 10 分間撮影した（図 3.6-107）

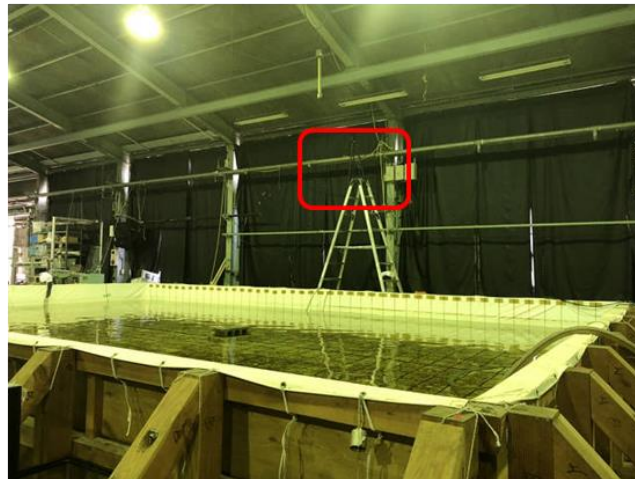


図 3.6-107 行動観察に用いたビデオカメラの設置位置（赤枠内がビデオカメラ）

B 血中酸素濃度

対象魚（検体）の血中乳酸濃度は、シリンジ（2.5 mL、注射針 22G）を用いて各検体の腹側尾柄部から血液約 0.5 mL を採取した後、ラクテート・プロ 2（アークレイ社製、LT-1730）を用いて計測した（図 3.6-108）。なお、サンプリング作業を要因とする計測誤差の発生を避けるため、サンプリング（検体の取り上げ）から血液の採取完了までに 3 分以上要した検体については実験対象から除外した。



a) 腹側尾柄部からの血液の採取



b) ラクテート・プロ 2 による血中乳酸濃度の計測

図 3.6-108 実験対象魚からの血液採取と計測手順

C 背側可食部の ATP 含量

背側可食部中 ATP 含量の分析用サンプルは、延髄刺殺した検体から背側可食部を約 5 g 採取した後（図 3.6-109）、ドライアイスにより凍結し、マイナス 80 °C の冷凍庫で保管した。作成した分析サンプルは、公益財団法人・函館地域産業振興財団・北海道立工業技術センターへ冷凍搬送した後、HPLC（高速液体クロマトグラフ）により ATP 含量を分析し

た。

背側可食部の遊離アミノ酸分析については、ATP 含量の分析と同一のサンプルを用いて HPLC により分析した。



(a) 背側可食部の採取



(b) サンプルのドライアイスによる凍結

図 3.6-109 対象魚からの背側可食部の分析サンプル採取

3.6.4.4.2. マアジに対する比較実験と追加実験の方法

マアジ（体重 110～200 g/尾、尾叉長 200～250 mm）を用いて、比較実験をニチモウ株式会社にて、令和 2 年 8 月 26 日（水）～28 日（金）に実施した。実験開始時の気温は 29.7 °C、水温は 21.7 °C、溶存酸素計の値は 8.24 mg/L、塩分濃度は 3.4%であった。

実験に供したマアジは（図 3.6-110）、有限会社リョウセイ（長崎県佐世保市小佐々町矢岳オ 13-5）がまき網漁法により漁獲して一時畜養したものを令和 2 年 8 月 25 日（火）に水揚げし、活魚車（4 トン）にてニチモウ研究開発室へ輸送した。マアジの比較実験についても馴致を考慮し、実験開始は実験対象魚の投入 20 時間後とした。また、投入範囲はコイルの外側とした。

コイルへの送電力条件が異なる場合の影響調査を目的として、比較実験における送電力条件（電力 1 kW・周波数 1 kHz）に加えて、電力 3 kW・周波数 1 kHz という送電力条件についても影響調査実験を実施した（以下、追加実験）。追加実験のコイル中心の磁界強度は 1,019 μ T、コイル近傍 10 cm の場所で 1,715 μ T であった。比較実験時の約 1.7 倍の磁界強度の環境になっている。追加実験においては、常にコイル近傍に対象魚を位置させるために、コイルの内側にマアジを投入した



学名：*Trachurus japonicus*

英名：Japanese jack mackerel

図 3.6-110 マアジの比較実験の対象魚

コイルへの通電時間は 1440 分間（24 時間）として、対象魚の行動観察、血中乳酸濃度の

計測および各科学分析に用いるサンプルを採取した。比較実験および追加実験ともに、サンプリングは通電開始 5 分後、180 分（3 時間）後、360 分（6 時間）後、1440 分（24 時間）後に実施し、検体に対する観察および科学分析方法は、ブリに対する比較実験と同様とした（3.6.4.4.1.A~3.6.4.4.1.C）。

A 血中コルチゾル濃度

血中コルチゾル濃度の分析用サンプルは、血中乳酸濃度の計測に用いた血液と同一のものを遠心分離（13,500 rpm、15 分間）して作製し、上澄み（血漿）をマイナス 80 °C の保冷庫で保管した（図 3.6-111）。

血中コルチゾル濃度の分析用サンプルは、公益財団法人・函館地域産業振興財団・北海道立工業技術センターへ冷凍搬送した後、DetectX Cortisol EIA Kit（Arbor Assay 社製、K003-H1）を用いた ELISA 法（酵素結合免疫吸着法/競合法）で分析した。

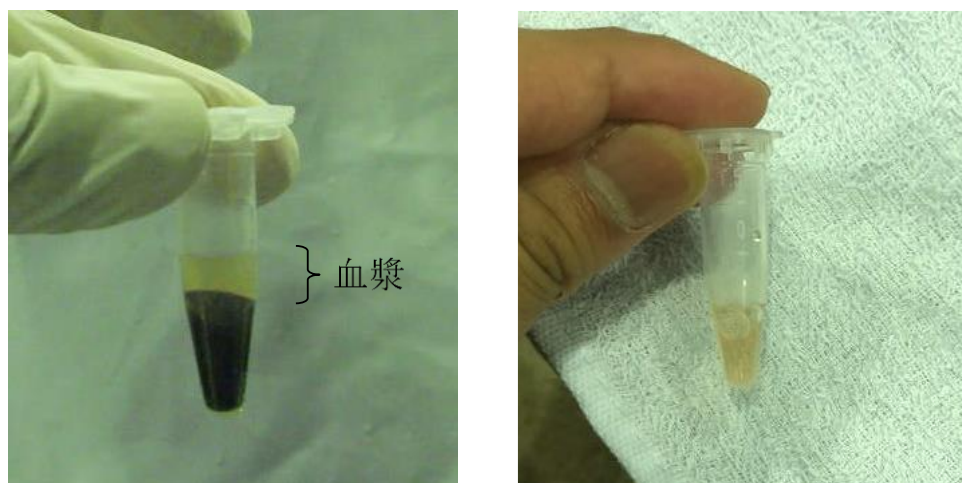


図 3.6-111 遠心分離した血液と血漿

3.6.4.5. 実験結果

3.6.4.5.1. ブリに対する比較実験の結果

A 通電が行動に及ぼす影響

通電開始から 1440 分後までの撮影結果から、ブリの行動に変化（暴れ、逃避、接近など）はなかった（図 3.6-112）。また、通電開始直後およびサンプリング時以外にも目視で観察していたが、行動の変化は確認されなかった。

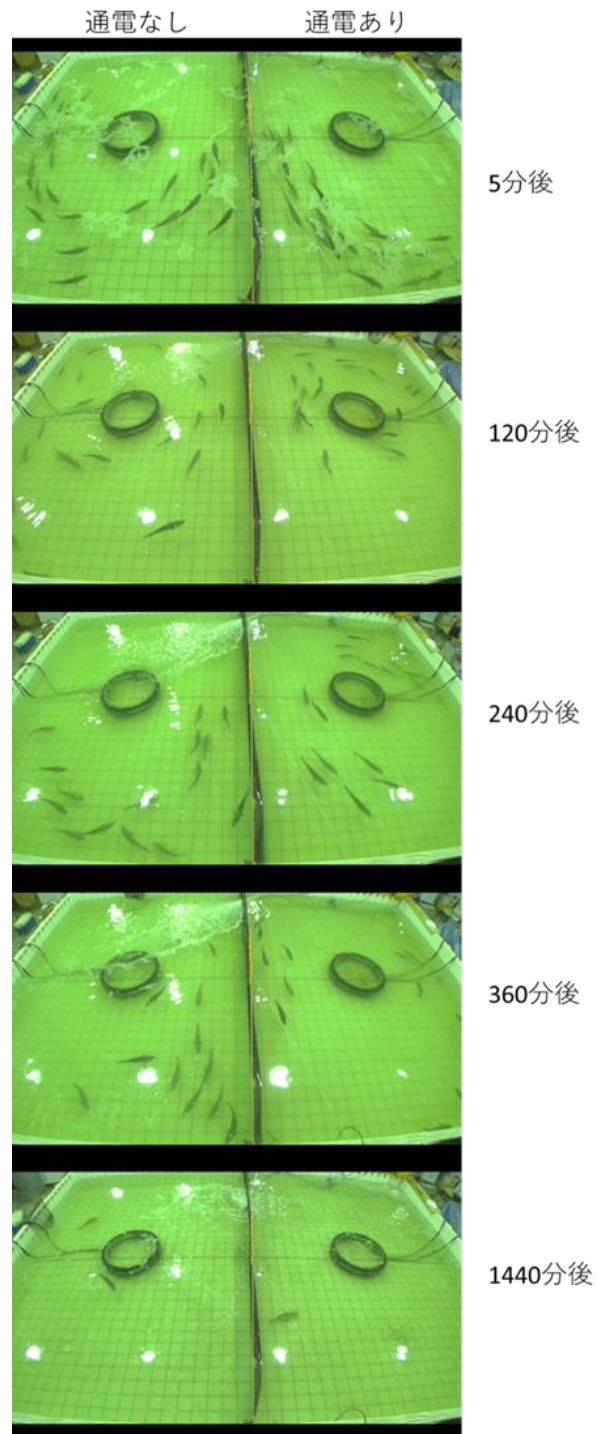


図 3.6-112 ブリの通電5分後、120分後、240分後、360分後、1440分後の様子

B 血中乳酸濃度

計測したブリの血中乳酸濃度の結果を図 3.6-113 に示す。ブリの血中乳酸濃度の平均値は、通電開始5分後のあり区で0.87 mmol/L、なし区で1.13 mmol/L、120分後のあり区で1.00 mmol/L、なし区で1.10 mmol/L、240分後のあり区で0.77 mmol/L、なし区で1.10 mmol/L、

360 分後のあり区で 0.90 mmol/L、なし区で 1.10 mmol/L であった。各サンプリング時間において通電なし区の方が僅かに高い値となったが、優位な差は見られなかった（考察にて後述）。また、通電時間に対する変化も確認されなかった。なお通電開始 1440 分後においては、斃死魚が多く発生し、3 検体ずつのサンプリングが実施できなかったため、平均値での比較はできなかったが、これについても通電有無による違いが見られなかった。

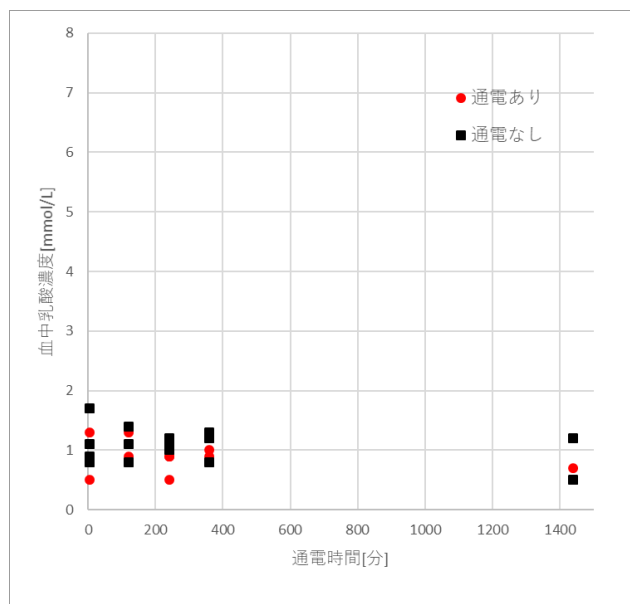


図 3.6-113 ブリの通電時間に対する血中乳酸濃度の計測結果

C 背側可食部の ATP 含量

分析したブリ背側可食部の ATP 含量の分析結果を図 3.6-114 に示す。ブリの ATP 含量の平均値は通電開始 5 分後のあり区で 8.18 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 8.33 $\mu\text{mol/g}$ 、120 分後のあり区で 9.15 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 8.78 $\mu\text{mol/g}$ 、240 分後のあり区で 8.73 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 9.03 $\mu\text{mol/g}$ 、360 分後のあり区で 9.48 $\mu\text{mol/g}$ 、なし区で 9.48 $\mu\text{mol/g}$ であり、通電有無に関わらず通電時間の経過とともに ATP 含量の増加が見られた。また、3.6.4.5.1.B に示した血中乳酸濃度の計測と同様に、通電開始 1440 分後においては斃死により 3 尾の検体について分析できなかったものの、通電有無による違いは見られなかった。これより、通電有無による異なる傾向は見られなかったが、通電時間が長くなるにつれて ATP 含量が若干増加する傾向が確認された。

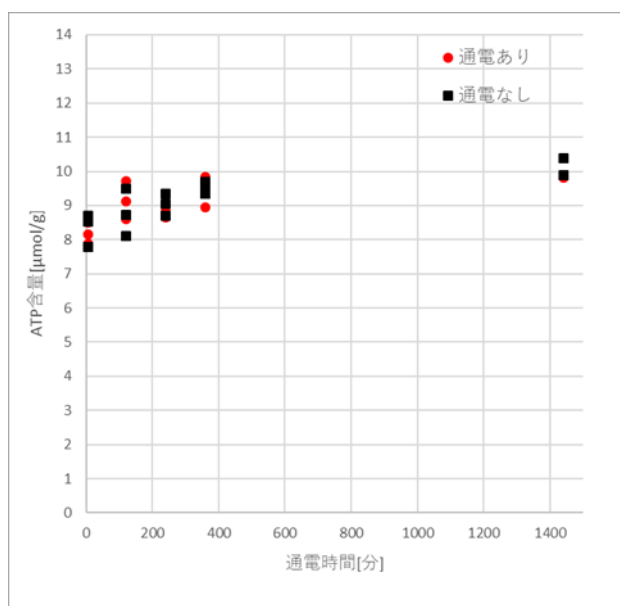


図 3.6-114 ブリの通电時間に対する ATP 含量の分析結果

D 背側可食部の遊離アミノ酸

分析したブリの遊離アミノ酸の結果を表 3.6-15 に示す。これより、通电有無および通电時間による違いは見られなかった。通电有無および通电時間に関わらず、苦み成分であるヒスチジンの値が最も高く、次いでアラニンまたはタウリン、リジンが高い値となった。

ヒスチジンを見てみると、その平均値は通电開始 5 分後のあり区で 1,257 mg/100 g、なし区で 1,345 mg/100 g、120 分後のあり区で 1,320 mg/100 g、なし区で 1,285 mg/100 g、240 分後のあり区で 1,370 mg/100 g、なし区で 1,290 mg/100 g、360 分後のあり区で 1,345 mg/100 g、なし区で 1,359 mg/100 g、1440 分後のあり区で 1,268 mg/100 g、なし区で 1,316 mg/100 g であった。

表 3.6-15 ブリの通電時間に対する遊離アミノ酸

通電時間	5分				120分				240分				360分				1440分						
	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし							
アランin	19	18	26	25	34	27	19	27	23	34	26	31	30	31	25	35	32	36	42	41	55	47	
アルギニン	0	0	5	3	0	0	3	3	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0	0	3	3	0	3
アスパラギン酸	11	9	9	15	5	11	12	13	11	5	9	9	12	10	12	7	6	10	10	6	10	5	9
システイン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
グルタミン酸	13	16	14	12	8	14	12	12	10	9	11	8	13	12	12	11	9	13	12	9	11	10	16
グリシン	10	10	12	12	11	13	8	12	9	11	11	11	11	11	13	10	13	11	14	13	13	14	17
ヒスチジン	1277	1261	1233	1287	1373	1469	1299	1373	1288	1244	1212	1399	1342	1401	1367	1252	1349	1372	1424	1363	1424	1340	1293
イソロイシン	5	5	5	5	3	4	4	5	4	4	4	5	4	4	5	3	5	4	5	4	5	4	6
ロイシン	9	9	9	9	6	8	8	10	7	7	7	9	8	8	8	7	9	9	7	7	9	5	10
リジン	29	30	39	25	29	34	28	30	24	29	19	27	42	45	37	34	33	34	29	34	29	30	38
メチオニン	1	1	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
フェニルアラニン	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2
プロリン	4	4	5	4	3	4	4	4	2	5	3	3	5	4	5	4	5	4	5	5	6	4	8
セリン	12	9	14	13	10	9	10	14	10	13	9	12	13	12	12	11	11	14	13	13	14	11	15
タウリン	33	28	28	35	29	34	28	30	38	32	62	29	30	32	39	32	50	41	38	38	37	38	33
スレオニン	8	8	10	9	8	8	8	9	8	9	7	8	9	9	10	9	10	10	12	9	12	10	15
チロシン	3	3	4	3	3	4	3	4	3	4	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	3	4
バリン	7	7	7	7	5	7	6	8	6	6	6	7	6	7	7	5	7	7	6	6	7	5	8
合計	1441	1419	1422	1466	1529	1649	1454	1554	1444	1413	1390	1567	1531	1597	1563	1425	1545	1418	1625	1550	1602	1488	1524

(単位: mg/100g)

3.6.4.5.2. マアジに対する比較実験と追加実験の結果

A 通電が行動に及ぼす影響

通電開始から 1440 分後までの撮影結果から、マアジの行動に変化（暴れ、逃避、接近など）はなかった（図 3.6-115）。また、通電開始直後およびサンプリング時以外にも目視で行動を観察したところ、同様に変化はなかった。

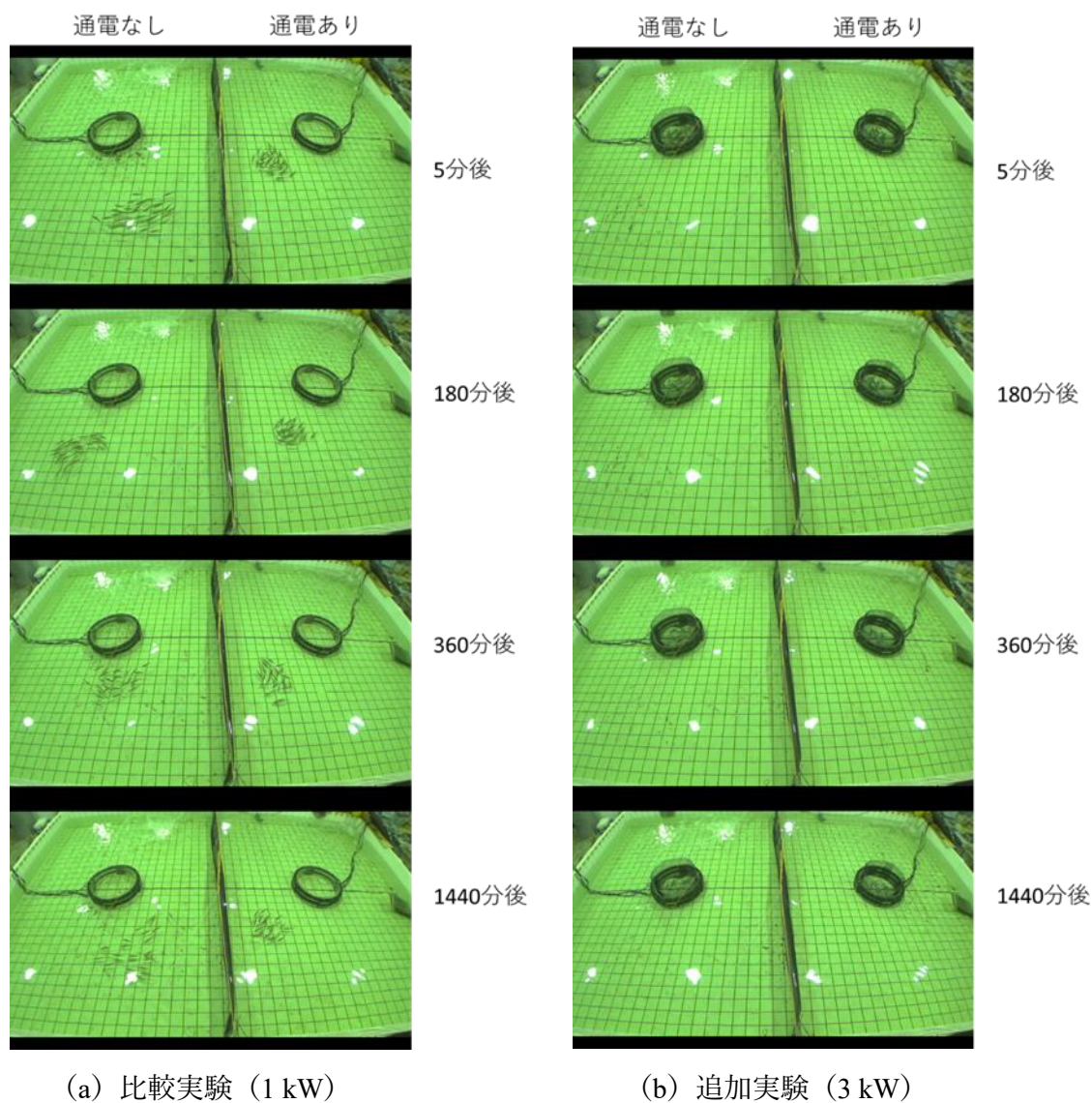


図 3.6-115 マアジの通電 5 分後、180 分後、360 分後、1440 分後の様子

B 血中乳酸濃度

計測したマアジの血中乳酸濃度について、比較実験の計測結果を図 3.6-116 に、追加実験

の計測結果を図 3.6-117 に示す。比較実験におけるマアジの血中乳酸濃度の平均値は、通電開始 5 分後の通電あり区で 4.13 mmol/L、通電なし区で 3.93 mmol/L、180 分後の通電あり区で 8.27 mmol/L、通電なし区で 9.77 mmol/L、360 分後の通電あり区で 3.40 mmol/L、通電なし区で 3.37 mmol/L、1440 分後の通電あり区で 4.50 mmol/L、通電なし区で 7.00 mmol/L であり、通電有無による変化の傾向は見られなかった。

追加実験におけるマアジの血中乳酸濃度の平均値は、通電開始 5 分後の通電あり区で 11.07 mmol/L、通電なし区で 9.53 mmol/L、180 分後の通電あり区で 2.00 mmol/L、通電なし区で 1.33 mmol/L、360 分後の通電あり区で 2.03 mmol/L、通電なし区で 1.63 mmol/L、1440 分後の通電あり区で 1.03 mmol/L、通電なし区で 1.33 mmol/L であり、通電 1440 分後以外では通電あり区の方が僅かに高い値であった。

比較実験における通電開始 5 分後から 1440 分後、および、追加実験における 5 分後では、通電有無でばらつきが見られたが、追加実験においては開始直後を除いては通電有無および通電時間による異なる傾向は見られなかった。

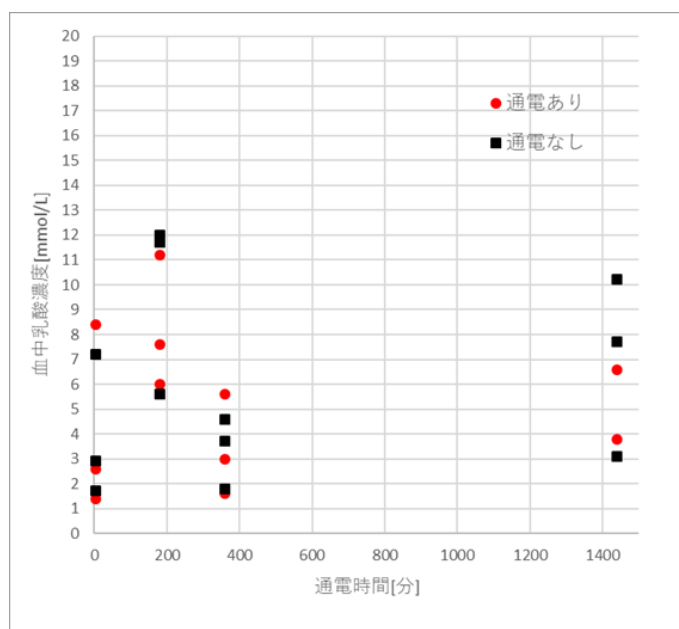


図 3.6-116 マアジの通电時間に対する血中乳酸濃度の計測結果（比較実験、1 kW）

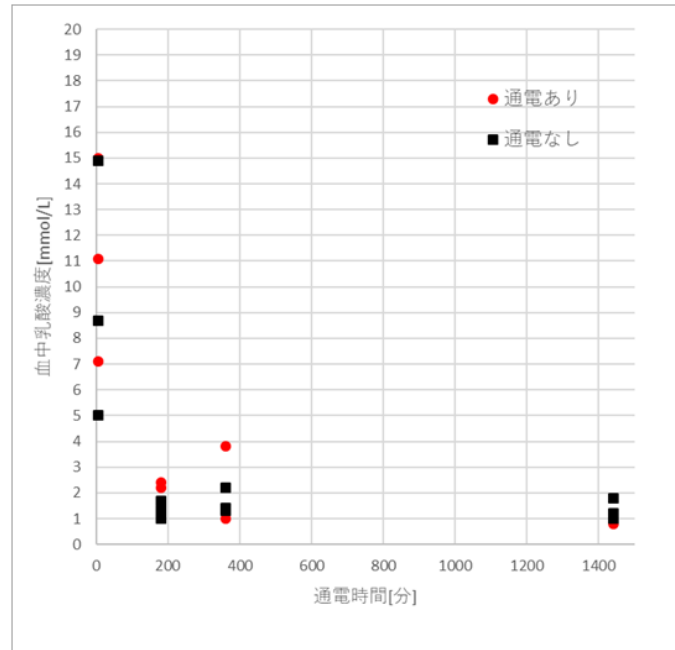


図 3.6-117 マアジの通电時間に対する血中乳酸濃度の計測結果（追加試験、3 kW）

C 血中コルチゾル濃度

血中コルチゾル濃度について、比較実験および追加実験の分析結果をそれぞれ図 3.6-118、図 3.6-119 に示す。比較実験におけるマアジの血中コルチゾル濃度の平均値は、通电開始 5 分後の通电あり区で 251.5 ng/mL、通电なし区で 275.0 ng/mL、180 分後の通电あり区で 157.5 ng/mL、通电なし区で 190.0 ng/mL、360 分後の通电あり区で 41.2 ng/mL、通电なし区で 76.6 ng/mL、1440 分後の通电あり区で 63.1 ng/mL、通电なし区で 54.4 ng/mL であり、通电有無に関わらず、通电時間の経過とともに減少する傾向が見られた。

追加実験におけるマアジの血中コルチゾル濃度の平均値は、通电開始 5 分後の通电あり区で 364.0 ng/mL、通电なし区で 397.3 ng/mL、180 分後の通电あり区で 263.9 ng/mL、通电なし区で 26.0 ng/mL、360 分後の通电あり区で 84.1 ng/mL、通电なし区で 68.4 ng/mL、1440 分後の通电あり区で 230.2 ng/mL、通电なし区で 250.2 ng/mL であった。通电開始 5 分後から 360 分後にかけて、通电有無に関わらず減少する傾向が見られた。通电開始 180 分後において、通电あり区の方が高い値であった。比較実験と追加実験ともに通电有無でばらつきが見られたが、通电有無による異なる傾向は見られなかった。

