平成２９年度防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

成果報告書

海中ワイヤレス電力伝送技術開発

平成 30 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）が実施した平成２９年度「海中ワイヤレス電力伝送技術開発」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的 2
1.0 委託業務の目的 2
1.1 研究開始時に設定した研究目標の達成度 3
1.2 研究課題終了後の将来性 4
1.3 副次的成果や目標を超える成果 4
1.4 論文、特許、学会発表等の研究の成果 4
1.5 研究実施体制とマネジメント 5
1.6 経費の効率的執行 5
2 平成２９年度(報告年度)の実施内容 6
2.1 平成２９年度の実施計画 6
2.2 研究実施日程 7
2.3 研究成果の説明 8
2.3.1 海中ワイヤレス電力伝送の設計手法の開発と伝送路設計 8
2.3.1.1 コイル直径、ターン数、線径を変えた特性検討 8
2.3.1.2 10m 海中ワイヤレス電力伝送システムの設計 14
2.3.1.3 設計手法の開発と伝送路設計まとめ 19
2.3.2 100W/10m の水中ワイヤレス電力伝送実証実験 20
2.3.2.1 実験の概要 20
2.3.2.2 実験の内容 20
2.3.3 水中ワイヤレス給電の構造体の設計 37
2.3.3.1 設計の概要 37
2.3.3.2 海中構造体まとめ 43
2.3.4 海中移動体搭載の電子機器のノイズ影響調査（九州工業大学） 45
2.3.4.1 AUV へのノイズ影響実験 45
2.3.5 プロジェクトの総合的推進 63
2.3.6 平成２９年度のまとめ 64
3. 成果の外部への発表及び活動 66
4. まとめ、今後の予定 68
4.1 まとめ 68
4.2 今後の予定 69

1. 委託業務の目的

1.0 委託業務の目的

海中におけるエネルギーの効率的伝送を実現するための最新の磁界共鳴方式を用いた海中ワイヤレス電力伝送技術の開発を実施する。

「海中でエネルギー伝送を可能とする長距離ワイヤレス電力伝送技術」においては、複数の伝送コイルを配置した伝送路を海水モデル(Sea Water)中で伝播させる電磁界シミュレーションを行い、コイルや共振回路の電気パラメータや配置、磁界の伝播状態を最適化する。この結果に基づき作成した試作機により海中ワイヤレス電力伝送の試験を実施し海中でのエネルギー伝送の可能性を検証する。

平成２７年度は水槽を使い 10W の電力を送電し 1m の水中伝送を目指す。複数コイルの配置やコイル設計の最適化手法を確立、真水や海水などの違いによる伝送効率や水中でワイヤレス給電を行う場合の課題抽出・対策を検討する。

平成２８年度はプールを使い最大 100W のワイヤレス電力伝送実験を行う。伝送距離は使用可能なプールのサイズから 5mを目標とする。平成２７年度の検討で得た水中ワイヤレス電力伝送の技術知見を電磁界シミュレーションに反映し、より正確な設計パラメータを導出する。また、10m の伝送を目標とすると電磁界解析の範囲が大きくなるため、広い領域を精度よく計算する電磁界シミュレーションの手法を検討する。この検討で複数個のコイルを並べて 10m の伝送を行う場合に起こる課題を抽出する。また、水中での腐食等の耐性のため防水構造や保護部材の検討を行なう。

平成２９年度は海中で 100W の電力を送電し 10m のワイヤレス電力伝送実験を行なう。水槽を使った海水で技術知見とプールを使った真水での 100W で 10m の電力伝送の知見に基づき、電磁界シミュレーションによる設計パラメータを導出する。さらに実際の海中での電力伝送実験を行い、海水の影響や海中での信頼性などの様々なデータを取得する。

また、海中移動体への電力伝送を想定してワイヤレス電力伝送で発生するノイズが海中移動体に搭載した電子機器に誤動作等の影響を及ぼさないかの検討を行う。

「海中ワイヤレス電力伝送技術開発」においては、海中長距離ワイヤレス電力伝送技術を実現するための最適なアプローチを検討し、これに基づく技術ロードマップをとりまとめる。平成２８年度以降に水中給電技術に関する公開ワークショップを実施することで、外部の研究者の知見を取り込む。

これらを実現するために、パナソニック(株)では、海中ワイヤレス電力伝送の伝送回路や真水、海水の物性がワイヤレス電力伝送に及ぼす影響に関わる技術開発及びプロジェクトの総合的推進、九州工業大学は、システムが海中設置安定性や防水性、耐圧、防食性など海での使用に耐え得る構造に関わる研究開発を実施する。

1.1　研究開始時に設定した研究目標の達成度

①　海中ワイヤレス電力伝送設計手法の開発

シミュレーションを行うコイルの形状や電線断面積を多角形にすることで解析時間の短縮を実現。又、周辺構造体の影響を取り除く為の最適解析エリアを明確化しシミュレーション手法を確立。この設計手法を用いて 10m の電力伝送に必要なコイル直径の検討を行った。その結果、送電効率、重量、電線コスト、組立性、輸送性、実験時のハンドリングなどの制約条件を考慮した実験システムを実現。実験でのフィードバックを含めて事前シミュレーションでの最適化の有効性を確認。

②　100W/10m の海中ワイヤレス電力伝送実証実験

平成２７年度は水中での 10W/1m、平成２８年度は水中での 40W/3m、平成２９年度は海中での 100W/10m と各年度目標に対して確実に目標を達成。
100W/10m の実験では 650Hz の周波数の伝送実験で、世界初の 20.7%の効率で電力を伝送できることを確認。

③　水中ワイヤレス給電の構造体の設計

浮沈式生簀で実用化されているポリエチレンパイプ中に電線を入れる方式等、既成概念にとらわれず浮力調整が可能な構造体を採用。共振回路の内蔵の為の防水構造等を含め検討を行い海上での実験で有効性を確認。

④　海中移動体搭載の電子機器のノイズ影響調査

AUV に搭載された電子機器へのワイヤレス給電による影響調査を以下の観点、
・影響が予測される機器の洗い出し。
・水中実験での電子機器への影響調査。
・海上実験での電子機器への影響調査。
で実施。影響がない事を確認。

⑤　プロジェクトの総合的推進

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、分担研究者である九州工業大学と月1回のペースで打ち合わせを実施。指導をいただくと共にプロジェクトの円滑な推進に協調して取り組んだ。又、平成29年度にはワイヤレス給電及び海洋研究の有識者を招聘してプロジェクトレビューを実施。プロジェクトの推進を効率的に実施。

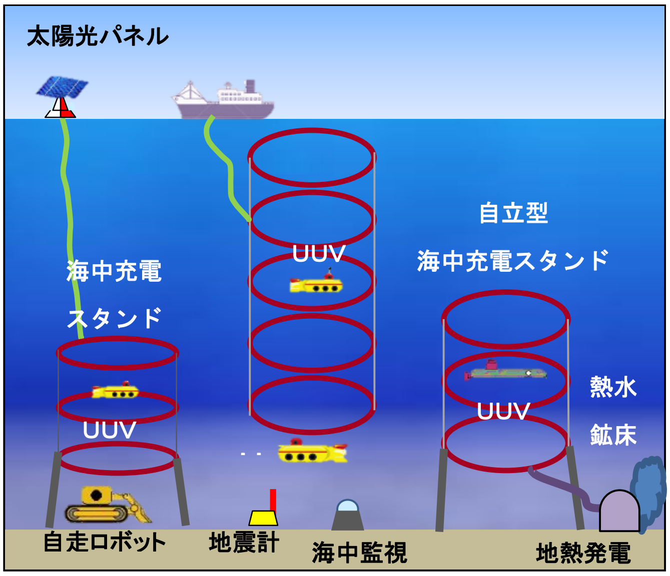
以上の研究推進結果により

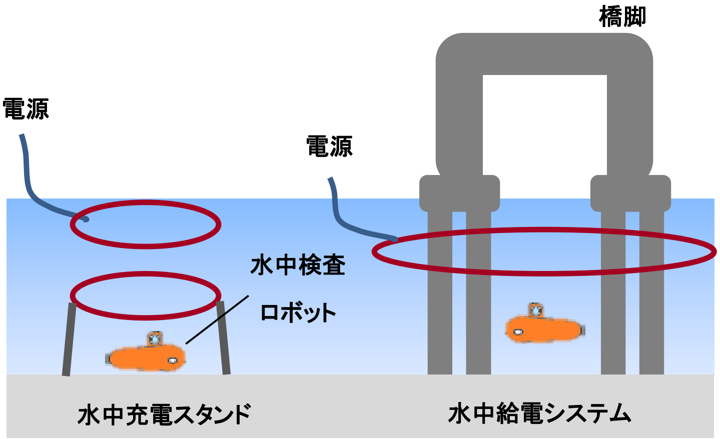
世界初の海中でのワイヤレス電力伝送に成功

目標を 100%達成

1.2　研究課題終了後の将来性

従来、海水中での電力伝送に関しては数十 cm 程度の研究結果しか無く、今回の研究で得られた 10m 以上離れた距離間での電力伝送が可能であるという成果は単に UUV 等の海中機器への無接点給電のみならず海中での電力伝送に関して新たな可能性を打ち出したもので有り、図 1 に示すように色々な海洋産業への応用・展開が可能な技術である。





・海洋鉱物資源探査
・水産資源の管理・監視
・海中観測網（地震、温度、CO_2）
・橋脚・桟橋の維持管理

海中給電・充電　　　　　　　　　　社会インフラ管理

図 1　海中ワイヤレス電力伝送技術の将来用途

1.3　副次的成果や目標を超える成果

今回は電力伝送に注力しシミュレーションと実験を交互に行い整合性を高めて行った事によって、海中での電磁界の振る舞いに関してシミュレーションによる予測が有効である事が検証できた。この結果は電力伝送のみならず例えば海中での通信の検討にも応用できるものであり、今まで進んでいなかった技術研究を飛躍的に進める可能性がある。

1.4　論文、特許、学会発表等の研究の成果

電子情報通信学会での発表	8 件
電子情報通信学会での論文掲載	1 件（2018 年 11 月予定）
海中海底工学フォーラムでの発表	1 件
IEEE での発表	1 件
特許出願	5 件（申請中）

学会だけでなく海洋関係者が集まるフォーラムで発表する事により、今回の取り組みを大いにアピールする事が出来た。又、多くの方に興味を持っていただいて、今後の協力関係が得られる目処が立った。

1.5　研究実施体制とマネジメント

パナソニックとしては海洋関係に知見が少なかった為、海洋関係に深い知見をもつ九州工業大学の社会ロボット具現化センターと共同研究を行う事で、運用上の問題点の事前検証ができ、トラブル事例の多い海上実験を計画通り推進し成功させる事ができた。

1.6　経費の効率的執行

弊社のいままでの取り組みの中で海洋関連のテーマが無かった為、テーマへの取り組みにおいて予想以上の経費が発生した。その中で、研究に支障が無い範囲で極力無駄を省いて優先順位を付けて経費の執行を行った。

2　平成２９年度(報告年度)の実施内容

2.1　平成２９年度の実施計画

① 海中ワイヤレス電力伝送設計手法の開発（パナソニック（株））

平成２７、２８年度の知見に基づき、複数コイル方式の海中ワイヤレス電力伝送のコイルや共振回路などの電気回路パラメータ、伝送周波数、コイルのターン数、線径や直径などの設計パラメータを電磁界シミュレーションにより導出する。伝送効率が高くなる複数の設計パラメータを導出する。

② 100W/10m の水中ワイヤレス電力伝送実証実験（パナソニック（株））

③の設計をもとに、ワイヤレス電力伝送の実験システムを作成する。この実験システムを用いて、海中での１００Ｗ／１０ｍの電力伝送を実証する。

また、将来的に海中でワイヤレス電力伝送を実用化する場合の課題を抽出する。

③ 海中ワイヤレス給電の構造体の設計　（国立大学法人九州工業大学)

平成２７、２８年度の研究成果より、コイル直径を大きく、線径を太くすることで伝送効率が向上することが明らかとなった。しかし、この方法では、実験システムの重量が重くなり、海流等の影響を受けやすく、海中試験が困難になる。そこで、コイル直径を小さく、線径を細くし、コイルの段数を増加することで、実験システムの重量を軽量化しつつ、伝送効率の高い最適な実験システムの構造を設計する。実験システムの設計パラメータは、①で導出した複数の設計パラメータから最適なものを選定する。また、電力伝送の効率に影響するコイルやコンデンサの防水用保護部材を選定し、②の実験システムに用いる。

④ 海中移動体搭載の電子機器のノイズ影響調査（国立大学法人九州工業大学)

海中移動体へ搭載される電子機器で、ワイヤレス給電のノイズで誤動作の可能性のあるものを抽出し、ノイズ耐性について調査する。平成２７年度、２８年度に実施した調査によりノイズ影響の高い機器を抽出したため、平成２９年度は抽出した機器について水槽内（幅 2m、長さ 2m、水深 2m）で電力伝送実験を実施し、ノイズ影響について確認する。この結果より、将来的にワイヤレス給電を実施する際に電子機器に生じる問題点を抽出する。

⑤ プロジェクトの総合的推進

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、平成２９年度は学会等での発表を積極的に行い、研究内容のレビューと専門家の意見を取り入れながら推進する。

特に、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資する。

2.2　研究実施日程

業務項目／月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
① 海中ワイヤレス電力伝送設計手法の開発	←	―	―	―	―	―	―	→				
② 100W/10m の海中ワイヤレス電力伝送実証実験					←	―	―	―	―	―	―	→
③ 水中ワイヤレス給電の構造体の設計	←	―	―	―	―	―	→					
④ 海中移動体搭載の電子機器のノイズ影響調査				←	―	―	―	―	―	→		
⑤ プロジェクトの総合的推進	←	―	―	―	―	―	―	―	―	―	―	→

2.3　研究成果の説明

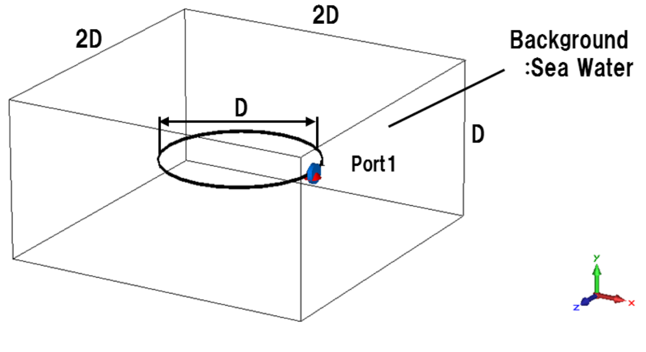
2.3.1 海中ワイヤレス電力伝送の設計手法の開発と伝送路設計

平成２７年度、２８年度の電磁界シミュレーションや実験の結果、コイルを海中に沈めるとワイヤレス電力伝送の伝送効率を決めるＱ（性能指数）が、空間と比べ大幅に低下し、海水の影響、コイルのサイズ、ターン数、電線の太さなどにより複雑に変化するため解析的に計算することは容易ではないことがわかった。そのため電磁界シミュレーションによりコイル特性を計算し実験値と比較検証することで、電磁界シミュレーションによる設計手法を開発した。さらに、10m の電力伝送を行うシステムでは、電磁界シミュレーションで扱うべき解析空間も大きくなるため、計算資源を節約し解析を行った。また、コイル特性を電磁界シミュレーションや実験より取得し、回路シミュレーションにより伝送効率を計算する設計手法も開発した。これらの手法を活用し 10m の海中ワイヤレス電力伝送システムを設計した。

2.3.1.1 コイル直径、ターン数、線径を変えた特性検討

１）１段コイルの電磁界シミュレーションモデル

図 2 に、１段コイルの電磁界シミュレーションモデルを示す。電磁界シミュレーションは汎用電磁界シミュレータである CST 社製 MW- STUDIO を用いて解析した。シミュレーションで、X、Z 方向は解析領域の大きさをコイル直径 D の 2 倍とし、Y 方向はコイル直径と同じサイズとした。媒質は海水として比誘電率 78、導電率 5S/m で計算した[1][2]。またシミュレーションは電線径、ターン数、コイル直径を変えて計算した。表 1 にクロロプレンキャプタイヤケーブル電線の仕様を、表 2 に可とう性架橋ポリウレタン絶縁電線の仕様を示す。



項目	特性
媒質	海水
比誘電率	78
比透磁率	0.999991
導電率(S/m)	5

図 2　電磁界シミュレーションモデル

表 1　クロロプレンキャブタイヤ電線の仕様

低圧電力用　600V　エチレンプロピレンゴム絶縁クロロプレンゴムシースケーブル　**600V 2TC Light (600V 2PNCT)**

2TC Light (2PNCT)　1.25～325mm²(単心)

線心数	導体 公称断面積	導体 構成	導体 外径	EPゴム絶縁体厚さ	クロロプレンゴムシース厚さ	仕上外径	最大仕上外径	概算質量(参考値)	電気特性 最大導体抵抗 20℃	電気特性 試験電圧	電気特性 最小絶縁抵抗 20℃
	mm²	本/mm	約mm	mm	mm	約mm	mm	kg/km	Ω/km	V・1分	MΩ・km
1	1.25	50/0.18	1.5	0.8	1.5	6.2	7.2	55	15.5	3000	500
	2	37/0.26	1.8	0.8	1.5	6.5	7.5	65	9.91	3000	500
	3.5	45/0.32	2.5	0.8	1.6	7.4	8.4	90	5.38	3000	400
	5.5	70/0.32	3.1	1.0	1.6	8.4	9.4	125	3.46	3000	400
	8	50/0.45	3.7	1.0	1.7	9.2	10.2	155	2.45	3000	400
	14	88/0.45	4.9	1.0	1.8	10.7	11.7	235	1.39	3000	300
	22	7/20/0.45	6.7	1.2	1.9	13.1	14.1	360	0.892	3000	300
	(30)	7/27/0.45	8.1	1.2	2.0	14.6	15.6	460	0.661	3000	300
	38	7/34/0.45	9.1	1.2	2.1	15.8	16.8	555	0.525	3000	200
	(50)	19/16/0.45	10.0	1.5	2.2	17.6	18.6	690	0.411	3000	200
	60	19/20/0.45	11.2	1.5	2.3	19.1	21	840	0.329	3000	200
	(80)	19/27/0.45	13.0	2.0	2.5	23	24	1140	0.243	3000	200
	100	19/34/0.45	14.6	2.0	2.6	25	26	1380	0.193	3000	200
	(125)	19/42/0.45	16.3	2.0	2.7	26	28	1660	0.156	3000	200
	150	27/34/0.45	17.7	2.0	2.8	28	29	1860	0.136	3000	200
	200	37/34/0.45	20.0	2.5	3.0	32	34	2540	0.0993	3000	200
	250	37/42/0.45	22.0	2.5	3.2	34	36	3070	0.0803	3000	200
	325	37/55/0.45	25.4	2.5	3.4	38	40	3910	0.0614	3000	200

表 2　可とう性架橋ポリウレタン電線の仕様

構 造 寸 法 表

600V EM-LMFC　**可とう性架橋ポリエチレン絶縁電線**

導体 断面積 (mm²)	導体 構成 素線数/素線径(本/mm)	導体 外径 (約mm)	絶縁体厚さ (mm)	仕上外径 (約mm)	最大導体抵抗(20℃) (Ω/km)	試験電圧 (V/1分)	最小絶縁抵抗 (MΩ・km)	表面漏れ抵抗 (MΩ)	概算質量 (kg/km)
0.75	30/0.18	1.1	0.8	2.8	25.8	2,200	80	300	13
1.25	50/0.18	1.5	0.8	3.2	15.5	2,200	70	300	19
2	37/0.26	1.8	0.8	3.5	9.91	2,200	60	300	27
3.5	45/0.32	2.5	0.8	4.2	5.38	2,200	50	300	44
5.5	35/0.45	2.9	1.0	5.0	3.46	2,200	50	300	63
8	50/0.45	3.5	1.0	5.6	2.45	2,200	50	200	86
14	88/0.45	4.7	1.0	6.8	1.39	2,200	40	200	140
22	7/20/0.45	6.4	1.2	8.9	0.892	2,200	40	100	234
(30)	7/27/0.45	7.4	1.2	9.9	0.661	2,200	40	100	306
38	7/34/0.45	8.4	1.2	10.9	0.525	2,500	40	100	378
(50)	19/16/0.45	9.6	1.5	12.7	0.411	2,500	30	100	488
60	19/20/0.45	10.7	1.5	13.8	0.329	2,500	30	100	600
(80)	19/27/0.45	12.4	1.5	15.5	0.243	2,500	30	90	790
100	19/34/0.45	13.9	2.0	18.0	0.193	3,000	30	80	1,020
(125)	19/42/0.45	15.5	2.0	19.6	0.156	3,000	20	70	1,241
150	27/34/0.45	17.1	2.0	21.2	0.136	3,000	20	60	1,430
200	37/34/0.45	19.5	2.5	24.6	0.0993	3,000	20	60	1,965
250	37/42/0.45	21.6	2.5	26.7	0.0803	3,000	20	50	2,395
325	37/55/0.45	24.7	2.5	29.8	0.0614	3,500	20	50	3,087

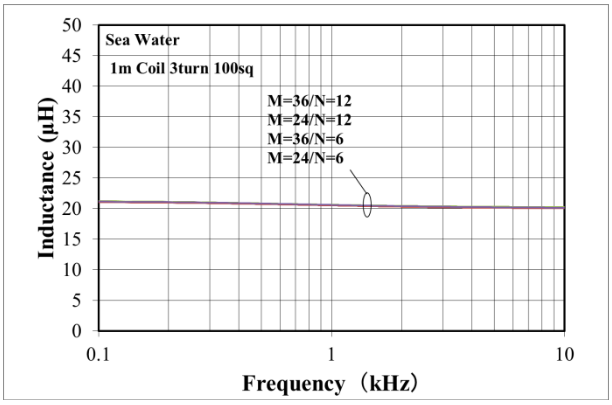
注1：(　)内は準標準サイズです。

２）電磁界シミュレーションの計算資源の節約

海中で 10m のワイヤレス電力伝送を行うシステムでは、解析領域が大きくなる。本年度の検討では、メッシュ形状に着目して計算資源の削減を行った。本検討に用いた電磁界シミュレータ MW-Studio の周波数領域での解析は三角錐の形状メッシュである。そのため構造体の断面が円形の場合は解析時間が大幅に増加することがわかった。そのため構造体を多角形としシミュレーション時間削減の検討を行った。たとえば、1 段の直径 1m、3 ターンで導体断面積 100mm² の電線を用いたコイルを海中に沈めたモデルで条件変えて表 3 のモデルで計算した。コイル形状や電線形状と計算時間を表 3 に示す。ここでコイル角数を M、電線断面角数を N とし、M=36／N=12 の場合と M=24／N=6 を比較すると計算時間を 52%削減することができた。図 3 にインダクタンス、Q の計算結果を示す。M=36／N=12 と M=24／N=6 を比較するとインダクタンスの変化は小さく、Q はピーク周波数 5kHz で M=24／N=6 が 5%程度であるため、今回のシミュレーションでは M=24／N=6 を用いた。