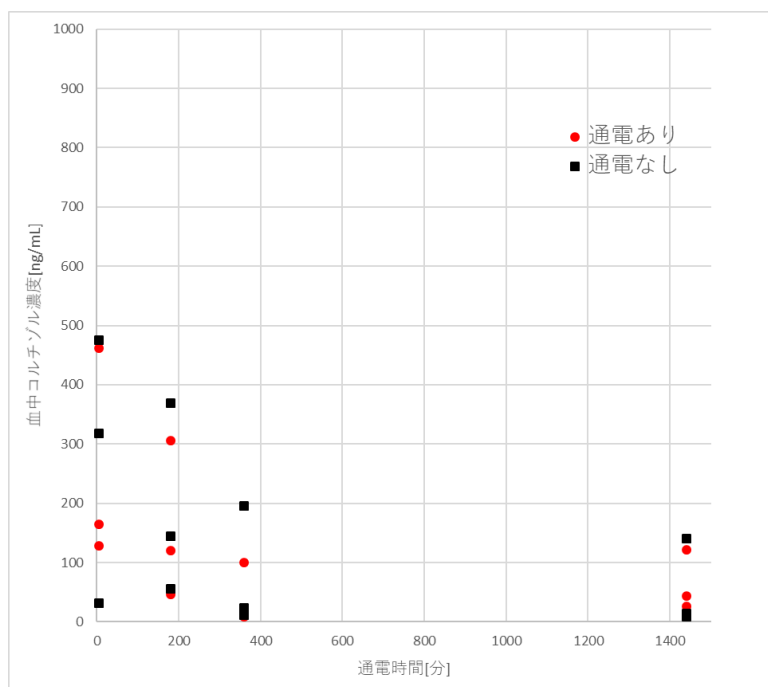


図 3.6-118 マアジの通电時間に対する血中コルチゾル濃度の分析結果（比較実験、1 kW）

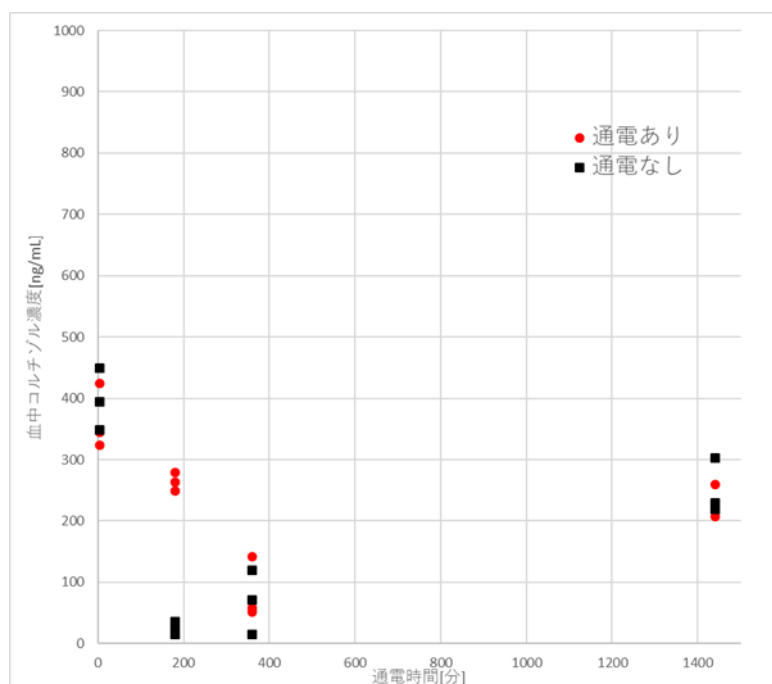


図 3.6-119 マアジの通电時間に対する血中コルチゾル濃度の分析結果（追加実験、3 kW）

D 背側可食部の ATP 含量

マアジの背側可食部の ATP 含量について、比較実験および追加実験の分析結果を図 3.6-120、図 3.6-121 に示す。比較実験におけるマアジの ATP 含量の平均値は、通电開始 5 分後の通电あり区で $4.47 \mu\text{mol/g}$ 、通电なし区で $4.10 \mu\text{mol/g}$ 、180 分後の通电あり区で 3.14

μmol/g、通電なし区で 4.37 μmol/g、360 分後の通電あり区で 5.66 μmol/g、通電なし区で 5.41 μmol/g、1440 分後のあり区で 3.70 μmol/g、通電なし区で 3.40 μmol/g であり、通電有無に関する傾向は見られなかったが、通電時間に対しては通電あり区、なし区ともに通電 360 分後までは上昇傾向であった。

追加実験におけるマアジの ATP 含量の平均値は、通電開始 5 分後の通電あり区で 6.61 μmol/g、通電なし区で 5.16 μmol/g、180 分後の通電あり区で 6.02 μmol/g、通電なし区で 4.25 μmol/g、360 分後の通電あり区で 4.33 μmol/g、通電なし区で 4.88 μmol/g、1440 分後の通電あり区で 5.99 μmol/g、通電なし区で 6.71 μmol/g であり、通電有無に関する傾向は見られなかった。通電あり区、なし区ともに通電 360 分後までは僅かに減少傾向であった。

比較実験、追加実験ともに全体を通してばらつきが見られたが、通電有無および通電時間による異なる傾向は見られなかった。

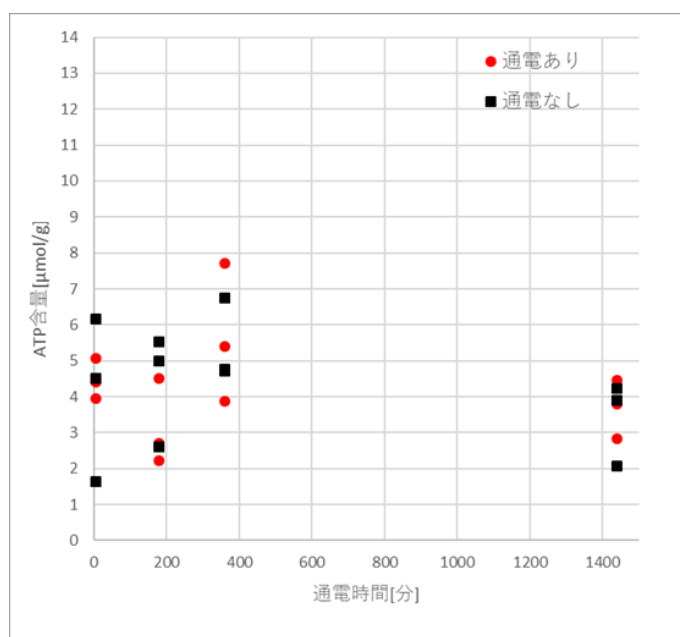


図 3.6-120 マアジの通电時間に対する ATP 含量の分析結果（比較実験、1 kW）

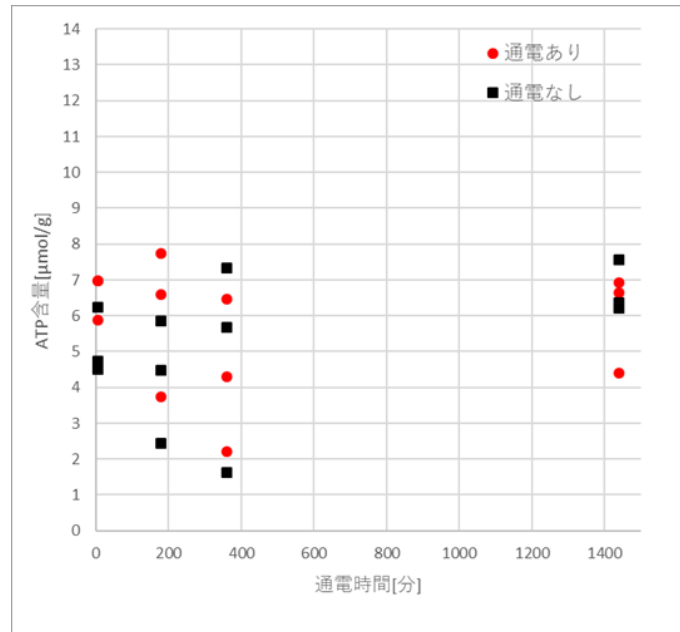


図 3.6-121 マアジの通电時間に対する ATP 含量の分析結果（追加実験、3 kW）

E 背側可食部の遊離アミノ酸

遊離アミノ酸について、比較実験および追加実験の分析結果を表 3.6-16、表 3.6-17 に示す。比較実験・追加実験ともに通电有無および通电時間による異なる傾向は見られなかった。ブリの遊離アミノ酸結果と同様、通电有無および通电時間に関わらず、苦み成分であるヒスチジンが最も高い値であり、次いでアラニンまたはタウリン、リジンが高い値となった。

ヒスチジンを見てみると、比較実験におけるその平均値は通电開始 5 分後の通电あり区で 370 mg/100 g、通电なし区で 385 mg/100 g、180 分後の通电あり区で 368 mg/100 g、通电なし区で 378 mg/100 g、360 分後の通电あり区で 350 mg/100 g、通电なし区で 379 mg/100 g、1440 分後の通电あり区で 384 mg/100 g、通电なし区で 404 mg/100 g であった。

追加実験の平均値は、通电開始 5 分後の通电あり区で 376 mg/100 g、通电なし区で 372 mg/100 g、180 分後の通电あり区で 424 mg/100 g、通电なし区で 355 mg/100 g、360 分後の通电あり区で 362 mg/100 g、通电なし区で 394 mg/100 g、1440 分後の通电あり区で 393 mg/100 g、通电なし区で 402 mg/100 g であり、両試験区の違いは見られなかった。

表 3.6-16 マアジの通電時間に対する遊離アミノ酸（比較実験、1kW）

遊離アミノ酸量 (mg/100g)	5分						180分						360分						1440分					
	あり			なし			あり			なし			あり			なし			あり			なし		
	あり	なし	合計	あり	なし	合計	あり	なし	合計	あり	なし	合計	あり	なし	合計	あり	なし	合計	あり	なし	合計			
アラニン	38	64	23	53	81	59	37	58	34	50	37	60	56	64	53	52	31	56	81	46	43	30	51	53
アルギニン	7	0	5	7	0	6	11	3	4	4	6	8	9	11	6	4	7	4	4	11	10	6	12	8
アスパラギン酸	7	0	4	0	0	0	6	0	0	3	7	3	5	6	0	0	6	4	0	5	7	0	13	8
システイン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
グルタミン酸	16	11	13	14	7	8	22	15	14	5	17	8	11	9	11	10	19	10	13	18	26	13	25	14
グリシン	24	24	25	28	20	19	23	24	21	25	13	20	22	26	26	24	15	23	25	23	21	28	24	24
ヒスチジン	340	393	376	372	463	321	342	374	387	393	412	328	317	339	393	378	374	384	371	428	353	332	410	469
イソロイシン	7	3	6	4	4	4	5	4	4	5	6	5	4	6	5	4	5	4	4	7	7	5	7	7
ロイシン	11	6	9	8	7	7	8	6	7	7	9	9	7	9	8	6	7	7	8	11	10	9	10	12
リジン	68	34	54	90	23	73	80	35	58	55	63	97	72	95	71	48	53	45	53	94	94	71	114	63
メチオニン	3	3	3	5	3	2	3	2	3	2	3	4	2	3	4	2	2	3	4	4	4	4	4	5
フェニルアラニン	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2
プロリン	11	6	8	6	10	7	8	3	6	10	5	8	9	15	10	8	7	10	7	15	17	11	12	11
セリン	13	13	11	19	9	10	13	13	13	13	12	12	13	15	15	12	12	13	16	19	15	15	22	18
タウリン	80	51	80	89	63	80	71	80	40	55	61	86	75	77	54	75	74	66	52	66	54	92	78	104
スレオニン	15	11	11	14	9	12	13	11	11	12	11	13	12	14	13	13	12	11	20	17	16	14	20	15
チロシン	2	2	2	3	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	3	1	4	3	3	4	4
バリン	9	6	7	6	6	6	7	5	6	7	8	7	6	8	6	6	7	7	7	9	9	7	10	10
合計	653	627	637	718	708	615	651	636	610	648	672	670	625	701	676	644	635	653	665	778	690	642	817	826

表 3.6-17 マアジの通電時間に対する遊離アミノ酸（追加実験、3 kW）

通電時間	5分		180分		360分		1440分																		
	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし																	
アラニン	89	106	55	51	57	45	27	91	85	52	41	69	50	57	44	43	42	30	61	52	83	77	35	32	
アルギニン	4	8	7	10	6	8	9	5	7	11	6	6	6	6	6	9	6	10	9	0	6	11	9	10	7
アスパラギン酸	4	0	3	7	7	0	0	5	5	4	0	0	5	10	5	4	7	6	5	7	7	6	11	3	
システイン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
グルタミン酸	12	7	13	15	15	7	13	11	9	12	11	14	12	25	18	14	22	31	13	14	11	9	31	10	
グリシン	24	28	27	24	27	20	26	31	17	29	27	22	21	29	21	27	31	23	30	22	31	26	28	24	
ヒスチジン	335	364	374	322	389	406	460	456	357	300	388	377	363	367	357	378	442	361	377	441	361	372	453	381	
イソロイシン	5	7	5	5	6	6	7	7	7	6	6	6	5	8	6	5	7	7	6	7	8	8	11	8	
ロイシン	11	12	8	8	10	10	12	12	12	8	9	10	8	12	9	8	11	11	11	13	14	14	18	14	
リジン	72	73	65	80	63	82	97	79	72	101	64	72	56	79	70	65	88	83	60	87	126	87	125	109	
メチオニン	2	4	4	3	4	4	3	5	5	3	3	4	3	4	4	3	4	4	4	4	6	5	5	7	
フェニルアラニン	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	
プロリン	15	13	11	10	13	11	11	16	9	13	12	11	8	14	14	13	15	14	13	14	18	19	22	17	
セリン	17	16	17	14	20	16	16	19	15	16	13	17	15	18	16	15	20	18	20	20	22	22	21	21	
タウリン	88	81	99	85	99	58	76	84	65	69	111	69	73	72	70	99	93	83	117	92	61	71	78	80	
スレオニン	16	15	15	16	18	14	14	21	13	15	14	15	15	24	17	14	18	17	17	19	24	21	25	18	
チロニン	3	2	3	2	3	3	4	3	5	3	2	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	5	
バリン	8	10	7	7	8	8	10	10	9	8	8	8	8	10	8	8	9	10	8	10	11	11	14	11	
合計	705	746	714	661	745	699	786	857	693	651	716	704	652	737	672	704	824	711	746	811	795	764	891	751	

遊離アミノ酸の種類
(単位/100g)

3.6.4.6. 考察

本研究における海中ワイヤレス給電を行うためには、海中に設置されたコイルへ大電力を送電する必要がある。その際、コイル周辺には強電磁界が発生することが予測される。そこで、この強電磁界が周辺の魚類に与える影響について調査するため、ブリおよびマアジを対象とした実験的調査を実施した。ブリに対しては1種類の送電条件について実験し（比較実験）、マアジについてはこれに加えて計2種類の送電条件について実験した（比較実験と追加実験）。比較実験および追加実験において、2つの区を設けた陸上海水角水槽を準備し、それぞれの区の中央にコイルを設置して対象魚を投入し、一方のコイルのみに一定時間通電した。このときの実験対象魚の行動、ストレス指標および背側可食部の呈味性に及ぼす変化について通電有無の2区で比較した。結果、本実験においてコイルへ通電することで発生すると考えられる強電磁界よりブリおよびマアジが受ける影響は、すべての評価項目において小さい、または、確認されなかった。

コイルへ通電した時の対象魚の行動観察において、通電開始から1440分（24時間）後までに特異的な変化が確認された対象魚（検体）は、ブリ、マアジともなかった。これは後述する、実験対象魚のATP含量に差が生じていないことから確認できる。一般に魚類の行動変化が発生した場合、その行動による生体内のエネルギー消費はATP含量の変化を生じることがあるが、本実験で評価した対象魚のATP含量は、通電有無に対して変化は小さかった、または、なかった。これらの結果により、コイルへの通電により周囲に存在する魚類の行動に及ぼす影響は少ないと考えられる。

ストレス指標として血中乳酸濃度および血中コルチゾル濃度を計測、分析した。ブリを対象とした実験において、通電有無と通電時間に対して顕著な影響は確認されなかった。一方で、マアジを対象とした実験においては比較実験では各サンプリングでばらつきが大きいものの、追加実験では通電開始直後以外のばらつきが小さくなった。これは、追加実験ではコイルの内側にマアジを投入したため、遊泳範囲が限られたことでマアジの運動量が制限されたことによる乳酸濃度の低下と考えられる。追加実験における通電開始直後は、コイル内側に投入する際に運動した影響が表れていると考えられる。

ブリを実験対象として実施した実験における血中乳酸濃度の計測値は、通電有無のそれぞれの検体に有意差は認められなかった（いずれのサンプリングにおけるt検定についても $p>0.05$ 、以下同様）。マアジを実験対象とした実験における血中乳酸濃度も、比較実験、追加実験ともに、通電有無による違いはそれぞれの検体について確認されなかった（ $p>0.05$ ）。ただし、マアジの血中乳酸濃度において、比較実験よりも追加実験の方が最終的な値が低く、通電時間に伴い減少することが確認された。これは追加実験におけるマアジの遊泳範囲の違いに起因することであるとされる。つまり、比較実験においてはコイル外側にマアジが存在したため広範囲を遊泳することができたが、追加実験においてはコイル内側にマアジが存在したために遊泳範囲が限られ、運動量が小さくなったことにより血中乳酸濃度が低くなったと考えられる。今後同様の実験を実施する際に実験条件を一

定とするためには、魚体に合わせて遊泳範囲を設定する必要があると考えられる。

マアジの血中コルチゾル濃度は、追加実験の一部を除き、通電有無による違いはそれぞれの検体に有意差は確認されなかった ($p>0.05$)。違いが確認されたマアジ追加実験の通電180分後では、通電有無に関わらずストレスが小さくなっていた。これは、短い馴致時間による安静状態のばらつきと考えられ、通電有無によるものではないと考えられる。

活ベ直後の魚類の ATP 含量は $6\sim 10\ \mu\text{mol/g}$ 程度であり [44][45][46]、今回の実験における分析結果はこれと同程度であり、適切な分析であったと言える。背側可食部の ATP 含量は、ブリおよびマアジにおいて通電有無による違いはそれぞれの検体に有意差は確認されなかった ($p>0.05$)。マアジを対象とした実験において、ばらつきが見られたものの、通電有無の両区についてばらつきが見られたため、コイルへの通電に起因するものではないと考えられる。

ブリおよびマアジの背側可食部の遊離アミノ酸組成は、通電有無の違いによりそれぞれの検体に有意差は確認されなかった ($p>0.05$)。これより、今回の実験においては、背側可食部の呈味性は通電有無と通電時間により顕著な影響を受けなかったと考えられる。これより、コイルへの通電が周囲の魚類の呈味性に及ぼす影響は小さい、または、ないと言える。結果で述べた通り、ブリとマアジの遊離アミノ酸組成において苦み成分のヒスチジンが最も高い値であった。一般にマグロやカツオなどの赤身魚は、タイやスズキなどの白身魚に比べて筋肉中の非たんぱく態窒素量が多く、その大半はヒスチジンによって占められている。そのため、赤身魚では遊離アミノ酸においてヒスチジンが主成分となり、ブリでは $1,000\ \text{mg}/100\ \text{g}$ 以上の値が計測されることが報告されている [47]。マアジにおいても同様にヒスチジンが主要成分であるが、含量はブリよりも低い。また、今回分析されたタウリンは、生体の恒常性（ホメオスタシス）維持に関与する成分であり、魚類では内臓系に多く存在する [48]。また、アラニンおよびグリシンは、水産物の呈味に特徴的な成分であり、イカなどの軟体類に多く含まれる [49]。昨年度の比較実験では、官能試験を実施し、通電有無と通電時間による影響は少ないと評価した。今後、マダイおよびシマアジについても、遊離アミノ酸組成分析を行い、官能試験との相互性を確認することが望ましい。

本実験の結果より、コイル周辺のブリ、マアジは通電に影響されない、または影響が小さいということが示唆された。ぶり類は西日本地区（特に、愛媛県、九州地区）で多く養殖されており、あじ類は西日本地区（特に山口県、九州地区）でまき網漁業などにより漁獲されており、いずれも水産業において重要なものである。本実験の結果によると、海中給電に用いるコイルがこれらの養殖業、漁業へ顕著な影響を与える可能性は低いと考えられる。

ブリを対象とした比較実験において、1440分後までに斃死が多く確認された。これは溶存酸素量の低下に加えて、水質の悪化が原因であると推察される。ブリなどの大型魚を陸上に設置した水槽で長時間生存させることは難しく、コイルへの通電以外の環境的影響も発生してしまった可能性がある。これらを解消するためには、より大型の水槽、または、海水面での実験も検討する必要があると考えられる。

本事業におけるこれまでの影響調査実験において（過去2年を含む）、コイルへの通電によって魚類の行動およびストレス指標への影響は確認されなかった。これについてさらに検証するため、マアジを対象として、より強い磁界（10 mT、比較実験のコイル近傍の約10倍の磁界に相当）を発生できる小型コイルを用いて行動観察を実施した。つまり、小型水槽に設置した小型コイル内側にマアジ1尾（検体）を位置させ、通電開始および通電中の行動を観察した（図 3.6-122）。この結果、実験対象魚のマアジに行動変化は確認されなかった。さらに、コイルへの通電時、振動によってコイルから微量な音の発生が予想されるため、音がマアジに及ぼす影響について調査した（図 3.6-123）。水中スピーカ（パナソニックより提供）を用いて、50 Hz、100 Hz、200 Hz、400 Hz、600 Hz、800 Hz、1,000 Hz、10,000 Hzの音を発生させ、これに対するマアジの行動を目視で観察した。結果として、50 Hzおよび100 Hz、200 Hzの発音時に行動変化（方向転換）が見られ、なかでも100 Hzの発音時の行動変化が最も大きかった。このため今後は、海中ワイヤレス給電装置から発生する音について調査し、音が魚類に及ぼす影響について検討する必要があると考えられる。

今年度までは陸上に設置した水槽において、コイルへ通電した際の周囲の魚類（主に幼魚や小型魚）に対する影響を調査したが、実際の漁業現場での影響調査実験は未実施である。今後は実際の漁業現場（養殖場など）におけるフィールド実験や、さらに、広範囲を回遊する魚類（さけ類など）の成魚に対する影響を調査する必要があると言える。

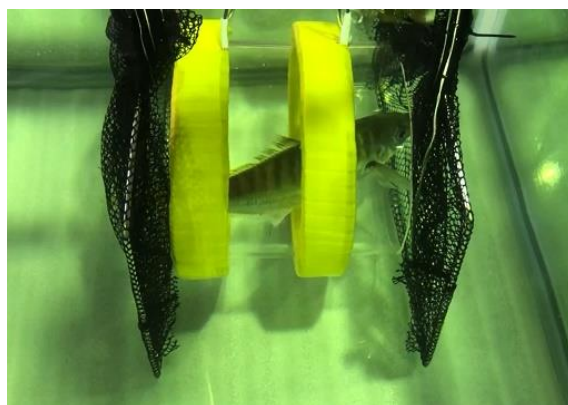


図 3.6-122 小型コイルを用いた行動観察実験の様子

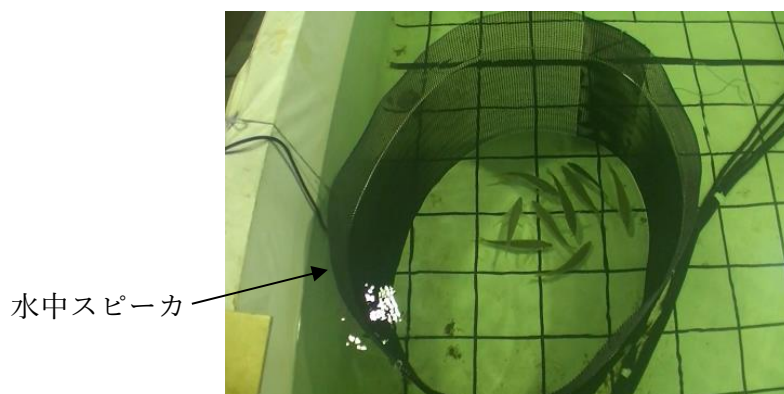


図 3.6-123 音がマアジに及ぼす影響調査の様子

3.6.5. 3 kW 電力印加実験（マダイ、15 日間）

3.6.5.1. 実験の概要

3 kW の電力伝送で発生する電磁界がマダイ（成魚）に影響を与えるのか、実際の養殖現場で成長度を調査した。

【実験期間】2021 年 10 月 19 日～11 月 9 日（環境構築、実験（15 日間）、撤収）

3.6.5.2. 実験場所

3.6.1 および 3.6.2 の実験と同じく深川水産株式会社で実施した。ただし本実験では、陸上生簀ではなく岸壁近くに設置した角形網生簀を用い、実際の海で実験した。岸壁の様子を図 3.6-124 に示す。



図 3.6-124 実験場（深川水産の岸壁と生簀）

3.6.5.3. 実験用ワイヤレス給電システム

これまでの実験で用いた直径 1 m のコイルではなく、大きな生簀に合わせて直径 2 m のコイルを用いてシステムを構成した。

3.6.5.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要

コイルを 3 つ連結して作製した充電スタンド（3.4.2.8 参照）のコイルを 1 つずつ分割した形のコイルを 4 つ準備した。使用している電線、巻き数、パイプ形状も全て充電スタンドのコイルと同じ仕様になっている。2 つを 1 組にしてワイヤレス給電システムを構成し、2 組作製して生簀に設置した。概略図を図 3.6-125 に、生簀への設置イメージを図 3.6-126 に、設置した写真を図 3.6-127 に示す。

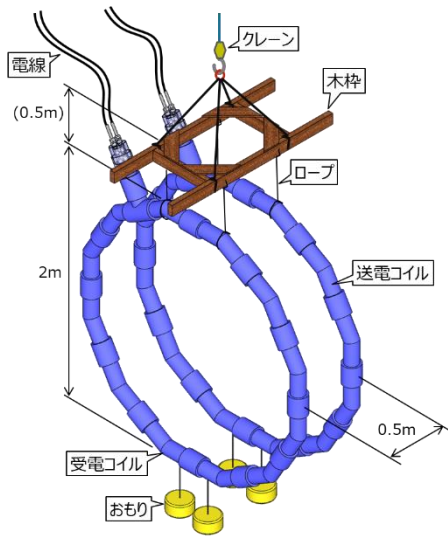


図 3.6-125 コイル組の概略図

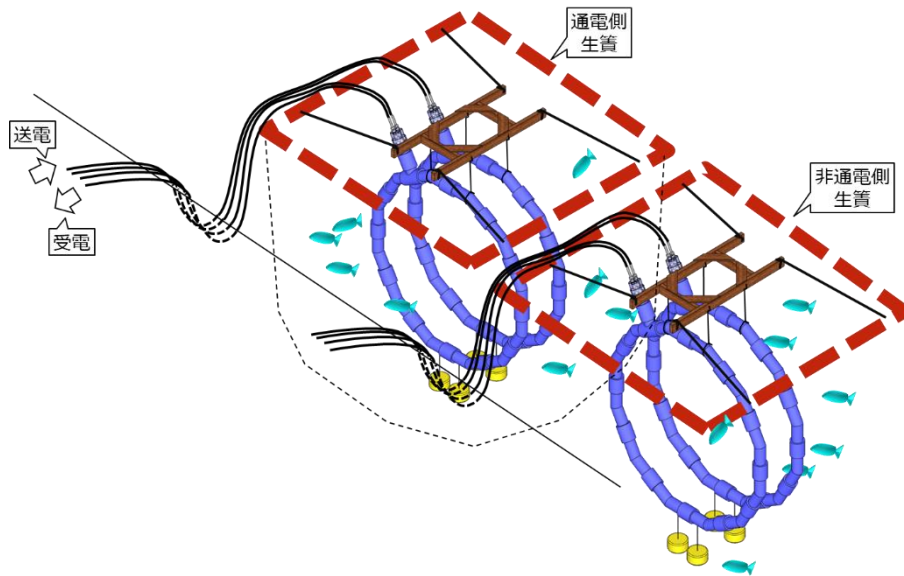


図 3.6-126 生簀へのコイル設置イメージ図



図 3.6-127 生簀へのコイル設置状況

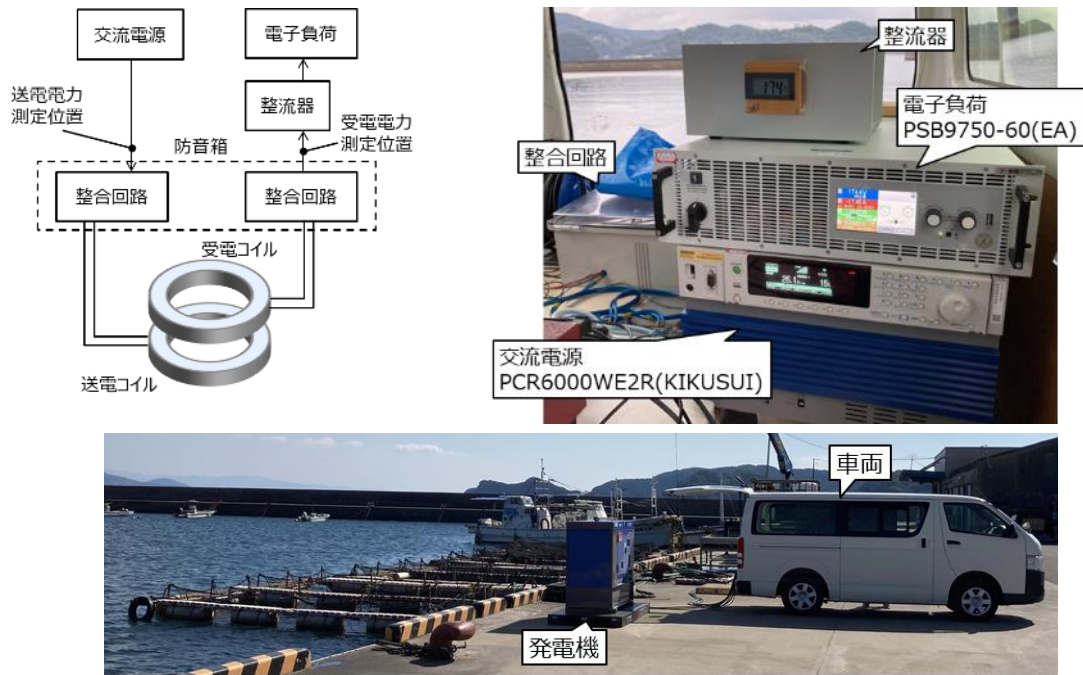


図 3.6-128 3 kW 電力印加実験（マダイ、15 日間）の実験系

図 3.6-128 は本実験に用いた機器の接続図と実施状況を示している。岸壁近くに停めた車両に積載した機器に発電機から電力を供給する方法で屋外実験系を構築した。

3.6.5.3.2. 伝送電力の確認

この実験系を用いて約 7.5 時間の 3 kW 電力伝送を実施した時の送受電電力のログを図 3.6-129 に示す。安定して受電電力 3 kW が維持でき、かつ伝送効率も 85% の高効率であることが確認できた。このときの海水コンディションを表 3.6-18 に示す。