表 3　コイル形状、電線形状の計算条件とメッシュ数・時間の削減結果

コイル形状 M 角形	電線形状 N 角形	メモリー （GByte）	メッシュ数	計算時間 （秒）
36	12	27	332273	3315
24	12	27	334276	3289
36	6	25	326280	1750
24	6	25	317275	1576



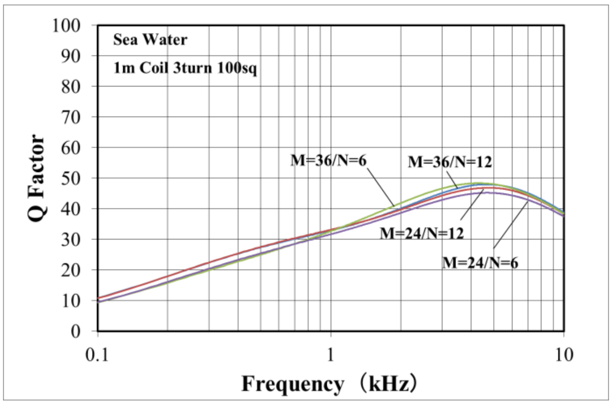


図 3　コイル形状を多角形近似前後のインダクタンスと Q 計算値

３）コイル直径を変えた場合のインダクタンス、Q の計算

図 4 にコイル直径を 10m、4m、1.7m に変えた場合の海中でのインダクタンスと Q の周波数特性の計算結果を示す。導体断面積は 250mm² で 5 ターンとした。その結果、コイル直径に対するインダクタンス特性の変化は小さいが、コイル直径が大きくなると Q の最大値は低下し周波数は下がることがわかった。一般にワイヤレス電力伝送では、コイルの Q が同じで、コイル直径の 1/2 程度の距離であれば、高効率に伝送できると考えられる。したがってコイル直径を大きくすれば、伝送距離を伸ばすことができる。しかし、海中にコイルを沈めるとコイルの直径が大きいほど Q はより

低い周波数で最大値を持ち、また Q は電線抵抗が同じであれば、周波数が下がると低下するので、低い周波数で高い Q を得るためには、電線を太くし抵抗を下げる必要がある。本研究では海中で 10m のワイヤレス電力伝送を行うことが目標であるため、構築する実験システムの伝送効率、重量、電線コスト、組立性、輸送性、実験時のハンドリングなどの制約条件を満足する必要がある。そのためこれらの条件を満足するコイル直径を 3.4m として設計を進めた。制約条件に対するコイルサイズの検討の詳細は 2.3.3 章で述べる

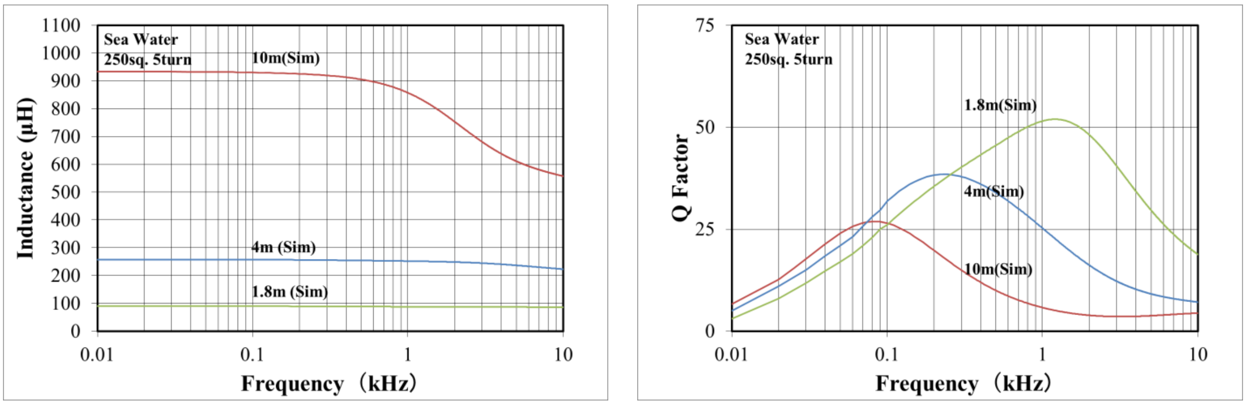


図 4　コイル直径を変えた場合のインダクタンスと Q の計算値

4）3.4mコイルで電線径とターン数を変えた場合のインダクタンス、Q の計算

図 5 に直径 3.4m コイルで電線直径とターン数を変えた場合のインダクタンス、Q の周波数特性の計算値を示す。表 4 に Q 値と最大値となる周波数、電線の概算重量を示す。電線は表 1 のクロロプレンキャプタイヤ電線を用いた。

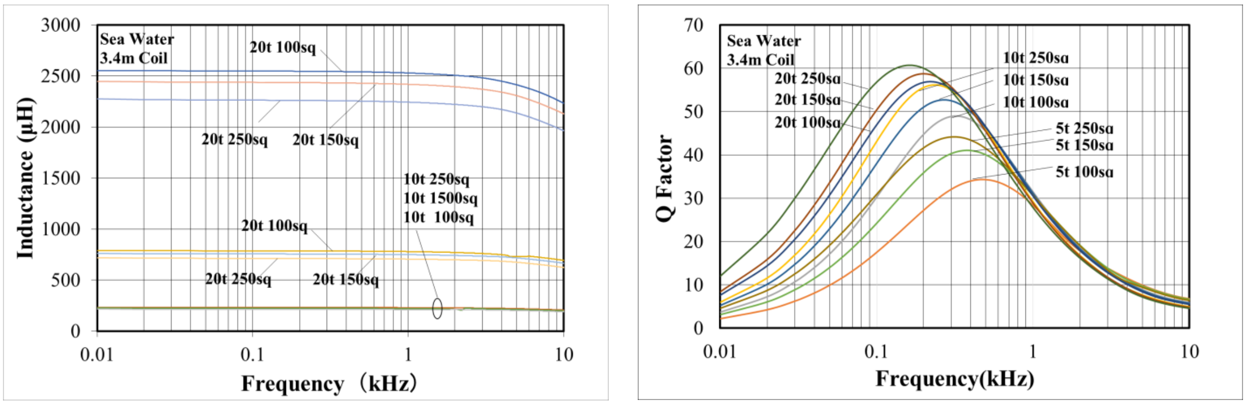


図 5　コイル直径を変えた場合のインダクタンスと Q の計算値

表 4　電線とターン数の選定

導体断面積	100mm^2	150mm^2	250mm^2
5 ターン	34.3 500Hz 54kg	41.0 350Hz 76kg	44.2 310Hz 128kg
10 ターン	49.0 320Hz 109kg	52.7 270Hz 153kg	56.6 220Hz 256kg
20 ターン	56.2 240Hz 218kg	58.8 200Hz 305kg	60.7 160Hz 512kg

上：Qmax
中：Qmax 周波数
下：電線重量

インダクタンスの周波数特性の変化は小さいが、Q は 160～500Hz で最大値を持つことが分かった。実験に使用するコイルの総重量を 1000kg 程度とするため、Q が 49 で、電線重量が 109kg となる 100 mm^2 電線で 10 ターンの直径 3.4m コイルを選択した。コイル構造や製作方法については 2.3.3 章で述べる

5）RX コイルの設計

図 6、図 7 に直径 1m と直径 1.7m の RX コイルの外観図を示す。1.7 m コイルは 100mm^2 の表 2 の可とう性架橋ポリウレタン電線で 15 ターンとし、1m コイルは 38mm^2 の表 1　クロロプレンキャプタイヤ電線の仕様のクロロプレンキャプタイヤ電線で 20 ターンとした。また、ボビンはアクリル樹脂を用いた。

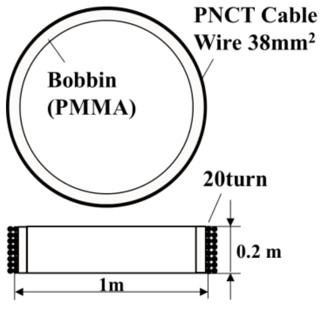


図 6　RX 直径 1m コイル

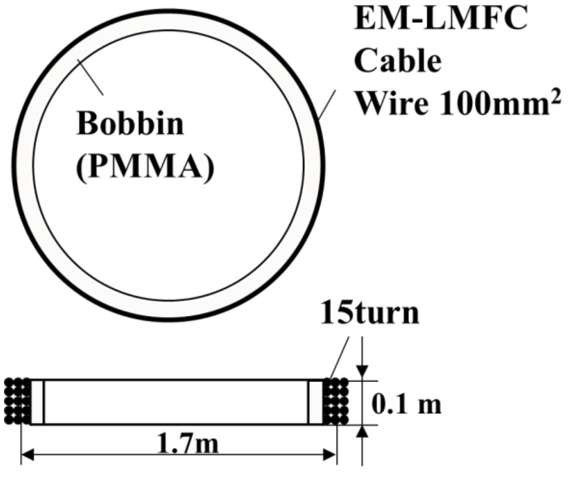
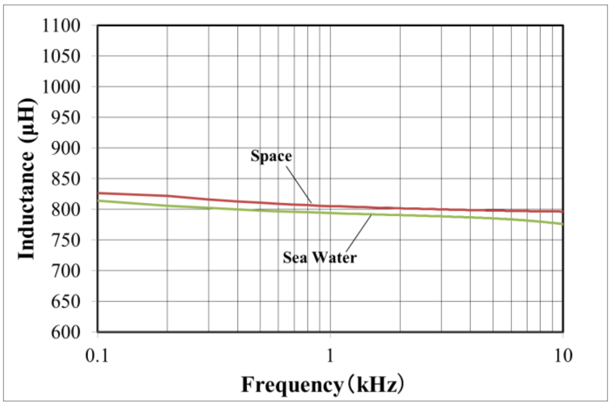


図 7　RX 直径 1.7m コイル

6）RX コイルのインダクタンス、Q の計算結果

図 8、図 9 に RX 1.7m コイルと 1.0m コイルのインダクタンスと Q の計算結果を示す。



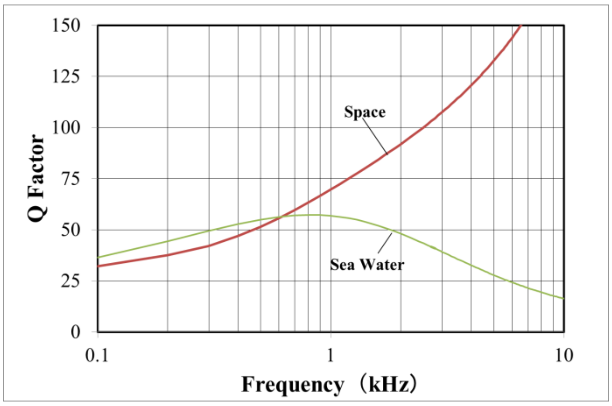
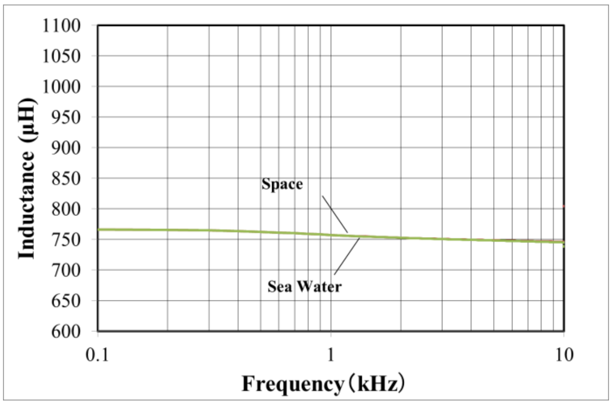


図 8　RX 1.7m コイルのインダクタンス、Q の計算値



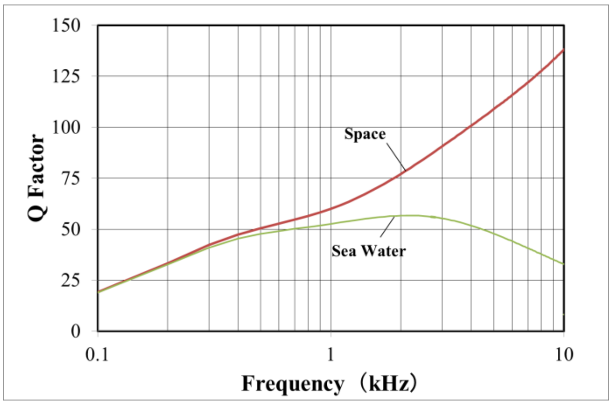


図 9　RX 1.0m コイルのインダクタンス、Q の計算値

海水では Rx1.7m コイルでは 800Hz 近辺、Rx1.0m コイルでは 1.1kHz 近辺に Q のピークが有る事が分かる。この結果を含めて 10m 海中ワイヤレス電力伝送システムの設計を行った。

2.3.1.2　10m 海中ワイヤレス電力伝送システムの設計

1）10m 海中ワイヤレス電力伝送システムのシミュレーションモデル

図 10 に 10m 海中ワイヤレス電力伝送システムの電磁界シミュレーションモデルを示す。TX コイルおよび無給電コイルは直径 3.4m を 7 段としコイル間隔はコイル直径の 1/2 の 1.7m で設計した。また RX コイルは直径 1.7m と 1m の 2 種類のコイルとした。

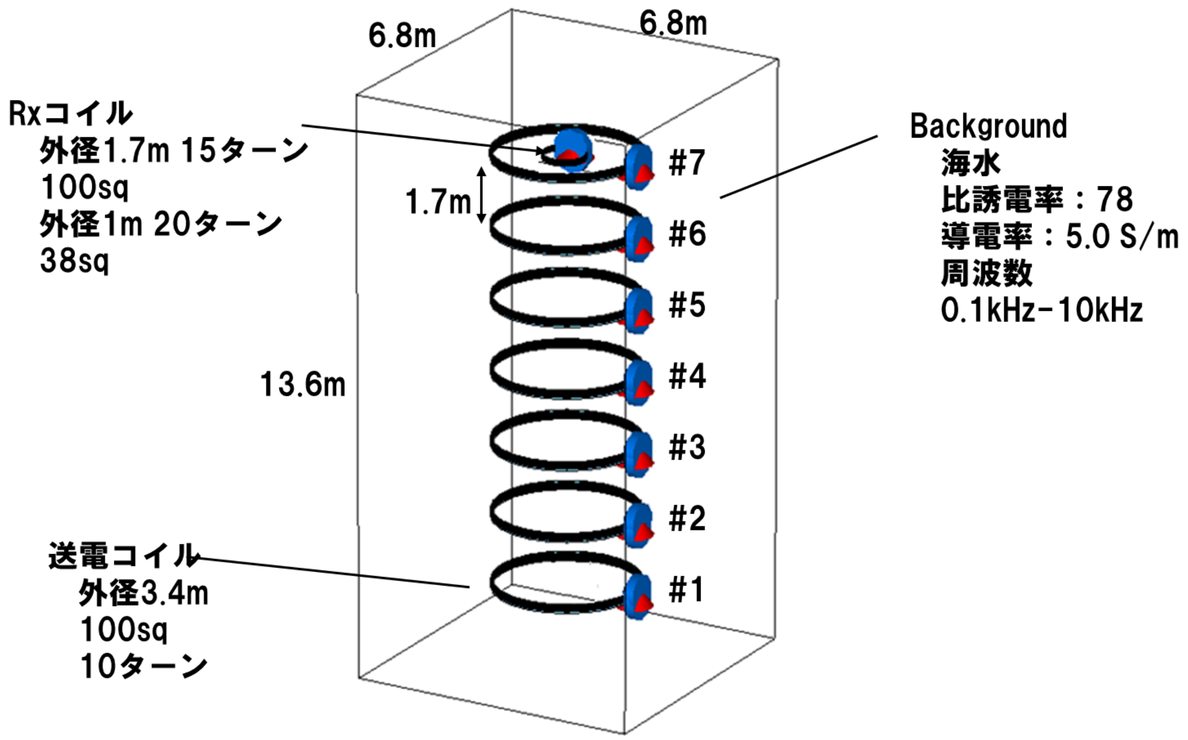


図 10　10m 海中ワイヤレス電力伝送の電磁界シミュレーションモデル

2）3.4mコイル間の結合係数

図 11 に直径 3.4m コイルの結合係数の計算結果を示す。空間は実線で海中は点線で示した。ここで k12 はコイル#1 と#2 間で他も同様とする。空間では結合係数の周波数特性の変化は小さいが海中では周波数が高くなると結合係数が低下する。また 1kHz までは空間と海中の結合係数の変化は小さいことがわかった。

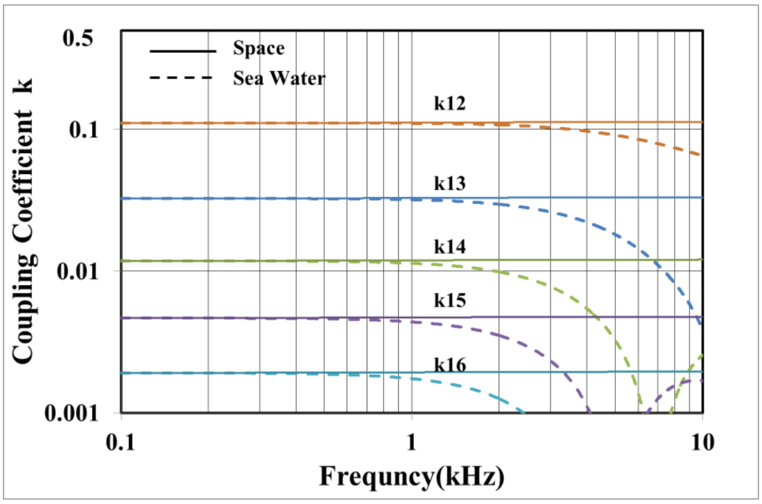


図 11　3.4m コイルの結合係数のシミュレーション計算

3）3.4mコイルと RX コイル間の結合係数

図 12 に直径 3.4m コイルと 1.7m、1m の RX コイル間の結合係数の周波数特性の計算結果を示す。ここでも 1kHz 以下の周波数では結合係数の変化は小さいことがわかった。

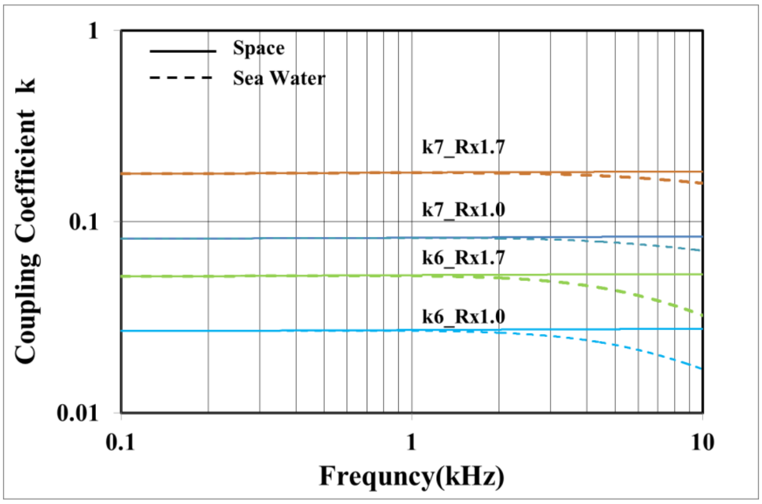


図 12　1.7m、1m コイルの結合係数のシミュレーション計算

4）電磁界シミュレータによる電力伝送効率の計算

電磁界シミュレーションの計算結果を S パラメータに変換して、回路シミュレーションにより電力伝送効率の計算を行う。S パラメータは回路シミュレータで一般的に使用される Touchstone フォーマットに電磁界シミュレーションの計算結果より変換した。

図 13 に 3.4m 7 段コイルのモデルを、図 14 に 3.4m 7 段コイルと RX 1m、1.7mコイルのモデルを示す。Touchstone フォーマットの端子 1～7 は、コイル#1～#7 に対応しており端子 8 は RX コイルに対応している。計算では 3.4m コイルの Q が最大となる 320Hz を伝送周波数とした。入出力ポートのインピーダンスは整合が取れる整合用コンデンサを接続し、他の端子は共振コンデンサを接続した。表 5 に接続したコンデンサの容量値を示す。

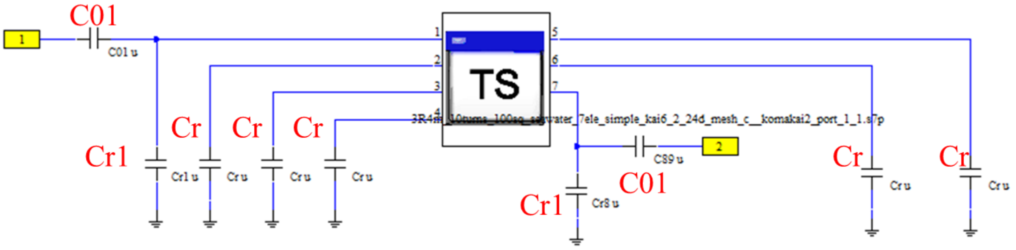


図 13　#1⇒#7 間の電力伝送効率計算モデル

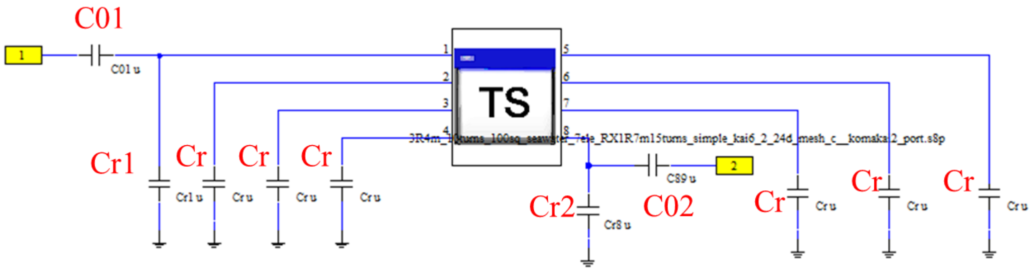


図 14　#1⇒RX1m、1.7m 間の電力伝送効率計算モデル

表 5　整合、共振コンデンサの容量の計算値

伝送路	媒質	C01(μF)	Cr1(μF)	Cr(μF)	C02(μF)	Cr2(μF)
3.4m7 段	空間	72	265	275	−	−
	海中	78	281	290	−	−
3.4m⇒RX1.7m	空間	70	270	290	240	280
	海中	68	270	282	286	294
3.4m⇒RX1m	空間	74	279	298	56	310
	海中	75	281	295	55	310

図 15、図 16 に#1⇒#7、#1⇒RX1m、1.7m コイルの伝送効率を示す。海中の伝送効率は#1⇒#7 で 32.7%、RX1.7m コイルで 27.8%、RX1m コイルで 22.5%となった。

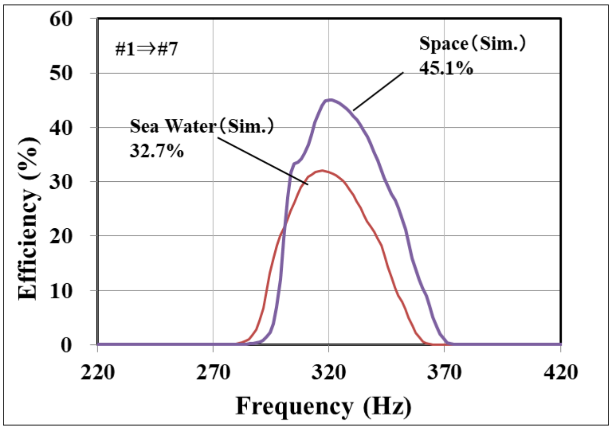
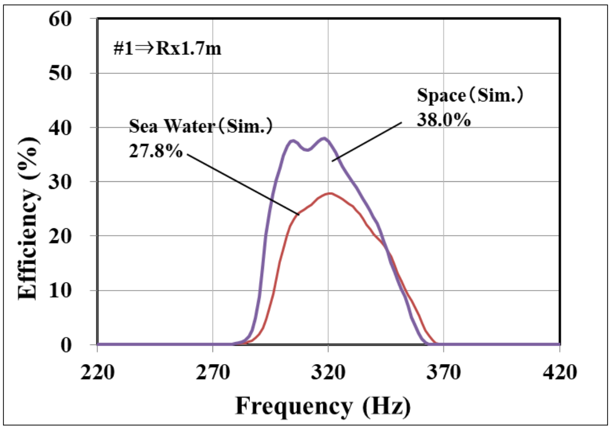


図 15　#1⇒#7 の伝送効率



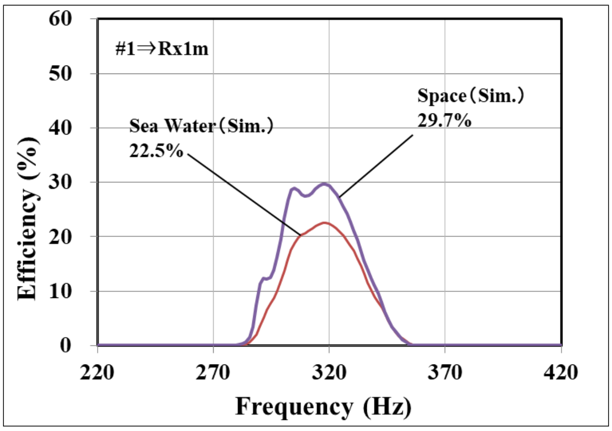


図 16　#1⇒RX1m、1.7m コイルの伝送効率

5）回路シミュレータによる電力伝送効率の計算

電磁界シミュレーションにより計算したコイルの電気特性を用いて、回路シミュレータにより海中ワイヤレス電力伝送効率を設計する。回路シミュレータが活用できれば実験により取得したコイル特性により伝送路を設計できる。表 6 に 320Hz での電磁界シミュレーションにより計算したインダクタンス、Q、および抵抗値を、表 7 に結合係数の値を示す。

表 6　320Hz でのコイルのインダクタンス、Q、抵抗

コイル直径	L(μH)	Q	R(mΩ)
3.4m	817	45	38.5
1.7m	802	49	30.6
1m	765	41	35.2

表 7　320Hz でのコイル間の結合係数

3.4m コイル間		3.4、1m コイル間		3.4、1.7m　コイル間	
k12	0.1108	k1_1.0	0.0817	k1_1.7	0.1789
k13	0.0325	k2_1.0	0.0269	k21.7	0.0520
k14	0.0118				
k15	0.0046				

図 17に伝送路の回路シミュレーションモデルを示す。シミュレーションの比較は海中で#1⇒RX1m、1.7mの2通りで行った。表 8に計算したコンデンサの容量値を示す。図 18に電磁界シミュレーションと回路シミュレーションでの伝送効率の比較を示す。青色が電磁界シミュレータでの計算結果だが、両者はよく一致しており回路シミュレータが活用できることを確認した。

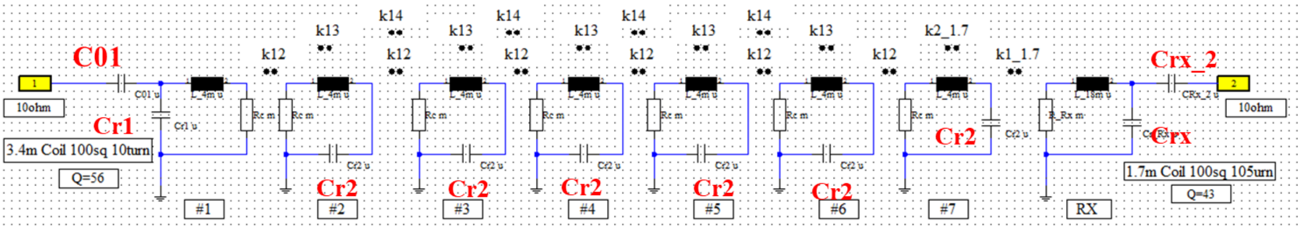


図 17　回路シミュレーションモデル

表 8　コンデンサ容量の計算値

伝送路	Sim	C01(μF)	Cr1(μF)	Cr(μF)	C02(μF)	Cr2(μF)
3.4m⇒Rx1.7m	EM	68	270	282	286	294
	Circuit	83	270	280	289	265
3.4m⇒Rx1m	EM	75	281	295	55	310
	Circuit	82	280	280	56	294

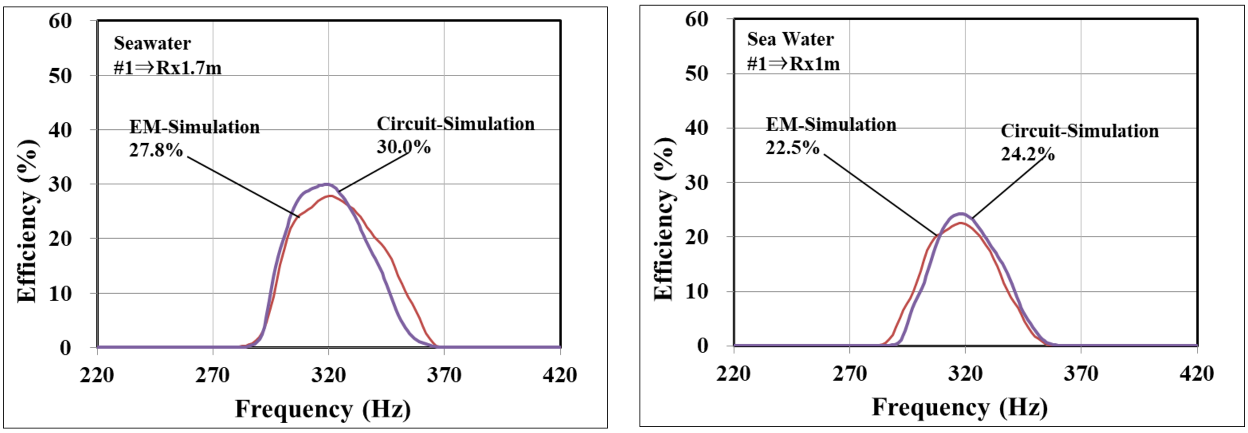


図 18　伝送効率の比較

2.3.1.3　設計手法の開発と伝送路設計まとめ

電磁界シミュレーションにより、海中で 10m のワイヤレス電力伝送を行うための設計手法の開発とコイルの電気特性の計算や伝送路設計を行い以下の結果を得た。

1）計算資源を削減するため、平成２７年度、２８年度に検討した 1m、5m 伝送の電磁界シミュレーションモデルを基により解析領域のシミュレーション手法の検討を行った。コイル形状や電線断面を多角形にすることで解析時間の短縮を行った。

2）上記の設計手法を基に、10m の電力伝送に必要なコイル直径の検討を行った。最初に電線断面積を $250mm^2$ でコイルサイズを 10m、4m、1.7m、ターン数を 5 ターンに設定し海中での電磁界シミュレーションを行った。その結果以下のことがわかった。

・10kHz 以下ではインダクタンスの周波数特性の変化は小さい。

・Q は 10kHz 以下の周波数でピークが現れる。

・コイル直径が大きいほど Q はより低い周波数で最大値を持つ。

この結果から、海中にコイルを沈めるとコイルは低い周波数でピークを持ち、その値はコイル直径により変化する。そのため、本研究のシステム構築には、コイル直径に加え伝送効率、重量、電線コスト、組立性、輸送性、実験時のハンドリングなどの制約条件を考慮した検討が必要であることがわかった。これらを考慮してコイルサイズを 3.4m に設定した。

3）コイル直径 3.4m のコイルに対して、電線太さ、ターン数などの条件を変えて電磁界シミュレーションを行った。その結果、電線断面積 100sq で 10 ターン、電線重量 109kg のコイルを選定した。また、RX コイルとして直径 1.7m と 1m の 2 種類の設計を行った。

4）これらのコイルを用いて 10m 海中ワイヤレス電力伝送システムの設計を行った。構造は直径 3.4m の TX コイル(#1)、無給電コイル（#1～#7）と RX コイル 1m、1.7m を多段に接続した。各 3.4m コイルの間隔は 1.7m とした。電磁界シミュレーションによる電力伝送効率は、RX 1.7m コイルの場合 27.8%、RX 1m の場合は 22.5%となった。

5）海中実験で必要な整合・共振コンデンサの容量を計算するために回路シミュレータが活用できるかの検討を行った。電磁界シミュレーションで計算したインダクタンスや Q を用いて、回路シミュレーションを行い、電磁界シミュレーションと同じ伝送効率の計算結果を得ることができた。したがって海中のワイヤレス電力伝送でも回路シミュレータが活用できることが分かった。

2.3.2 100W/10m の水中ワイヤレス電力伝送実証実験

2.3.2.1 実験の概要

平成２９年度は、（株）オキシーテック（静岡県沼津市）前の海中で 10m の海中ワイヤレス電力伝送実験を行った。実験の準備段階では山口県下関市で 3.4m コイルの作成を行いオキシーテックへトラック搬送した。3.4m コイルは、円形に曲げたポリエチレンパイプの中に、100sq の可とう性架橋ポリウレタン絶縁電線を 10 ターン巻いて作成した。また、コンデンサをコイル近くで接続するため、ポリエチレンパイプは防水構造とした。オキシーテックでの海中実験では、3.4m コイル 7 段をロープで接続し、RX コイルを 7 段コイル上部に取付け台船上のクレーンで吊るし海中に沈めて伝送実験を行った。実験内容は、空間、海中での各コイルのインダクタンス、Q およびコイル間の結合係数の測定、ベクトルネットワークアナライザ（VNA）での電力効率の測定、高周波電源とパワーアナライザ(PA)による 100W／10m の海中ワイヤレス電力伝送実験を行った。さらに、この実験の計画や実施の内容から、海中ワイヤレス電力伝送システムを実用化するための課題抽出・対策案の検討を行った。

2.3.2.2 実験の内容

1)試験場および日程

試験場：株式会社オキシーテック前　内浦湾内　SEATECⅡ近く

静岡県沼津市内浦三津５３７－５

日程：表 9 に示す

表 9　試験日程

時間	1日目	2日目	3日目			4日目	5日目	6日目	7日目	8日目
	11/8 水	11/9 木	11/10 金	11/11 土	11/12 日	11/13 月	11/14 火	11/15 水	11/16 木	11/17 金
	陸上作業	陸上作業	陸上作業	休日	休日	海上作業	海上作業	海上作業	予備日	機材搬出
8:00	機材搬入	試験準備	試験準備			機材積込	機材を海上へ移動	機材を海上へ移動		梱包作業
9:00		陸上試験	陸上試験			機材を海上へ移動	吊下作業確認・調整	吊下作業確認・調整		
10:00	開梱・組立準備					吊下作業確認・調整	海上試験	海上試験		
11:00						計測確認				機材積込発送
										片付け
12:00	昼食	昼食	昼食			昼食	昼食	昼食	予備日	
13:00	組立準備	陸上試験	陸上試験			海上試験	海上試験	海上試験		
14:00	吊り具準備									
15:00	吊下ロープ取り付け							陸上へ移動洗浄作業		
16:00		片付け	片付け			陸上へ移動	陸上へ移動			
		撤収	撤収			撤収	撤収	撤収		

2)桟橋試験

①桟橋試験概要

製作したコイルの電磁界シミュレーション値と海中に沈めた場合の実験値を事前に比較するため桟橋のクレーンを使って海中に沈めて実験した。桟橋試験の概要図を図 19 に示す。

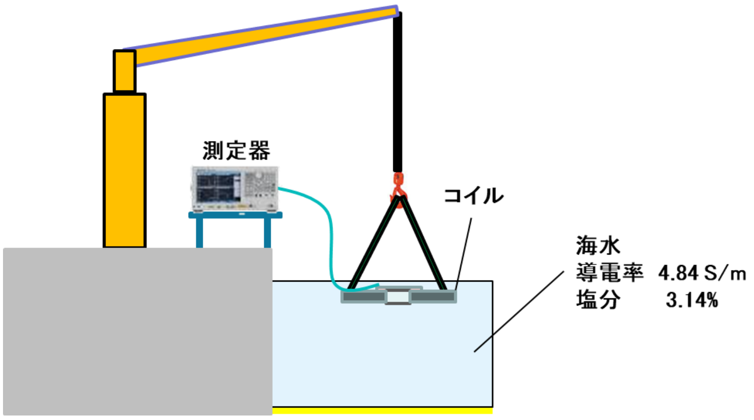


図 19　桟橋試験の概要

②インダクタンス、Q の測定方法

インダクタンス、Q の測定は、周波数が 10kHz 以下と低く、さらに 100mΩ以下の低インピーダンスの測定が必要となる。そのためネットワークアナライザ E5061B のフェーズゲインポートを用いたシャントスルー法により行った[3]。また、海中で測定する必要があるため、コイルから延長ケーブルを 10m 引き出して測定を行った。測定ケーブルは海中コネクタにより接続した。なお測定ケーブルのインダクタンスと抵抗成分は測定値より差し引いた。図 20 に測定ケーブルのインダクタンス、抵抗値を示す。

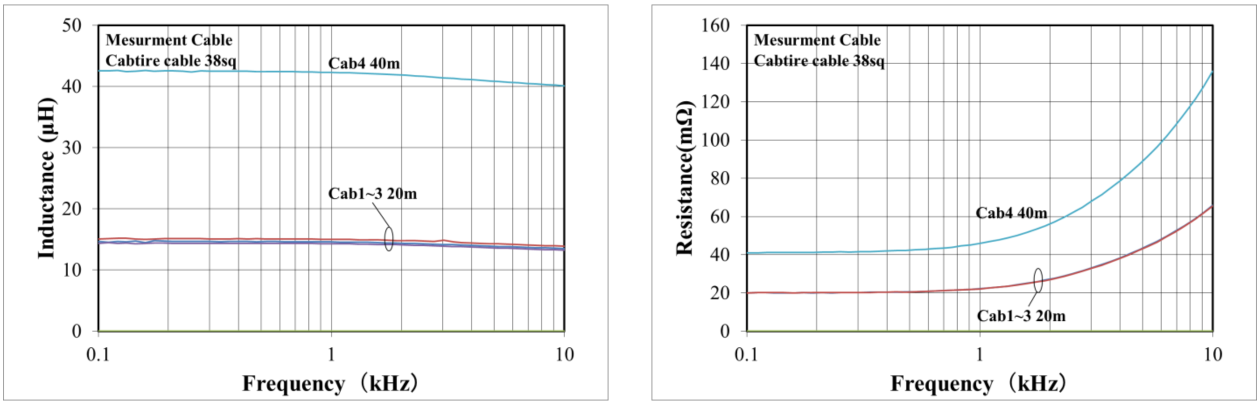


図 20 測定ケーブルのインダクタンスと抵抗の測定値

③1 段コイルのインダクタンス、Q の測定

③-1　3.4m コイルのインダクタンス、Q の測定

図 21 に 3.4m コイルのインダクタンス、Q の測定結果を示す。この測定はオキシーテック前の桟橋に設置されたクレーンから海中に沈めて測定した。海中での Q の測定値はシミュレーションと比較して高い値となり、Q の最大値も 636Hz とシミュレーションより高くなった。

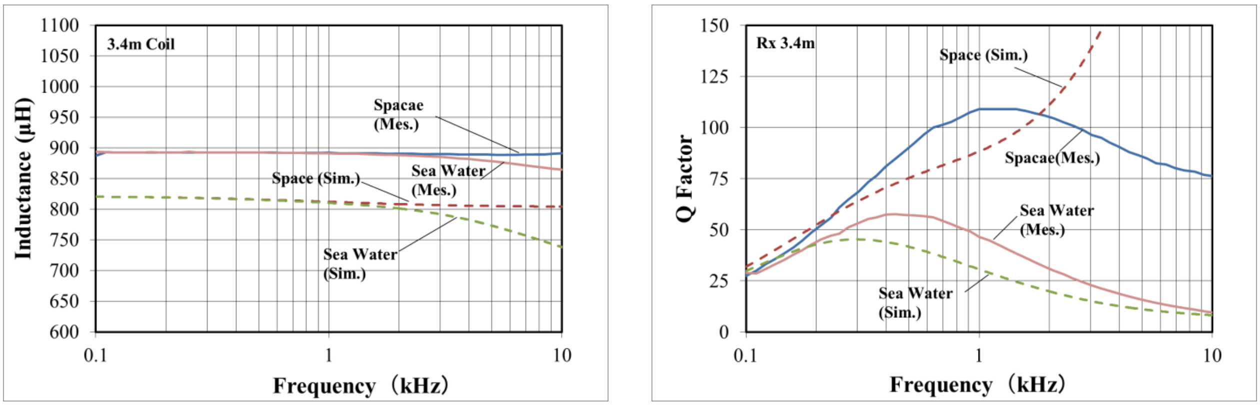


図 21 3.4m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値

表 10 にコイル特性の 334Hz と 636Hz のポイントデータを示す。２つの値はそれぞれシミュレーションでの Q の最大周波数と実験で Q が最大となる周波数である。

表 10　3.4m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値

#1(334Hz)	L(μH)	Q	R(mΩ)
空間(Mes.)	893	73	25.5
空間(Sim.)	817	67	26.0
海中(Mes.)	893	55	33.9
海中(Sim.)	817	45	38.5

#1(636Hz)	L(μH)	Q	R(mΩ)
空間(Mes.)	892	100	35.6
空間(Sim.)	815	80	40.7
海中(Mes.)	892	56	63.7
海中(Sim.)	814	38	84.8

③-2 1m コイルのインダクタンス、Q の測定

図 22 に 1m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値を示す。

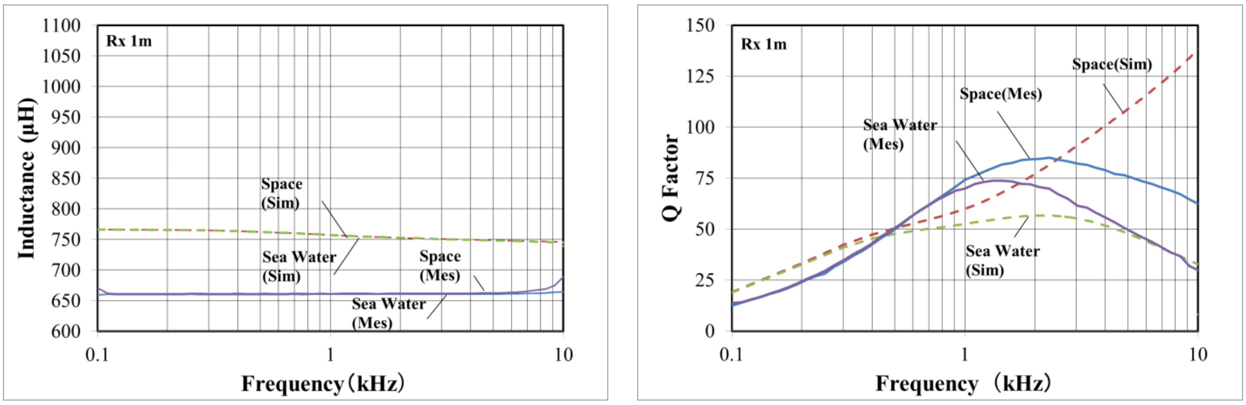


図 22　1m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値の周波数特性

海中でのQの測定値はシミュレーションと比較して周波数が高い方にシフトしている。Qが最大となる周波数はシミュレーションでは1.5kHz、実測では2kHzとなっている。今回は3.4mコイルのQが最大の周波数を伝送周波数とする。表 11 にコイル特性の 334Hz と 636Hz のポイントデータを示す。