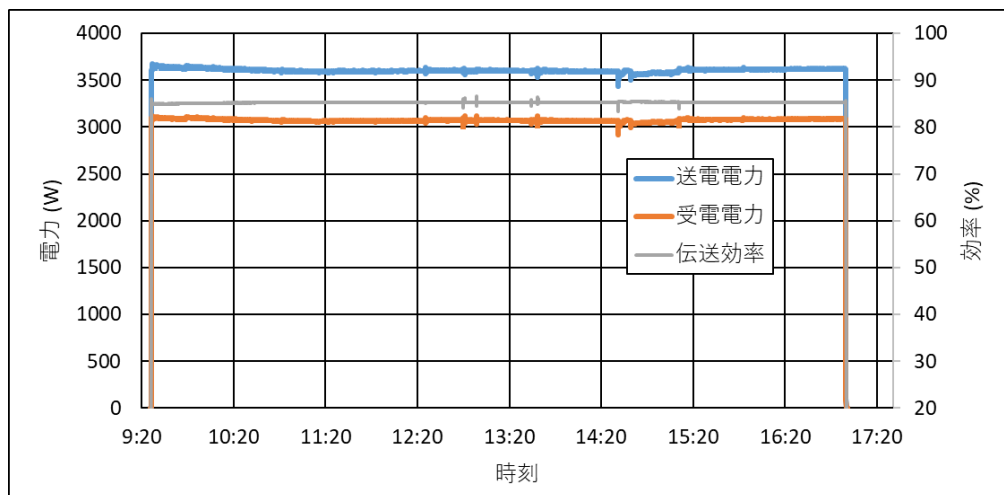


図 3.6-129 3 kW 伝送時の送受電電力と効率

表 3.6-18 生簀の海水コンディション

水温	導電率 (25°C換算)	塩分濃度 (25°C換算)
23.8 °C	4.96 S/m	3.22%

3.6.5.3.3. 磁界強度の測定

3 kW 電力伝送中の磁界強度を Narda 製 EHP50-TS で測定した生簀内の箇所を図 3.6-130 に、測定値を表 3.6-19 に示す。通電したコイル近傍では 1 mT を超える磁界があり中心部でも ICNIRP ガイドラインの職業的暴露レベルを超える磁界があることが確認でき、通電していない側の生簀の磁界は公衆暴露レベル以下であることから、比較実験の環境は正しく構築できたと考える。

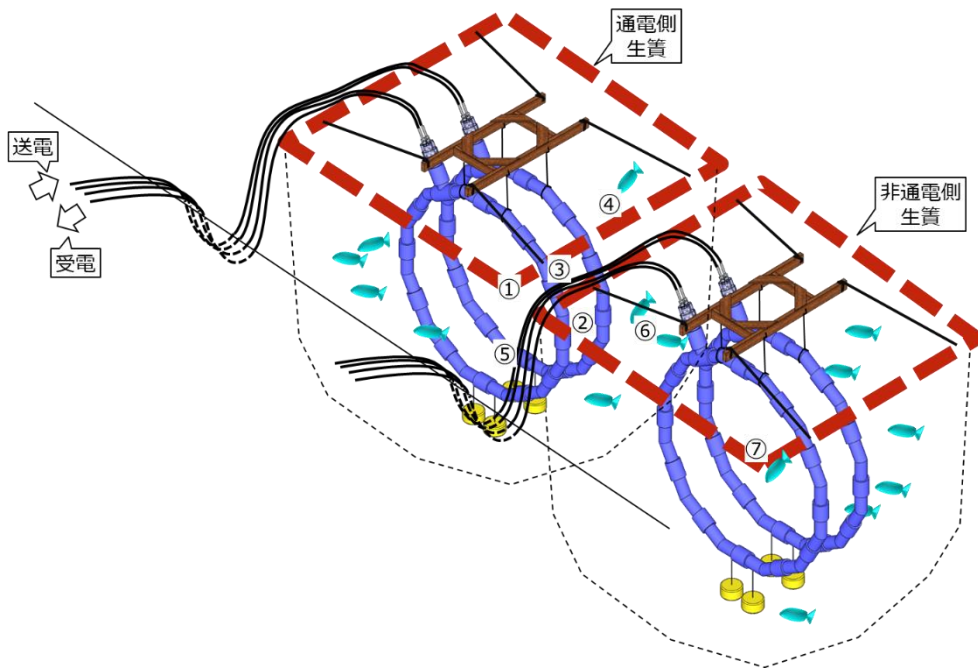


図 3.6-130 磁界強度測定箇所 (図中 ①～⑦)

表 3.6-19 磁界強度測定結果 (生簀内、@1 kHz)

測定位置		実測値
①	コイルの中心	460
②	送電コイルと受電コイルの間	565
③	コイルのすぐ傍	1313
④	水面付近	85
⑤	コイル間の生簀底側	486
⑥	非通電側の水面付近	11
⑦	非通電側のコイルの中心	7

職業的暴露レベル	300
公衆暴露レベル	80

単位：μT

3.6.5.4. 実験方法

角形網生簀（図 3.6-131、長さ 7.0 m×幅 3.5 m×深さ 4.0 m、以下、生簀と呼ぶ）を 2 つ設置し、それぞれの生簀に海中ワイヤレス給電装置（図 3.6-125、直径 2.0 m、空中重量 100 kg（コイル 1 つの重量）、以下、コイルと呼ぶ）を海面下 50 cm となるよう設置した（図 3.6-132）。

2 つの生簀には、マダイ成魚（図 3.6-133、尾叉長：約 360 mm、体高：約 130 mm、体幅：約 65 mm、体重：約 1150 g）をそれぞれ 25 尾放流した。

実験では、10 月 25 日から 11 月 8 日までの 15 日間のうち 8 日間、片方のコイルに 3 kW、1 kHz の条件で 8 時間/日の通電を午前 9 時～午後 5 時に行い、15 日後にそれぞれの生簀からサンプルを抽出してマダイの尾叉長、体高、体幅及び体重を計測した。2 つの生簀はそれぞれ通電あり区と通電なし区と設定し（図 3.6-131）、実験時には生簀に海面を覆うよう遮光シートを設置した。

実験魚に対する馴致時間は放流後 24 時間とし、給餌は日清丸紅飼料株式会社製 EP（Extruded Pellet、長さ 6 mm、図 3.6-134）を 10 g/尾/日の量で、午前 9 時と午後 4 時の 2 回行った。実験時の気温は 20.6～24.5℃、水温は 22.7～23.7℃、生簀周辺における海水の溶存酸素量は 6.88～7.21 mg/L、海水の塩分濃度は 3.2～3.7‰、海水の pH は 7.9～8.0 であった。



図 3.6-131 養殖現場における生簀の設置



図 3.6-132 生簀内のコイル設置状況



学名： *Pagrus major*
英名： Red seabream

図 3.6-133 実験に用いたマダイ成魚



図 3.6-134 餌 (EP)

3.6.5.5. 実験結果

放流直後と 15 日後にサンプリングした通電あり区と通電なし区におけるマダイの尾叉長を図 3.6-135、体高を図 3.6-136、体幅を図 3.6-137、体重を図 3.6-138 に示す。尾叉長の平均値は、通電あり区の場合、放流直後→15 日後で 380 mm→383 mm (以下同様に表記) と成長率は 0.8%、通電なし区の場合、383 mm→387 mm と成長率は 1.3%であった。体高の平均値は、通電あり区の場合、132 mm→133 mm と成長率は 0.8%、通電なし区の場合、136 mm→136 mm と成長率は 0%であった。体幅の平均値は、通電あり区の場合、63 mm→65 mm と成長率は 3.2%、通電なし区の場合、63 mm→65 mm と成長率は 3.1%であった。体重の平均値は、通電あり区の場合、1,182 g→1,190 g と成長率は 0.7%、通電なし区の場合、1,194 g→1,218 g と成長率は 2.0%であった。

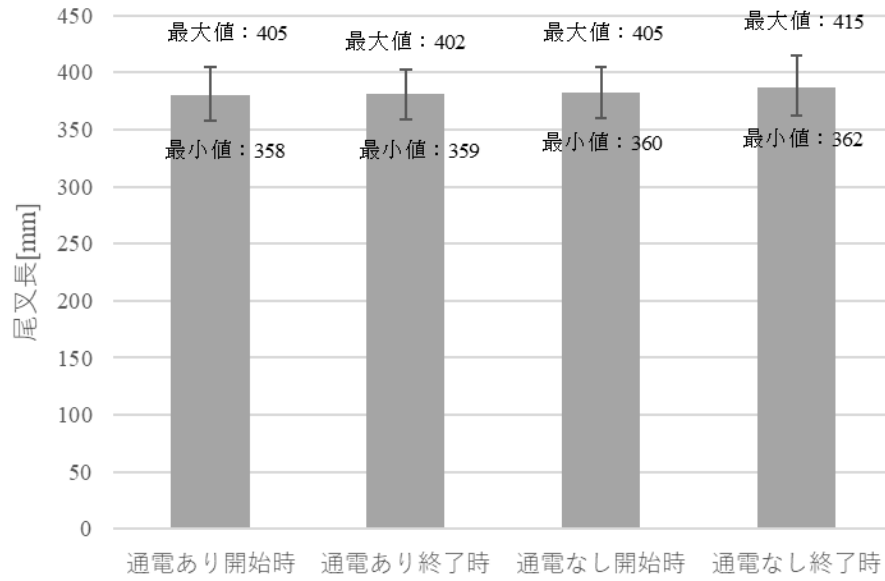


図 3.6-135 通電有無による実験魚の尾叉長変化

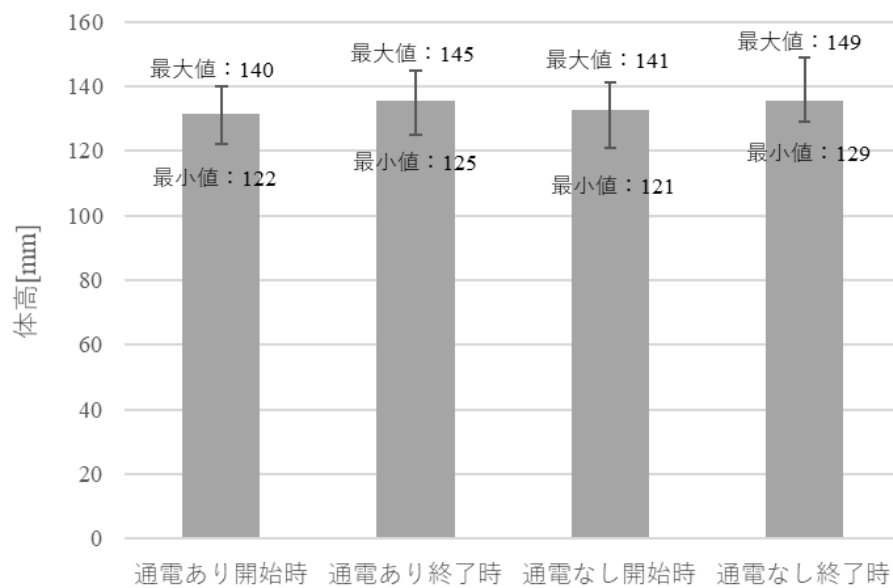


図 3.6-136 通電有無による実験魚の体高変化

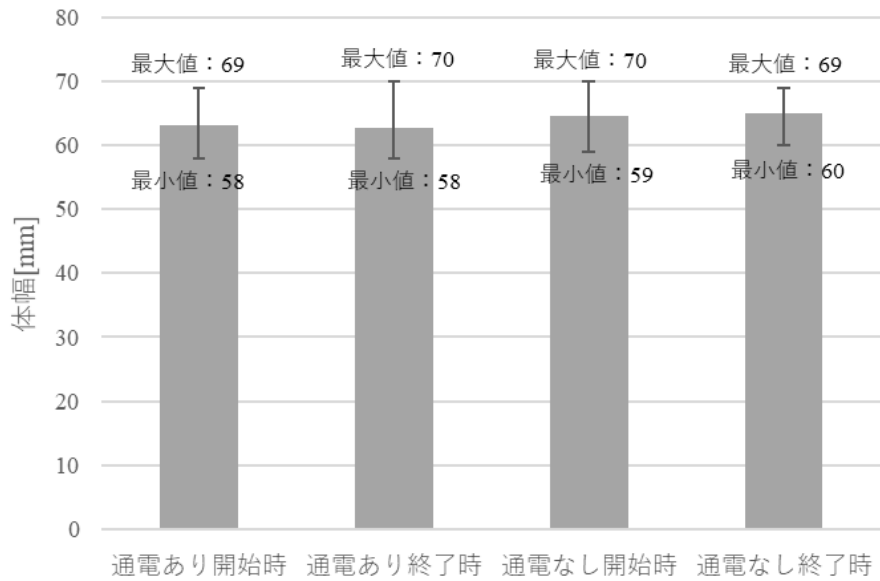


図 3.6-137 通电有無による実験魚の体幅変化

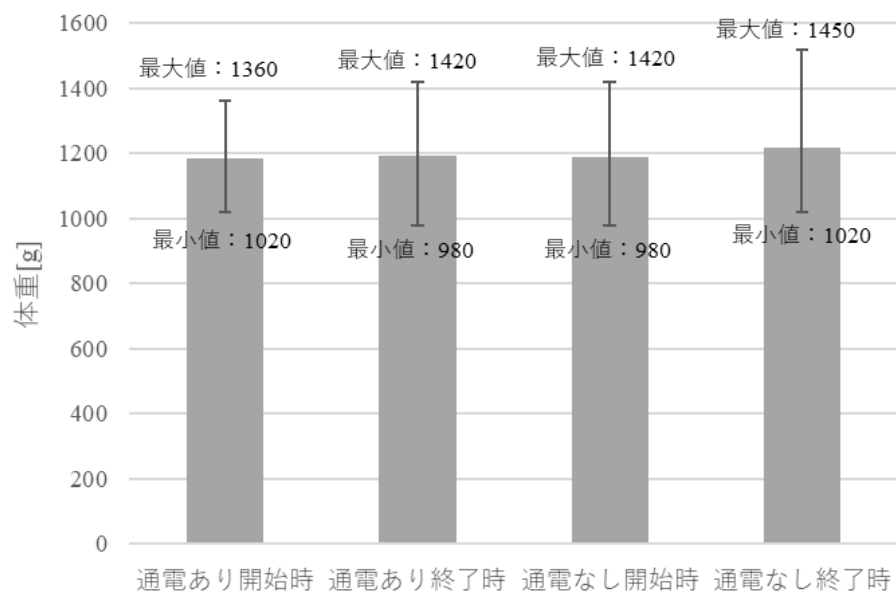


図 3.6-138 通电有無による実験魚の体重変化

3.6.5.6. 考察

実養殖現場において強電磁界が発生していると考えられる状況における成長度の調査において、マダイに対して通电による成長率の変化は見られなかった。これまでに行った 3.6.1 から 3.6.4 の実験より、陸上水槽における 1 日の通电（最大 1440 分）による行動、ストレス指標に変化が見られなかったことに続き、海面養殖場における 2 週間（480 分/日）の通电による成長率の変化についても変化は見られなかった。成長率について、本実験の給餌

量（1日あたり 10 g/尾）と増肉係数 1.95 [50]から考えると、2週間で約 72 g（10 g/日×14 日÷1.95=71.8 g）成長すると期待されたが、体重の平均値を見ると通電あり区、通電なし区ともに期待する成長は確認できなかった。この原因として、飼育状況の変化による影響が考えられる。本実験では、24 時間の馴致、約 2 週間の実験期間で成長率を評価したが、実験始めの設置、移設による環境変化の影響より、対象魚が平常時と同様な摂餌をしなかった可能性が考えられる。よって、この影響を小さくするためには、数カ月程度の実験が望ましいと考える。一方で、海面養殖場での成長率の評価は、コイルの常時稼働、実験場所の確保、水質の変動等の課題があり、成長率を評価するうえで長期間の実験は難しく、今後の課題として検討する必要がある。

3.6.6. 3 kW 電力印加実験（シロザケ、ギンザケ、カジカ）

3.6.6.1. 実験の概要

磁気感覚が発達していると考えられる冷水性魚類のシロザケ（成魚）、ギンザケ（中間魚）等について、3 kW 電力伝送で発生する電磁界によるストレス指標及び品質指標を調査した。

【実験期間】2021 年 11 月 15 日～11 月 20 日（環境構築、実験、撤収）

3.6.6.2. 実験場所

3.6.3 の実験の時と同じく、NPO 法人標津サーモン科学館（以下、サーモン科学館、北海道標津郡標津町北 1 条西 611-1）で実施した。シロザケ成魚は近くの定置網で漁獲されるため仕入れやすく、また、ギンザケはサーモン科学館で人工ふ化後に養育しているため、実験場所として最適と判断した。

3.6.6.3. 実験用ワイヤレス給電システム

3.6.5 で使用したコイルと同じコイルを用いたが、水槽の大きさに合わせて配置や設置方法を見直した。

3.6.6.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要

水槽の大きさが直径 2.4 m、深さ 1.1 m であるため、コイルが半身浴するような形で図 3.6-139 のように設置し、これを 2 組準備して片方に通電するようにした。3.6.3 で使用した水槽より本実験の水槽は大きく、屋内に設置できないため、図 3.6-140 に示すように機器類はサーモン科学館の 2 階に設置し、窓から電線を延ばして水槽内のコイルに接続して実験系を構築した。

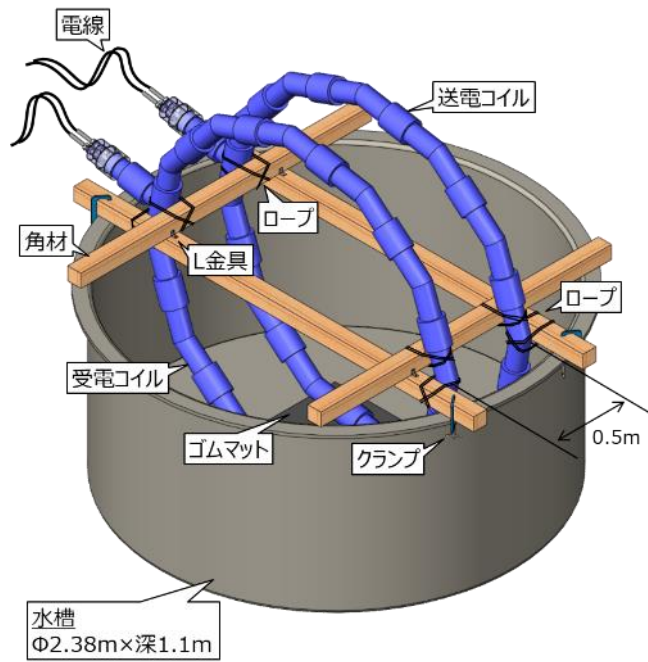


図 3.6-139 水槽に設置するコイル組の概略図

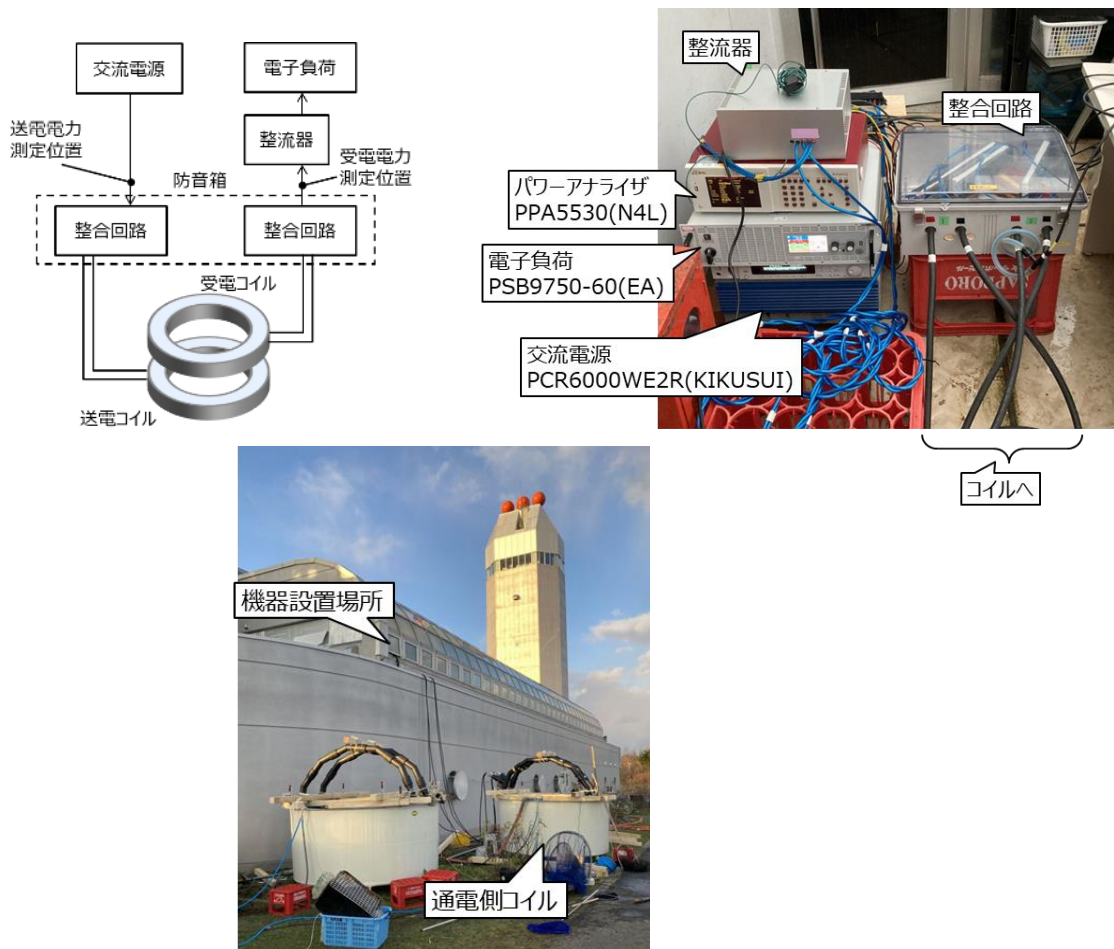


図 3.6-140 3 kW 電力印加実験（シロザケ、ギンザケ、カジカ）の実験系

3.6.6.3.2. 伝送電力の確認

実験時の送受電電力のログを図 3.6-141 に示す。コイル半分だけ海水に浸かった状態でも電力伝送は安定しており、効率は 3.6.5 の場合と同じく 85% の高効率であった。なおグラフの途切れている部分は、サンプル採取のために送電を一時的に止めた状況を表している。

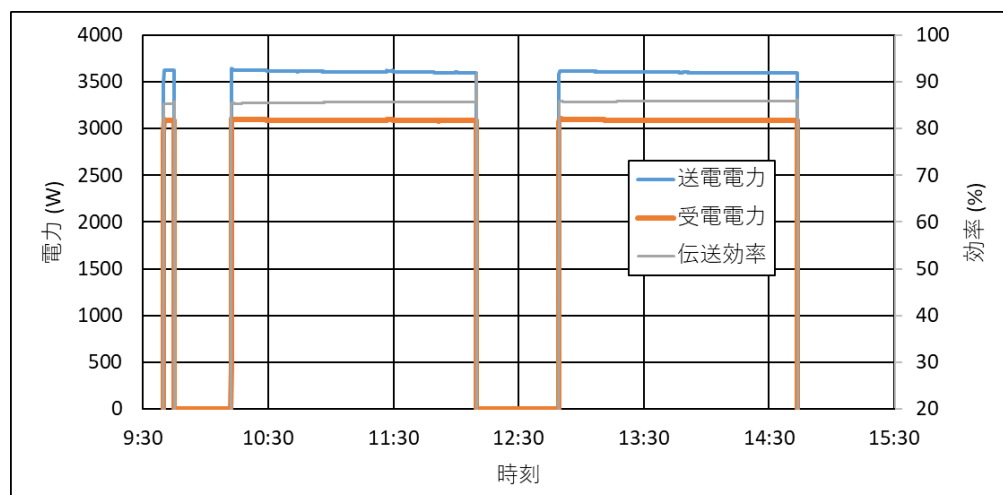


図 3.6-141 実験時の送受電電力と効率

3.6.6.3.3. 磁界強度の測定

3 kW 電力伝送中の磁界強度を Narda 製 EHP50-TS で測定した。測定箇所を図 3.6-142 に、測定結果を表 3.6-20 に示す。コイルの近傍およびコイルに挟まれた空間では ICNIRP ガイドラインの職業的暴露レベルを超える磁界が発生しており、また通電側の水槽内はどこでも公衆暴露レベル以上の磁界があることが確認できた。非通電側は公衆暴露レベルを大きく下回っており、比較実験の環境として問題ないことも確認できた。

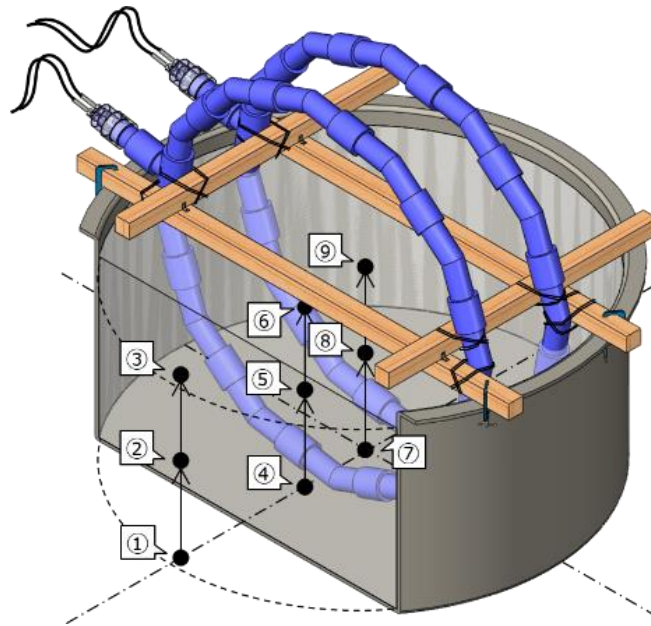


図 3.6-142 磁界強度測定箇所（図中①～⑨）

表 3.6-20 磁界強度測定結果（水槽内、@1 kHz）

測定位置		実測値
①	水槽内壁際の底	110
②	水槽内壁際の間	140
③	水槽内壁際の水面	155
④	コイル手前側の底	1017
⑤	コイル手前側の間	562
⑥	コイル手前側の水面	385
⑦	水槽中央の底	1092
⑧	水槽中央の間	774
⑨	水槽中央の水面（コイル組の中心）	486
-	非通電側の水槽内	5以下
職業的暴露レベル		300
公衆暴露レベル		80

単位：μT

3.6.6.4. 実験方法

サーモン科学館の敷地内に2つの水槽（FRP製、直径2.4 m×高さ1.1 m）を設置してコイルを入れ、通電あり区と通電なし区を設定した（図 3.6-143）。

対象魚として磁気感覚が発達していると考えられるサケ科魚類のシロザケの成魚（図

199 a、尾叉長：530～760 mm、体重：1,400～4,300 g、各水槽 6 尾で計 12 尾) とギンザケの中間魚 (図 199b、尾叉長：250～330 mm、体重：150～460 g、各水槽 12 尾で計 24 尾) を用いた。シロザケ成魚は標津町の定置網で漁獲された個体で、ギンザケはサーモン科学館で人工ふ化後、養殖された個体である。