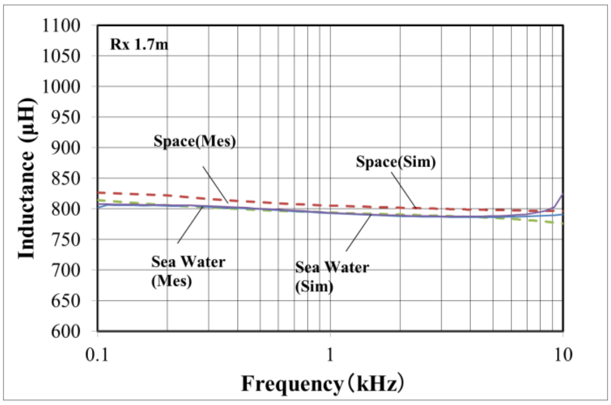
表 11　1m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値

#1(334Hz)	L(μH)	Q	R(mΩ)
空間(Mes.)	660	37	37.3
空間(Sim.)	765	42	34.2
海中(Mes.)	661	38	36.6
海中(Sim.)	765	41	35.2

#1(636Hz)	L(μH)	Q	R(mΩ)
空間(Mes.)	660	60	44.8
空間(Sim.)	762	50	47.4
海中(Mes.)	661	59	44.9
海中(Sim.)	762	48	50.2

③-3　1.7m コイルのインダクタンス、Q の測定

図 23 に 1.7m コイルのインダクタンス、Q の測定結果を示す。海中での Q の測定値とシミュレーションと比較して高い値となった、Q の周波数の最大値はシミュレーションで 1.5kHz、シミュレーションで 1kHz となっているため 3.4m コイルの Q が最大の周波数を伝送周波数とする。表 12 にコイル特性の 334Hz と 636Hz のポイントデータを示す。



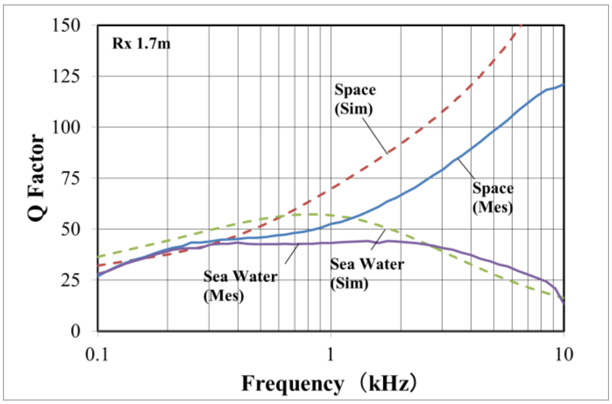


図 23　1.7m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値の周波数特性

表 12　1.7m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値

#1(636Hz)	L(μH)	Q	R(mΩ)
空間(Mes.)	797	47	67.4
空間(Sim.)	811	51	49.5
海中(Mes.)	798	43	74.5
海中(Sim.)	798	55	45.7

#1(334Hz)	L(μH)	Q	R(mΩ)
空間(Mes.)	803	45	37.3
空間(Sim.)	816	42	36.6
海中(Mes.)	804	43	39.4
海中(Sim.)	802	49	30.6

3)陸上試験

①陸上試験概要

7 段連結した 3.4m コイルと RX コイルを陸上で吊り上げ、それぞれのコイルのインダクタンス、Q を測定した。さらに空間での電力伝送効率を測定した。陸上試験の概要図を図 24 に示す。

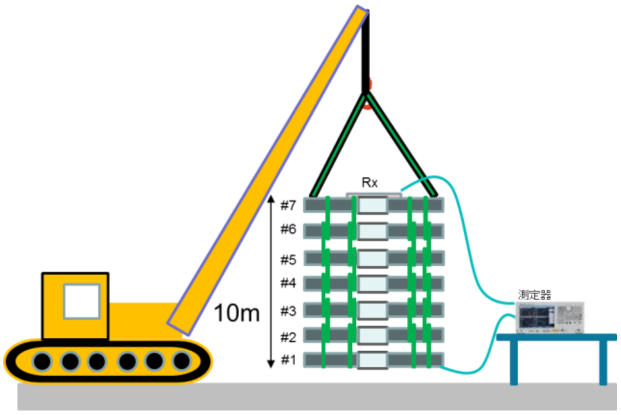


図 24　陸上試験の概要

② 7 段コイルでのインダクタンス、Q、結合係数の測定

②-1　3.4m コイルのインダクタンス、Q

空間で 3.4m コイル 7 段をロープで連結した状態でインダクタンス、Q、結合係数の測定を行った。図 25 に測定結果を示す。また、表 13 に 334Hz と 636Hz のインダクタンス、Q、抵抗の値を示す。コイル#6 は 100sq のクロロプレンキャプタイヤケーブルを用いており他のコイルと線材が異なる。コイルのインダクタンスの周波数特性の変化は小さいが、シミュレーションとは 10%程度大きな値となっている。これは電磁界シミュレーションのコイルの巻き方が縦積み 10 層となっているが、実際の 3.4m コイルはパイプ内で縦横にランダムに巻かれているためと考えられる。

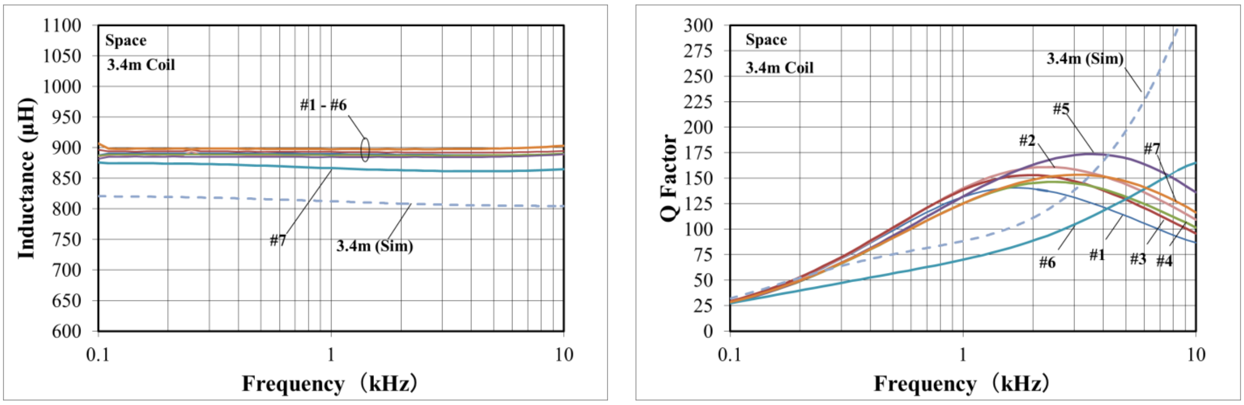


図 25　3.4m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値の周波数特性

また、Q は、#6 以外のコイルは 2～4kHz でピークを持つ特性となり、シミュレーションとは違った傾向を示している。#6 コイルはシミュレーションと同じように単調に増加しているが、Q は

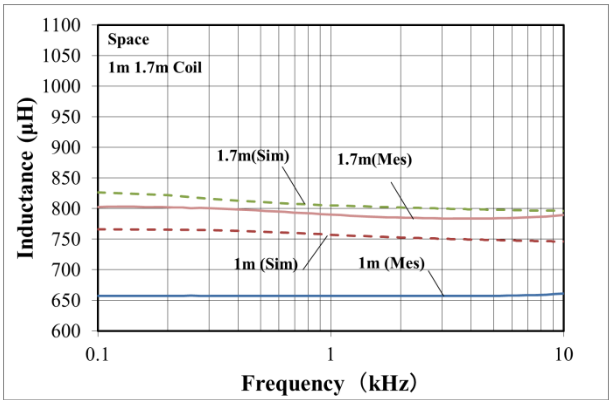
小さい値となった。#6 と他のコイルは電線の素線の断面積や本数、また被覆の材質や厚みが異なるためこれらが影響していると考えられる。本研究の目的が海中でのコイル特性の把握が主眼であるため、要因の解析はできていないが、興味深い内容であるので今後検討を行いたい。

表 13　3.4m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値

コイル No	延長ケーブル	334Hz			636Hz		
		L(μH)	Q	R(mΩ)	L(μH)	Q	R(mΩ)
#1	Cab1	891	76	24.4	890	112	31.8
#2	Cab2	888	77	24.1	888	115	30.8
#3	Cab3	894	78	23.9	893	116	30.9
#4	Cab2	889	71	26.2	888	104	34.2
#5	Cab3	885	72	25.7	885	107	33.1
#6	Cab2	873	49	37.1	869	61	56.9
#7	Cab3	898	72	26.3	898	104	34.6
Simulation	–	818	65	25.0	814	79	40.2

②-2　1m、1.7m コイルのインダクタンス、Q

図 26 に 1m と 1.7m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値の周波数特性を、表 14 に 334Hz と 636Hz のインダクタンス、Q、抵抗の値を示す。1.7m コイルのインダクタンスはシミュレーションとよく一致しているが、1m コイルは 15%程度測定値が小さい値となった。コイルの Q は 1m コイルでは 2kHz でピークを持ち 1.7m コイルでは単調に増加していることがわかった。



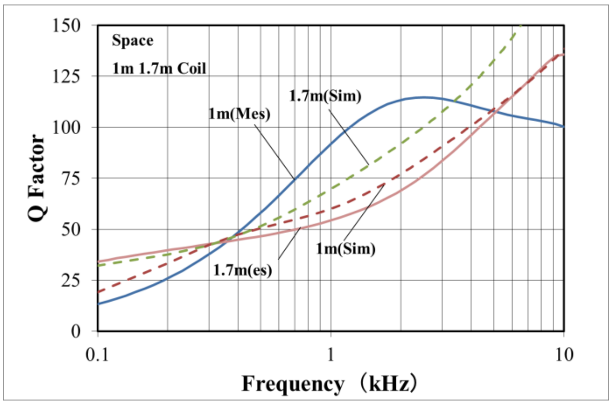


図 26　1m、1.7m のインダクタンスと Q の計算値と測定値の周波数特性

表 14　1m、1.7m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値

コイル No	延長ケーブル	334Hz			636Hz		
		L(μH)	Q	R(mΩ)	L(μH)	Q	R(mΩ)
RX 1m (Mes)	Cab4	657	41	33.4	657	69	37.8
RX 1m (Sim)	–	765	42	34.2	762	50	47.4
RX 1.7m(Mes)	Cab4	800	43	38.6	794	49	65.1
RX 1.7m(Sim)	–	816	42	36.6	811	51	49.5

②-3　結合係数測定

図 27 に 3.4m コイル間の空間での結合係数の周波数特性を、図 28 に 3.4m コイルと 1.7m/1.0m コイル間の空間での結合係数の周波数特性を示す。シミュレーションと実験値は k13 および k6 で多少誤差があるものの全体的には良く一致している。また表 15 に 334Hz での結合係数を示す。

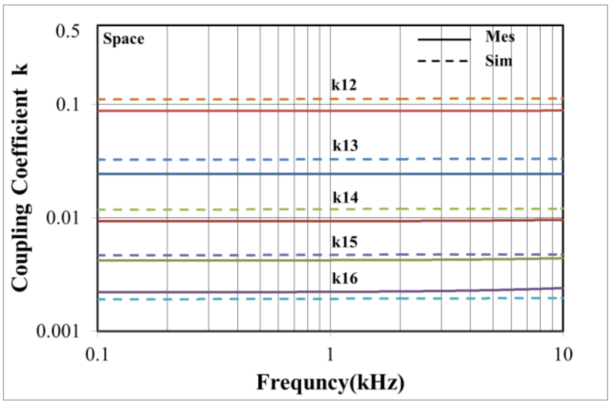
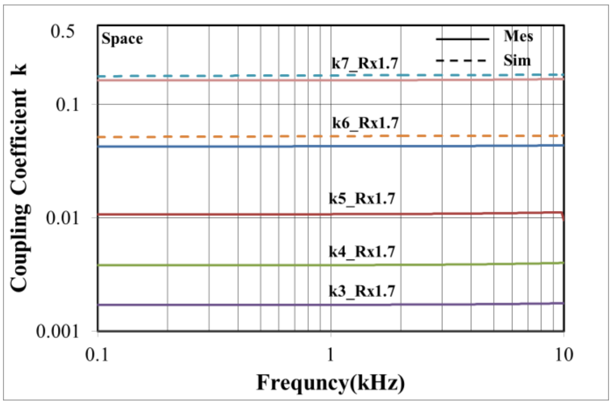


図 27　3.4m コイル間の結合係数



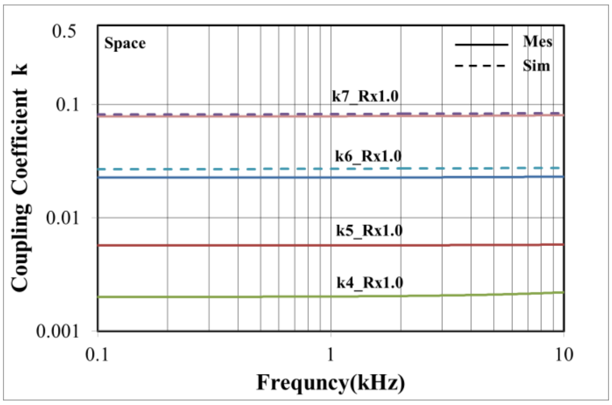


図 28　3.4m と 1.7m / 1.0m コイル間の結合係数

表 15　結合係数(334Hz)

3.4m コイル間			3.4−1m コイル間			3.4−1.7m コイル間		
No	Mes	Sim	No	Mes	Sim	No	Mes	Sim
k12	0.0879	0.1109	k1_1.0	0.0786	0.0818	k1_1.7	0.1630	0.1790
k13	0.0244	0.0326	k2_1.0	0.0226	0.0269	k2_1.7	0.0426	0.0525
k14	0.0093	0.0118	k3_1.0	0.0057	−	k3_1.7	0.0107	−
k15	0.0042	0.0047	k4_1.0	0.0020	−	k4_1.7	0.0038	−
k16	0.0022	0.0019	k5_1.0	0.0009	−	k5_1.7	0.0017	−
k17	0.0015	0.0008	−	−	−	−	−	−

③伝送路の設計と電力伝送効率の計算

③-1 伝送路の設計

図 29 に#1⇒＃7 を図 30 に#1⇒RX の回路シミュレーションモデルを示す。表 16 に回路シミュレーションのインダクタンス、抵抗、結合係数と最適化した整合容量と共振容量の値を示す。インダクタンス、Q、抵抗は、表 14、表 15 の値を参考にした。

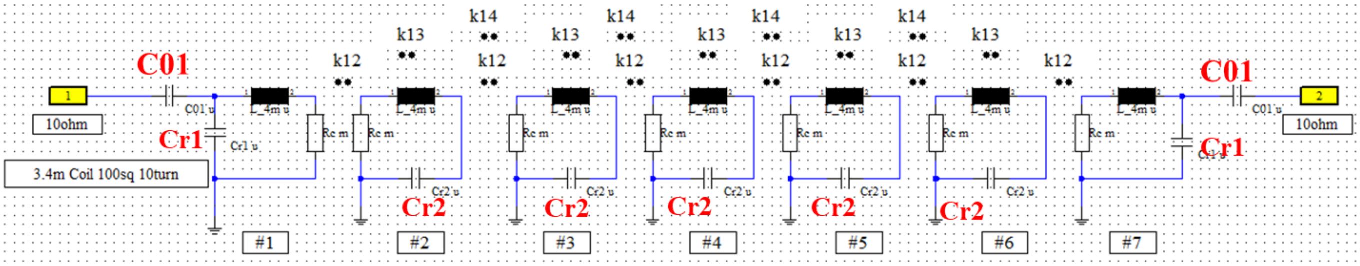


図 29　#1⇒#7 の伝送路モデル

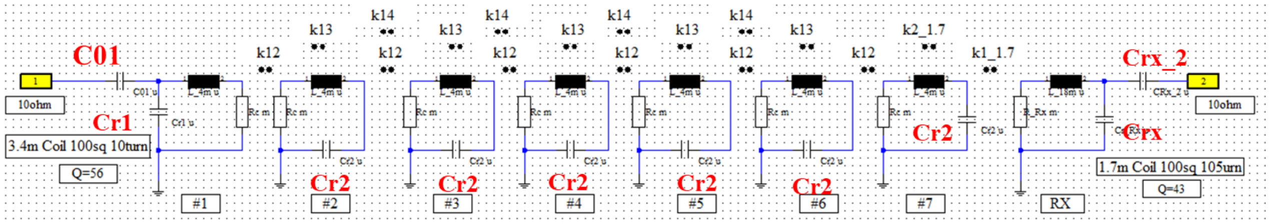


図 30　#1⇒RX の伝送路モデル

計算したコンデンサの容量値は 13uF～342uF と大きな値となったため、パナソニックのプラスチックフィルムコンデンサ EZPE シリーズを用いた。

表 16　計算に用いたインダクタンス、Q、抵抗、結合係数の値と計算した容量値

	320Hz			650Hz		
	#1⇒#7	#1⇒Rx1m	#1⇒ Rx1.7m	#1⇒#7	#1⇒Rx1m	#1⇒ Rx1.7m
L1(μH)	891	891	891	890	890	890
Q1	76	76	76	112	112	112
R1(mΩ)	24.2	24.2	24.1	31.8	31.8	31.8
L_rx(μH)	-	657	800	-	657	794
Q_rx	-	41	43	-	69	49
R_rx(mΩ)	-	33.4	38.6	-	37.8	65.1
k12	0.0879	0.0879	0.0879	0.0879	0.0879	0.0879
k13	0.0244	0.0244	0.0244	0.0244	0.0244	0.0244
k14	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093	0.0093
k1_rx	-	0.0789	0.1630	-	0.0789	0.1630
k2_rx	-	0.0226	0.0426	-	0.0226	0.0426
C01(μH)	53.0	47,4	45.3	13.0	14.0	15.2
Cr1(μH)	247.8	252	246.2	56.9	57.0	55.7
Cr2(μH)	258.4	262	255.2	64.2	63.3	63.0
Crx_2(μH)		59.2	240.0	-	16.7	50.0
Crx(μH)		342.4	254.3	-	78.5	57.5

③-2 電力伝送効率

電力測定は表 16 で計算したコンデンサをコイル端の防水ケース内に接続して測定した。表 17、表 18 に、空間の伝送効率の測定結果を示す。効率は#1⇒RX1.7m で 54.5%、#1⇒RX1.0m で 62.6%となった。

表 17　320Hz での空間の電力伝送効率測定

f=320Hz		#1⇒#7	#1⇒RX1.7m	#1⇒RX1.0m
Network Analyzer	Eff.	44.4%	40.0%	32.6%
Power Analyzer	Eff.	31.4%	30.3%	25.3%
	Pout	77W	71W	64W
Simulation	Eff.	44.6%	40.7%	30.1%
Circuit-Simulation	Eff.	43.2%	39.7%	31.6%

表 18　650Hz での空間の電力伝送効率測定

f=650Hz		#1⇒#7	#1⇒RX1.7m	#1⇒RX1.0m
Network Analyzer	Eff.	54.9%	45.1%	48.5%
Power Analyzer	Eff.	47.3%	40.0%	34.7%
	Pout	103W	101W	116W
EM-Simulation	Eff.	42.2%	47.6%	36.0%
Circuit-Simulation	Eff.	55.7%	55.2%	49.1%

4)海上試験

①海上試験概要

7 段連結した 3.4m コイルと RX コイルを海上の台船上かクレーンで吊るし海中に沈めて、それぞれのコイルのインダクタンス、Q を測定した。さらに海中での電力伝送効率を測定する。
海上試験の概要を図 31 に示す。

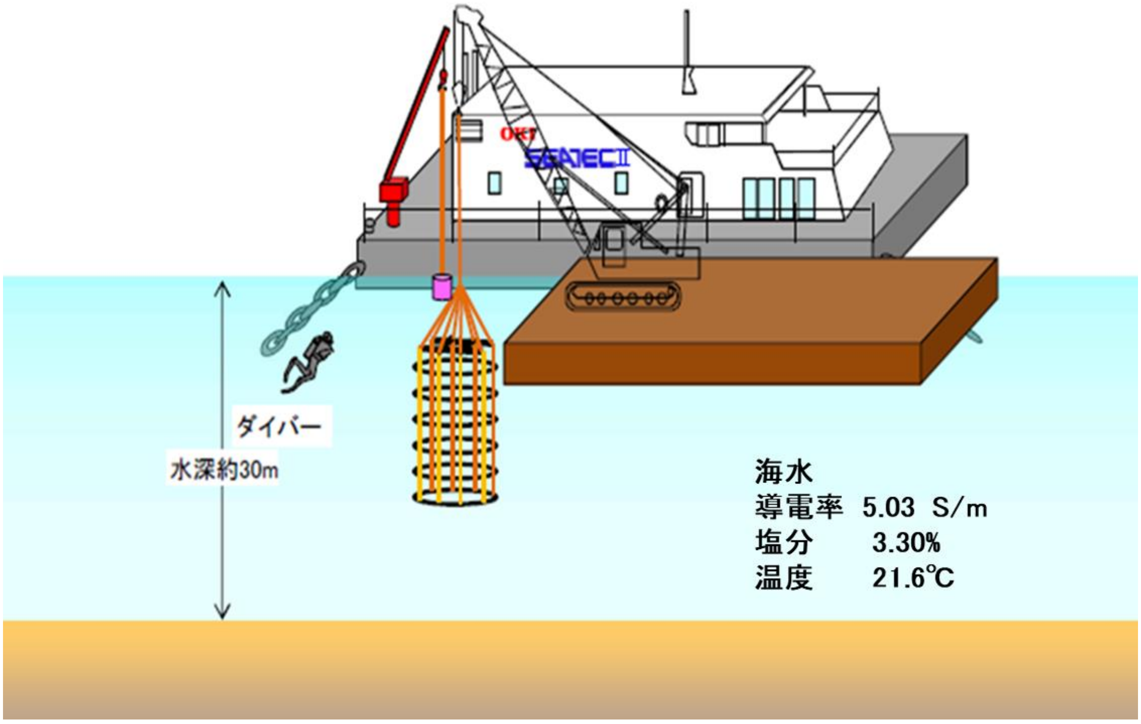
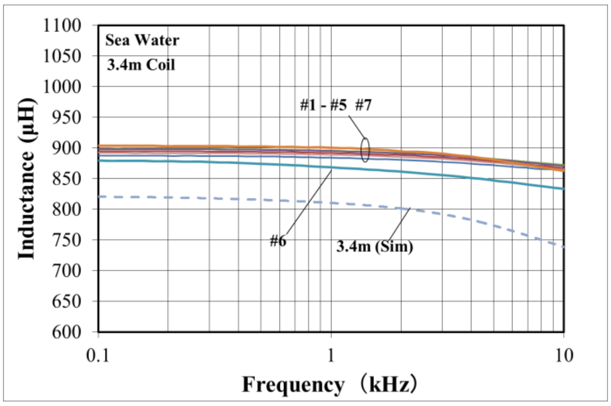


図 31　海上試験の概要

② 7 段コイルでのインダクタンス、Q、結合係数の測定

②-1　海中に沈めたコイル 3.4m コイルのインダクタンス、Q

海中で 3.4m コイルのインダクタンス、Q、結合係数の測定を行った。図 32 に測定結果を示す。また、表 19 に 334Hz と 636Hz のインダクタンス、Q、抵抗の測定値を示す。例えば#1 コイルで比較するとインダクタンスは図 25 の空間データと比較して変化は小さいが、Q はピーク値が 2kHz から 636Hz に下がり、最大値は 140 から 55 と 60%低下した。電磁界シミュレーションと比較するとインダクタンスは空間と同じように測定値が 10%程度大きな値となった。広い海中でのコイルのインダクタンス及び Q の測定結果は図 21 の桟橋試験でのインダクタンス及び Q の測定結果と同じようになったので、全体設計の前にコイルを 1 個製作して特性確認することは有効である。



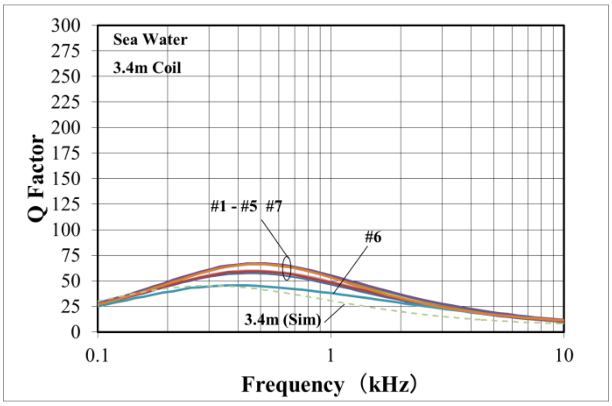


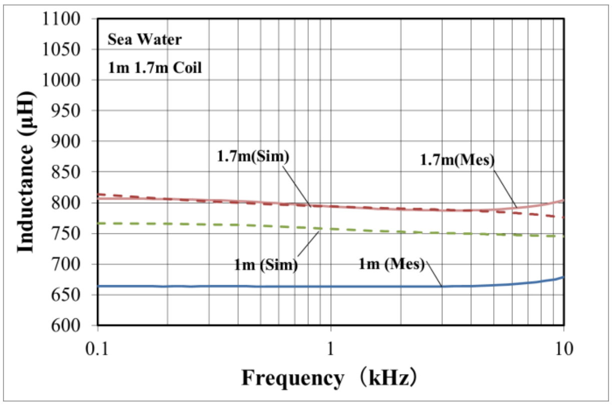
図 32　3.4m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値

表 19　3.4m コイルのインダクタンスと Q と抵抗の測定値

コイル No	延長ケーブル	334Hz			636Hz		
		L(μH)	Q	R(mΩ)	L(μH)	Q	R(mΩ)
#1	Cab1	887	55	33.7	886	55	64.6
#2	Cab2	891	58	32.5	890	58	61.4
#3	Cab3	894	57	33.0	893	57	62.5
#4	Cab2	898	63	30.0	897	64	56.0
#5	Cab3	897	64	29.6	896	65	54.9
#6	Cab2	877	45	40.6	873	43	81.3
#7	Cab3	903	62	30.5	902	64	56.1
Simulation	−	817	45	38.5	814	38	84.8

②-2　1m、1.7m コイルのインダクタンス、Q

図 33 に 1m および 1.7m コイルのインダクタンス、Q の計算値と測定値を示す。1m コイルのインダクタンスは海中で 1.5kHz でピークを持つ、また 1.7m コイルの Q は 300Hz～2kHz で変化は小さかった。今回は 3.4m コイルの段数が 7 段と多いため、3.4m コイルの Q の電磁界シミュレーションと測定で最大となる値に近い 320Hz と 650Hz を伝送周波数とした。表 19 に 2 つの周波数のインダクタンス、Q、抵抗の測定値を示す。



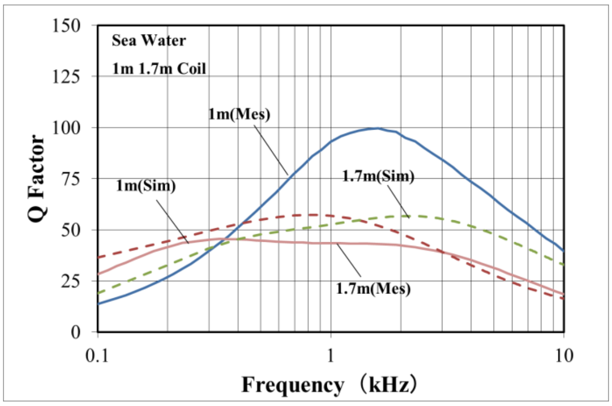


図 33　1m、1.7m のインダクタンスと Q の計算値と測定値

表 20　1m、1.7m コイルのインダクタンスと Q の計算値と測定値

コイル No	延長ケーブル	334Hz			636Hz		
		L(μH)	Q	R(mΩ)	L(μH)	Q	R(mΩ)
Rx 1m (Mes)	Cab4	664	44	31.9	664	73	36.4
Rx 1m(Sim)	−	765	41	35.2	761	49	58.4
Rx 1.7m(Mes)	Cab4	804	46	37.0	798	44	72.5
Rx 1.7m(Sim)	−	802	49	30.6	796	56	53.4

②-3　結合係数測定

図 34、図 35 に 3.4m、1.7m、1.0m コイル間の空間での結合係数の計算値（点線）と測定値の周波数特性を示す。計算値の周波数特性は 1kHz で結合係数が低下するが、測定値の変化は小さい。また計算値と測定値は良く一致している。表 21 に 320Hz での結合係数の計算値と測定値のポイントデータを示す。この値を用いて回路シミュレーションより回路定数を計算した。

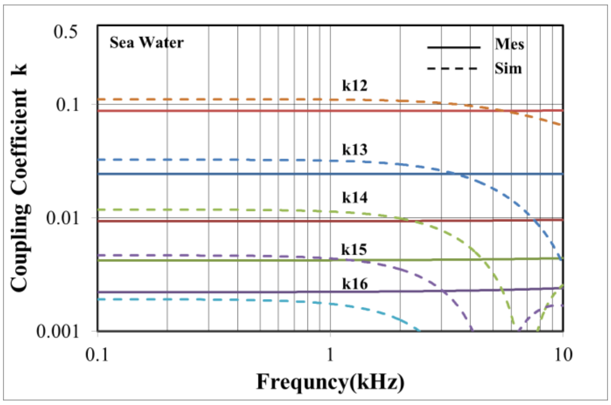


図 34　3.4m コイル間の結合係数

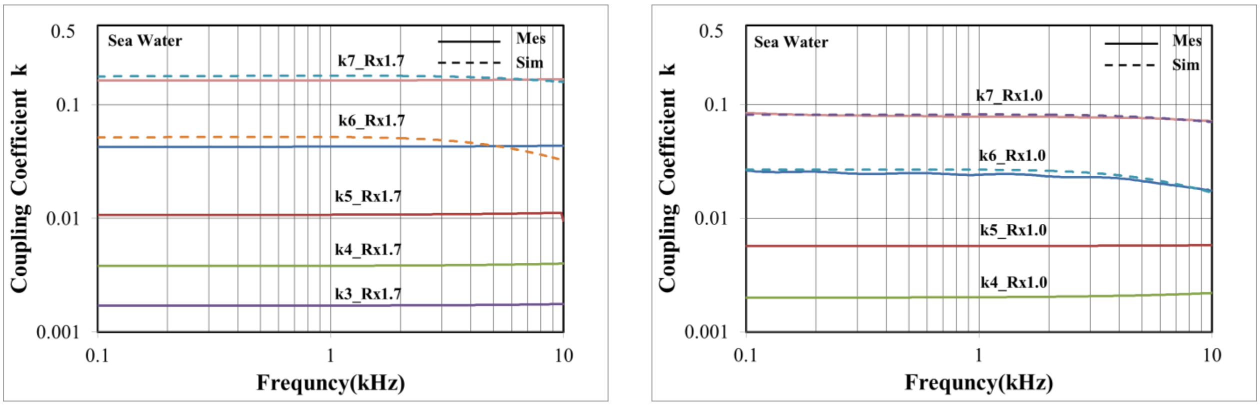


図 35　3.4m と 1.7m / 1m コイル間の結合係数

表 21　海中での結合係数

3.4m コイル間			3.4−1.7m コイル間		
No	Mes	Sim	No	Mes	Sim
k12	0.0879	0.1108	k1_1.7	0.1630	0.1789
k13	0.0244	0.0325	k2_1.7	0.0426	0.0520
k14	0.0093	0.0118	3.4−1m コイル間		
k15	0.0042	0.0046	No	Mes	Sim
k16	0.0022	0.0019	k1_1.0	0.0786	0.0817
k17	0.0015	0.0008	k2_1.0	0.0226	0.0269

③伝送路の設計と電力伝送効率の計算

③-1 伝送路の設計

伝送路は図 29、図 30 の回路シミュレーションモデルを用いる。海中で測定したインダクタンス、結合係数は空間の測定値と比較して変化は小さいため回路定数は表 16 の値を用いる。しかし、Q は海中で大幅に低下するため、Q の低下を抵抗値に反映して 3.4m、1.7m、1m コイルに対応する抵抗値は表 22 を用いた。

表 22　回路シミュレーションで用いた抵抗値

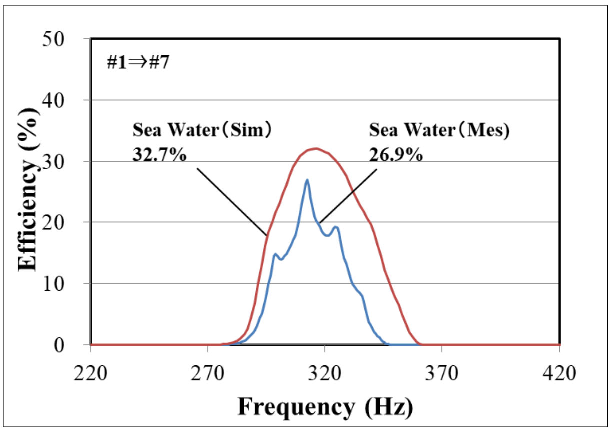
コイル	334Hz		636Hz	
	Q	R(mΩ)	Q	R(mΩ)
3.4m	55	33.7	55	64.6
1.7m	46	37.0	44	72.5
1m	44	31.9	73	36.4

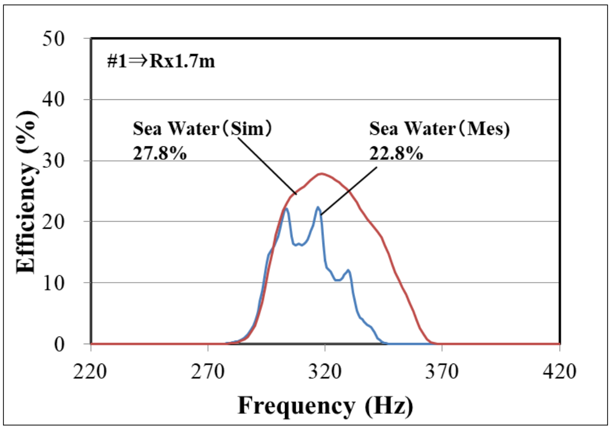
③-2 320Hz での電力伝送効率

空間で設定した表 16 のコンデンサ容量は変えずに、伝送コイルを台船からクレーンで吊るし海中に沈めて伝送効率の測定を行った。320Hz の測定結果を表 23 に示す。VNA 測定で#1⇒1.7m コイルでは 22.2%の効率だったが、高周波電源より電力を投入し 100W 伝送を行った場合は 17.2%であった。図 36 に VNA で測定した伝送路の周波数特性を示す。

表 23　320Hz の効率測定の結果

f=320Hz		#1⇒#7	#1⇒RX1.7m	#1⇒RX1.0m
Network Analyzer	**Eff.**	**26.9%**	**22.2%**	**19.0%**
Power Analyzer	**Eff.**	**24.3%**	**17.2%**	**16.6%**
	Pout	**107W**	**107W**	**106W**
Simulation	**Eff.**	**32.0%**	**27.8%**	**22.5%**
Circuit-Simulation	**Eff.**	**N.A**	**N.A**	**N.A**





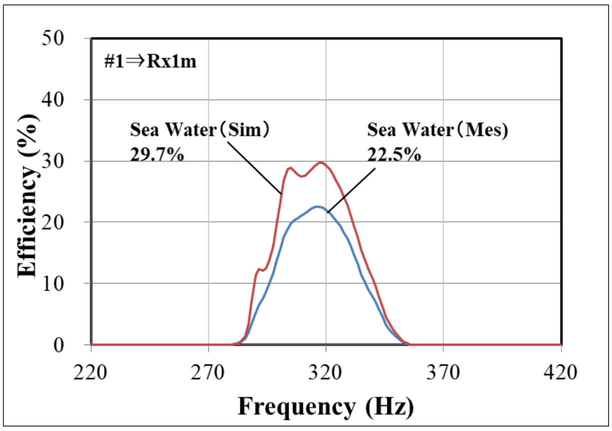


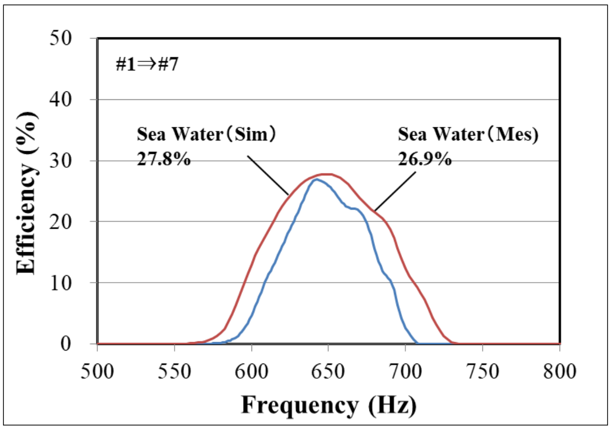
図 36　周波数特性の測定結果

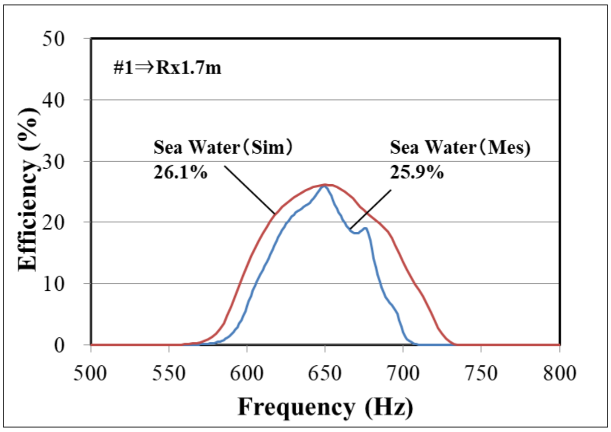
③-3　650Hz での伝送効率の測定

表 24 に 650Hz での伝送効率の測定結果を示す。また、図 37 に 650Hz の周波数特性を示す。この実験では#1⇒1.7m コイルの VNA での測定で 25.9%、PA で 100W 伝送した場合の測定で 20.7%の効率で伝送できることを確認した。

表 24 650Hz の効率測定の結果

f=650Hz		#1⇒#7	#1⇒RX1.7m	#1⇒RX1.0m
Network Analyzer	Eff.	26.9%	25.9%	23.1%
Power Analyzer	Eff.	25.9%	20.7%	18.7%
	Pout	104W	103W	103W
Simulation	Eff.	27.8%	26.1%	20.5%
Circuit-Simulation	Eff.	N.A	N.A	N.A





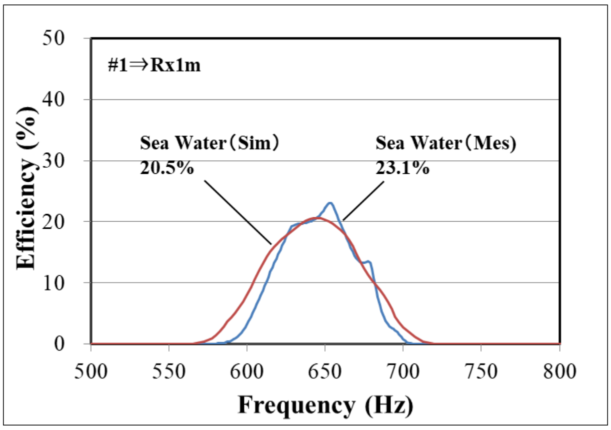


図 37　650Hz の伝送効率の周波数特性

③-4 電力伝送時の電力依存性

図 38 に#1⇒1.7m コイルを海中で 650Hz の伝送時に電力の大きさを変えて、効率の電力依存性がないかの検討を行った。1～100W 程度の伝送では、依存性はなかった。

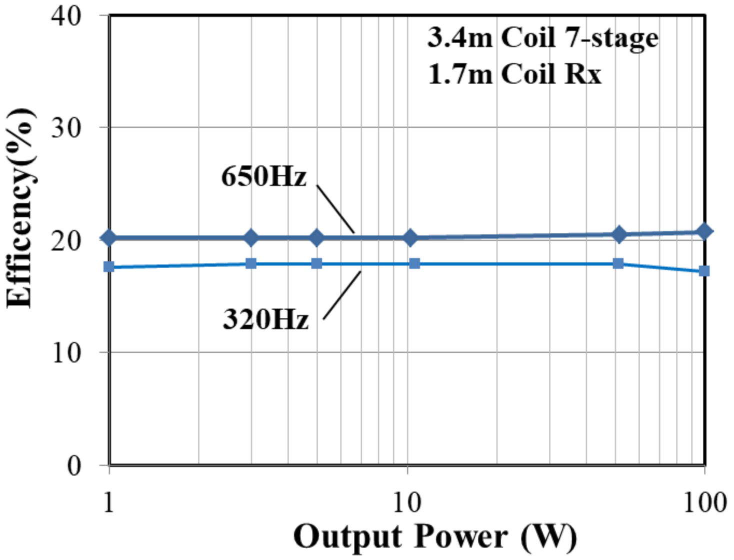


図 38　海中伝送時の効率の電力依存性

5）まとめ

海中にコイルを沈め 10m の海中ワイヤレス電力伝送実験を行い、100W の電力を伝送できることを確認した。この実験を通して以下の結果を得た。

１）製作した 3.4m、1.7m、1.0m コイルの特性と電磁界シミュレーションの計算値と比較するため、桟橋のクレーンを使って海中に沈めコイル特性を測定した。コイル特性は台船での試験と良く一致しており、事前検証の有効性を確認した。

２）3.4m コイル 7 段をロープで連結し空間でのインダクタンス、Q、結合係数を測定した。また、測定したコイル特性より整合・共振コンデンサの容量を計算し、各コイルに接続して伝送効率の測定を行った。VNA による測定での 650Hz 伝送効率は#1⇒1.7m コイルで 45.1%であった。

３）陸上試験で組立てたコイルを海上の台船上でクレーンで吊るし海中に沈めて、コイル特性と電力伝送効率の測定を行った。海中でのコイルのインダクタンスや結合係数は空間と比べて変化は小さいが、3.4m コイルの Q は空間に比べピーク値で 60%も低下した。シミュレーションや測定で 3.4m コイルの Q が最大となる 320Hz と 650Hz を伝送路として伝送効率の測定を行った。その結果 650Hz の周波数の伝送実験で、#1⇒1.7m コイルの VNA での測定で 25.9%、PA で 100W 伝送した場合の測定で 20.7%の効率で伝送できることを確認した。

４）#1⇒1.7m コイルでは海中で 650Hz の伝送時に電力の大きさを変えて、効率の電力依存性がないかの検討を行った。出力 1～100W の範囲では電力依存性は見られなかったが、さらに kW 級の大電力を伝送する場合は、海水の物性が非線形性を示す可能性があり今後も検討する必要がある。

2.3.3　水中ワイヤレス給電の構造体の設計

2.3.3.1　設計の概要

1～10m の距離を伝送できるワイヤレス電力伝送の実験構造および海水での防水性や腐食性などの研究を行った。平成２７年度、２８年度に実施した水槽やプールでの実験検討により、コイル周辺に金属物があるとコイルの Q が大きく低下すること、コイルとコンデンサの接続箇所の防水構造を確保することが重要であることが明らかになった。平成２９年度は 10m の距離を伝送させるため、これまでより水深の深い海中にて直径数 m のコイルを多段に配置して安定的に実験を行うための水中ワイヤレス給電装置の構造を明らかにした。特に、コイルの大きさと段数の選択は、伝送性能と実験信頼性に係わる重要な設計条件であるため、海流の影響を受けにくい安定した構造、実験作業場所で安全に組み立てられる構造、高い電力伝送効率等の視点から最適な条件を選定した。さらに、海中にてコンデンサをコイル直下に配置することは性能確保の上で重用であるので、本構成によるワイヤレス給電方式の、実運用時におけるコンデンサをどのように選定するかの設計指針を得た。

１）コイル直径の検討

海中で 10m のワイヤレス電力伝送を行うためには、TX コイルや無給電コイルの直径が大きくなるため適切な大きさを検討する必要がある。コイル直径を決定するためには、構築する実験システムの伝送効率、重量、電線コスト、組立性、輸送性、実験時のハンドリングなどの制約条件を満足する必要がある。表 25 に 10m、3.4m、1.7m コイルを用いた実験システムの比較を示す。それぞれ、長所短所はあるが工場でコイルを作成しトラック運搬が可能で、実験作業が容易な 3.4m コイルに決定した。