シロザケ成魚の実験は、令和 3 年 11 月 15 日に定置網で漁獲された活魚を上述した 2 つの水槽に移送した後、片方のコイルに 3 kW、1 kHz の条件で 5 分及び 300 分の通電を行った後、サンプルを通電のありとなしで各 3 尾を抽出して、血中乳酸濃度を計測するとともに、血中コルチゾル濃度と可食部の ATP 含量及び遊離アミノ酸量および組成を分析するための試験片を作製した。実験時の気温は 3.8～9.2°C、水温は 13.8～15.5°C、水槽における海水の溶存酸素量は 8.60～9.00 mg/L、海水の塩分濃度は 2.8～3.0%、海水の pH は 5.9～6.0 であった。

ギンザケ中間魚の実験は、令和 3 年 11 月 17～18 日に養殖された個体を 2 つの水槽に移送した後、12 時間の馴致時間を与えた後、片方のコイルに 3 kW、1 kHz の条件で 5 分、150 分、300 分及び 600 分の通電を行った後、サンプルを通電のありとなしで各 3 尾を抽出して、シロザケと同様に血中乳酸濃度を計測するとともに、血中コルチゾル濃度と可食部の ATP 含量及び遊離アミノ酸量および組成を分析するための試験片を作製した。実験時の気温は 4.3～7.2°C、水温は 9.5～11.9°C、水槽における海水の溶存酸素量は 10.10～10.60 mg/L、海水の塩分濃度は 2.9～3.0%、海水の pH は 6.2～6.5 であった。

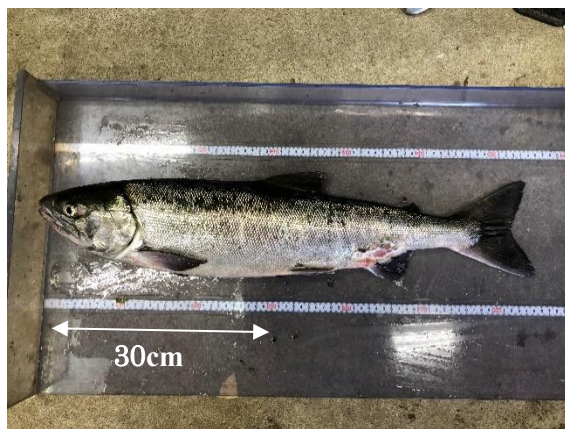
なお、両試験の分析に用いた血液と可食部位の試験片採取、保蔵とその分析手法は、3.6.4.4 と同様である。凍結保存したサンプルを公益財団法人・函館地域産業振興財団・北海道立工業技術センターへ届けた後、血中コルチゾル濃度は ELISA 法 (酵素結合免疫吸着法/競合法) で、ATP 含量と遊離アミノ酸は HPLC (高速液体クロマトグラフ) で分析した。

また、主に北海道の定置網で漁獲される底魚のカジカ (図 18、尾叉長：290～440 mm、体重：350～1,040 g、各水槽 9 尾で計 18 尾) も用いた。

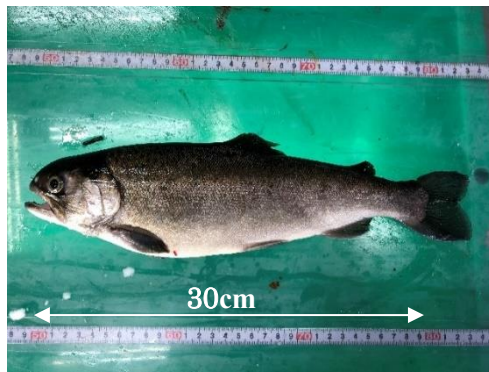
カジカの実験は、令和 3 年 11 月 15 日に定置網で漁獲された活魚を上述した 2 つの水槽に移送した後、片方のコイルに 3 kW、1 kHz の条件で 5 分、150 分及び 300 分の通電を行った後、サンプルを通電のありとなしで各 3 尾を抽出して、血中乳酸濃度を計測するとともに、血中コルチゾル濃度と可食部の ATP 含量及び遊離アミノ酸量および組成を分析するための試験片を作製した。実験時の気温は 4.1～8.7°C、水温は 11.0～11.8°C、水槽における海水の溶存酸素量は 10.4～10.5 mg/L、海水の塩分濃度は 3.0%、海水の pH は 6.1～6.4 であった。



図 3.6-143 通電あり区と通電なし区の設定



(a) シロザケ
学名：*Oncorhynchus keta*
英名：Chum salmon



(b) ギンザケ
学名：*Oncorhynchus kisutch*
英名：Coho salmon



(c) カジカ
学名：*Cottus pollux Gunther*
英名：Japanese sculpin

図 3.6-144 実験に用いた対象魚

3.6.6.5. 実験結果

3.6.6.5.1. シロザケのストレス指標と呈味指標の分析結果

A 血中乳酸濃度

計測したシロザケ成魚の血中乳酸濃度を図 3.6-145 に示す。シロザケ成魚の血中乳酸濃度の平均値（各 3 尾の平均値、以下同様）は、通電開始 5 分後の通電あり区で 3.6 mmol/L、通電なし区で 4.0 mmol/L、300 分後の通電あり区で 2.0 mmol/L、通電なし区で 1.6 mmol/L であった。通電ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

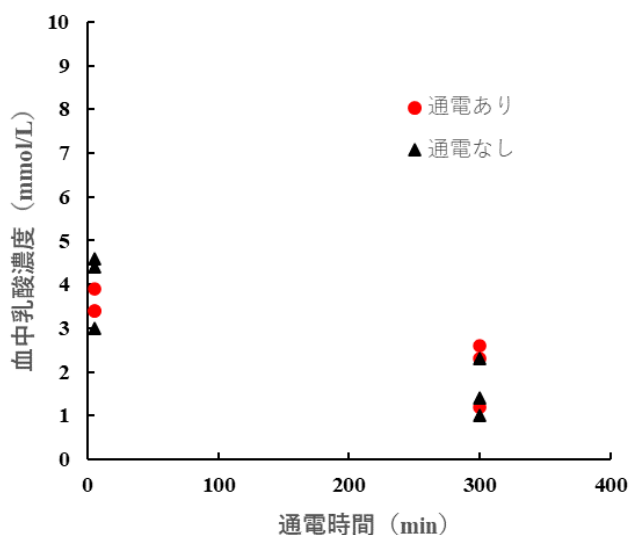


図 3.6-145 シロザケ成魚の通电有無による血中乳酸濃度の変化

B 血中コルチゾル濃度

分析したシロザケ成魚の血中コルチゾル濃度を図 3.6-146 に示す。シロザケ成魚の血中コルチゾル濃度の平均値は、通電 5 分後の通電あり区で 79.5 ng/mL、通電なし区で 274.5 ng/mL、300 分後の通電あり区で 164.9 ng/mL、通電なし区で 164.3 ng/mL であった。通電ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

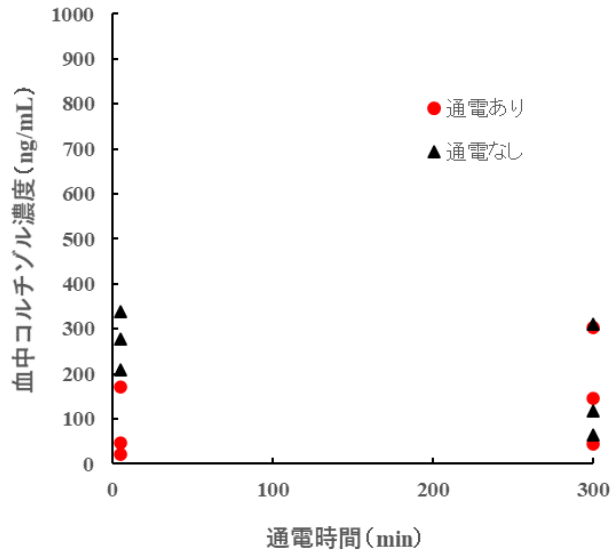


図 3.6-146 シロザケ成魚の通电有無による血中コルチゾル濃度の変化

C ATP 含量

分析したシロザケ成魚の ATP 含量を図 3.6-147 に示す。シロザケ成魚の ATP 含量の平均値は、通电 5 分後の通电あり区で $6.96 \mu\text{mol/g}$ 、通电なし区で $6.79 \mu\text{mol/g}$ 、300 分後の通电あり区で $6.61 \mu\text{mol/g}$ 、通电なし区で $6.60 \mu\text{mol/g}$ であった。通电ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

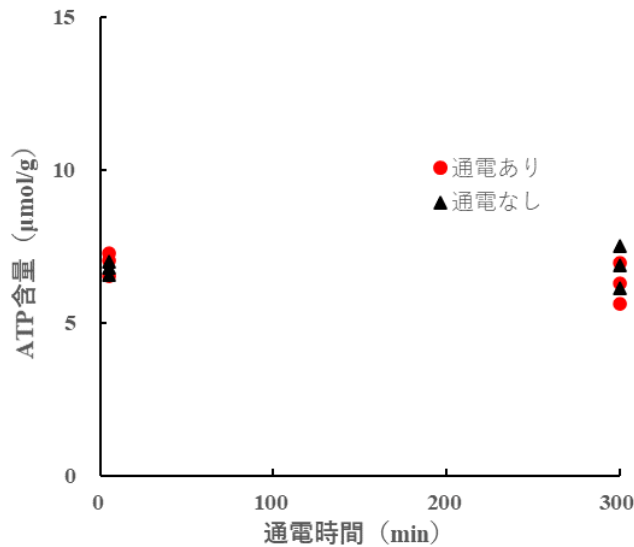


図 3.6-147 シロザケ成魚の通电有無による ATP 含量の変化

D 遊離アミノ酸

分析したシロザケの遊離アミノ酸の結果を表 3.6-21 に示す。アラニン、グルタミン酸、グリシン、セリン及びタウリンが高い値を示したが、通電のありとなしで優位な差はなかった。

遊離アミノ酸合計量の平均値は、通電 5 分後の通電あり区で 210 mg/100 g、通電なし区で 197 mg/100 g、300 分後の通電あり区で 185 mg/100 g、通電なし区で 214 mg/100 g であった。これらの結果から、通電による呈味に差はないと考えられる。

表 3.6-21 シロザケ成魚の遊離アミノ酸

通電時間		5分						300分					
通電有無		あり			なし			あり			なし		
遊離アミノ酸 (mg/100g肉)	アラニン	61	41	39	45	35	35	18	36	23	32	29	53
	アルギニン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	アスパラギン酸	0	4	0	5	3	0	0	4	0	0	0	3
	システイン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	グルタミン酸	37	15	26	14	19	30	25	57	37	23	37	23
	グリシン	40	18	51	20	31	32	10	20	25	13	22	37
	ヒスチジン	12	7	14	7	10	9	6	7	5	5	5	16
	イソロイシン	6	7	5	9	6	5	6	13	6	8	10	9
	ロイシン	9	10	8	13	11	9	9	23	9	13	17	14
	リジン	10	11	8	13	6	5	3	8	5	17	5	17
	メチオニン	4	4	3	4	6	3	4	8	6	4	5	4
	フェニルアラニン	2	2	2	2	3	1	2	3	2	2	3	2
	プロリン	8	5	8	7	7	8	5	10	6	6	9	12
	セリン	19	8	19	8	15	17	6	14	10	8	11	21
	タウリン	15	26	13	31	15	25	32	13	18	45	14	14
	スレオニン	10	7	5	6	6	6	3	6	5	6	5	7
	チロシン	3	4	2	4	6	3	3	8	3	4	5	3
バリン	9	10	7	13	10	8	8	20	8	12	14	14	
合計	242	179	210	201	189	200	140	248	168	198	194	250	
合計の平均値		210		197		185		214					

3.6.6.5.2. ギンザケのストレス指標と呈味指標の分析結果

A 血中乳酸濃度

計測したギンザケ中間魚の血中乳酸濃度を図 3.6-148 に示す。ギンザケ中間魚の血中乳酸濃度の平均値は通電 5 分後の通電あり区で 0.8 mmol/L、通電なし区で 1.4 mmol/L、150 分後の通電あり区で 2.2 mmol/L、通電なし区で 2.1 mmol/L、300 分後の通電あり区で 1.1 mmol/L、通電なし区で 1.8 mmol/L、600 分後の通電あり区で 1.1 mmol/L、通電なし区で 2.0 mmol/L、であった。通電ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

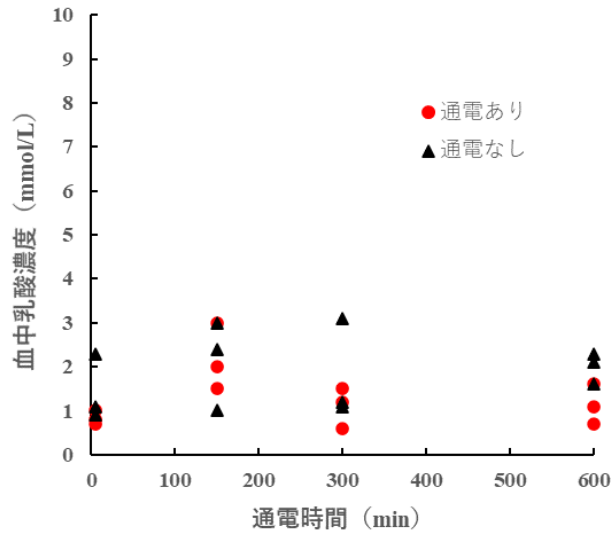


図 3.6-148 ギンザケ中間魚の通电有無による血中乳酸濃度の変化

B 血中コルチゾル濃度

分析したギンザケ中間魚の血中コルチゾル濃度を図 3.6-149 に示す。ギンザケ中間魚の血中コルチゾル濃度の平均値は、通电 5 分後の通电あり区で 9.25 ng/mL、通电なし区で 80.3 ng/mL、150 分後の通电あり区で 96.7 ng/mL、通电なし区で 18.4 ng/mL、300 分後の通电あり区で 59.6 ng/mL、通电なし区で 38.9 ng/mL、600 分後の通电あり区で 17.7 ng/mL、通电なし区で 76.7 ng/mL であった。通电ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

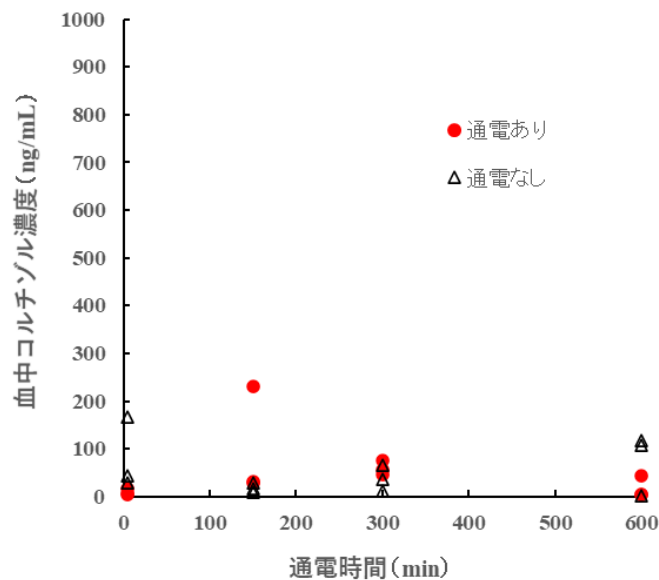


図 3.6-149 ギンザケ中間魚の通电有無による血中コルチゾル濃度の変化

C ATP 含量

分析したギンザケ中間魚の ATP 含量を図 3.6-150 に示す。ギンザケ中間魚の ATP 含量の平均値は、通電 5 分後の通電あり区で 8.05 $\mu\text{mol/g}$ 、通電なし区で 7.70 $\mu\text{mol/g}$ 、150 分後の通電あり区で 7.75 $\mu\text{mol/g}$ 、通電なし区で 8.15 $\mu\text{mol/g}$ 、300 分後の通電あり区で 8.25 $\mu\text{mol/g}$ 、通電なし区で 8.19 $\mu\text{mol/g}$ 、600 分後の通電あり区で 7.81 $\mu\text{mol/g}$ 、通電なし区で 8.13 $\mu\text{mol/g}$ であった。通電ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

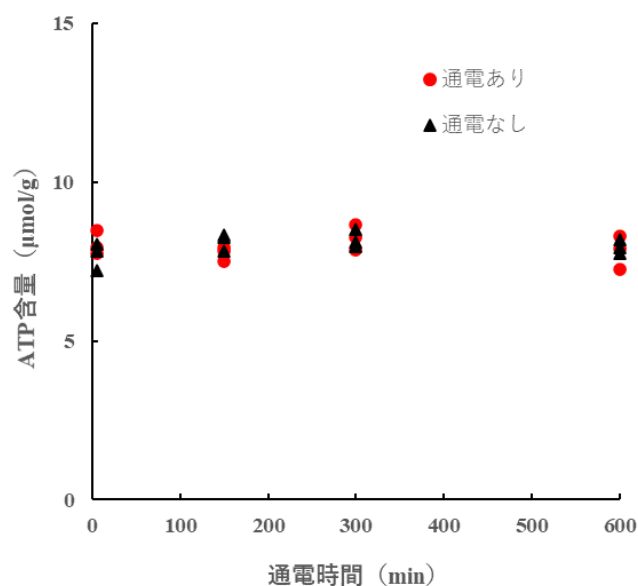


図 3.6-150 ギンザケ中間魚の通电有無による ATP 含量の変化

D 遊離アミノ酸

分析したギンザケの遊離アミノ酸の結果を表 3.6-22 に示す。アラニン、グリシン、ヒスチジン、セリン及びタウリンが高い値を示したが、通电のありとなしで優位な差はなかった。

遊離アミノ酸合計量の平均値は、通電 5 分後の通電あり区で 453 mg/100 g、通電なし区で 250 mg/100 g、150 分後の通電あり区で 336 mg/100 g、通電なし区で 329 mg/100 g、300 分後の通電あり区で 359 mg/100 g、通電なし区で 422 mg/100 g、600 分後の通電あり区で 330 mg/100 g、通電なし区で 265 mg/100 g であった。これらの結果から、通电による呈味に差はないと考えられる。

表 3.6-22 ギンザケ中間魚の遊離アミノ酸

通電時間		5						150					
通電有無		あり			なし			あり			なし		
遊離アミノ酸 (mg/100g肉)	アラニン	41	50	28	25	26	33	31	35	19	48	29	33
	アルギニン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	アスパラギン酸	3	6	3	5	0	6	4	3	3	4	6	4
	システイン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	グルタミン酸	17	31	15	7	7	7	6	13	7	20	6	6
	グリシン	99	89	103	60	43	78	129	78	91	97	83	114
	ヒスチジン	73	56	58	86	69	65	46	63	103	52	76	52
	インロイシン	3	3	4	2	2	3	3	4	2	3	4	4
	ロイシン	4	4	4	3	3	3	2	3	2	4	2	3
	リジン	10	21	10	6	3	5	3	13	4	18	2	5
	メチオニン	3	2	3	2	1	1	1	3	3	3	2	1
	フェニルアラニン	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	プロリン	7	9	4	5	4	6	4	7	10	9	3	2
	セリン	47	49	32	12	8	9	11	30	32	58	12	14
	タウリン	166	107	146	41	15	63	24	89	89	113	35	26
スレオニン	10	12	9	6	6	8	6	10	6	10	5	7	
チロシン	2	2	2	1	1	5	1	2	2	2	2	2	
バリン	4	4	3	3	2	3	2	3	2	3	2	2	
合計	488	447	424	265	191	294	273	357	378	445	268	273	
合計の平均値		453			250			336			329		

通電時間		300						600					
通電有無		あり			なし			あり			なし		
遊離アミノ酸 (mg/100g肉)	アラニン	36	28	39	24	38	78	41	20	46	19	34	26
	アルギニン	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	アスパラギン酸	2	3	7	3	0	7	3	3	3	0	0	3
	システイン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	グルタミン酸	21	8	6	9	16	16	13	7	18	7	11	11
	グリシン	91	152	119	101	83	66	68	117	127	122	84	67
	ヒスチジン	71	69	48	99	91	55	50	81	95	49	75	51
	インロイシン	4	4	4	4	2	4	3	4	4	3	4	4
	ロイシン	4	2	3	3	4	4	3	4	4	2	5	4
	リジン	20	2	1	4	8	19	6	8	13	3	6	9
	メチオニン	3	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1
	フェニルアラニン	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	プロリン	22	3	2	2	10	9	3	3	6	0	5	2
	セリン	54	12	11	11	42	60	9	14	31	9	12	9
	タウリン	143	21	12	57	158	129	52	72	89	46	58	15
スレオニン	9	4	7	5	9	14	8	8	8	4	10	6	
チロシン	2	3	2	1	2	2	1	2	1	0	2	2	
バリン	3	2	2	2	3	4	2	3	3	2	3	3	
合計	496	315	267	327	469	469	263	349	451	268	312	216	
合計の平均値		359			422			355			265		

3.6.6.5.3. カジカのストレス指標と呈味指標の分析結果

A 血中乳酸濃度

計測したカジカの血中乳酸濃度を図 3.6-151 に示す。カジカの血中乳酸濃度は下限値未満の検体が確認された（グラフでは 0 mmol/L で表示）。通電 5 分後の通電あり区で下限値未満が 2 検体、それ以外が 1.0 mmol/L、通電なし区で下限値未満が 2 検体、それ以外が 0.5 mmol/L であった。通電 150 分後の通電あり区で下限値未満が 3 検体、通電なし区で下限値未満が 2 検体、それ以外が 0.5 mmol/L であった。通電 300 分後の通電あり区で下限値未満が 1 検体、それ以外の平均値が 0.5 mmol/L、通電なし区で下限値未満が 2 検体、それ以外が 0.5 mmol/L であった。通電ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

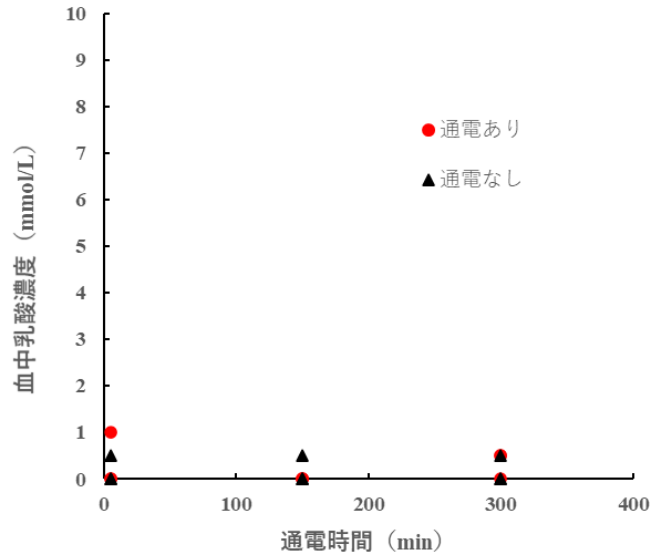


図 3.6-151 カジカの通电有無による血中乳酸濃度の変化

B 血中コルチゾル濃度

分析したカジカの血中コルチゾル濃度を図 3.6-152 に示す。カジカの血中コルチゾル濃度の平均値は、通电5分後の通电あり区で 545.8 ng/mL、通电なし区で 161.0 ng/mL、150 分後の通电あり区で 65.9 ng/mL、通电なし区で 145.2 ng/mL、300 分後の通电あり区で 176.9 ng/mL、通电なし区で 34.8 ng/mL であった。通电ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

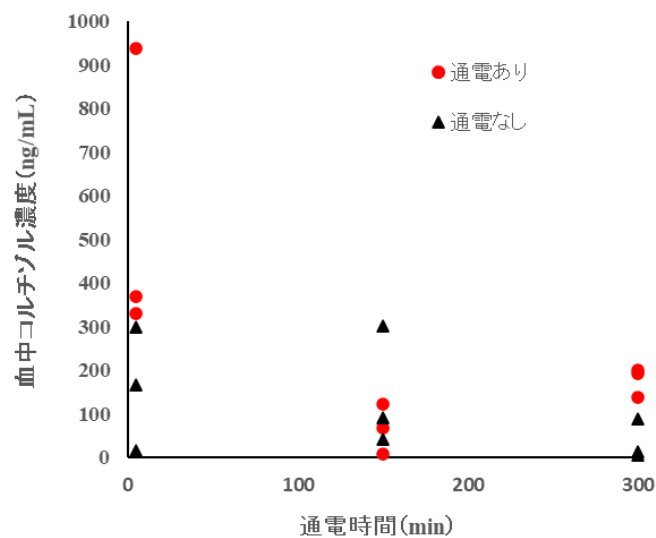


図 3.6-152 カジカの通电有無による血中コルチゾル濃度の変化

C ATP 含量

分析したカジカの ATP 含量を図 3.6-153 に示す。カジカの ATP 含量の平均値は、通電 5 分後の通電あり区で 6.34 $\mu\text{mol/g}$ 、通電なし区で 4.24 $\mu\text{mol/g}$ 、150 分後の通電あり区で 6.77 $\mu\text{mol/g}$ 、通電なし区で 6.71 $\mu\text{mol/g}$ 、300 分後の通電あり区で 5.62 $\mu\text{mol/g}$ 、通電なし区で 6.64 $\mu\text{mol/g}$ であった。通電ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

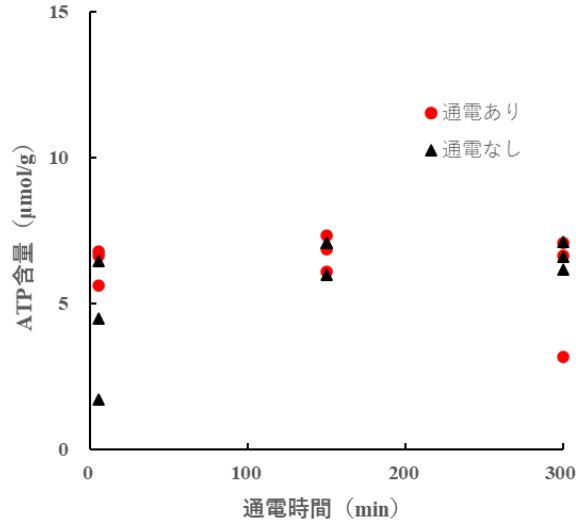


図 3.6-153 カジカの通電有無による ATP 含量の変化

D 遊離アミノ酸

分析したカジカの遊離アミノ酸の結果を表 3.6-23 に示す。アラニン、グリシン、ヒスチジン、リジン及びタウリンが高い値を示したが、通電のありとなしで優位な差はなかった。

カジカの背側可食部の遊離アミノ酸の平均値は通電 5 分後の通電あり区で 416 mg/100 g、通電なし区で 361 mg/100 g、150 分後の通電あり区で 436 mg/100 g、通電なし区で 457 mg/100 g、300 分後の通電あり区で 443 mg/100 g、通電なし区で 512 mg/100 g であった。通電ありとなしでは優位な差はないと評価できる。

表 3.6-23 カジカの遊離アミノ酸

遊離アミノ酸 (mg/100g)	5						150						300					
	あり			なし			あり			なし			あり			なし		
アラニン	7	15	8	6	16	22	22	6	21	16	20	27	26	17	4	16	39	6
アルギニン	15	7	0	0	8	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	5
アスパラギン酸	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
システイン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
グルタミン酸	13	8	5	5	7	14	14	15	11	13	10	22	34	14	9	12	16	16
グリシン	15	13	16	4	12	23	37	10	15	35	18	32	51	49	6	28	29	18
ヒスチジン	16	7	0	0	14	20	10	0	19	9	7	11	9	4	0	6	7	0
イソロイシン	2	2	2	3	2	2	2	3	3	2	2	0	4	3	1	4	2	1
ロイシン	5	4	3	3	3	3	3	3	4	3	2	4	8	5	2	6	2	3
リジン	84	66	33	10	37	52	21	20	37	34	12	25	30	19	15	28	31	35
メチオニン	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	1	0	1	0	1
フェニルアラニン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0
プロリン	2	2	2	0	3	6	5	0	6	3	4	5	7	4	2	5	5	2
セリン	5	3	0	0	6	5	7	0	17	6	2	6	5	4	0	5	12	0
タウリン	276	302	280	94	293	367	302	351	304	326	353	329	336	388	235	383	413	356
スレオニン	8	3	2	0	16	11	5	0	21	5	3	9	6	4	0	8	12	0
チロシン	1	2	1	0	2	1	0	1	5	1	1	2	2	1	2	1	2	9
バリン	4	3	2	3	2	2	2	2	2	3	2	3	6	3	2	4	2	2
合計	454	437	357	127	421	535	430	408	470	457	435	480	530	522	278	510	573	453
合計の平均値	416			361			436			457			443			512		