表 25　コイルのサイズを変えた場合の実験システムの比較

	Φ10m コイル 3 段 ＋1m Rx コイル	Φ3.4m コイル 7 段 ＋1m Rx コイル	Φ1.8m2 重コイル 12 段 ＋1m Rx コイル
伝送効率	0.9%	23%	26%
導体重さ （Rx 除く）	320*3=960kg 10 ターン	109*7=763kg 10 ターン	115*12=1380kg 20 ターン
トラック運搬	×	○	○
地上置き 高さ	○ 0.4m以上	○ 1 m以上	× 1.7m以上
つり下げ構造	△	○	○

2）3.4mコイルの基本構造物の選定

海中にコイルを沈めて試験を行うためのコイル保持等の構造体の要件は以下の内容とした。

1．防水性を確保した上で共振用コンデンサを容易に交換できること。

2．水中重量を極力 0 に近づけて水中での位置調整が容易にできること。

3. 波等によりコイルの位置ずれが発生しにくいこと。

上記要件を満足できる方式として、生け簀の構造体で使われているポリエチレンパイプの中に電線を巻込む方式を検討した。図 39 にポリエチレンパイプを用いた生け簀の概要を示す。
これは東京大学とニチモウマリカルチャーが共同開発している浮沈式生け簀である[4]。ポリエチレンパイプは電線を入れる十分なスペースがあり、防水性、水中重量、加工性、今回の実験で予想される波に対する強度に対しても十分な強度があることが確認できた。

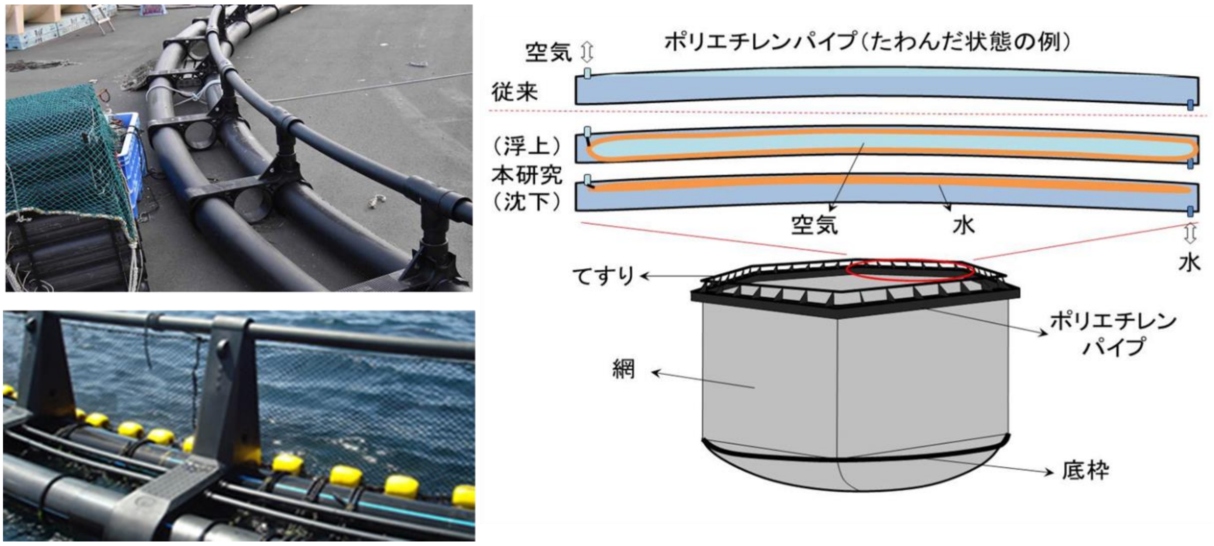


図 39　生け簀構造体の概要

3）ポリエチレンパイプを用いた 3.4m コイル作成

①ポリエチレンパイプの溶着

ポリエチレンパイプを円形にして防水性を確保するためには、パイプ端の合わせ加工が重要である。今回は、パイプ端に T 字ソケット溶着して組み合わせる方式を取った。図 40 に接合したパイプを示す。2 本のパイプをパット溶着することで長さを確保している。

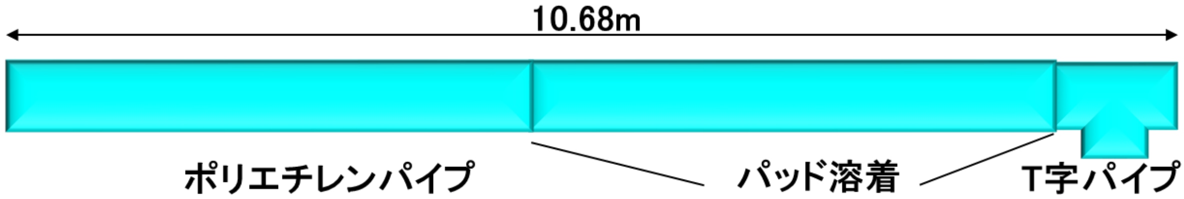


図 40　ポリエチレンパイプと T 字ソケット

②パイプの円形加工およびケーブル挿入

ポリエチレンパイプ内にケーブル順次挿入し、コイルを作成した。図 41 に作業内容を示す。

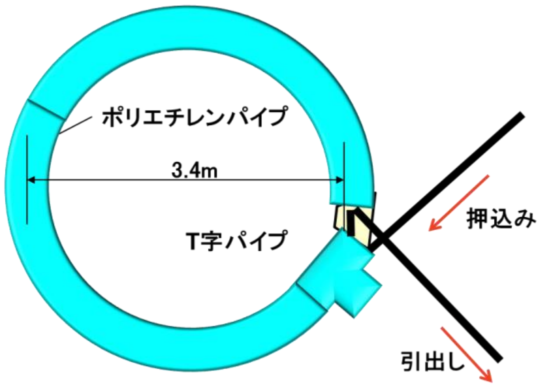


図 41　ケーブルの挿入

③パイプ溶着

　ケーブルを挿入したパイプの端部と T 字ソケット EF 溶着により接合する。また、コンデンサを収納するための延長パイプも接続する。図 42 に完成したコイル構造と外観写真を示す。

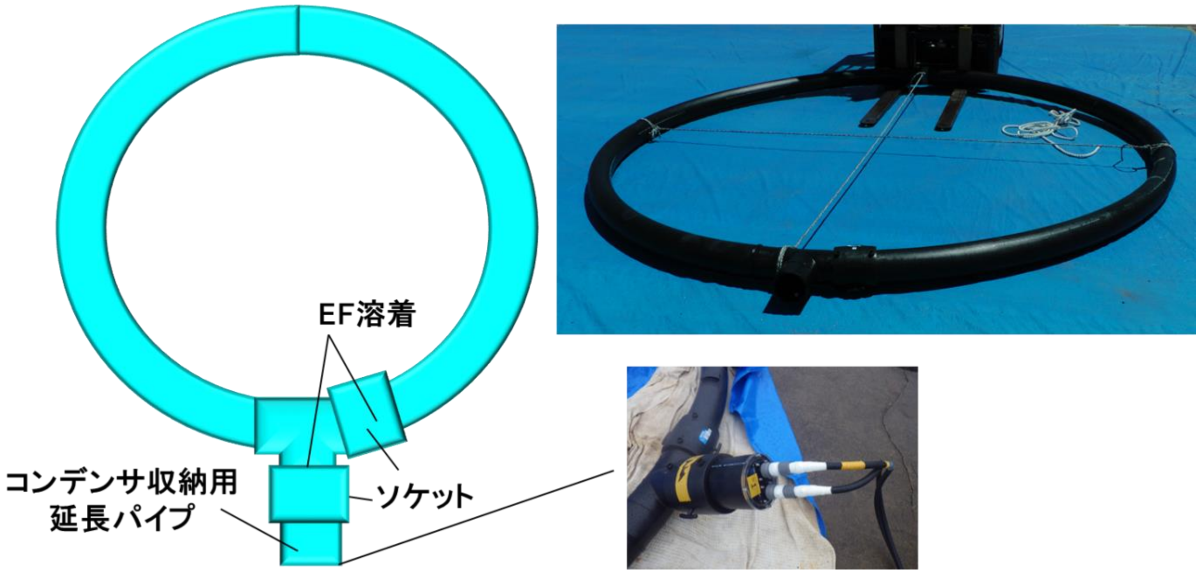


図 42　3.4m コイルの完成図

④パイプ内のケーブルの収納イメージ

　図 43 に組立後のケーブルの収納イメージを示す。組立中はコイルが円の中心寄りにあるが、パイプ接続後円の直径が縮まる分だけコイルが円の外側に来るような配置にする。

図 43　電線のパイプ内収納イメージ

4）コンデンサボックスの構造

測定用ケーブルが 20m 以上あるため、これを通さずにコイルにコンデンサを直接することでコイルの抵抗分を減らすことができる。コンデンサを直接コイルに接続するためには、コンデンサを入れる防水ボックスと防水ボックス中のコンデンサと測定ケーブルを接続する必要がある。図 44 に T 字パイプを用いたコンデンサボックスを示す。コンデンサボックスの防水性は O リングを用いて確保した。またコンデンサボックスと測定ケーブルの接続は海中コネクタを用いた。38sq の太い電線に接続する海中コネクタが市販されていなかったため特別に製作した。

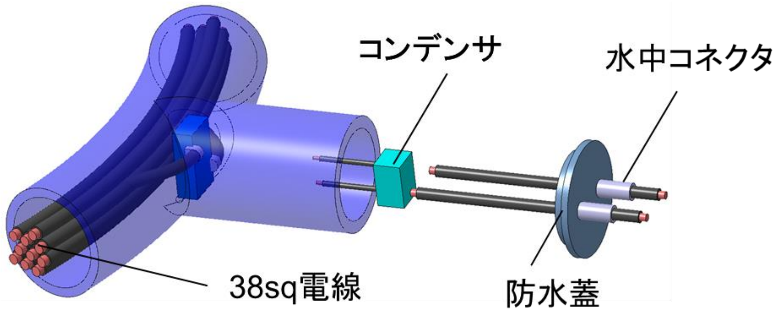


図 44　コンデンサボックスの構造

5）1.7m、1m　RX コイルの作成

AUV 等での受電を想定し、直径 1m 及び 1.7m のコイルを準備した。図 45 に RX コイルの外観を示す。ポリエチレンパイプでの作成はパイプの曲げ半径が対応していないためアクリルボビン構造で作成した。なお、コンデンサボックスもアクリルで製作し防水は O リングを用いた。

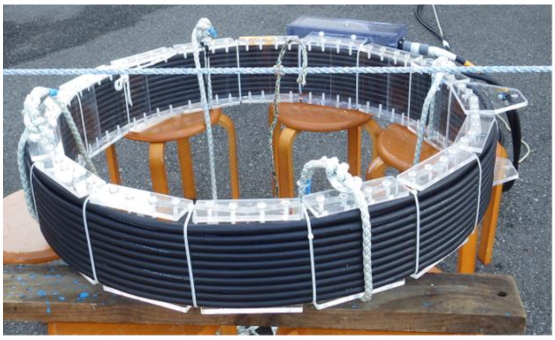


図 45　1.7m 1m RX コイルの外観

6）実験用コイルの構造

図 46 に実験用コイルの組立図を示す。3.4m のコイル間隔は 1.7m としロープで結合した。また、表 26 に実験用コイル構造体の空中重量と余剰浮力を示す。

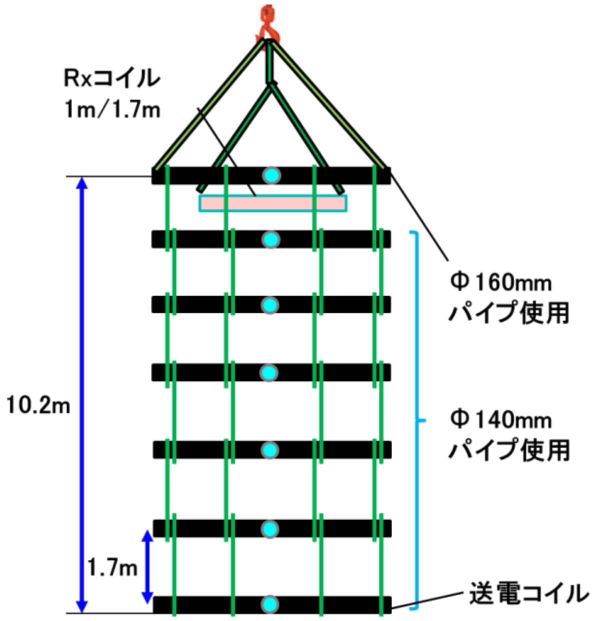


図 46　実験用コイルの組立図

表 26　コイル構造体の重量・浮力

項目	空中重量	余剰浮力
Φ140 パイプ	165.9kg	3.3kg
Φ140 パイプ	183.6kg	37.4kg
7 段コイル	1179.1kg	57.1kg
Rx 1m コイル	34.5kg	-21.9kg
Rx 1.7m コイル	95.0kg	-70.9kg

7）試験場選定

平成２７年度、２８年度に実施した水槽やプールでの実験検討により、コイル周辺に金属物があるとコイルの Q が大きく低下すること、コイルとコンデンサの接続箇所の防水構造を確保することが重要であることが明らかになった。

①試験場の選定

①-1 試験場の選定条件および候補地

試験場の選定条件として以下の内容で検討を行った。

1.水深 13m 以上。
2.大型クレーン（20t 以上）の展開可能。
3.コイル組み立てスペースの確保
4.測定器設置場所の確保（雨天対応）
5.電源（単層 100V20A,単層 200V20A）
6.洗浄用水の確保
7.トイレ、休憩施設等の作業環境の有無
8.宿泊施設の有無

その結果、以下の 2 候補地を選定した。

1.高知県宿毛市の新港岸壁
2.静岡県沼津市の株式会社オキシーテック所有台船

① -2 高知県宿毛市新港岸壁

図 47 に高知県宿毛市新港岸壁の所在地を示す。国及び県が管理している岸壁で、大型客船の寄航が可能だが、使用しているのは年数回程度である。また使用に関して県の了解が得られる見込みは確認済。

図 47　高知県宿毛市新港岸壁

①-3 静岡県沼津市の株式会社オキシーテック

図 48 オキシーテックの所在地と台船、バージを示す。係留バージや台船を所有するもっぱら海上試験を専門に行う会社で防衛省や国立研究開発法人 海洋研究開発機構等の海上試験を数多くサポートしている。

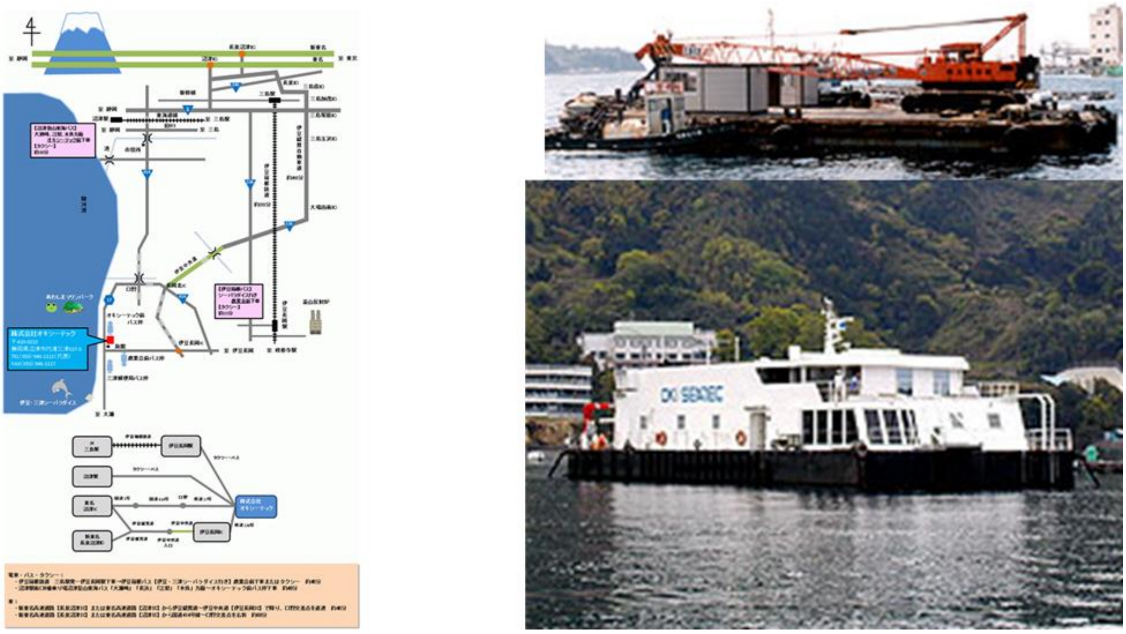


図 48　静岡県沼津市の株式会社オキシーテック

①-4 候補地の絞り込み

候補として上がった、

　1.高知県宿毛市の新港岸壁

　2.静岡県沼津市の株式会社オキシーテック所有台船

の 2 地点に対して検討を行い、

・初めての試験なので経験者のサポートが成功の要点。

・トラブル対応のしやすさ（海上試験でのトラブル）

・交通の利便性

上記を考慮して静岡県沼津市の株式会社オキシーテックに依頼する事に決定した。

2.3.3.2 海中構造体まとめ

　10m の海中ワイヤレス電力伝送実験を行うため、直径 3.4m コイルを 7 段接続した構造の実験システムを構築した。この実験を通して以下の結果を得た。

1）10m 伝送を行うため、直径 10m、3.4m、1.7m のコイルを、それぞれ 7 段、12 段接続した方式を検討した。各方式の伝送効率、重量、トラック運搬性、現場作業性などを比較検討した結果、工場で作成しトラック運搬が可能な 3.4m コイル 7 段の方式に決定した。

2)3.4m コイル製作にあたり、浮沈式生簀で実用化されているポリエチレンパイプ中に電線を入れる方式を採用した。この方式で防水性、腐食性、水中重量、加工性、波に対する強度等も十分に満足

できる構造となった。また、T 型パイプを使って防水型のコンデンサボックスを接続しコイルにコンデンサを直結することができた。コンデンサボックスから水中コネクタにより測定ケーブルを接続することで、実験効率を向上することができた。

３）RX コイルは、アクリルボビンを用いて製作した。コイルにコンデンサを直接接続するためにアクリルで防水型のコンデンサボックスを製作し、水中コネクトも接続した。

４）3.4m コイル間は実験での磁界への影響をなくすため非金属のロープで接続した。組立てたコイルは若干の余剰浮力があったが、海中での安定作業のため下部に重りを接続した。

５）実験場は、高知県宿毛市新港岸壁と静岡県沼津市内浦港（オキシーテック）の 2 カ所を候補として検討した。初めての実験のため実験サポートが可能なオキシーテックを選定した。

６）実験は陸上、内浦港内で台船上から海中にコイルを沈めて行った。結果は当初目標の 10m／100W の海中ワイヤレス電力伝送実験に成功した。

2.3.4　海中移動体搭載の電子機器のノイズ影響調査（九州工業大学）

2.3.4.1　AUV へのノイズ影響実験

1)はじめに

本研究開発は、防衛装備庁の平成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、パナソニック株式会社が研究委託された「海中ワイヤレス電力伝送技術開発」を実施するものである。

九州工業大学は、パナソニック㈱の委託を受け、AUV の研究開発や運用実績・経験を元に、AUV への給電を想定した海中ワイヤレス給電システムに関して、以下を実施した。

- ・海中 10m 以上での実験を想定した、コイルの構造および設置方法の検討
- ・海中での長期設置を想定した防水性・防食性に関する基礎調査
- ・安全性、腐食耐性を研究し指針を策定
- ・AUV に搭載された電子機器へのワイヤレス給電よりの影響について継続検証実施
- ・AUV へワイヤレス給電システムを搭載する場合の電力容量および負荷変動等についての仕様

平成２９年度は、これらに関して毎月の進捗会議および技術検討会や岸壁試験等でパナソニック㈱との意見交換・技術協議・指導等を行ったが、本報告書ではこれらの内、九州工業大学が実施した AUV に搭載された電子機器へのワイヤレス給電よりの影響について継続検証実施（AUV への電磁波ノイズ影響調査実験）について報告する。

2)ワイヤレス給電による搭載機器への電磁波ノイズ影響調査試験

平成２８年度は第 1 ステップとして、ボードコンピュータをアルミニウム合金製の小型耐圧容器に収納して平成２７年度に製作した試験水槽に設置し、同じく平成２７年度に製作した 3 個のコイルで構成される直径 1m の伝送コイルシステムの給電状態下でコンピュータを稼働させて、ワイヤレス給電による電磁波ノイズの影響を調査した。シミュレーションで得られた入力電流１A 励振での磁界強度を基にした推定値で 85A/m の磁界強度までの試験により、ボードコンピュータや付属の電子機器の作動異常や、温度センサからのアナログ信号の異常は認められないことを確認した。

平成２９年度は、平成２８年度の試験結果も参考に、今年度製作した直径 3.4mのコイルが 7 個で構成される伝送コイルシステムにより、実際の海中での給電状態下でコンピュータを稼働させてワイヤレス給電による電磁波ノイズの影響を調査した。

①ノイズ影響調査試験対象機器

調査対象の電子機器としては、昨年度の水槽試験で調査した艇体制御用ボードコンピュータをそのまま採用することとした。

①-1　ボードコンピュータ

調査対象となる艇体制御用ボードコンピュータは、九州工業大学の小型 AUV に搭載されている SainSmart UNO R3 ATmega328P Development Board である。

表 27 に、ボードコンピュータの主要スペックを示す[5]。

表 27　Specification of SainSmart UNO R3

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage(recommended)	7-12V
Input Voltage(limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14(of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40mA
DC Current for 3.3V pin	50mA
Flash Memory	32KB (ATmega328 internal memory)0.5KB used by bootloader
SRAM	2KB (ATmega328 internal memory)
EEPROM	1KB (ATmega328 inernal memory)
Clock Speed	16MHz

②ノイズ影響調査試験装置の構成

②-1 海中試験場所および運用概念

後述のコイルシステムの寸法・重量から、海中での試験場所としては以下の条件を満足する必要がある。

1）　水深 10m、周辺 5m 以上の海水空間を有すること。
2）　大型クレーン（吊り上げ荷重 20t 以上）の展開が可能なこと。
3）　陸上及び船上で、コイルシステムの格納、展開スペースが確保できること。
4）　コイルシステム～測定機器間距離は 10m 以内であること。
5）　試験に使用する電源が確保できること。

これらをベースに検討の結果、静岡県沼津市の株式会社オキシーテックが所有する SEATECⅡに大型クローラークレーンを搭載した台船を接舷固定して試験場所とすることとした。図 49 に海中試験場所とした SEATECⅡと接舷固定した台船、及び台船上の様子を示す。図 50 に海中試験の実施概念図を示す。

図 49　海中試験場所

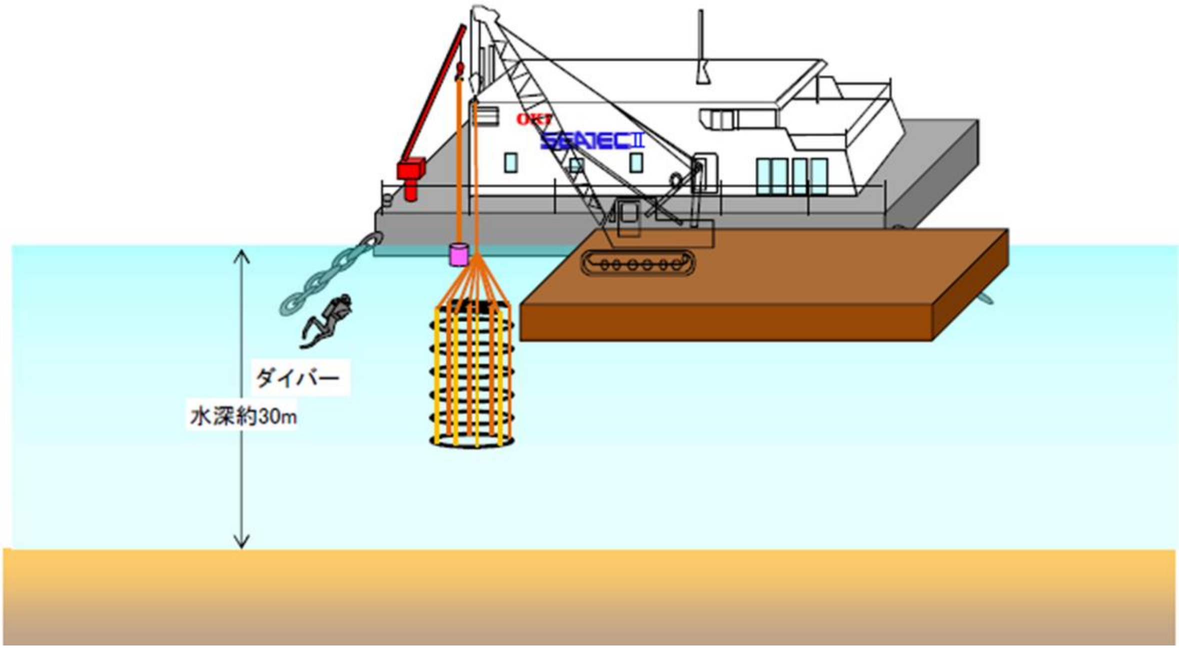


図 50　海中試験実施概念図(図 31 再掲)

② -2　コイルシステム

図 51 にコイルシステムを示す。コイルシステムは#1～#7 の 7 段のコイルで構成され、各コイルは直径 3.4mのポリエチレンパイプで、#1～#7 は外径 140mm、肉厚 13.4mm、一番上（海面側）になる#7 は吊下げ時等での強度確保のため外径 160mm、肉厚 15.4mm とした。これらのパイプにターン数 10 で可撓性架橋ポリエチレン絶縁電線（断面積 100mm²、導体外径 13.9mm、絶縁体厚み：2.0mm、仕上外径：18.0mm）を通してコイルとしている。コイル間距離は 1.7m で、7 段で全高 10.2m となる。

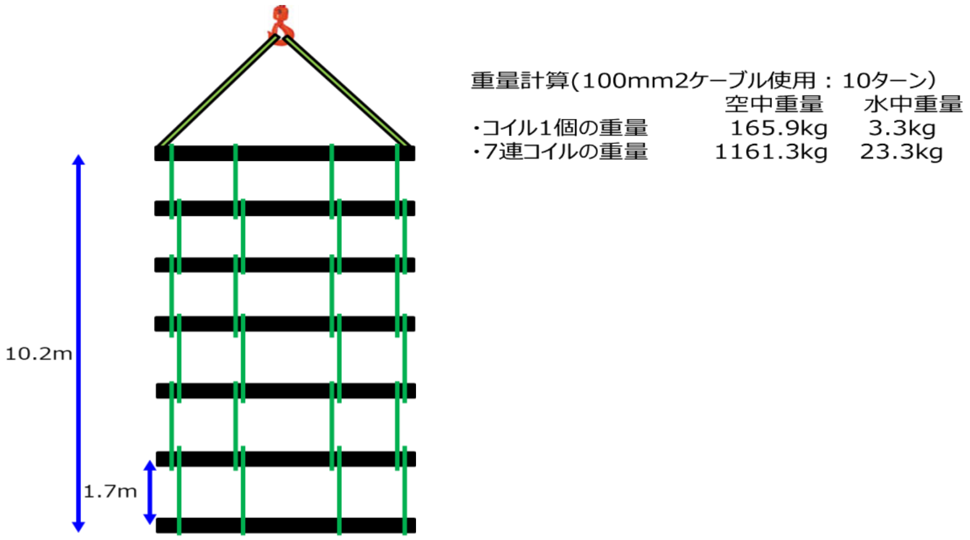


図 51　コイルシステム

② -3　電子機器の構成と計測システム

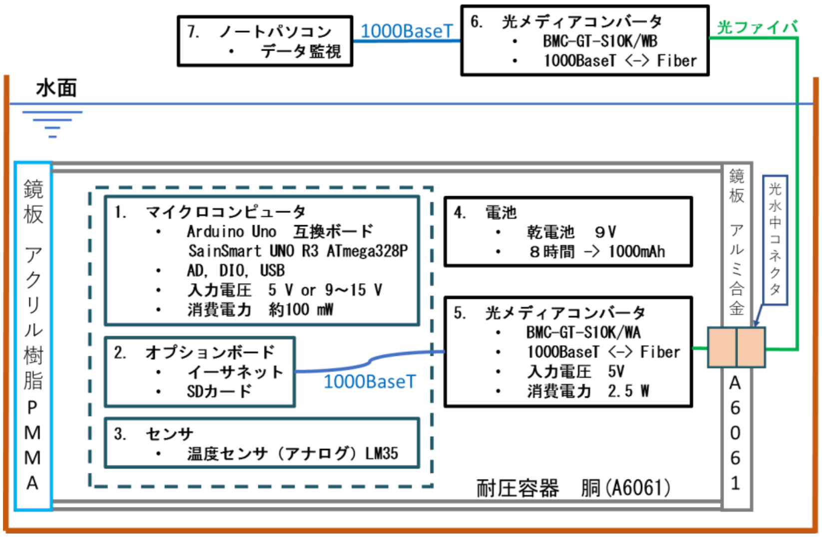


図 52　電子機器の構成と計測システムブロック図

電子機器の構成と計測システムは昨年度使用したもので、図 52 に耐圧容器内に収納した電子機器の構成と陸上側の計測システムのブロック図を示す。コンピュータの電力は、同じ耐圧容器内に収納した電池から給電する方式で、データは、光メディアコンバータを介して光ファイバケーブルで接続し、陸上ノートパソコンと通信する。容器内電池給電と光ファイバケーブル通信方式を採用し、耐圧容器内ボードコンピュータと陸上側の電気的接続が無いシステムとすることにより、接続ケーブルへの電磁気的影響は無くなり、耐圧容器内の電子機器のみへの電磁気影響として調査することが可能となる。

図 53 に電子機器を収納した耐圧容器と光ファイバケーブルを示す。

図 53　耐圧容器と光ファイバケーブル

②-4　温度センサ

昨年度と同じく、コンピュータ等のデジタル電子機器の他に、アナログ信号への影響を調査するため、耐圧容器内に温度センサを設置し、この温度センサの出力信号の状態をモニターするものとした。温度センサは、National Semiconductor 社の LM35 高精度・摂氏直読 IC 温度センサで、昨年度使用したものである。

②-5　耐圧容器

電子機器を収納した耐圧容器は昨年度使用したもので、図 54 に耐圧容器の形状・材質を示す様に、胴部とコネクタ接続用の鏡板は A6061 のアルミ合金であるが、もう片方の鏡板はアクリル樹脂を採用している。

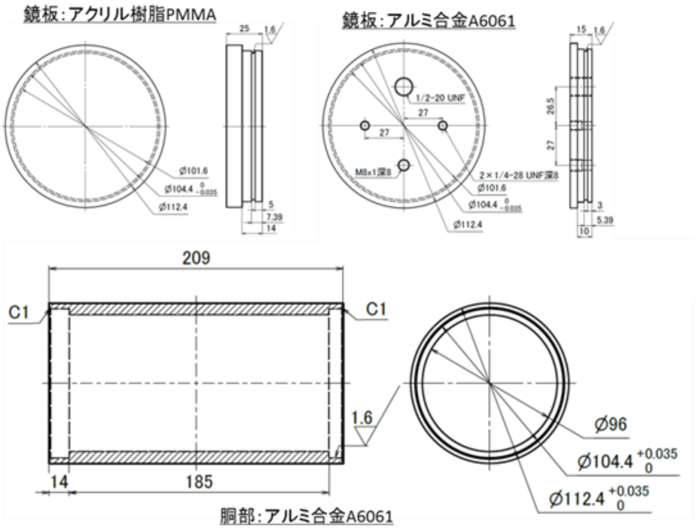


図 54　耐圧容器

③ノイズ影響調査試験要領

③-1　海中試験条件

試験のパラメータは伝送周波数、コイル出力電力、耐圧容器位置の３種類とする。

1）伝送周波数

昨年度までの解析結果や実験結果等を参考に、1kHz 以下の周波数での伝送が適していることを踏まえ、伝送周波数は 320Hz と 650Hz とした。

2）コイル出力電力

試験に用いる交流電源の容量を考慮し、出力電力は、OFF 状態から 20W、40W、60W、80W 、100W までの 5 段階とした。

3）耐圧容器（電子機器）位置

海中試験に先立ちパナソニックが実施した海中磁界強度分布のシミュレーションでは、後述の図 63 および図 64 の例に示す様にコイル近傍ほど磁界強度は強くなり、給電コイル近傍が一番強く、給電コイルから離れたコイルほど弱くなる事が確認されたので、耐圧容器は、図 55 に示す様に、水平方向は S：コイル内側近傍と C：コイル中心の２つの位置とし、垂直方向は各段コイル（#7：一番上(海面側)～#1：一番下（海底側））と同じ深さとなる 7 つの位置とした。

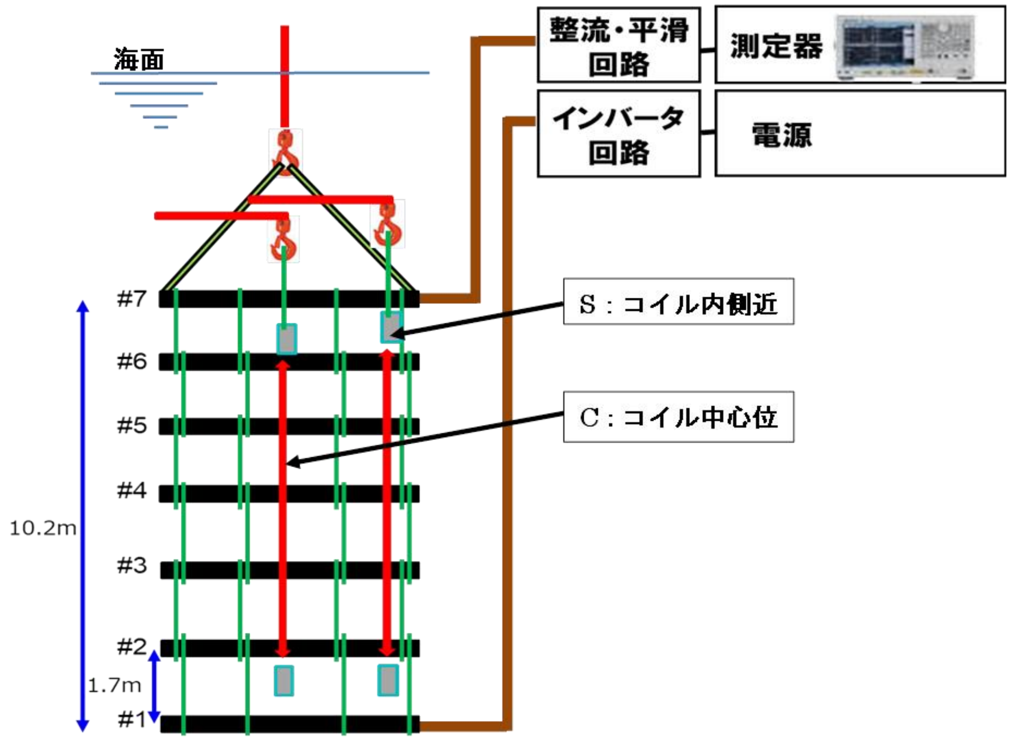


図 55　計測システムと耐圧容器位置

図 56 に台船上で吊り上げた状態のコイルシステム全景を示す。耐圧容器は、図 57 に示す様に、#7 コイルに渡したロープに取り付けられた滑車を通る吊下げロープによって吊下げられており、この吊下げロープの出し入れにより耐圧容器を任意の位置に上下させることが出来る。耐圧容器上下位置の確認は、吊下げロープに予め付けられた各コイル位置に対応する印により行い、更に必要に応じてダイバーにより計測・確認した。コイルに対する耐圧容器の水平位置の変更は、コイルに渡したロープへの滑車の取付け位置を変えることにより行う。図 58 に耐圧容器位置が S：コイル内側近傍の場合、図 59 に耐圧容器位置が C：コイル中心の場合の写真を示す。

図 56　耐圧容器の吊り下げ方法

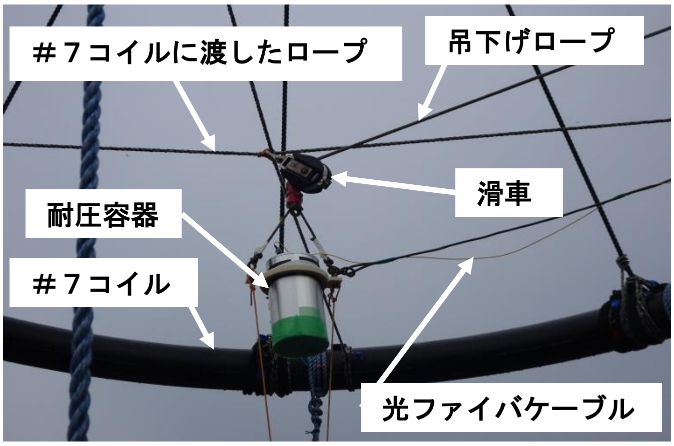


図 57　耐圧容器の吊り下げ方法

図 58　耐圧容器位置 S：コイル内側近傍

図 59　　耐圧容器位置 C：コイル中心

③-2 データの計測方法

データは、昨年度と同じく、温度センサからのアナログ信号を 1,000Hz で A/D 変換してサンプリングし、図 60 に示すタイムチャートで計測・保存する。データの温度換算は行わずに、A/D 変換値をそのまま陸上 PC へ転送すると共に、5 秒毎に 5 秒間のデータを SD カードに保存する。

サンプリングレート	: 1,000Hz
データフォーマット	: タイムスタンプ、温度データ（A/D カウント数）
データ保存	: 5 秒毎に SD カードに保存
陸上 PC へのデータ伝送	: サンプリングレートで伝送し、モニター画面に表示

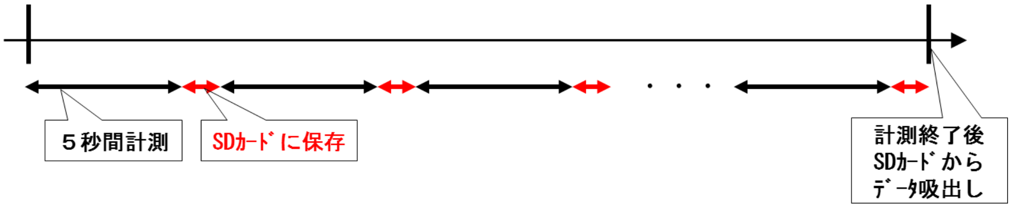


図 60　データ計測・保存タイムチャート

③-3 ノイズ影響有無の判定方法

ノイズ影響有無の判定方法は、昨年度と同じ以下の方法とした。

1)　作動不良

試験中、耐圧容器内のボードコンピュータと陸上ノートパソコンの通信状況を通じて、収納されている電子機器の稼働状況をチェックし、異常の有無を確認する。

2)　データの異常

モニター画面に約 1,000Hz で順次表示される温度センサからのデータを、目視でチェックすると共に、試験終了後 SD に保存されているデータをチェックして変動幅や異常値の有無を確認する。

③ 海中試験結果

図 61 に、試験中の#7 コイルに対する耐圧容器位置が S：コイル内側近傍の例を示す。

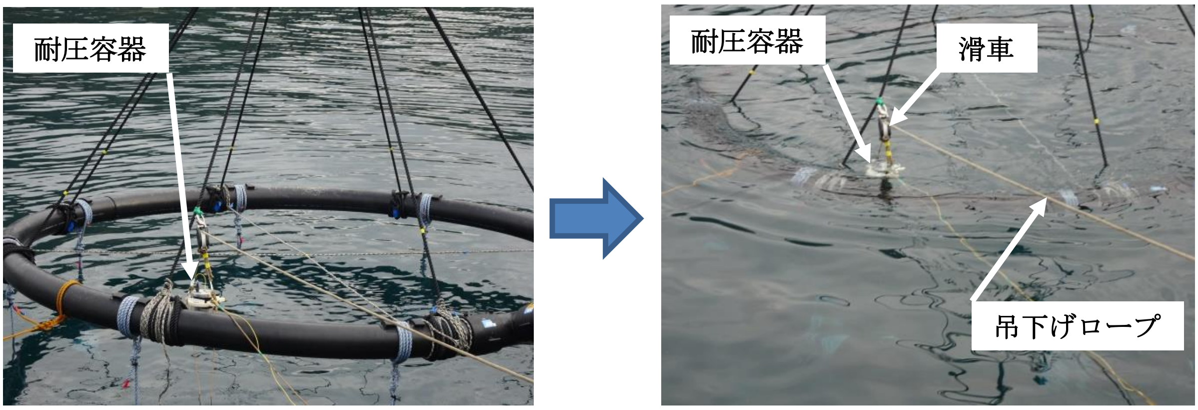


図 61　海中試験中の耐圧容器 S：コイル内側近傍の例

表 28 と表 29 にそれぞれ伝送周波数 320Hz におけるコイル各段（#7~#1）に対する耐圧容器位置 S : コイル内側近傍での試験結果を示す。表 30 は伝送周波数 320Hz でコイル各段（#7、#4、#1）に対する耐圧容器位置 C ; コイル中心での試験結果である。表 31 と表 32 にそれぞれ伝送周波数 650Hz におけるコイル各段（#7~#1）に対する耐圧容器位置 S : コイル内側近傍でのノイズ影響調査試験の結果を示す。

各表から分かるように、いずれの伝送周波数とも、耐圧容器がコイルに対してどの位置にあっても、出力電力 20W~100W の範囲でコンピュータが読み取ったデータ値はばらつくことは無く安定しており、電子機器の異常やアナログ信号の異常は認められなかった。

なお、コンピュータ電源用の電池を交換して行った伝送周波数 650kHz の試験では、表 31 示す様に、容器着水後の計測開始直後（PC 時刻 8:55:16）で、データのばらつきが大きい（データ値で 6~8、フルスケール分解能に対し 0.6%～0.8%）事が認められた。コイルへの給電を停止してもばらつきは大きいままのため、このばらつきはワイヤレス給電によるものでは無いと判断して、一旦試験を中断し耐圧容器を回収・開放して内機（電子機器）を取り出して調査したところ、内機単体ではデータのバラつきは発生しないことが確認された。今までの経験から、この様な不具合は、多くの場合、内機の耐圧容器への組み込みの際に電線の接続不良や回路の一部が耐圧容器と接触するなどによりアース系の絶縁抵抗が変化してグランドループが構成され、ある種のノイズを発生させていることが多い。このため、各部の電線接続や耐圧容器との接触に注意して内機を組み込みなおしたところ、ノイズのバラつきが少なくなった（フルスケール分解能に対し 0.1%以下）ので、計測を再開した。

以上より、今回の海中試験条件の範囲では、ワイヤレス給電による電子機器やアナログ信号への影響は無いと結論される。

表 28　ノイズ影響調査試験（伝送周波数：320Hz、容器位置：コイル内側近傍）

ノイズ影響調査試験　CASE-1S　耐圧容器位置:コイル内側近傍

実施日:　2017年11月14日
実施場所:　株式会社オキシーテック(沼津)のSEATECⅡに接舷した台船
天候:　小雨
CPU電源ON時刻:　13:00:50　CPU時刻は実時刻より1分20秒進んでいる。
耐圧容器:　胴部:アルミ合金、鏡板:アルミ合金、アクリル板
水／陸通信線:　光ファイバーケーブル
コイルシステム:　φ 3.4m ×7段　ｺｲﾙ番号は、下端がNo.1で、最上段がNo.7
伝送周波数:　320 Hz　耐圧容器吊り点とｺｲﾙ素線中心の距離=320㎜
塩分濃度:　3.33 %　海水物性測定時刻＝１３：３５
海水温度:　21.5 ℃
導電率:　5.10 S/m
データ値は、AD変換値　分解能１０２４　データ値の１／２がほぼ温度と同じになる。