3.6.6.6. 考察

海中ワイヤレス給電を行う際、通電したコイル周辺に発生が推察される電磁界が魚類に与える影響について調査するために、比較実験を行った。コイル通電がサケ科魚類（成魚・中間魚）に及ぼす影響調査は、陸上において水槽を2つ設置し、海水で満たし、その中心付近にコイルを固定して、2つの実験区を設定した。水槽に対象魚を投入し、このうち一方の実験区のコイルにのみ通電し、対象魚に違いが生じるかについて行動、ストレス指標、呈味成分について、通電の有無で比較して、コイル通電による影響を評価した。結果、本調査で用いた冷水性魚類がコイルの通電によって受ける影響は、行動、ストレス指標、呈味成分に関する全ての評価項目において小さい、または、確認されなかった。

行動観察において、いずれの調査においても通電開始から終了までに特徴的な変化が見られた対象魚は確認されなかった。

強電磁界が発生していると推察される状況がサケ科魚類（成魚・中間魚）に及ぼす影響調査において、ストレス指標として計測した血中乳酸濃度および血中コルチゾル濃度の結果は、シロザケでは、通電有無に関係なく、通電開始5分後の値が高く、通電時間に応じて値が減少する傾向が見られた。この要因として、対象魚のシロザケは実験日の早朝に定置網で漁獲され、午前に実験を開始したために、馴致時間が不十分であったことが考えられる。魚類の血中乳酸濃度および血中コルチゾル濃度は、一般的に外部刺激や環境変化などによって変化し、行動（運動）が大きく、または、激しいときに値が大きくなるといわれている [33] [39]。そのため、通電開始5分後の計測値は、漁獲移送によって生じたストレスの影響があり、通電開始300分後よりも高い値を示したと考えられる。その他の実験結果は、通電による差がないことより、コイルの通電の影響は魚類の暴れに対する影響より小さいといえる。

背側可食部のATP含量は、いずれの実験においても、顕著な違いが見られないため、今回実験したサケ科魚類成魚・中間魚において、通電による影響は極めて小さいといえる。

背側可食部の遊離アミノ酸は、いずれの実験においても、背側可食部のATP含量の実験結果と同様に、顕著な違いが見られないため、全ての対象魚において、通電による影響は極めて小さいといえる。

サケ科魚類は、稚魚よりも成魚の方が体内の磁気感覚が発達しているという報告がある [37] [51]。2019年度に実施したサケ科魚類の稚魚を対象とした調査において、通電による影響は見られなかった。この結果と同様に、本調査の成魚を対象とした実験でも、通電による影響が見られなかった。このことより、サケ科魚類に対して、通電による影響が小さいことが示唆された。

カジカの行動、ストレス指標についても通電による影響は見られなかった。

これまでの結果より、実験した暖水性・冷水性魚類の養殖魚、サケ科魚類に対して通電による影響が見られていない。今後は、実際に海中ワイヤレス給電装置を沿岸域で設置することを想定し、沿岸漁業で漁獲されている漁獲対象魚種（アジやサバ等）に対する通電

の影響を調査する実験を検討する必要があると考える。

3.6.7.3 kW 電力印加実験（マアジ、マサバ、カタクチイワシ）

3.6.7.1. 実験の概要

海中ワイヤレス給電装置を沿岸域で設置することを想定し、日本の沿岸域で多く漁獲されるマアジ、マサバを対象として行動観察、ストレス指標および呈味指標の分析、カタクチイワシを対象として行動観察を行い、強電磁界による影響を調査した。

本実験の印加電力 3 kW は 3.6.4、3.6.5、3.6.6 で実施した実験と同じであるが、周波数は以前の実験と同じ 1 kHz に加えて、新たに 1.5 kHz でも実施した。本研究のワイヤレス給電システムを用いた実海域での最終実験で使用する周波数が 1.5 kHz になったためである。

水槽内にコイル組（直径 2m）を 2 組設置するとともに対象魚種を投入して、片方のコイルにのみ 3 kW の電力を一定時間通電したときの、対象魚種の行動、ストレス指標、呈味指標に及ぼす変化を通電の有無に対して比較した（比較実験）。ストレス指標は背側可食部の ATP（アデノシン三リン酸）含量とした。また、呈味指標は遊離アミノ酸合計量として評価した。

【実験期間】 2022 年 10 月 11 日～10 月 24 日（環境構築、実験、撤収）

3.6.7.2. 実験場所

3.6.4 と同じ、ニチモウ株式会社研究開発室所有の陸上海水角水槽を選定した。水槽内の海水はポンプで循環し、水質維持を図っている。

3.6.7.3. 実験用ワイヤレス給電システム

3.6.5、3.6.6 の実験と同じコイルを使用するが、設置する場所の水深や形状に合わせて配置を見直して構成した。

3.6.7.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要

直径 2 m のコイル 2 つを図 3.6-154 のように間隔を 40 cm 開けた状態で 1 組にして、水槽に図 3.6-155 のように 2 組設置した。この実験系ではコイル組から伸ばしている電線のどちらに送電機器をつなぐかによって通電あり・なしの場所を入れ替えることができる。実験系を図 3.6-156 に示す。

周波数を 1 kHz から 1.5 kHz に変更する際は、交流電源の設定周波数だけでなく整合回路のコンデンサ定数を変更する必要がある。そのコンデンサ定数を表 3.6-24（回路記号は図 3.6-4 参照）に示す。

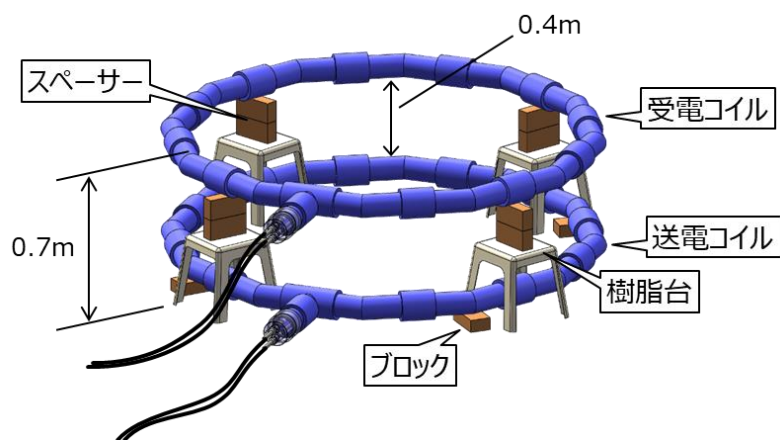


図 3.6-154 コイル組の概略図

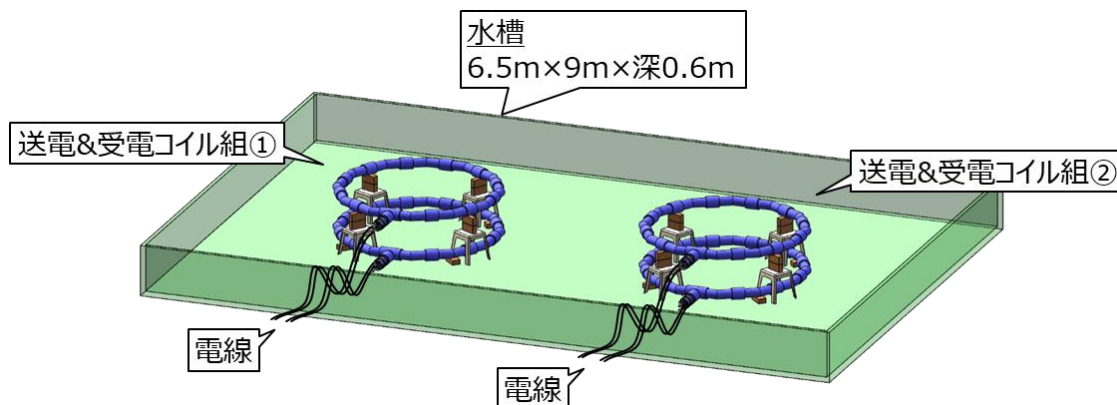


図 3.6-155 水槽内のコイル組の設置図

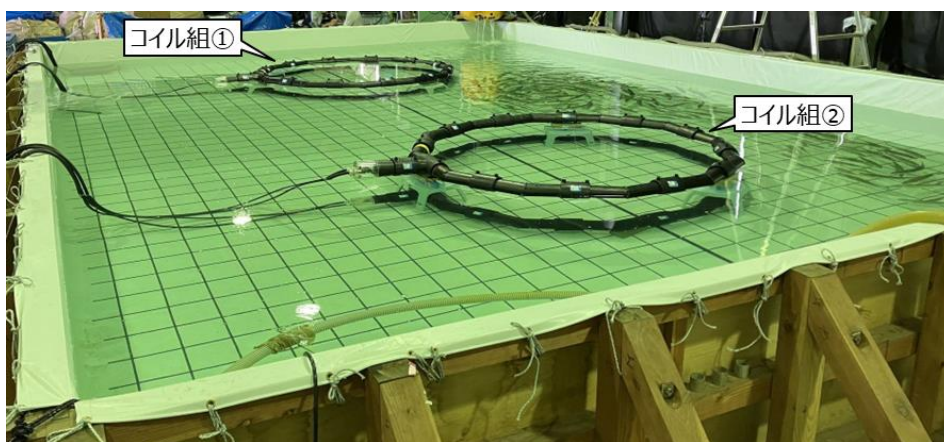
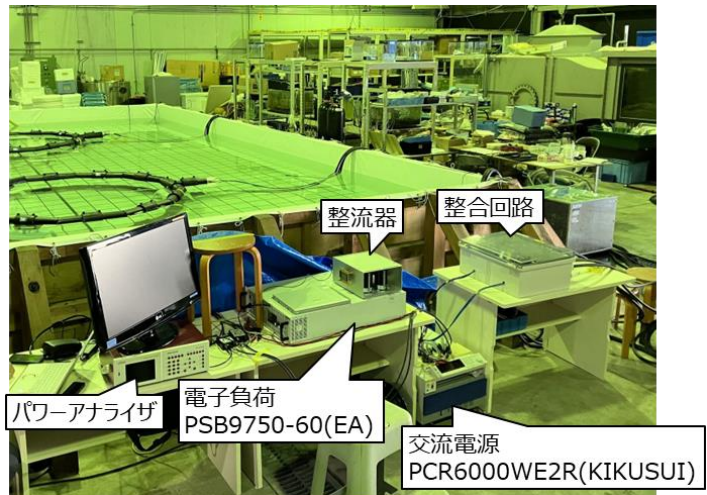
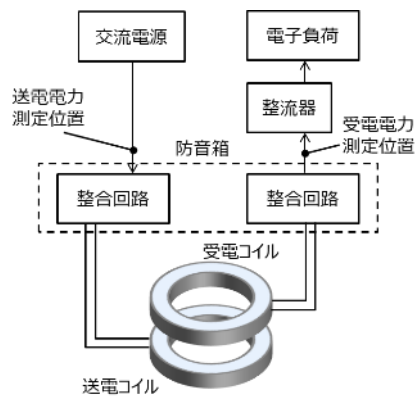


図 3.6-156 マアジ、マサバ、カタクチイワシ用 3 kW 実験系

表 3.6-24 1 kHz 用と 1.5 kHz 用のコンデンサ定数

	1 kHz 用	1.5 kHz 用
Cs_Tx (μF)	24.2	10.3
Cp_Tx (μF)	44	17.6
Cs_Rx (μF)	24.2	10.3
Cp_Rx (μF)	44	17.6

3.6.7.3.2. 伝送電力の確認

キーサイト・テクノロジー製のベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA) E5061B にて 1 kHz および 1.5 kHz の整合状態を確認した結果をそれぞれ図 3.6-157、図 3.6-158 に示す。これにより共振周波数が正しく変わっていることが確認できた。

次に 3 kW を伝送しているときの送受電電力のログを図 3.6-159、図 3.6-160 に示す。周波数が変わっても伝送電力の大きさおよび伝送効率は変わらなかった。

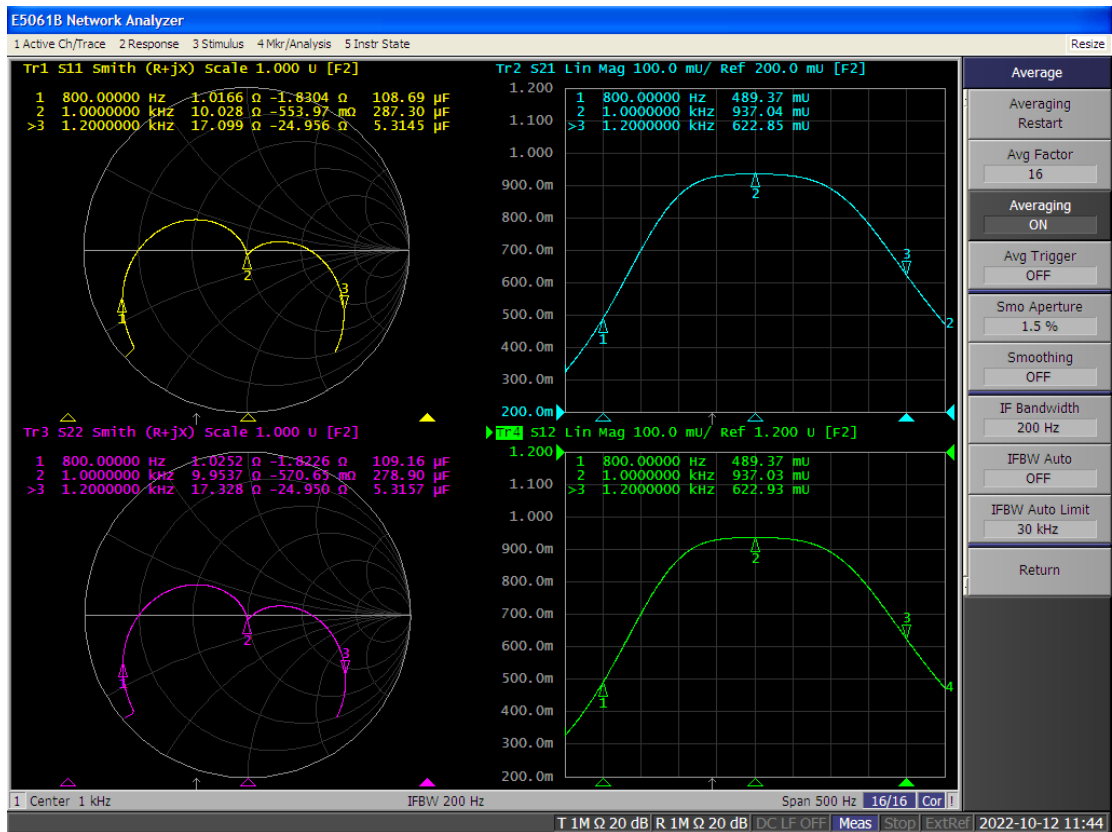


図 3.6-157 1 kHz の整合確認結果 (中心周波数 = 1 kHz)

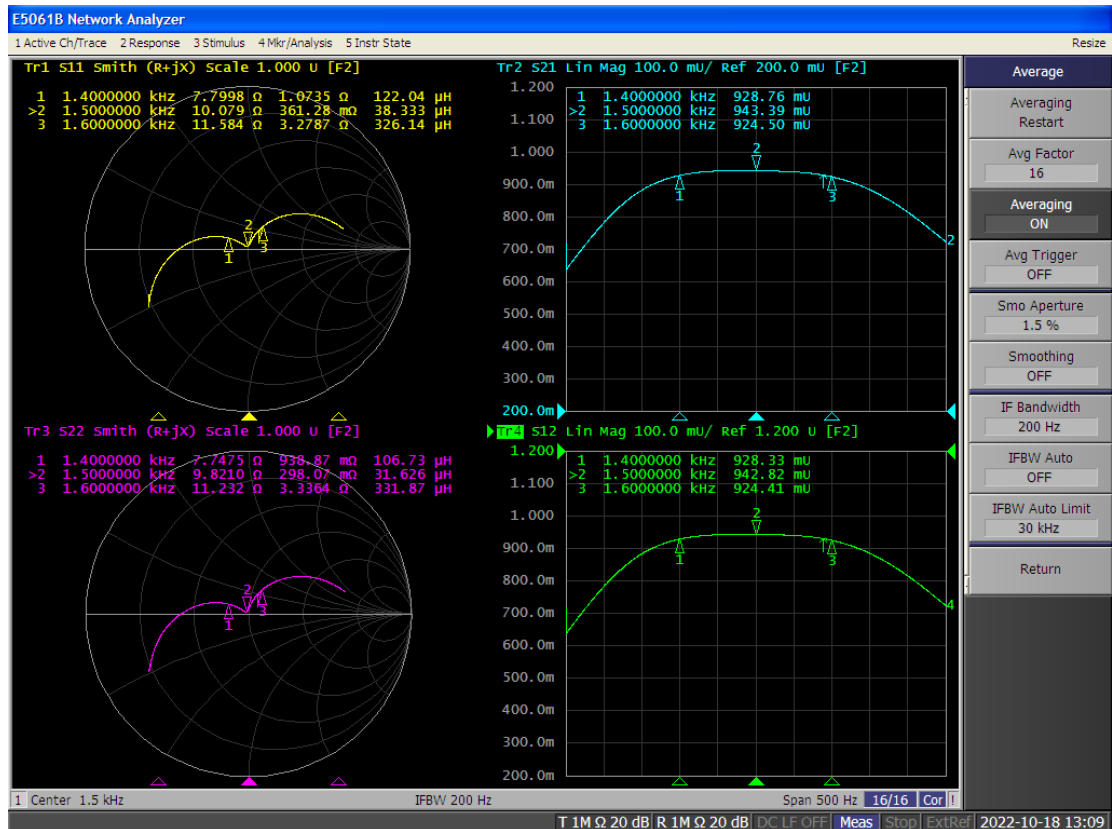


図 3.6-158 1.5 kHz の整合確認結果 (中心周波数 = 1.5 kHz)

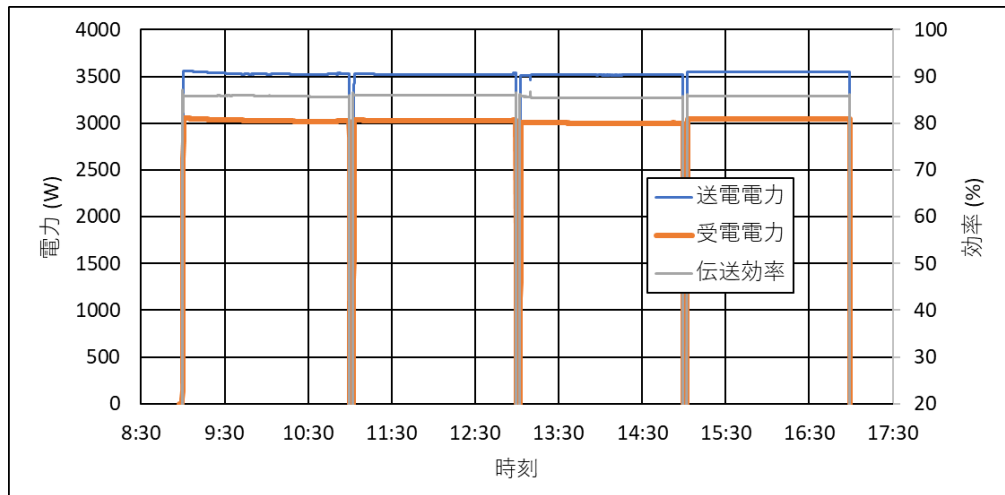


図 3.6-159 3 kW 伝送時の送受電電力と効率（周波数 1 kHz）

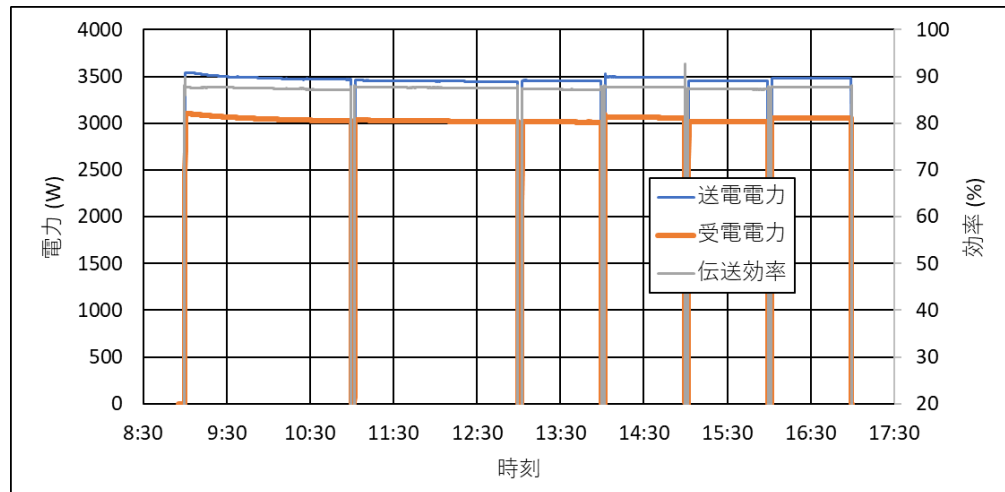


図 3.6-160 3 kW 伝送時の送受電電力と効率（周波数 1.5 kHz）

図 3.6-159 および図 3.6-160 は後述する行動観察時のログである。2 時間おき、あるいは 1 時間おきに途切れているのは、行動観察の際に通電するコイル組を①から②、または②から①へと切り替えているためである。

3.6.7.3.3. 磁界強度の測定

3 kW 電力伝送中の磁界強度を Narda 製 EHP50-TS で測定した。測定箇所と、コイル組①に通電した時の測定結果を図 3.6-161 に示し、ICNIRP ガイドライン参考レベルと比較した結果を表 3.6-25 に示す。コイル内および近傍では ICNIRP ガイドラインの職業的暴露レベルを超える磁界が発生しており、コイル組とコイル組の中間点付近を境にして非通電側の領域では公衆暴露レベルを下回っており、比較実験の環境として問題ないことも確認できた。

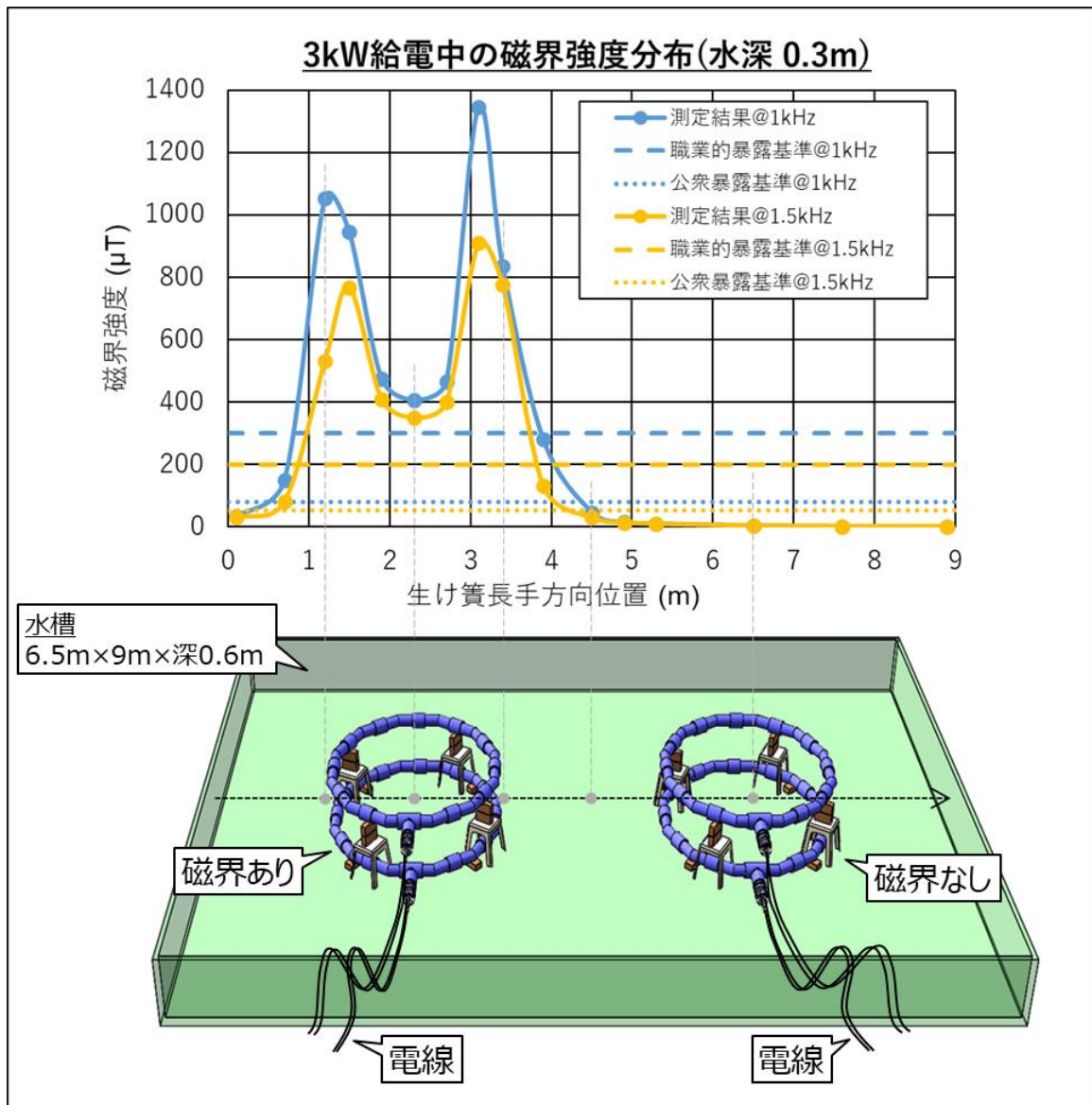


図 3.6-161 磁界強度測定位置と 3 kW 電力伝送中の測定結果

表 3.6-25 測定値と ICNIRP ガイドライン参考レベル

	1 kHz	1.5 kHz
最大測定値	1346	910
通電ありコイル組の中心	406	351
2つのコイル組の中間点	47	30
通電なしコイル組の中心	4	4
職業的暴露レベル	300	200
公衆暴露レベル	80	53

単位：μT

3.6.7.4. 実験方法

マアジ(図 3.6-162(a)、尾叉長:約 191~253mm、体高:約 45~57mm、体重:約 85.0~177.0g)、マサバ(図 3.6-162(b)、尾叉長:約 303~370mm、体高:約 53~74mm、体重:約 332.0~505.5g)、カタクチイワシ(図 3.6-162(c)、尾叉長:約 88~92mm、体高:約 14~17mm 体重:約 5.2~7.5g)を対象に行動観察およびストレス指標、呈味指標について調査を行ったが、周波数や投入尾数および投入領域などを調査内容によって調整しながら実施した。

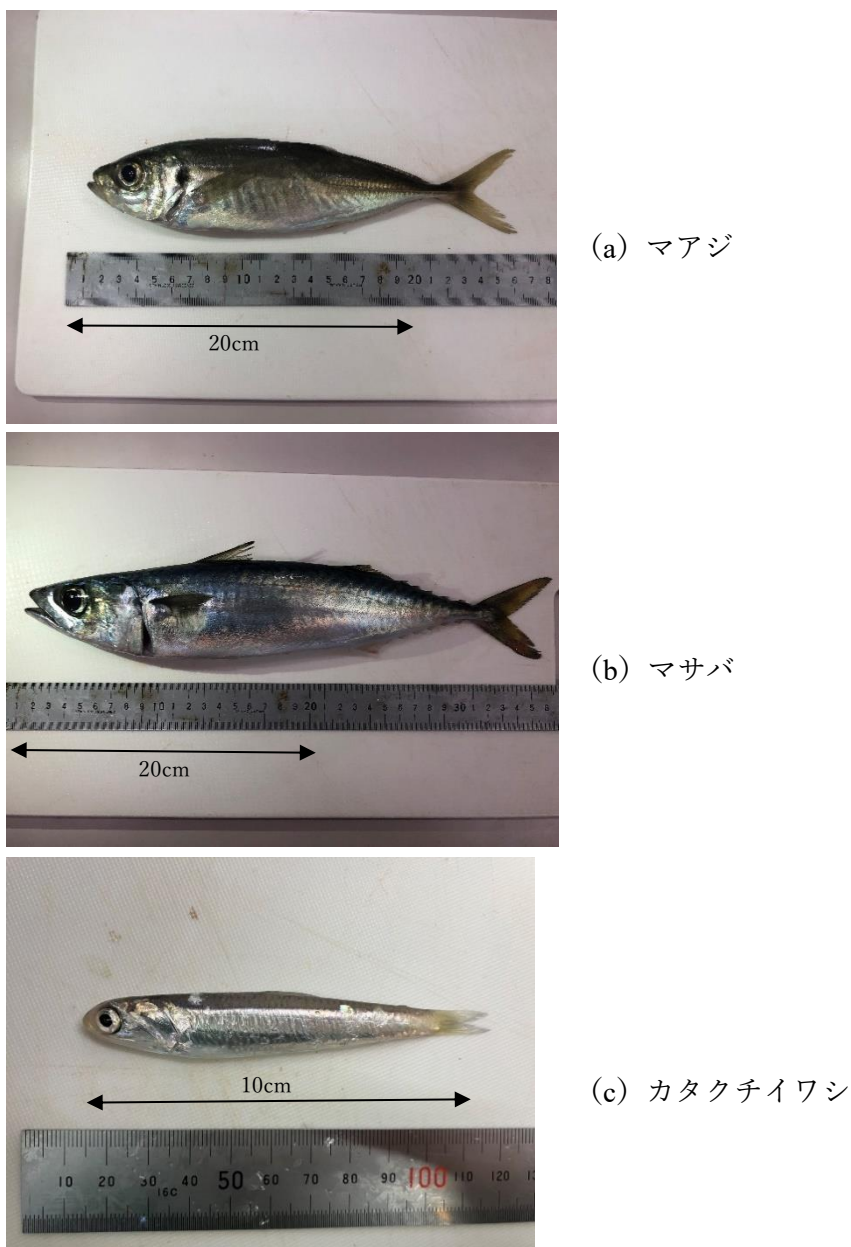


図 3.6-162 実験に用いた対象魚

3.6.7.4.1. マアジ、マサバの行動観察（周波数 1 kHz）

コイル通電下におけるマアジ、マサバの行動を観察し、通電による行動への影響を調査した。令和 4 年 10 月 13 日（木）にニチモウ株式会社研究開発室（以下、ニチモウ、山口県下関市小月小島 2-3-17）で行った。

マアジ、マサバをそれぞれ 125 尾（計 250 尾）、コイルを設置した循環式海水水槽（長さ 9.0m×幅 6.5m×深さ 0.6m、以下、海水水槽）に放流した。マアジ、マサバは長崎県佐世保市の蓄養生簀から取り上げた個体を令和 4 年 10 月 11 日に運搬した後、海水水槽に移送し、約 24 時間馴致した。

実験では図 3.6-163 に示す通り、2つのコイル組に交互に通電した。通電条件は 3 kW、1 kHz で 9 時～11 時までの 2 時間は一方のコイル組に通電し、11 時～13 時はもう一方のコイル組に通電した。これ以降 17 時まで 2 時間おきに 2 つのコイル組に交互に通電し、その時のマアジ、マサバの行動を観察した。海水水槽が設置されている建屋の室温は 18.6～24.5℃、実験に用いた海水の水温は 20.0～20.3℃、溶存酸素量は 7.16～7.72mg/L、塩分濃度は 3.2～3.4%、pH は 7.7～7.8 であった。

行動観察はビデオカメラ（SONY HDR-CX680）による撮影および目視により行った。

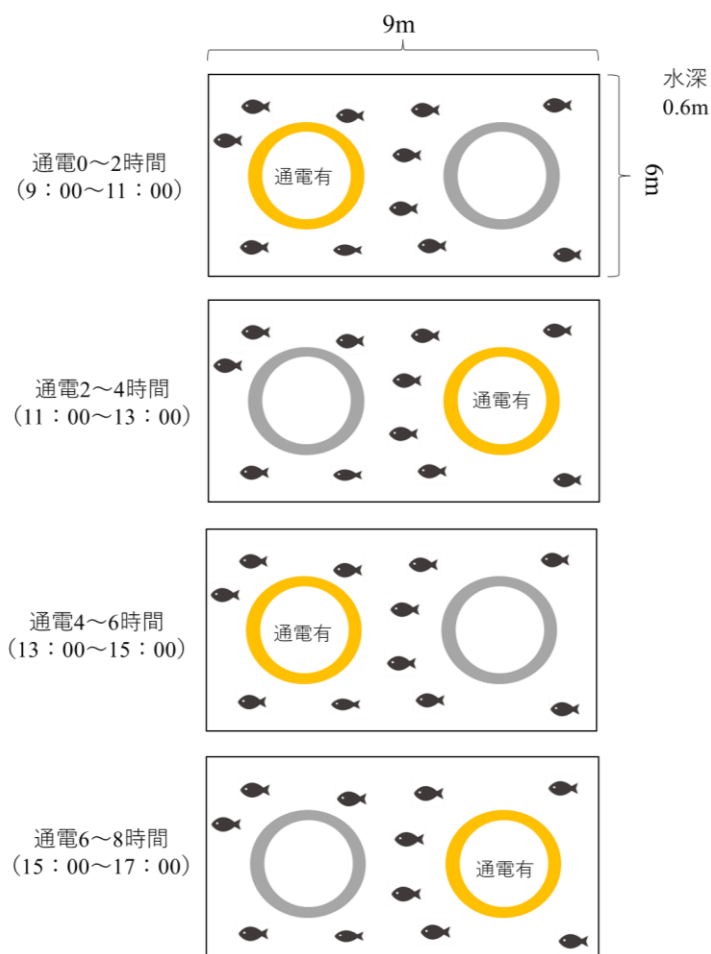


図 3.6-163 行動観察時の通電条件

3.6.7.4.2. マアジ、マサバのストレス指標、呈味指標の調査 (周波数 1 kHz)

コイル通电によるマアジ、マサバのストレス指標、呈味指標の調査について、分析するためのサンプル抽出は、令和4年10月14日(金)にニチモウ所有の海水水槽で行った。魚が逃避しないよう、海水水槽に設置した2つのコイルの内面に沿うように魚逃避防止用網(トリカルネット)を取り付けた(図 3.6-164 (a))。2つのコイル組の一方のみに通电し、通电したコイル組の方を通电あり区、通电していないコイル組の方を通电なし区とした(図 3.6-164 (b))。

対象魚のマアジ、マサバは令和4年10月12日に長崎県佐世保市の蓄養生簀網から取り上げた活魚を運搬した後、500L海水水槽に移送し、2日間馴致した。その後、通电あり区、通电なし区それぞれにマアジ12尾、マサバ12尾を放流した。

実験では、通电あり区は3kW、1kHzの条件で午前9時から17時(計480分)まで通电した。実験開始から5分、120分、240分、480分経過後の通电あり区と通电なし区で各3尾サンプルを抽出して、ストレス指標として可食部のATP含量と呈味指標として遊離アミノ酸合計量を分析するための試験片を作成した。海水水槽が設置されている建屋の室温は22.1~23.6°C、実験に用いた海水の水温は20.3~20.4°C、溶存酸素量は7.98~11.90 mg/L、塩分濃度は3.2~3.3%、pHは7.7~7.8であった。

分析に用いた可食部位の試験片採取、保蔵とその分析手法は、3.6.4.4と同様である。分析は、凍結保存したサンプルを公益財団法人・函館地域産業振興財団・北海道立工業技術センターへ冷凍便で輸送した後、ATP含量と遊離アミノ酸についてHPLC(高速液体クロマトグラフ)により行った。

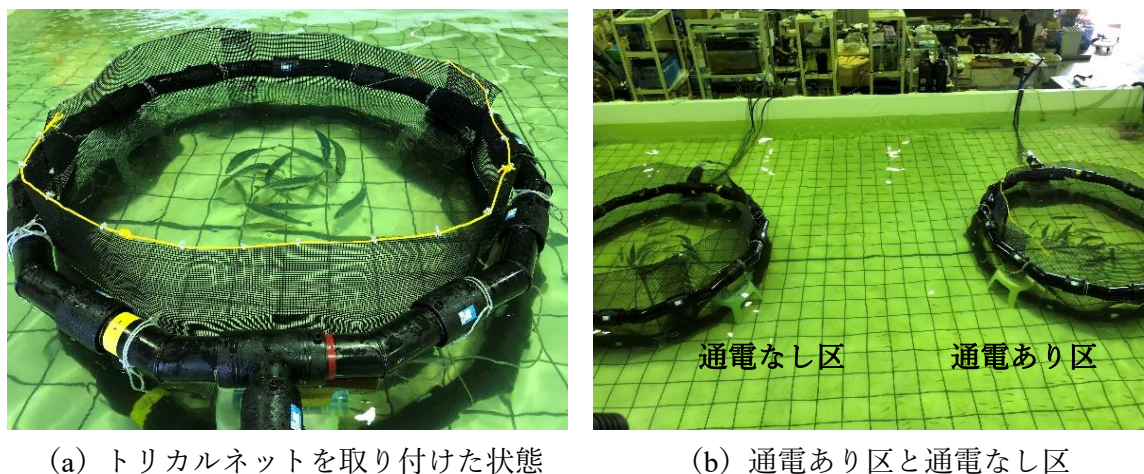


図 3.6-164 ストレス指標、呈味指標の調査時の実験環境

3.6.7.4.3. カタクチイワシの行動観察 (周波数 1 kHz)

コイル通电下におけるカタクチイワシの行動を観察し、通电による行動への影響を調査した。令和4年10月17日(月)にニチモウ所有の海水水槽にて行った。

海水水槽にカタクチイワシ 500 尾放流した。カタクチイワシは、愛媛県近海のまき網漁業で漁獲された個体を海面生簀で蓄養し、令和 4 年 10 月 16 日に活魚車で運搬した後、海水水槽に移送し、約 24 時間馴致した。

実験は、3.6.7.4.1 と同様の方法で行った。海水水槽が設置されている建屋の室温は 20.8~22.5°C、実験に用いた海水の水温は 20.2~20.4°C、溶存酸素量は 8.22~10.23 mg/L、塩分濃度は 3.2~3.3%、pH は 7.7~7.8 であった。

3.6.7.4.4. マアジ、マサバの行動観察（周波数 1.5 kHz）

コイル通電下におけるマアジ、マサバの行動を観察し、通電による行動への影響を調査した。調査は、令和 4 年 10 月 19 日（水）にニチモウ所有の海水水槽にコイルを設置して行った。

海水水槽にマアジ、マサバをそれぞれ 75 尾（計 150 尾）放流した。マアジ、マサバは 3.6.7.4.1 と同じ個体とした。

実験では、2つのコイル組に交互に通電した。通電条件は 3 kW、1.5 kHz で 9 時~11 時までの 2 時間は一方のコイル組に通電し、11 時~13 時はもう一方のコイル組に通電した。これ以降 17 時まで、1 時間おきに 2つのコイル組に交互に通電し、その時のマアジ、マサバの行動を観察した。海水水槽が設置されている建屋の室温は 19.7~22.4°C、実験に用いた海水の水温は 20.1~20.3°C、溶存酸素量は 7.87~8.27 mg/L、塩分濃度は 3.2~3.4%、pH は 7.8 であった。

行動観察はビデオ（SONY HDR-CX680）による撮影と目視により行った。

3.6.7.4.5. マアジ、マサバのストレス、呈味指標の調査（周波数 1.5 kHz）

コイル通電によるマアジ、マサバのストレス指標、呈味指標の調査について、分析するためのサンプル抽出は、令和 4 年 10 月 20 日（木）にニチモウ所有の海水水槽で行った。魚が逃避しないよう、コイル内側にトリカルネットを取り付けた（図 3.6-164 (a) 参照）。

対象魚のマアジ、マサバは長崎県佐世保市の蓄養生簀から取り上げた個体とした。通電あり区、通電なし区それぞれにマアジ 12 尾、マサバ 12 尾を放流した。

実験では、10 月 20 日に通電あり区は 3 kW、1.5 kHz の条件で通電し、5 分、240 分、480 分経過後のサンプルを通電あり区と通電なし区で各 3 尾を抽出して、可食部の ATP 含量及び遊離アミノ酸合計量を分析するための試験片を作成した。海水水槽が設置されている建屋の室温は 18.8~22.8°C、実験に用いた海水の水温は 19.8~20.1°C、溶存酸素量は 8.31~8.80 mg/L、塩分濃度は 3.5%、pH は 7.8~7.9 であった。

なお、分析に用いた可食部位の試験片採取、保蔵とその分析手法は、3.6.4.4 と同様とした。

3.6.7.5. 実験結果

3.6.7.5.1. マアジ、マサバの行動観察（周波数 1 kHz）

2つのコイル組を2時間おきに交互に通電した際のマアジ、マサバの行動を観察した。結果、どちらのコイル組に通電していても、群れをなしてコイルの間を遊泳していることが多く、2魚種が混ざって行動していた（図 3.6-165）。通電による行動への影響はみられなかった。

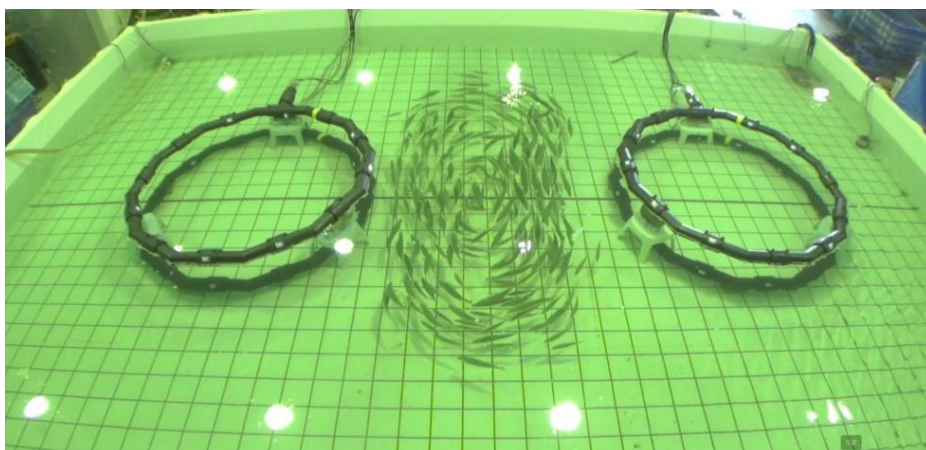


図 3.6-165 マアジ、マサバの行動観察（周波数 1 kHz）

3.6.7.5.2. マアジ、マサバのストレス指標、呈味指標の調査（周波数 1 kHz）

A マアジのストレス指標（ATP 含量）の分析結果

マアジの ATP 含量の分析結果を図 3.6-166 に示す。マアジの ATP 含量の平均値（3尾）は、通電 5 分後、120 分後、240 分後、480 分後のいずれの場合も通電あり区と通電なし区で同程度であった。これらの結果から、通電ありとなしではストレス指標に有意な差はみられなかった。

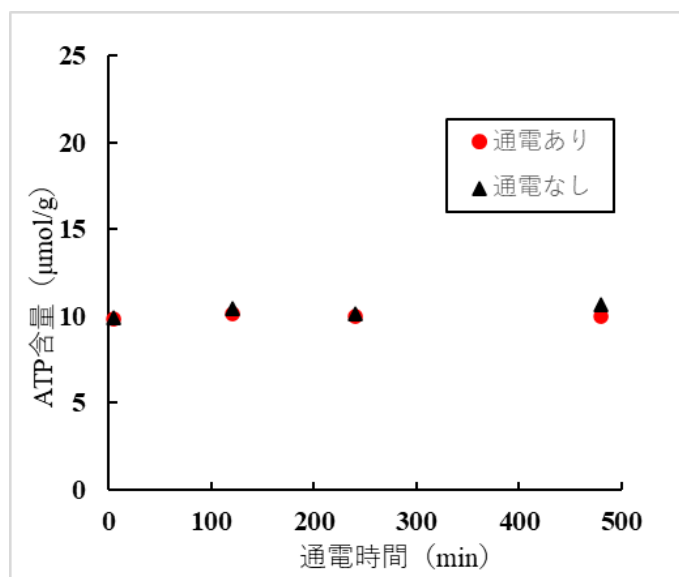


図 3.6-166 マアジの通电有無による ATP 含量の変化 (周波数 1 kHz)

B マアジの呈味指標 (遊離アミノ酸) の分析結果

マアジの遊離アミノ酸合計量の平均値 (3尾) の分析結果を図 3.6-167 に示す。遊離アミノ酸合計量の平均値は、通电 5 分後は通电なし区が高かった。一方で、通电 120 分後は通电あり区が高かった。また、240 分後、480 分後は通电あり区と通电なし区で同程度であった。これらの結果より、各通电時間について通电あり区となし区の値の高低に傾向はなく、通电ありとなしでは呈味指標に有意な差はみられなかった。

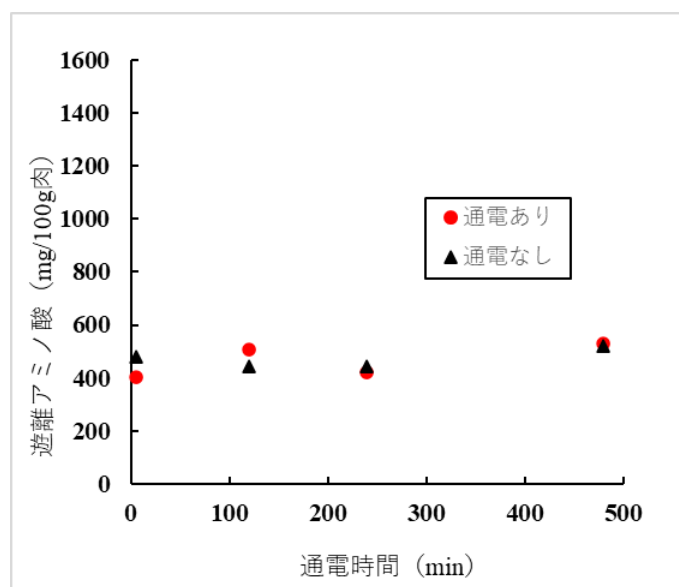


図 3.6-167 マアジの通电有無による遊離アミノ酸量の変化 (周波数 1 kHz)

C マサバのストレス指標（ATP 含量）の分析結果

マサバの ATP 含量の分析結果を図 3.6-168 に示す。マサバの ATP 含量の平均値（3 尾）は、通電 5 分後、240 分後は通電あり区が高かった。一方、通電 120 分後、480 分後は通電あり区と通電なし区で同程度であった。これらの結果より、各通電時間について通電あり区となし区の値の高低に傾向はなく、通電ありとなしでは呈味指標に有意な差はみられなかった。

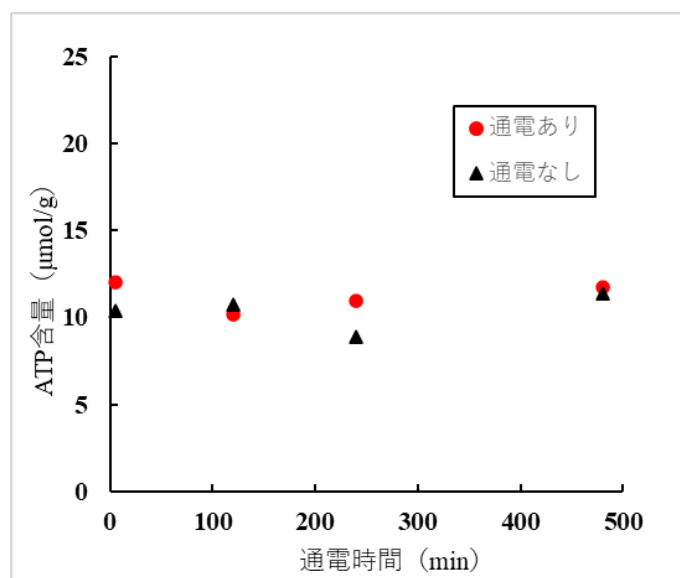


図 3.6-168 マサバの通電有無による ATP 含量の変化（周波数 1 kHz）

D マサバの呈味指標（遊離アミノ酸）の分析結果

マサバの遊離アミノ酸合計量の平均値（3 尾）の分析結果を図 3.6-169 に示す。マサバの遊離アミノ酸合計量の平均値（3 尾）は、通電 5 分後、240 分後は通電あり区が高かった。一方で、通電 120 分後は通電なし区が高かった。また、480 分後は通電あり区と通電なし区で同程度であった。これらの結果より、各通電時間について通電あり区となし区の値の高低に傾向はなく、通電ありとなしでは呈味指標に有意な差はみられなかった。

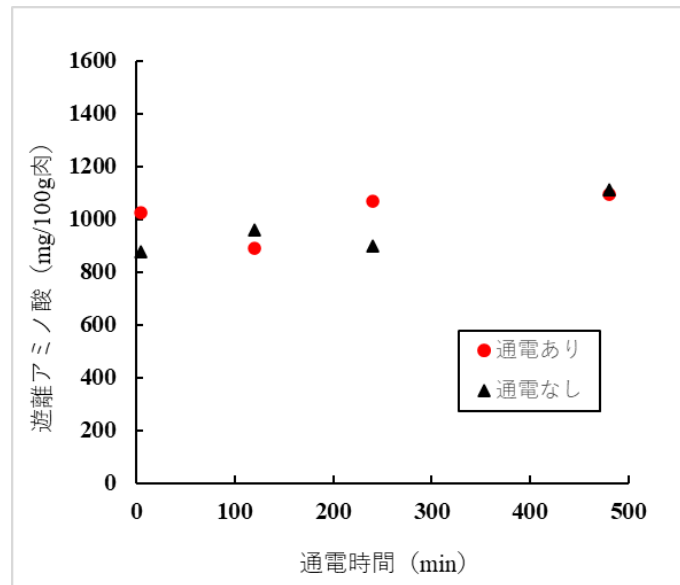
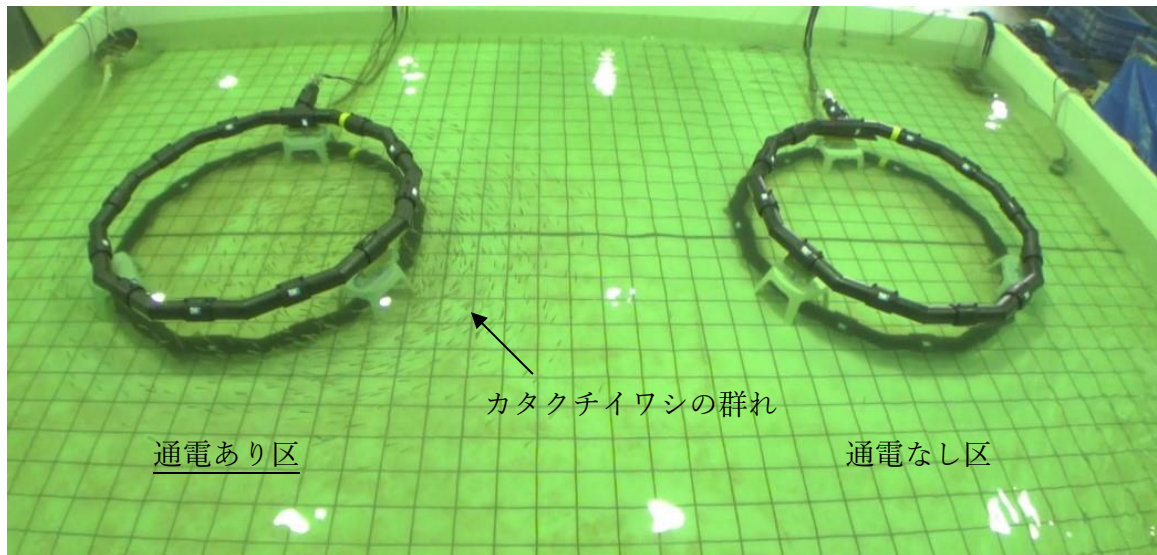


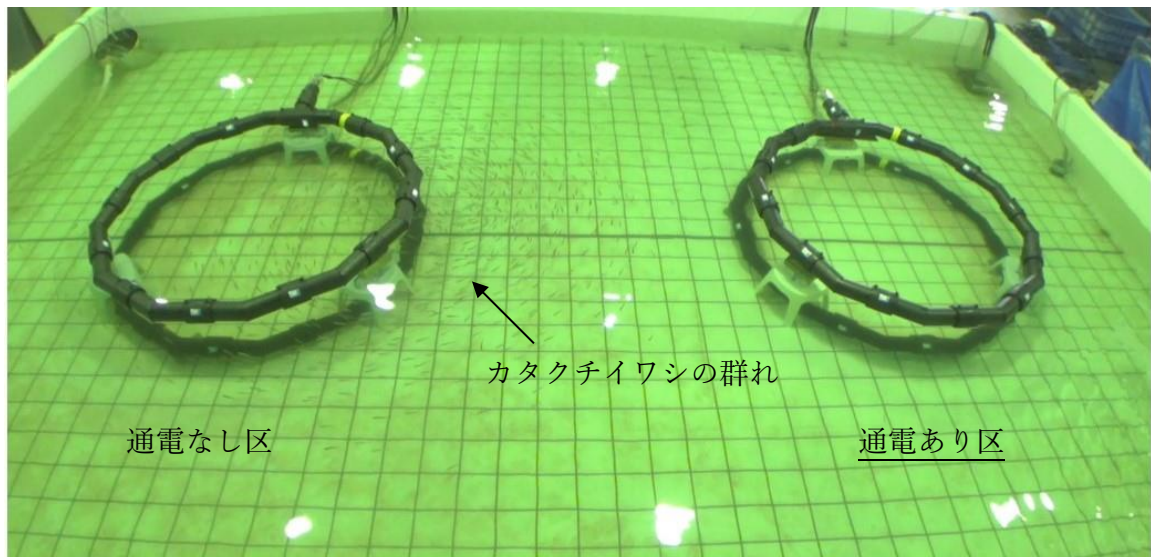
図 3.6-169 マサバの通电有無による遊離アミノ酸量の変化（周波数 1 kHz）

3.6.7.5.3. カタクチイワシの行動観察（周波数 1 kHz）

2つのコイル組に2時間おきに交互に通電した際のカタクチイワシの行動を観察した。結果、どちらのコイルに通電していても、左のコイル付近で群れをなして遊泳していることが多く（図 3.6-170）、通電による行動への影響はみられなかった。



(a) 通電 4～6 時間のとき



(b) 通電 6～8 時間のとき

図 3.6-170 カタクチイワシの行動観察 (周波数 1 kHz)

3.6.7.5.4. マアジ、マサバの行動観察 (周波数 1.5 kHz)

2つのコイルを2時間おきに交互に通電し、マアジ、マサバの行動を観察した。結果、周波数 1 kHz の場合 (3.6.7.5.1) と同様にどちらのコイルに通電していても、群れをなしてコイルの間を遊泳していることが多く、2魚種が混ざって行動していた (図 3.6-171)。通電による行動への影響はみられなかった。

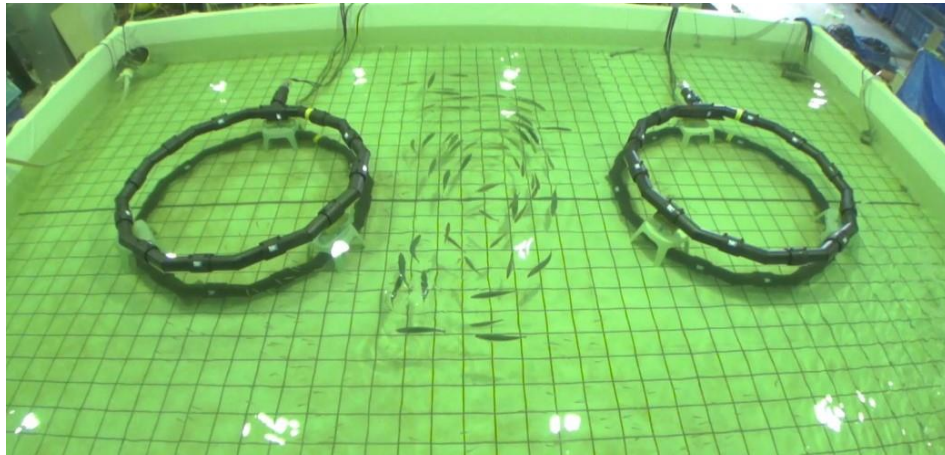


図 3.6-171 マアジ、マサバの行動観察（周波数 1.5 kHz）

3.6.7.5.5. マアジ、マサバのストレス、呈味指標の調査（周波数 1.5 kHz）

A マアジのストレス指標（ATP 含量）の分析結果

マアジの ATP 含量の分析結果を図 3.6-172 に示す。マアジの ATP 含量の平均値（2 尾）は、通電 5 分後、240 分後、480 分後いずれの場合も通電あり区と通電なし区で同程度であった。これらの結果から、通電ありとなしではストレス指標に有意な差はみられなかった。

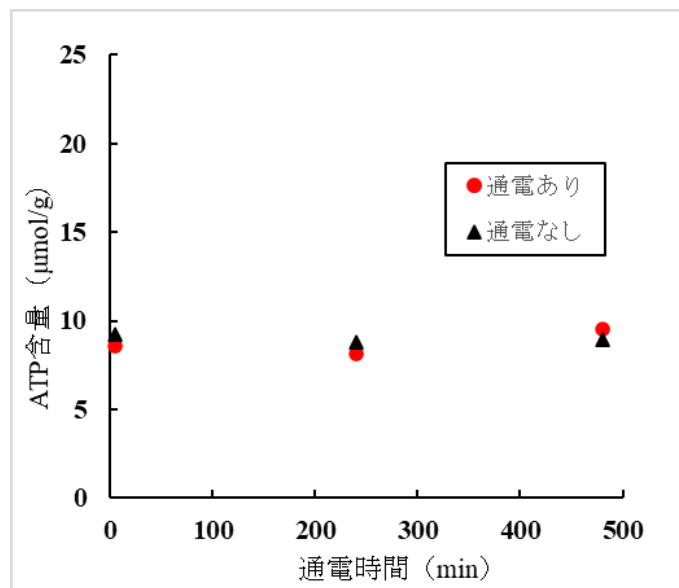


図 3.6-172 マアジの通電有無による ATP 含量の変化（周波数 1.5 kHz）

B マアジの呈味指標（遊離アミノ酸）の分析結果

マアジの遊離アミノ酸合計量の平均値（2尾）の分析結果を図 3.6-173 に示す。マアジの遊離アミノ酸合計量の平均値（2尾）は、通電 5 分後、480 分後は通電なし区が高かった。一方で、通電 240 分後は通電あり区と通電なし区が同程度であった。これらの結果より、各通電時間について通電あり区となし区の値の高低に傾向はなく、通電ありとなしでは呈味指標に有意な差はみられなかった。

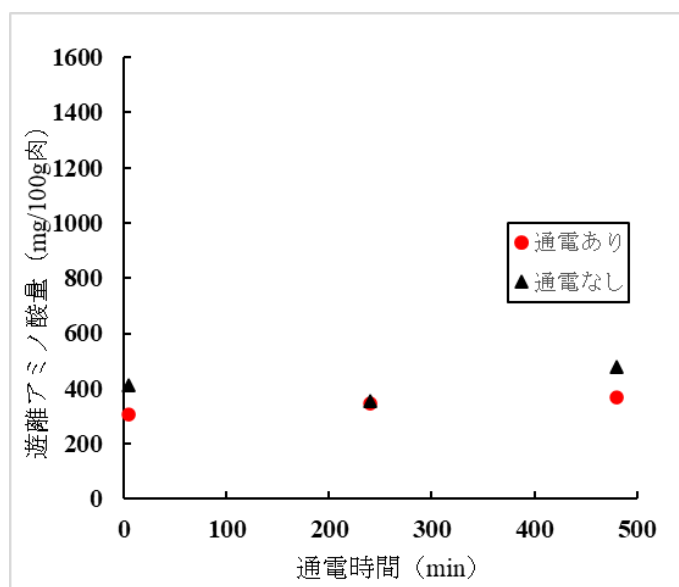


図 3.6-173 マアジの通电有無による遊離アミノ酸量の変化（周波数 1.5 kHz）

C マサバのストレス指標（ATP 含量）の分析結果

マサバの ATP 含量の分析結果を図 3.6-174 に示す。マサバの ATP 含量の平均値（2尾）は、通電 5 分後、240 分後、480 分後いずれの場合も通電あり区と通電なし区で同程度であった。これらの結果から、通電ありとなしではストレス指標に有意な差はみられなかった。

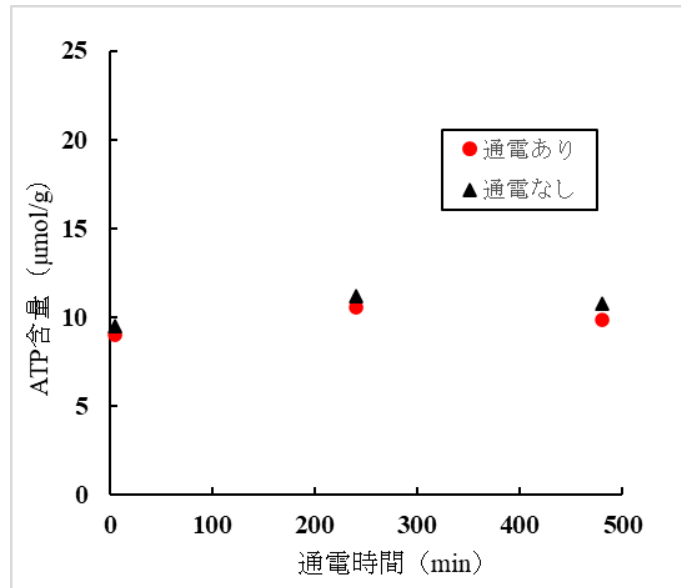


図 3.6-174 マサバの通电有無による ATP 含量の変化 (周波数 1.5 kHz)

D マサバの呈味指標 (遊離アミノ酸) の分析結果

マサバの遊離アミノ酸合計量の平均値 (2尾) の分析結果を図 29 に示す。マサバの遊離アミノ酸合計量の平均値 (2尾) は、通电 5 分後は通电あり区が高かった。一方で、通电 480 分後は通电なし区が高かった。また、通电 240 分後は通电あり区と通电なし区が同程度であった。これらの結果より、各通电時間について通电あり区となし区の値の高低に傾向はなく、通电ありとなしでは呈味指標に有意な差はみられなかった。

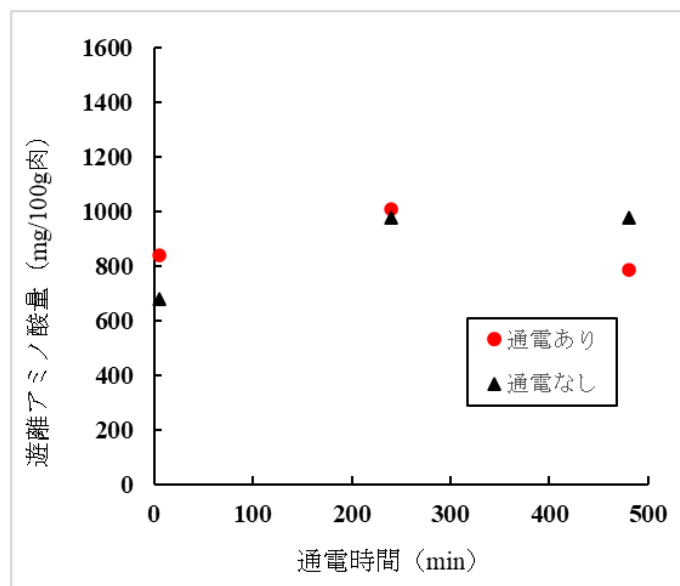


図 3.6-175 マサバの通电有無による遊離アミノ酸量の変化 (周波数 1.5 kHz)

3.6.7.6. 考察

海中ワイヤレス給電を行う際、発生していると考えられる電磁界が沿岸域の漁獲対象魚種（マアジ、マサバ、カタクチイワシ）に与える影響について調査した。

行動観察の結果、通電の有無による行動への影響は極めて小さい、あるいは、ないと言える。また、ストレス指標と呈味指標の調査結果においても、通電の有無による影響は極めて小さい、あるいは、ないと言える。1 kHz と 1.5 kHz の周波数の違いによる結果の差も見られなかった。

3.6.8. 海藻類の成長度の調査（小型コイル）

3.6.8.1. 実験の概要

海中ワイヤレス給電装置を沿岸域の海底に設置することを想定し、日本の沿岸域で多く生息する海藻類への電磁界の影響を調査した。

本実験では、小型コイルを用いて陸上海水水槽の中で 3.6.7 の実験と同等の磁界強度環境を作り、ワカメ、アラメ、ツルアラメを対象にして周波数 1.5 kHz で実験した。魚類の実験と同様に 2 つの水槽とコイル組を用意し、片方のコイル組にのみ一定時間通電したあとの成育度とストレス指標の変化を、通電の有無に対して比較した（比較実験）。ストレス指標は葉部の最大量子収率（=吸収光量あたりの CO₂ 吸収量、または O₂ 発生量、単位なし）とした。また、呈味指標は遊離アミノ酸合計量として評価した。

【実験期間】2023 年 1 月 16 日～1 月 19 日（環境構築、準備）

2023 年 1 月 23 日～1 月 26 日（実験、測定、撤収）

3.6.8.2. 実験場所

海藻類のサンプル入手が容易で、かつある程度の期間の成育が可能で、成育状態の定量評価ができるような設備を所有している環境として、島根県隠岐郡海士町にある岡部株式会社応用藻類学研究所を選定した。周囲を海藻の豊富な海岸で囲まれており、水質も良く、実験環境として申し分ない。研究所の場所と外観を図 3.6-176 に示す。

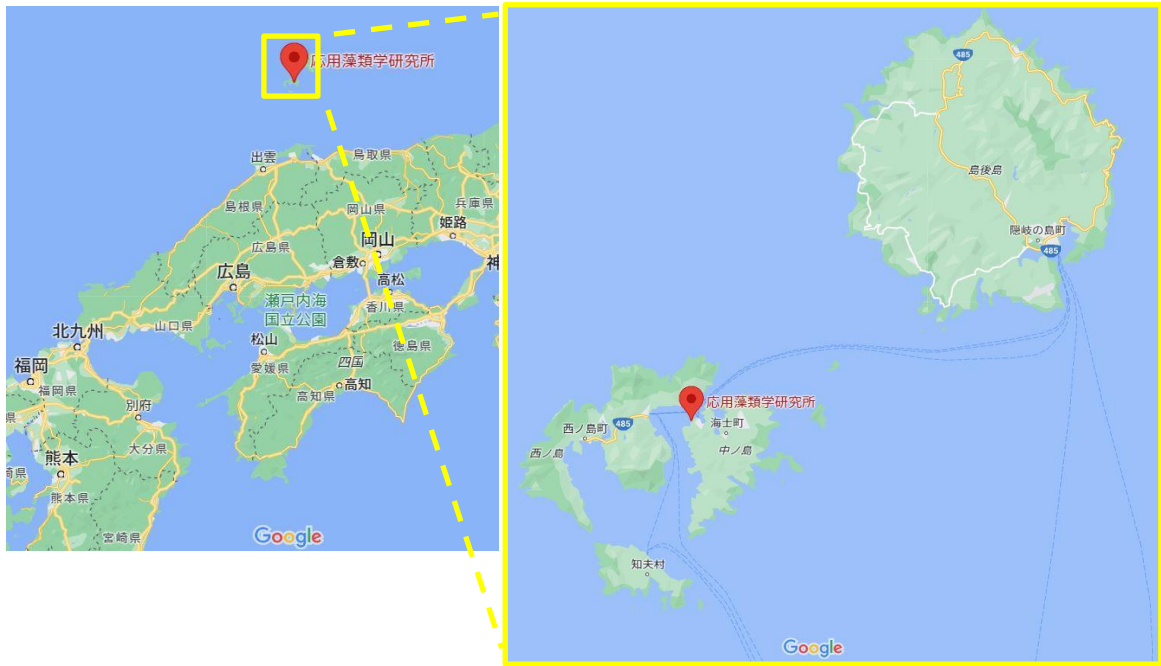


図 3.6-176 応用藻類学研究所の場所と外観

3.6.8.3. 実験用ワイヤレス給電システム

3.6.8.3.1. 実験用ワイヤレス給電システムの概要

海藻類を対象とするため小型水槽で実験できるように小型コイルを用いて実験環境を構築した。コイルの直径が小さいと、少ない電力でも磁界は強い。図 3.6-177 に本実験用のワイヤレス給電システムの外観を示すが、直径 20 cm のコイル（導体径 1.6 mm の被覆単線を 25 巻したもの）を 7.5 cm 間隔で配置しており卓上サイズに収まる。それでも周波数 1.5 kHz の送電電力 17.5 W で、1 mT のコイル中心部の磁界強度を得ることができる。これは 3.6.7.3.3 で示した直径 2 m コイルを用いた 3 kW 電力伝送の場合を上回る磁界強度である。用いた機器一覧は表 3.6-26 に示す。

水槽内にコイルを設置した実験系を図 3.6-178 に示す。比較実験用に水槽は 2 つある。

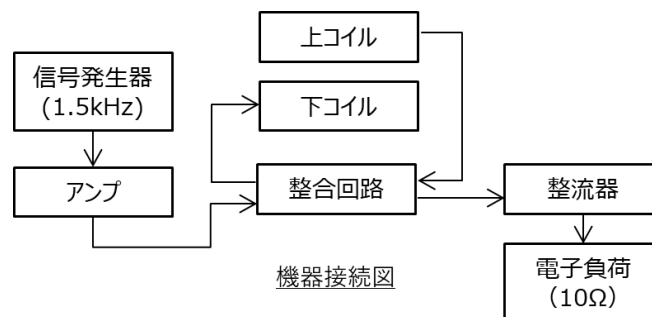
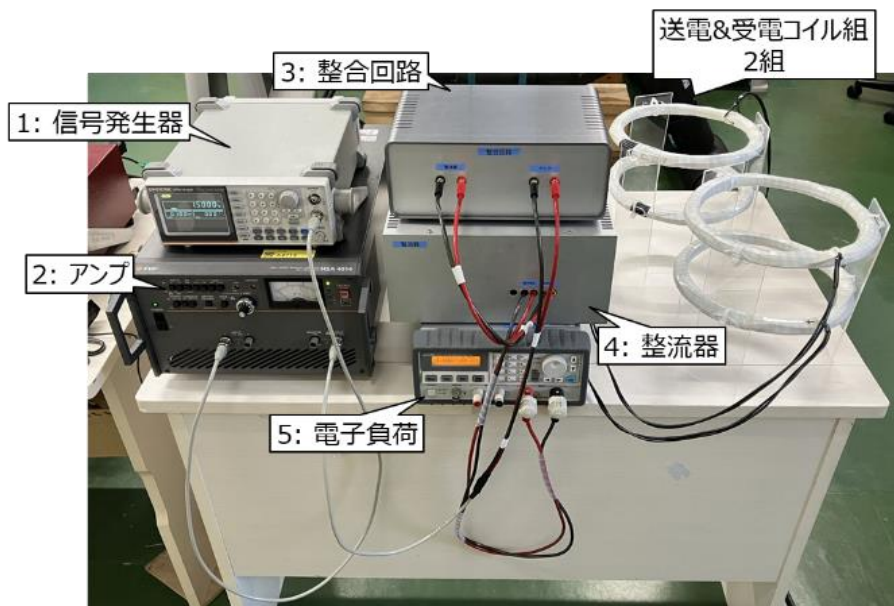


図 3.6-177 藻類実験用ワイヤレス給電システムの外観と接続図

表 3.6-26 使用機器一覧

No.	機器名	品番など
1	信号発生器	AFG-2105 (GW instek)
2	アンプ	HSA4014 (NF)
3	整合回路	コンデンサ組込
4	整流器	S50VB80 (新電元工業)
5	電子負荷	3721A (ARRAY)
	コイル組	内径 20 cm、間隔 7.5 cm



図 3.6-178 藻類実験の実験系

3.6.8.3.2. 磁界強度の確認

周波数 1.5 kHz、送電電力 17.5 W、受電電力 5.2 W、効率約 30%の条件で、図 3.6-178 の磁界強度を測定した位置と結果を図 3.6-179 と表 3.6-27 に示す。海藻をセットするコイル内の磁界は ICNIRP ガイドラインの職業的暴露レベルを超えており、直径 2 m コイルで 3 kW の電力伝送中の磁界強度（図 3.6-161 参照）も超えている。対照区では公衆暴露レベルを下回っており、比較実験の環境として問題ないことを確認した。

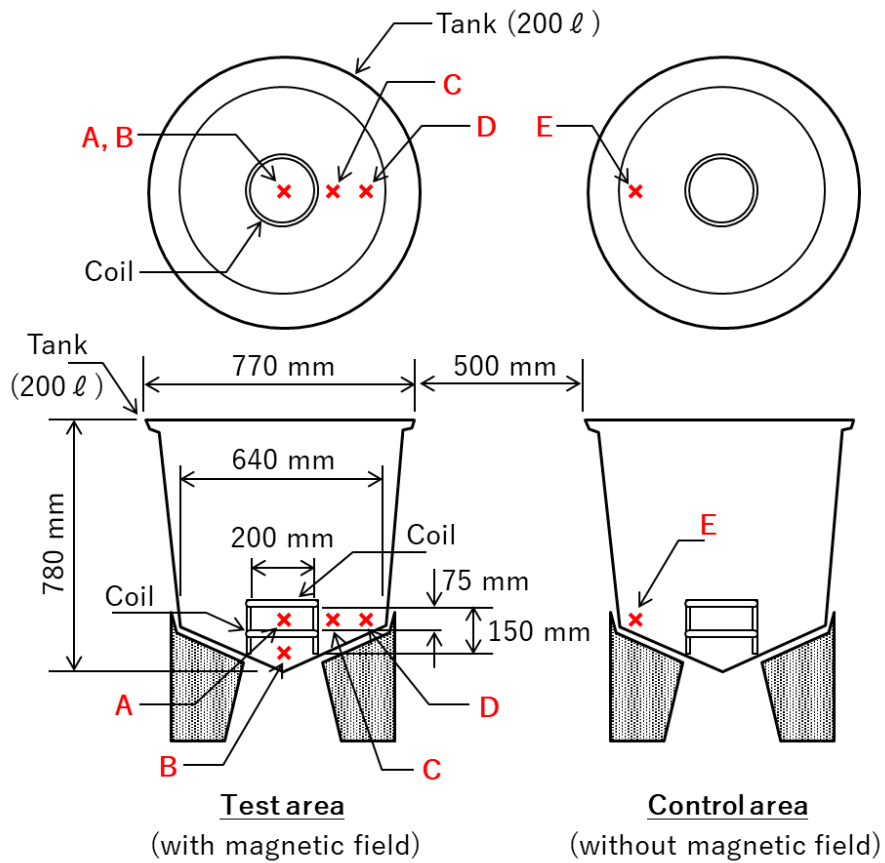


図 3.6-179 水槽内の磁界測定位置

表 3.6-27 藻類実験系の磁界強度測定結果 (@1.5 kHz)

測定位置	実測値
A	1069
B	464
C	137
D	82
E	0.4
職業的暴露レベル	200
公衆暴露レベル	53

単位： μT

3.6.8.4. 実験方法

3.6.8.4.1. 海藻類の成育度の調査

コイル通電による海藻類の成育度の調査は、令和5年1月23日(月)～令和5年1月26日(木)に岡部株式会社応用藻類学研究所(以下、岡部、島根県隠岐郡海士町大字福井1467)で行った。

岡部所有の循環式丸型海水水槽(直径75 cm×高さ55 cm、容積200 L、以下、丸型海水水槽)を2つ設け、それぞれ中央の底部に小型海中ワイヤレス給電装置(直径20 cm、コイル間隔7.5 cm、以下、小型コイル)を設置した(図3.6-180)。それぞれの丸型海水水槽には、海藻類の成育を促進するため、蛍光灯8本とLED12本を点灯し、日中は常時光合成を行う実験条件とした。小型コイルが設置された2つの丸型海水水槽は、一方のみに通電し、通電あり水槽と通電なし水槽と設定した(図3.6-181)。

小型コイル内側にワカメ4株、アラメ3株、ツルアラメ3株を約3cmの棒に各海藻の仮根部を接着剤で固定した後(図3.6-182)、FRP板に取り付け、通電あり水槽、通電なし水槽それぞれの小型コイル内に設置した(図3.6-183)。なお実験に供したワカメ、アラメ、ツルアラメは、岡部所有の海水かけ流し水槽で栽培したものを使用しており、短期間での成育度を評価するため、一般的に成育が速いとされる、葉部の長さが約10 cmの海藻を選定した。

実験では、1月24～26日の3日間にわたり、9時～15時に通電あり水槽のコイルに17.5 W(信号発生器の振幅設定値1.5 V_{rms}、アンプ設定値×10)、1.5 kHzの条件で6時間の通電を行った。丸型海水水槽が設置されている実験室の室温は8.7～10.7°C、実験に用いた海水の水温は12.5～13.6°C、溶存酸素量は10.76～11.36 mg/L、塩分濃度は3.3%、pHは8.0～8.1、丸型海水水槽の中央部の光量は100～120 μmol/m²/sであった。

1月24日の通電開始時と1月26日の通電終了時に各海藻の葉部の最大長さ、最大幅の変化量を画像解析より計測した結果から成育度を評価した。

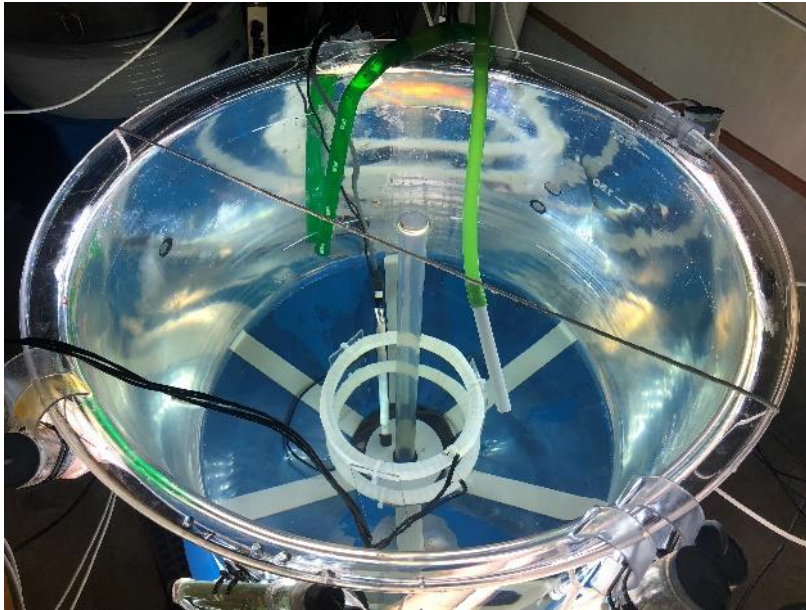


図 3.6-180 小型コイル設置状態（中央のパイプは海藻セット時には撤去）



図 3.6-181 左：通电あり水槽 右：通电なし水槽



ワカメ（左4株） アラメ（右上3株） ツルアラメ（右下3株）

図 3.6-182 実験に用いた海藻（1水槽あたり）

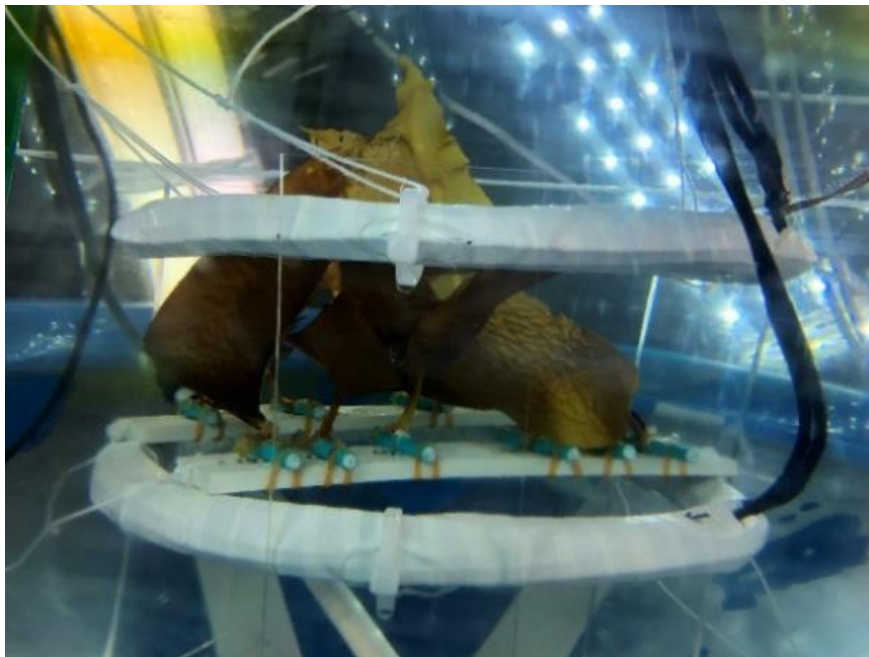


図 3.6-183 FRP板に取り付けた海藻の設置状況

3.6.8.4.2. 海藻類のストレス指標の調査

コイル通電による海藻類のストレス指標の調査は、令和5年1月24日（火）～令和5年1月26日（木）の期間で岡部所有の丸型海水水槽で行った。

実験条件、実験に供した海藻、環境条件は 3.6.8.4.1 と同一とした。

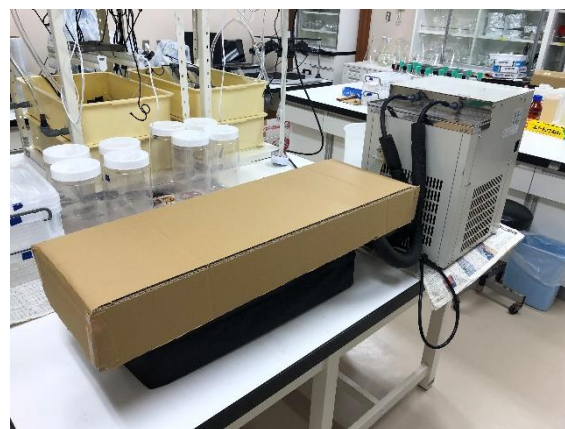
ストレス指標は、実験前の 1 月 24 日 9 時と実験後の 1 月 26 日 15 時にクロロフィル蛍光測定法（2次元イメージング・クロロフィル蛍光測定器（図 3.6-184、旭光通商株式会社製、Open Fluor Cam E-FC 800-O））により、葉部の最大量子収率（=吸収光量あたりの CO₂ 吸収量、または O₂ 発生量、単位なし）の計測から評価した。最大量子収率は、計測前に完全に遮光した冷暗水槽（図 3.6-185、水温 13°C）に 30 分馴致し、光合成を未活性の状態にした後、ワカメ、アラメ、ツルアラメの葉部全体を計測した [52] [53]。



図 3.6-184 2次元イメージング・クロロフィル蛍光測定器



冷暗水槽と海藻を入れたポット



馴致時の状態（遮光中）

図 3.6-185 クロロフィル蛍光測定の前準備の様子

3.6.8.5. 実験結果

3.6.8.5.1. 海藻類の成育度の調査結果

実験前後のワカメ、アラメ、ツルアラメの葉部の最大長さと最大幅の変化量（ワカメ 4 株、アラメ 3 株、ツルアラメ 3 株）について図 19、図 20 に示す。葉部の最大長さの変化量（図 3.6-186）について、ワカメは通電あり水槽が高かった。一方で、アラメとツルアラメは通電なし水槽が高かった。また、葉部の最大幅の変化量（図 3.6-187）について、ワカメとアラメは通電あり水槽が高く、ツルアラメは通電あり水槽と通電なし水槽で同程度であった。これらの結果より、各海藻の葉部の変化量は、通電あり水槽となし水槽で最大長さと最大幅の増加について、明確な傾向はなく、通電ありとなしでは有意な差はみられなかった。

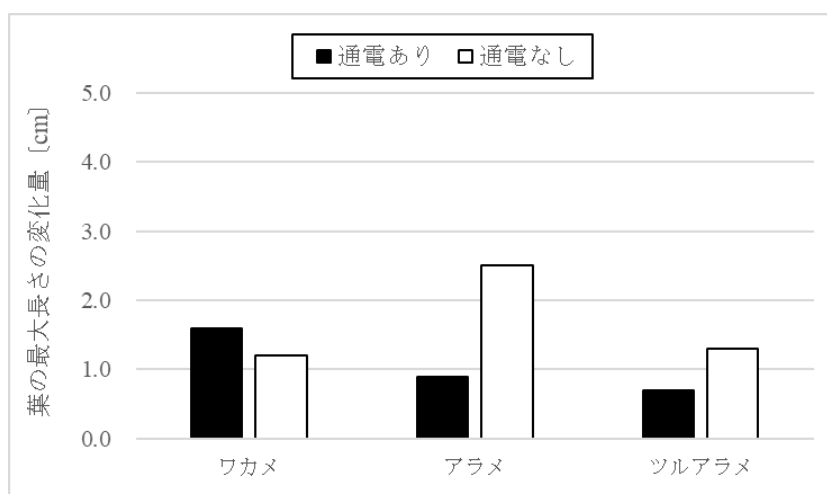


図 3.6-186 通電有無による葉部の最大長さの変化

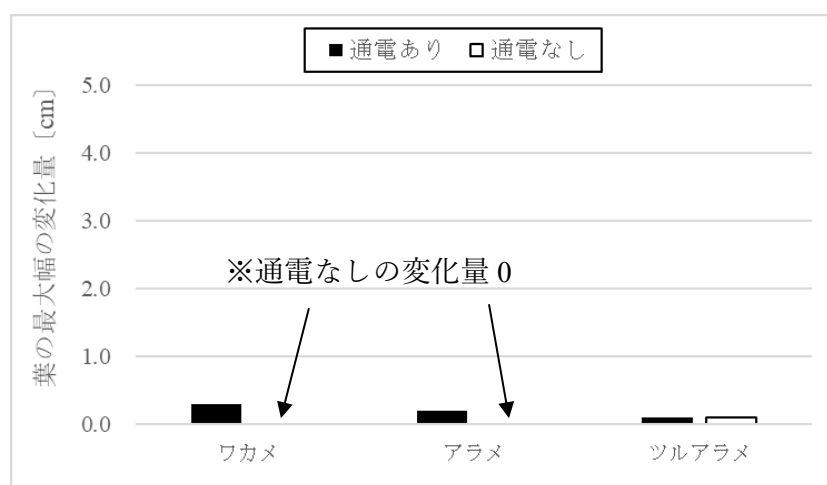


図 3.6-187 通電有無による葉部の最大幅の変化

3.6.8.5.2. 海藻類のストレス指標の調査結果

実験前後のワカメ、アラメ、ツルアラメの葉部全体の最大量子収率の測定例を図 3.6-188 に、測定結果の平均値（ワカメ4株、アラメ3株、ツルアラメ3株）のグラフを図 3.6-189 に示す。ワカメ、アラメ、ツルアラメの葉部全体の最大量子収率の平均値は、通電あり・なしに関わらず、いずれの海藻も実験後の方が低い値であり、通電ありとなしではストレス指標に有意な差はみられなかった。

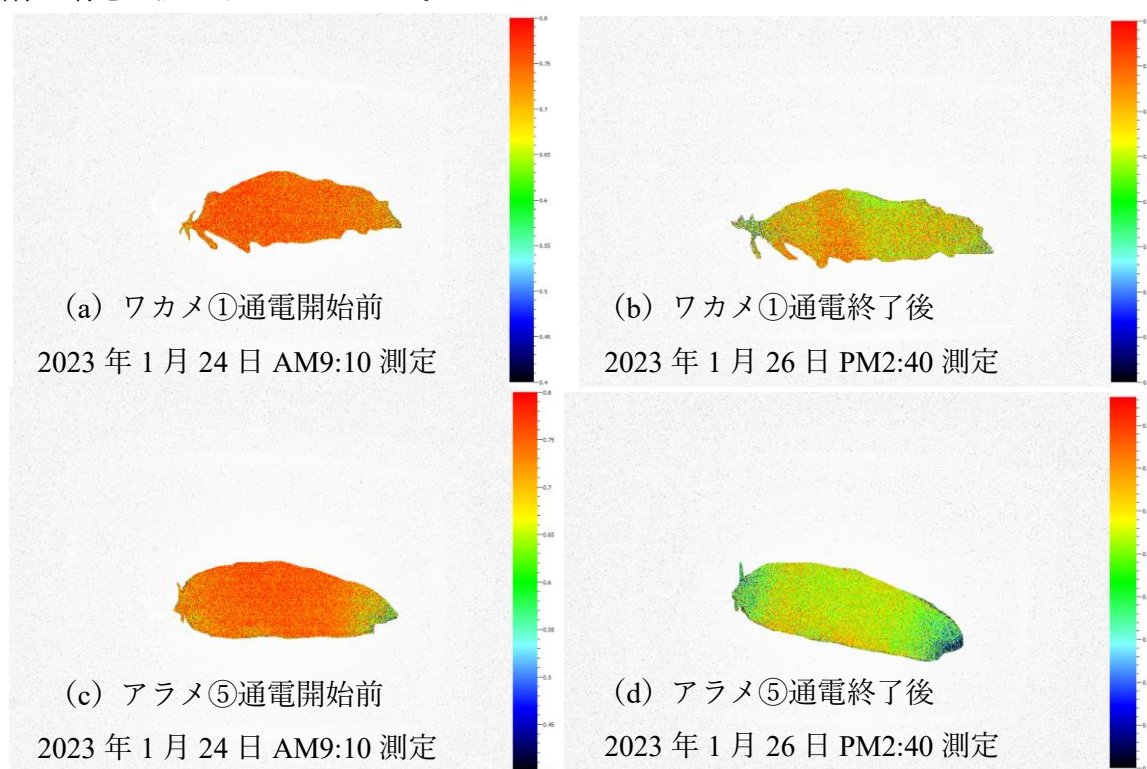


図 3.6-188 クロロフィル蛍光測定結果（最大量子収率）※一部のみ掲載

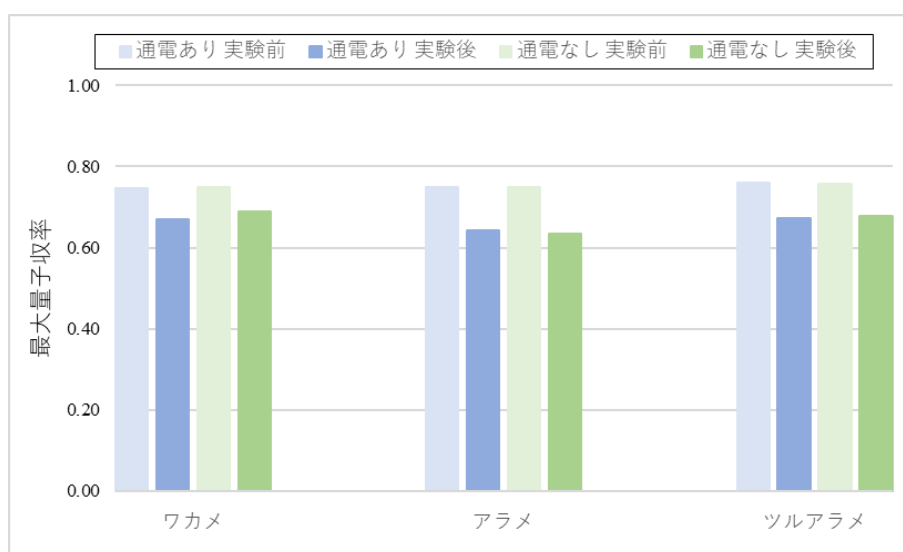


図 3.6-189 通電有無による最大量子収率の変化

3.6.8.6. 考察

丸型海水水槽において強電磁界が発生していると考えられる状況における海藻類（ワカメ、アラメ、ツルアラメ）の調査において、各海藻の葉部の最大長さと同幅の変化量の計測から成育度を評価した。葉部の最大長さの変化量について、ワカメは通電あり水槽が高かった。一方で、アラメ、ツルアラメは通電なし水槽が高かった。また、葉部の同幅の変化量について、ワカメ、アラメは通電あり水槽の値が高く、ツルアラメは通電あり水槽と通電なし水槽は同程度であった。このように、各海藻の葉部の変化量に有意な差がみられなかったため、本実験においてコイルへの通電が海藻類の成育度に与える影響は極めて小さい、あるいは、ないと言える。海面養殖場における2週間（480分/日）の通電によるマダイ成魚の成長率についても変化がみられなかった（3.6.5参照）ことに基づき、海藻類を対象とした本調査でも変化はみられなかったことになる。各海藻の成育度について、葉部の最大長さの変化量は最大で2.5cm、同幅の変化量は最大で0.3cmであり、これらの変化量を見ると通電有無ともに期待する成長は確認されなかった。この原因として、実験期間が短かったことが考えられる。本実験では3日間の実験期間で成育度を評価したが、岡部によると、成育度を調査する期間として1ヵ月程度が望ましいと考える。一方で、陸上海水水槽における長期間での成育度の評価は、海藻の成育に必要な栄養分を常時注入できる環境、コイルの常時稼働、実験場所の確保等の課題があり、長期間の実験は難しく、今後の課題として検討する必要がある。

また、海藻類の成育度の評価と同一環境、同一サンプルで、海藻類のストレス指標として葉部全体の最大量子収率を計測した。いずれの計測においても、通電の有無で有意な差がみられなかったため、通電による影響は極めて小さいと言える。最大量子収率を用いた評価方法は、海藻類のストレス指標を評価する方法として知られている。本調査の最大量子収率は、光合成を未活性の状態にした後に計測した [54]。本調査の実験開始時の最大量子収率は0.75~0.76であり、この値は岡部によると通常値であるとのことから、本調査の測定値は妥当といえる。一方で、実験終了時の最大量子収率は、通電の有無に関わらず0.60~0.70であり、実験開始時より0.05~0.15低下していた。その要因として、海水中の栄養不足の可能性が考えられる。本調査では、実験期間中に実験環境（水温、溶存酸素、塩分濃度、pH）を大きく変化させないようにするため、循環式海水水槽を用いた。循環式の水槽を用いたことで、海藻が成長する際に必要な栄養分が海水中に足りなくなり、十分に吸収できなくなったため、最大量子収率が低下したと考えられる。よって、この影響を小さくするためには、常時新たな海水を注入できる水槽での実験が望ましい。一方で、このような水槽での海藻類の評価は、実験場所の確保、水質の変動等の課題があり、海藻類の通電有無による影響を評価するうえで実験を行うことは難しく、今後の課題として検討する必要がある。

3.6.9. まとめ

本プロジェクトで取り組んだ「強電磁界での魚類等の生態系への影響調査」で行った実験内容について表 3.6-28 にまとめた。いずれの比較実験でも差分は確認されていない。

表 3.6-28 生態系への影響調査の実験内容一覧

期間	場所	コイル	電力・周波数	時間	対象	調査方法	結果
2019/2/18~ 2019/3/1	熊本県 天草市 牛深	φ 1 m	0.1 kW ・ 1 kHz	5 h	マダイ シマアジ	行動観察 乳酸濃度 コルチゾル濃度 ATP 含量	変化 なし
2019/10/24~ 2019/11/1	熊本県 天草市 牛深	φ 1 m	1 kW ・ 1 kHz	5 h	マダイ シマアジ	行動観察 乳酸濃度 コルチゾル濃度 ATP 含量 弾力、官能試験	変化 なし
2020/1/14~ 2020/1/18	北海道 標津郡 標津町	φ 1 m	1 kW ・ 1 kHz	5 h	シロザケ ハタハタ ヌマガレイ アメマス ニジマス ウグイ	行動観察 乳酸濃度 コルチゾル濃度 ATP 含量	変化 なし
2020/7/14~ 2020/7/17	山口県 下関市 小月	φ 1 m	1 kW ・ 1 kHz	24 h	ブリ	行動観察 乳酸濃度 ATP 含量 遊離アミノ酸	変化 なし
2020/8/24~ 2020/8/28	山口県 下関市 小月	φ 1 m	1 kW 3 kW ・ 1 kHz	24 h	マアジ	行動観察 乳酸濃度 コルチゾル濃度 ATP 含量 遊離アミノ酸	変化 なし
2021/10/19~ 2021/11/9	熊本県 天草市 牛深	φ 2 m	3 kW ・ 1 kHz	8 h × 8 日	マダイ	成長度	変化 なし
2021/11/15~ 2021/11/20	北海道 標津郡 標津町	φ 2 m	3 kW ・ 1 kHz	5 h	シロザケ ギンザケ カジカ	乳酸濃度 コルチゾル濃度 ATP 含量 遊離アミノ酸	変化 なし
2022/10/11~ 2022/10/24	山口県 下関市 小月	φ 2 m	3 kW ・ 1 kHz 1.5 kHz	8 h	マアジ マサバ カタクチイワシ	行動観察 ATP 含量 遊離アミノ酸	変化 なし
2023/1/16~ 2023/1/26	島根県 隠岐郡 海士町	φ 0.2 m	17.5W ・ 1.5 kHz	6 h × 3 日	ワカメ アラメ ツルアラメ	成育度 最大量子収率	変化 なし

4. 委託業務全体の成果

4.1. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や目標を超える成果

副次的成果

- ・ (1)強電磁界に対する海水物性の解明にて、電磁界から海水へのエネルギー輸送過程が概ね理解でき、「人為的なエネルギー輸送過程の調整」は難しいことがわかった。さらに、海水中では磁界が伝搬しているとの解釈が一般的であったが、実際には電界がエネルギー伝搬には重要な役割を持っており、海水イオンは電界によって運動し、水分子に衝突することでローカルなエネルギーの逸脱が発生するメカニズムが理解できた。
- ・ (5)充電制御及びデータ伝送のための海中通信方式の確立にて、電波を用いた AUV への充電制御を海水中で実施できただけではなく、AUV に装着したカメラからの画像伝送も行うことが出来た。

4.2. 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

海中での AUV の活動範囲や時間を拡大するため、海中で安定した電源確保ができるワイヤレス給電システムの実現が期待されている。海水のような電磁波の損失の大きな媒質内でワイヤレス給電を行う場合、従来は送受電コイルを極近接させることでコイル間の結合を高めて電力を送る方式が一般的であった。本研究で実施した、ポジションフリー方式の給電技術では、大きな送電コイル内の広い範囲で高効率かつ大電力で受電可能であること明らかにしており、海中給電技術としては画期的なものである。

これまで AUV の運用は船と一体であったが、本方式の充電スタンドを探査する海中に設置すれば、人を介することなく無人で作業を行えるようになるため、気象などの影響を受けず効率的な運用が可能となる。これにより AUV を無人で給電させて長期間運用でき

る可能性が高まり、関連する産業分野の発展に幅広く寄与し得る。

一例として、令和 4 年度よりいであ社が実施している「水中自律航行システムに向けた画像解析による位置推定手法の開発」の研究に活用し、本研究成果を活用発展させた水中充電ステーションを製作することで AUV による実海域実験を効率に行うことを目論んでいる。本給電技術と、いであ社の画像解析による位置推定技術を組み合わせることで、AUV を無人で長期間自立運用できることが可能になり、港湾警備やインフラ監視等の海中作業を省人化、無人化できる。また、AUV だけでなく、海中の観測機器、監視システム、海中センサなどへも給電できるため、機器の運用自由度が大幅に増し、海中での様々な活動における利用範囲が広がることを期待できる。これらにより、関連する産業分野の発展に大きく寄与し得る。

4.3. 研究成果の発信・発表に関する活動

<国際学会発表での受賞>

発表した成果	発表者	発表場所	時期	受賞内容
A Highly Efficient and High Degree of Freedom of Position kW-class Wireless Power Transfer system in Seawater for Small AUVs	Ryosuke Hasaba 他	2021 IEEE MTT-S Wireless Power Transfer Conference (WPTC 2021)	2021/6	Best Industry Paper

<研究実施において得られた派生的な成果>

- ・ 令和4年度安全保障技術研究推進制度「水中自律航行システムに向けた画像解析による位置推定手法の開発」にて、本研究成果を活用した水中充電ステーションを製作することで AUV による実海域実験の効率化を図っている。
- ・ 令和3年度国立研究開発法人情報通信研究機構の Beyond 5G 研究開発促進事業「海中・水中 IoT における無線通信技術の研究開発」にて、パナソニックホールディングス(株)が開発した電波による水中通信技術を活用発展させて、電波を使った海中での通信距離のさらなる拡大を図っている。

5. プロジェクトの総合的推進

5.1. 研究実施体制とマネジメント

効率的な研究プロジェクト運営を行うため、プロジェクト管理を行う専門部署を設置し、デザインレビュー等の研究の質を高めるための取り組みを行うとともに、プロジェクト進行に関わる社内各部署（人事や経理等）との調整を行った。

5.2. 経費の効率的執行

無駄が無く、適正な経費の執行を行うため、プロジェクト管理を行う専門部署を設置し、物品や外注費等の購入に関わる経費執行状況の確認、作業日報の確認及び整備、経理関係書類の確認、定期的なレビューの実施等を行った。さらに、経費に関わる事務処理を担当する事務処理担当者を配置し、物品や外注費等の購入に関わる事務手続き、作業日報の作成とりまとめ等を専門的に行うことで、効率的な経費の執行を行った。

6. まとめ・今後の予定

本研究では、海中に3連コイルによる海中充電スタンドを設置し、3kWの電力を伝送効率75%以上で海中移動体(AUV)へポジションフリーでワイヤレス給電できることを明らかにした。

本技術により、AUVを給電させながら無人で長期間運用できる可能性が高まり、関連する産業分野の発展に幅広く寄与し得る。

今後は、令和4年度安全保障技術研究推進制度「水中自律航行システムに向けた画像解析による位置推定手法の開発」にて、本研究成果を活用した水中充電ステーションを製作し、AUVによる実海域実験の効率化を図るとともに、関係機関と連携協力しながら関連する産業分野の発展に幅広く寄与し得る革新的な技術の創出を継続していく予定である。

7. 研究発表・知的財産権の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	3件
学会発表	15件
展示・講演	該当なし
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	1件

(2) 知的財産権等の状況

発明の名称	発明者	出願 登録 区分	出願番号 (出願日)	出願 区分	出願 国	登録番号 (登録日)
送電コイル、送電装置および海中給電システム	岡本克也 他	出願	2019-175943 (2019/9/26)	国内	日本	
送電用コイル、送電装置および海中給電	岡本克也 他	出願	JP2020/036429 (2020/9/25)	国外	PCT	
水中給電システムおよび受電装置	八木達雄 他	出願	2020-183275 (2020/10/30)	国内	日本	
水中給電システムおよび受電装置	八木達雄 他	出願	JP2021/040177 (2021/10/29)	国外	PCT	
受電装置および電力制御方法	八木達雄 他	出願	2020-198635 (2020/11/30)	国内	日本	
受電装置および電力制御方法	八木達雄 他	出願	17/535849 (2021/11/26)	国外	米国	
受電装置、送電電圧制御方法および水中給電システム	八木達雄 他	出願	2020-198636 (2020/11/30)	国内	日本	
受電装置、送電電圧制御方法および水中給電システム	八木達雄 他	出願	17/535858 (2021/11/26)	海外	米国	
ワイヤレスデータ伝送システムおよびワイヤレスデータ伝送方法	江口和弘 他	出願	2021-156850 (2021/9/27)	国内	日本	

ワイヤレスデータ伝送システムおよびワイヤレスデータ伝送方法	江口和弘 他	出願	JP2022/032469 (2022/8/29)	国外	PCT	
ワイヤレス給電システム、送電装置、送電電圧制御方法および充電電流制御方法	八木達雄 他	出願	2023-011872 (2023/1/30)	国内	日本	
位置検知装置、送電装置、位置検知方法、及び位置検知プログラム	山口修一郎 他	出願	2023-017868 (2023/2/08)	国内	日本	

(3) その他特記事項

該当なし

参照文献

- [1] L. D. Landau , E. M. Lifshitz, The Classical Theory of Fields, Pergamon, 1980.
- [2] N. W. Ashcroft , N. D. Mermin, Solid State Physics, Saunders College Publishing, 1976.
- [3] M. P. Allen , D. J. Tildesley, Computer Simulation of Liquids second edition, NewYork: oxford university press, 2017.
- [4] A. Yariv, Optical Electronics in Modern Communications, NewYork: oxford unicersity press, 1997.
- [5] 上田顕, 分子シミュレーション: 古典系から量子系手法まで, 千代田区: 裳華房 , 2003.
- [6] H. Kamberaj, Molecular Dynamics Simulations in Statistical Physics: Theory and Applications, Switzerland: Springer Nature, 2020.
- [7] T. Ohara, “Comtribution of intermolecular energy transfer to heat conduction in a simple liquid,” Journal of Chemical Physics, 1999.
- [8] 犬石嘉雄, 中島達二, 川辺和夫, 家田正之, 誘電体现象論, 東京都千代田区: 社団法人 電気学会, 1973.
- [9] S. S. I. O. Masakazu Matsumoto, “Molecular dynamics simulation of the ice nucleation and growth process leading to water freezing,” Nature, Vol. 416, p.p. 409–413 (2002).
- [10] H. D. O. P. E. Galicia-Andrés, “Temperature dependence of the microscopic structure and density anomaly of the SPC/E and TIP4P-Ew water models. Molecular dynamics simulation results,” Condensed Matter Physics, 2015, Vol. 18, No 1, 13603.
- [11] “<https://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/98.html>”.
- [12] 江口和弘, 川田壮一, 岡本克也, 榑場亮祐, 小柳芳雄, “磁界結合によるポジションフリー海中ワイヤレス電力伝送システムの実験検討,” 信学論(B), VOL.J101-B, No.11, pp958-967, Nov.2018.
- [13] T. Ohira, "Maximum available efficiency formulation based on a black-box model of linear two-port power transfer systems," *IEICE Electronics Express*, vol. 11, no. 13, pp. 1-6, June. 2014.
- [14] 江口和弘, 川田壮一, 岡本克也, 榑場亮祐, 小柳芳雄, "磁界結合によるポジションフリー海中ワイヤレス電力伝送システムの実験検討," 信学論 (B) , Vols. J101-B, no. 11, pp. 958-967, Nov. 2018.
- [15] G. Matthaei, L. Young and E. Jones, "Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures", Artech house Inc., 1980.
- [16] パナソニック株式会社インダストリアルソリューションズ社デバイスソリューションズ事業部, "インダクタ (コイル) の基礎知識", 2020.
- [17] 茂木 晃, “磁気回路 基礎電気工学講座 14,” 共立出版, 1959, pp. 181-182.
- [18] 長谷部 望, 電波工学, コロナ社, 1995.5.10.
- [19] 海洋音響学会編, “海洋音響の基礎と応用,” 成山堂書店, 2004.
- [20] 副島光積、堀内和夫, “電磁気学,” 電子情報通信学会, 1976.8.20.
- [21] T. Ohira, “Maximum available efficiency formulation based on a black-box model of liner two-

- port power transfer systems.,” IEICE electronics Express, Vol11, No13, pp1-6, July 10, 2014.
- [22] 海中移動体へ大電力を送る革新的ワイヤレス給電に関する研究、平成 31 年度 成果報告書.
- [23] アンリツ , [オンライン]. Available: <https://www.anritsu.com/ja-jp/test-measurement/buy/promotions/ja-jp/shockline/home>.
- [24] 国際非電離放射線防護委員会, “ICNIRP ガイドライン,” [オンライン]. Available: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdljap.pdf>.
- [25] 農研機構, 農村工学研究所 2013 年の成果情報, “簡易乳酸測定器による魚類の遊泳運動負荷評価,” [オンライン]. Available: http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/nkk/2013/nkk13_s11.html.
- [26] 角田篤弘, Ari Purbayanto, 秋山清二, 有元貴文, “漕ぎ刺網で漁獲されたシロギスの血中コルチゾール濃度を指標としたストレス測定,” *日水誌*, 第 65, pp. 457-463, 1999.
- [27] Chopin F, 井上喜洋, (有元貴文, 難波憲二編), “漁獲行為によるストレスと生存性,” 著: *魚の行動生理学と漁法*, 恒星社厚生閣, 1996, pp. 116-128.
- [28] 農林水産省, “全国年次別統計 (平成 20 年~30 年) 養殖魚種別収穫量, 確報, 漁業・養殖業生産統計,” 2018. [オンライン]. Available: <https://www.maff.go.jp/j/tokei>.
- [29] 保聖子, 折田和三, 木村郁夫, “ゴマサバの畜養期間の検討,” *日本水産学会誌*, 第 83(3), pp. 392-399, 2017.
- [30] 青木隆子, 鷹田馨, 國崎直道, “天然および養殖 6 種の一般成分, 無機質, 脂肪酸, 遊離アミノ酸, 筋肉硬度および色差について,” *日本水産学会誌*, 第 57(10), pp. 1927-1934, 1991.
- [31] 寺山誠人, 山中英明, “カツオの品質に及ぼす脱血の効果,” *日本水産学会誌*, 第 66(5), pp. 852-858, 2000.
- [32] 米田千恵, 粟津原元子, 畑江敬子, “温塩水解凍により解凍したマグロ肉の品質,” *日本調理学会誌*, vol. 41, no. 5, pp. 337-343, 2008.
- [33] 福島英登, 前田俊道, 福田裕 (福田裕, 渡辺終五 編), “漁獲および畜養による生化学的变化と品質,” 著: *水産学シリーズ [172], 沿岸漁獲物の高品質化—短期養殖と流通システム—*, 日本水産学会, 平成 24 年.
- [34] 保聖子, 永友聖代, 南隆之 (福田裕, 渡辺終五 編), “アジ・サバ類の畜養による刺身商材化,” 著: *水産学シリーズ [172], 沿岸漁獲物の高品質化—短期養殖と流通システム—*, 日本水産学会, 平成 24 年.
- [35] 農林水産省, “全国年次別統計 (平成 20 年~30 年) 魚種別漁獲量, 確報, 漁業・養殖業生産統計,” 2018. [オンライン]. Available: <https://www.maff.go.jp/j/tokei>.
- [36] 農林水産省, “全国年次別統計 (平成 20 年~30 年) 内水面養殖魚種別収穫量, 確報, 漁業・養殖業生産統計,” 2018. [オンライン]. Available: <https://www.maff.go.jp/j/tokei>.
- [37] 上田宏, “サケの感覚機能と母川回帰,” *バイオメカニズム学会誌*, vol. 31, no. 3, 2007.

- [38] 農林水産省, “全国年次別統計 (平成 21 年～令和元年) 養殖魚種別収穫量, 確報, 漁業・養殖業生産統計,” 2019. [オンライン]. Available: <https://www.maff.go.jp/j/tokei>.
- [39] 山本憲一, 小林博, “硬骨魚 4 種の筋肉中乳酸量に及ぼす運動および体側筋の負傷による影響,” *水産増殖*, 第 34 巻, 第 2 号, 1986.
- [40] 保聖子, 杉田毅, 鶴田和弘, 福田裕, 木村郁夫, “漁獲ストレスを受けたゴマサバの短期畜養によるストレス回復,” *日本水産学会誌*, 第 78(3), pp. 454-460, 2012.
- [41] 藤田辰徳, 海野徹也, 斉藤英俊, 小櫃剛人, 徳田雅治, 奥宏海, 吉松隆夫, 石丸恵利子, 他, “広島湾における天然クロダイの筋肉成分の季節変化,” *日本水産学会誌*, 第 77(6), pp. 1034-1042, 2011.
- [42] 西塔正孝, 國崎直道, “天然および養殖トラフグ筋肉の一般成分, 脂肪酸組成, 遊離アミノ酸, 無機質および筋肉硬度について,” *日本水産学会誌*, 第 64(1), pp. 116-120, 1998.
- [43] 二宮恒彦, “アミノ酸の呈味に関する研究,” *調理科学*, vol. 1, no. 4, 1968.
- [44] M. Ando, et al, “Influence on Post-mortem Rigor of Fish Body and Muscular ATP Consumption by the Destruction of Spinal Cord in Several Fish,” *Fisheries Science*, vol. 62, no. 5, pp. 796-799, 1996.
- [45] 望月聡, 佐藤安岐子, “マアジ筋肉の死後変化に及ぼす致死条件と貯蔵条件の影響,” *日本水産学会誌*, 第 60(1), pp. 125-130, 1994.
- [46] 望月聡ら, “マアジ筋肉の事後お変化に及ぼす脱血の影響,” *日本水産学会誌*, 第 64(2), pp. 276-279, 1998.
- [47] 須山三千三, 吉沢由紀男, “回遊性魚類の筋肉の遊離網の酸組成,” *日本水産学会誌*, 第 39(12), pp. 1339-1343, 1973.
- [48] 村上茂, “タウリン研究と産業利用の歴史,” *タウリンリサーチ*, vol. 1, 2015.
- [49] 鴻巣章二, “魚介類の味—呈味成分の中心にして—,” *日本食品工業学会誌*, 第 20 巻, 第 9 号, pp. 432-439, 1973.
- [50] 山下浩史, 中島廉太郎, 眞鍋諒太郎, 佐々木真一, “低魚粉飼料によるブリおよびマダイの養殖実証実験,” 養殖安定生産・供給技術開発委託事業.
- [51] 北村章二, 板倉敏弘, 上田一夫, “シロザケ稚魚の磁気感覚—外洋回遊期の航法としての磁気コンパスに関連して—,” *水産庁養殖研究所*, 第 8 号, 1985.
- [52] 阿部真比古, 塩田真由, 村瀬昇, 鹿野陽介, “クロロフィル蛍光を活用した紅藻スサビノリ葉状体の貧栄養ストレスの評価,” *Journal of National Fisheries University*, no. 67(1), pp. 13-23, 2018.
- [53] 坂上潤一, 曾根千晴, 冠水中の葉のクロロフィル蛍光は稲品種の冠水耐性評価指標となるか, 国際農林水産業研究センター.
- [54] 大竹佑衣, 鳥田智, 秋田晋呉, “異なる地域に生育する褐藻アラメの高水温耐性,” *Algal Resources*, pp. 85-89, 2020.
- [55] 榎場亮祐, 岡本克也, 江口和弘, 川田壮一, 小柳芳雄, “海中ワイヤレス電力伝送実験を考慮したコイル伝送系の検討,” 2018 信学総大 B-21-22, pp.507, Mar.2018.