TEST No	PC時刻	データ値	出力電力	入力電力	効率	CPU Time	メモ
Frq.-ｺｲﾙNo	時:分:秒		W	W	%	0.1Sec	
記録開始	13:11:14	43～44	OFF				
	13:15:00						ｺｲﾙ吊り上げ中
	13:17:10						ｺｲﾙ空中CAL
320-7S	13:21:14	45	OFF			6400	
	13:37:20	49	OFF			15930	
	13:38:40	49	21.6	88.6	24.18	16790	
	13:39:45	49	40.4	167.1	24.20	17510	値は安定している
	13:41:40	49	60.6	250.7	24.20	18110	
	13:42:35	49	80.3	331.7	24.20	19045	
	13:42:30	49	101.1	417.6	24.20	19620	値は安定している
320-6S	13:47:15	49	OFF			21840	
	13:48:50	49	20.5	84.9	24.15	22780	
	13:49:59	49	40.8	168.9	24.16	23550	
	13:50:59	49	61.0	252.5	24.17	24140	
	13:51:56	50	80.5	333	24.17	24680	
	13:52:42	50	102.2	423.2	24.15	25110	値は安定している
320-5S	13:56:01	50	OFF			27160	
	13:56:50	50	20.5	84.9	24.12	27590	
	13:57:50	50	40.6	168.1	24.15	28180	
	13:58:50	50	60.8	251.6	24.16	28780	
	14:00:05	50	80.5	333.2	24.15	29550	
	14:00:50	50	101.6	420.7	24.14	30070	値は安定している
320-4S	14:03:05	50	OFF			31340	
	14:03:50	50	20.5	85.1	24.10	31820	
	14:04:45	50	40.6	168.4	24.13	32330	
	14:05:30	50	61.1	252.9	24.14	32830	
	14:06:45	50	80.5	333.5	24.14	33630	
	14:07:45	50	102.2	423.8	24.1	34000	値は安定している

TEST　No.＝周波数ーコイル位置(段)　S:コイル内側近傍、C:コイル中心

結論:通電によるデータの変化はなし。

表 29 ノイズ影響調査試験（伝送周波数：320Hz、容器位置：コイル内側近傍）

ノイズ影響調査試験　CASE-1S　耐圧容器位置：コイル内側近傍

実施日：　2017年11月14日
実施場所：　株式会社オキシーテック（沼津）のSEATECⅡに接舷した台船
天候：　小雨
CPU電源ON時刻：　13:00:50　CPU時刻は実時刻より1分20秒進んでいる。
耐圧容器：　胴部：アルミ合金、鏡板：アルミ合金、アクリル板
水／陸通信線：　光ファイバーケーブル
コイルシステム：　φ3.4m ×7段　コイル番号は、下端がNo.1で、最上段がNo.7
伝送周波数：　320 Hz　耐圧容器吊り点とコイル素線中心の距離=320mm
塩分濃度：　3.33 %　海水物性測定時刻＝13：35
海水温度：　21.5 ℃
導電率：　5.10 S/m
データ値は、AD変換値　分解能1024　データ値の1／2がほぼ温度と同じになる。

TEST No.	PC時刻	データ値	出力電力	入力電力	効率	CPU Time	メモ
Frq.-コイルNo.	時：分：秒		W	W	%	0.1Sec	
320-3S	14:09:30	50	OFF			35170	
	14:10:10	50	20.5	85.1	24.08	35570	
	14:11:05	50	40.8	169.2	24.11	36150	
	14:11:59	50	61.0	252.8	24.13	36720	
	14:12:55	50	80.4	333.4	24.12	37220	
	14:13:35	50	102.1	423.6	24.11	37620	値は安定している
320-2S	14:14:45	50	OFF			38320	
	14:16:15	50	20.5	85.1	24.07	39210	
	14:17:10	50	40.8	169.2	24.10	39790	
	14:17:59	50	61.0	252.9	24.11	40310	
	14:18:45	50	80.3	333.3	24.11	40740	
	14:19:35	50	102.0	423.5	24.09	41250	値は安定している
320-1S	14:29:30	50	OFF			47170	
	14:31:15	50	20.5	85.2	24.08	48250	51が時々でる。
	14:32:50	50	40.9	169.5	24.12	49160	
	14:33:40	50	60.6	251.2	24.13	49690	
	14:34:40	50	80.2	332.7	24.12	50300	
	14:35:30	50	102.2	424.2	24.11	50700	値は安定している
			OFF				
	14:35:00	水切り：耐圧容器位置をコイルセンターに移動。					
	14:40:00	49	で安定している。				

TEST No.＝周波数ーコイル位置（段）　S：コイル内側近傍、C：コイル中心

結論：通電によるデータの変化はなし。

表 30　ノイズ影響調査試験（伝送周波数：320Hz、容器位置：コイル中心）

ノイズ影響調査試験　　CASE-1S　　耐圧容器位置：コイル中心

実施日：　2017年11月14日
実施場所：　株式会社オキシーテック（沼津）のSEATECⅡに接舷した台船
天候：　小雨
CPU電源ON時刻：　13:00:50　　CPU時刻は実時刻より1分20秒進んでいる。
耐圧容器：　胴部：アルミ合金、鏡板：アルミ合金、アクリル板
水／陸通信線：　光ファイバーケーブル
コイルシステム：　φ3.4m ×7段　　ｺｲﾙ番号は、下端がNo.1で、最上段がNo.7
伝送周波数：　320 Hz　　耐圧容器吊り点はコイル直径３．４mの中心位置
塩分濃度：　3.33 %　　海水物性測定時刻＝１３：３５
海水温度：　21.5 ℃
導電率：　5.10 S/m
データ値は、AD変換値　分解能１０２４　データ値の１／２がほぼ温度と同じになる。

TEST No.	PC時刻	データ値	出力電力	入力電力	効率	CPU Time	メモ
Frq.-ｺｲﾙNo.	時：分：秒		W	W	%	0.1Sec	
320-7C	14:55:10	48～49	OFF			62710	耐圧容器はNo.7ｺｲﾙより
	14:56:30	49	20.6	84.9	24.20	63450	300㎜下方となった。
	14:57:25	49	40.6	168	24.22	64000	
	14:58:25	49	60.9	251.5	24.22	64570	
	14:59:30	50	80.6	333.1	24.23	65280	
	15:00:25	49～50	102.5	423.2	24.21	65900	値は安定している
320-4C	15:01:55	50	OFF			66670	
	15:02:50	50	20.6	85.0	24.18	67200	
	15:03:40	50	40.5	167.2	24.20	67720	
	15:04:25	50	60.9	251.5	24.22	68170	
	15:05:10	50	80.6	333.0	24.22	68610	
	15:05:50	50	102.4	423.1	24.21	69040	値は安定している
320-1C	15:10:10	50	OFF			71640	耐圧容器を150㎜上げて、
	15:11:10	50	20.5	85.0	24.18	72200	No.1ｺｲﾙと同一平面に調整
	15:12:00	50	40.7	168.1	24.21	72710	
	15:12:45	50	61.2	252.5	24.22	73170	
	15:13:35	50	80.6	332.9	24.22	73680	
	15:14:15	50	102.4	423.0	24.20	74110	値は安定している
	15:15:05	50	OFF				
	15:16:45	50	102.3	422.9	24.20	76170	画面ｷｭﾌﾟﾁｬｰ用
	15:18:05	50	OFF			76490	
	15:21:10	CPU停止					
	試験開始前の電池電圧：９．６３V（新品の電池）						
	試験終了後の電池電圧：７．７１V						

TEST　No.＝周波数ーコイル位置（段）　S：コイル内側近傍、C：コイル中心

結論：通電によるデータの変化はなし。

表 31 ノイズ影響調査試験（伝送周波数：650Hz。容器位置：コイル内側近傍）

ノイズ影響調査試験　CASE-2S　耐圧容器位置：コイル内側近傍

実施日：	2017年11月15日	
実施場所：	株式会社オキシーテック（沼津）のSEATECⅡに接舷した台船	
天候：	晴	
CPU電源ON時刻：	08:25::00	CPU時刻＝実時刻
耐圧容器：	胴部：アルミ合金、鏡板：アルミ合金、アクリル板	
水／陸通信線：	光ファイバーケーブル	
コイルシステム：	φ 3.4m ×7段	ｺｲﾙ番号は、最下端がNo.1で、最上段がNo.7
伝送周波数：	650 Hz	耐圧容器吊り点とｺｲﾙ素線中心の距離=320㎜
塩分濃度：	5.17 %	海水物性測定時刻＝8：53
海水温度：	21.0 ℃	
導電率：	3.35 S/m	

データ値は、AD変換値　分解能1024　データ値の1／2がほぼ温度と同じになる。

TEST No.	PC時刻	データ値	出力電力	入力電力	効率	CPU Time	メモ
Frq.-ｺｲﾙNo.	時：分：秒		W	W	%	0.1Sec	
	8:35:00	容器取付					
	8:40:00	空中磁界測定					
		容器着水					
	8:55:16	**計測開始**					
650-7S	8:55:59	36～42	OFF			13480	
	8:58:25	38～45	20.6	79.8	25.87	15090	
	8:59:55	40～45	OFF				
	9:17:05		CPU電源OFF				ﾃﾞｰﾀのﾊﾞﾗﾂｷが大きいため
							容器を開けて調べる。
	内機を取り出して単体でﾁｪｯｸ。			⇒データのﾊﾞﾗﾂｷは無い。			
	内機を容器に組み込み、蓋を開けた状態でﾁｪｯｸ。					⇒ﾊﾞﾗﾂｷが少し出る。40～42位	
	蓋を閉めてﾁｪｯｸ。		⇒40～42の値。				
	再度計測することとした。						
	9:19:30	**記録開始**					
	9:20:00	容器着水					
650-7S	9:20:30	41～42	OFF			890	
	9:21:20	42～43	20,6	79.8	25.85	1410	
	9:22:20	43～44	40.4	156.1	25.88	2010	
	9:23:15	43～44	60.9	235.6	25.90	2550	
	9:24:30	44～45	80.2	309.6	25.91	3300	
	9:25:20	44～45	102.0	393.8	25.90	3810	値はほぼ安定している。
650-6S	9:27:10	45	OFF			4910	
	9:27:50	45	20.9	81.2	25.81	5270	
	9:28:30	45	40.1	154.8	25.83	5630	
	9:29:05	45	60.2	232.9	25.86	6040	
	9:29:50	45～46	80.5	311.3	25.87	6510	
	9:30:35	45～46	101.3	392.1	25.88	6950	値はほぼ安定している。
650-5S	9:31:15	45～46	OFF			7390	
	9:32:05	45～46	20.2	78.4	25.8	7850	
	9:32:55	46～47	40.2	156.2	25.8	8330	
	9:33:35	46～47	60.3	233.6	25.82	8750	
	9:34:20	46～47	80.8	314.2	25.83	9180	
	9:34:55	46～47	100.8	390.3	25.84	9550	値はほぼ安定している。

TEST No.＝周波数ーコイル位置（段）　S：コイル内側近傍、C：コイル中心

結論：通電によるデータの変化はなし。

表 32　ノイズ影響調査試験（伝送周波数：650Hz、容器位置：コイル内側近傍）

ノイズ影響調査試験　CASE-2S　耐圧容器位置：コイル内側近傍

実施日:	2017年11月15日		
実施場所:	株式会社オキシーテック（沼津）のSEATECⅡに接舷した台船		
天候:	晴		
CPU電源ON時刻:	08:25::00	CPU時刻=CPU時刻＝実時刻	
耐圧容器:	胴部:アルミ合金、鏡板:アルミ合金、アクリル板		
水／陸通信線:	光ファイバーケーブル		
コイルシステム:	φ 3.4m ×7段	ｺｲﾙ番号は	ｺｲﾙ番号は、最下端がNo.1で、最上段がNo.7
伝送周波数:	650 Hz	耐圧容器吊	耐圧容器吊り点とｺｲﾙ素線中心の距離=320㎜
塩分濃度:	5.17 %	海水物性Ⅱ	海水物性測定時刻＝8:53
海水温度:	21.0 ℃		
導電率:	3.35 S/m		

データ値は、AD変換値　分解能1024　データ値の1／2がほぼ温度と同じになる。

TEST No.	PC時刻	データ値	出力電力	入力電力	効率	CPU Time	メモ
Frq.-ｺｲﾙNo.	時:分:秒		W	W	%	0.1Sec	
650-4S	9:35:40	46～47	OFF			10000	
	9:36:20	46～47	20.1	78.1	25.75	10380	
	9:37:05	46～47	40.4	157.1	25.77	10850	
	9:37:50	46～47	60.3	233.8	25.80	11280	
	9:38:30	46～47	80.7	313.3	25.81	11720	
	9:39:10	46～47	100.3	389.1	25.82	12000	値はほぼ安定している。
650-3S	9:39:50	46～47	OFF			12490	
	9:40:25	46～47	20.6	80.1	25.73	12840	
	9:41:10	46～47	40.2	155.2	25.75	13280	
	9:41:50	46～47	60.6	235.1	25.78	13780	
	9:42:45	46～47	80.2	311.2	25.8	14330	
	9:43:35	46～47	100.1	388.1	25.80	14750	値はほぼ安定している。
650-2S	9:44:50	47～48	OFF			15510	
	9:45:30	47～48	20.0	78.2	25.70	15900	
	9:46:15	47～48	40.2	156.4	25.73	16350	
	9:47:05	47～48	60.6	235.6	25.76	16890	
	9:47:50	47～48	80.3	311.0	25.77	17330	
	9:48:40	47～48	100.0	387.4	25.79	17880	値はほぼ安定している。
650-1S1	9:49:40	47～48	OFF			18380	位置:No.1ｺｲﾙより50cm上
	9:50:50	47～48	20.1	78.5	25.69	18890	(ﾀﾞｲﾊﾞｰにより確認)
	9:51:30	47～48	40.0	156.0	25.72	19490	
	9:52:15	47～48	60.5	235	25.75	19900	
	9:52:55	47～48	80.2	310.2	25.76	20330	
	9:53:50	47～48	100.5	390.5	25.77	20850	値はほぼ安定している。
650-1S2	10:00:15	47～48	OFF			24780	No.1コイルに位置合わせ
	10:01:40	47～48	20.4	79.7	25.58	25650	(ﾀﾞｲﾊﾞｰ指示で調整)
	10:02:30	47～48	40.5	157.2	25.60	26100	
	10:03:20	47～48	60.9	237	25.7	26620	
	10:04:00	47～48	80.6	312.7	25.7	27030	
	10:04:50	47～48	101.9	395.8	25.73	27530	値はほぼ安定している。

TEST No.＝周波数ーコイル位置（段）　S:コイル内側近傍、C:コイル中心

結論：通電によるデータの変化はなし。

３）ノイズ影響調査考察

①海中試験時の磁界強度の検討

パナソニックが実施した海中での磁界強度シミュレーション結果を基に、海中試験時の磁界強度を検討した。図 62　シミュレーションの座標系と磁界影響調査位置は、シミュレーションの座標系と海中試験での磁界影響調査位置（耐圧容器位置）で、矢印の線①コイル内側近傍および②コイル中心軸上に沿って各段コイルで調査を行っている。

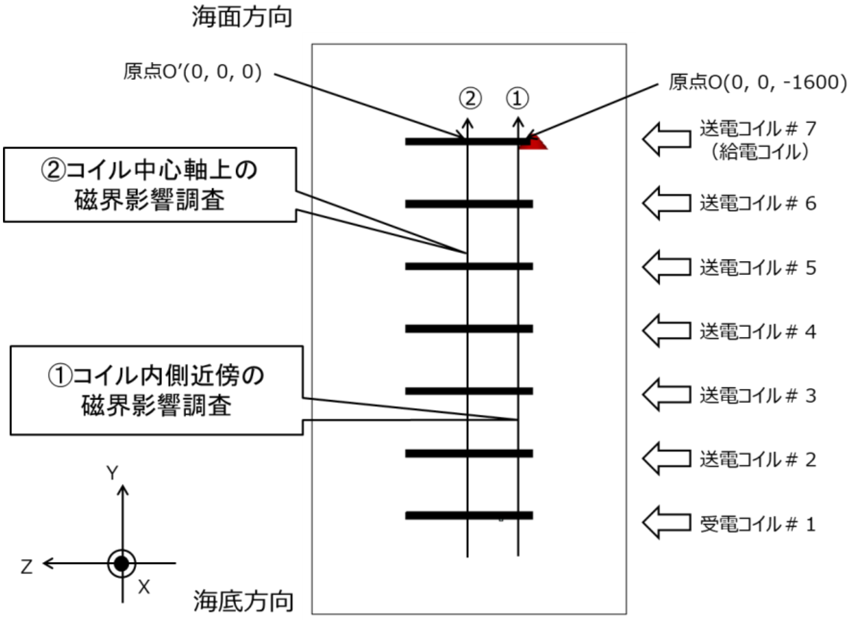


図 62　シミュレーションの座標系と磁界影響調査位置

図 63 は伝送周波数 330Hz でのシミュレーション結果で、海水コラム（6.8m×6.38m×13.6m の直方体）に海中試験と同じコイルシステム条件を設定し、海面方向一番上の#7 コイルを入力電流 1A、電圧 8.78V、電力 8.78W、入力インピーダンス 8.78Ω で励振（給電）した時の X＝0 断面での磁界強度のコンター図である。各段コイルともコイル近傍ほど磁界強度は強く、また励振した#7 のコイルが一番強い磁界強度となっている。

図 64 は、この時の Y 軸方向の①コイル近傍と②コイル中心での磁界強度の最大値と平均値のシミュレーション結果を示したもので、#7 コイルのコイル近傍での最大値は 107A/m、平均値は 68A/m で、コイル中心での最大値は 20A/m、平均値は 13A/m となっている。

図 65 は、海中試験で実施したのと同じ、受電コイルでの出力電力を 100W とした場合の Y 軸方向の①コイル近傍と②コイル中心での磁界強度の最大値と平均値のシミュレーション結果を示したもので、受電効率を 32%と想定すると#1 受電コイルの出力電力が 100W での#7 給電コイルの電力は 312.5W（＝100W/0.32）となり、入力電流は I＝5.96A（＝√（312.5W）/8.78Ω））として算出したものである。

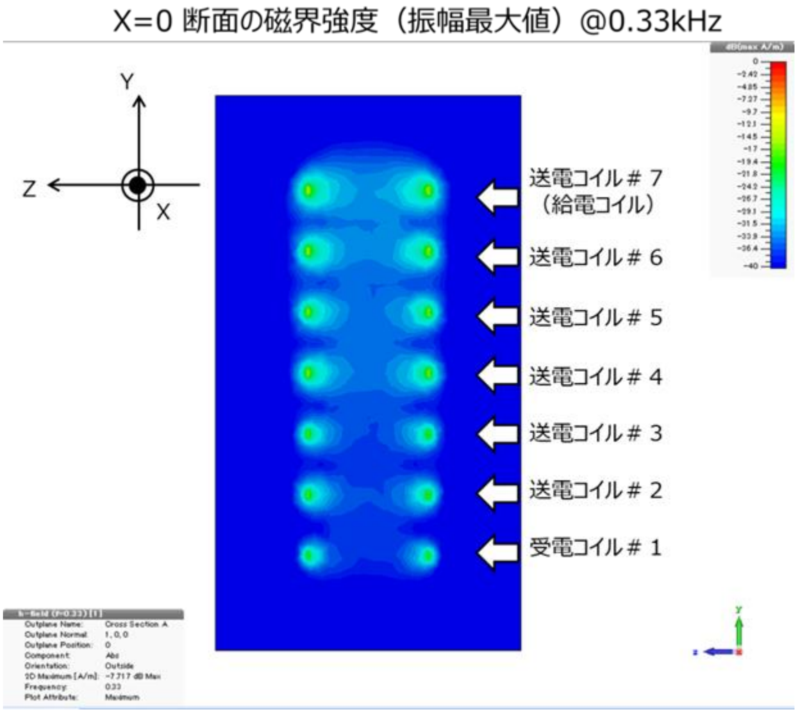


図 63　 X=0 断面の磁界強度コンター図 （周波数：330Hz 、入力電流： 1 A）

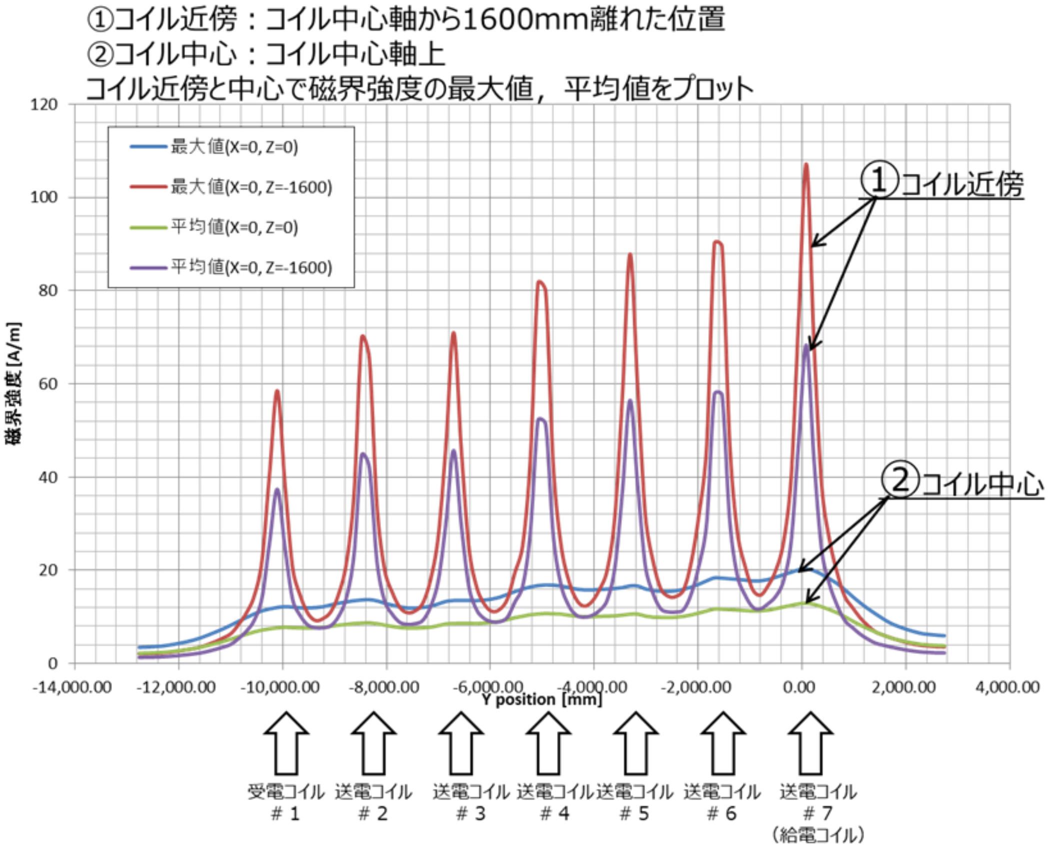


図 64　磁界強度シミュレーション（周波数：330Hz、入力電流：1A）

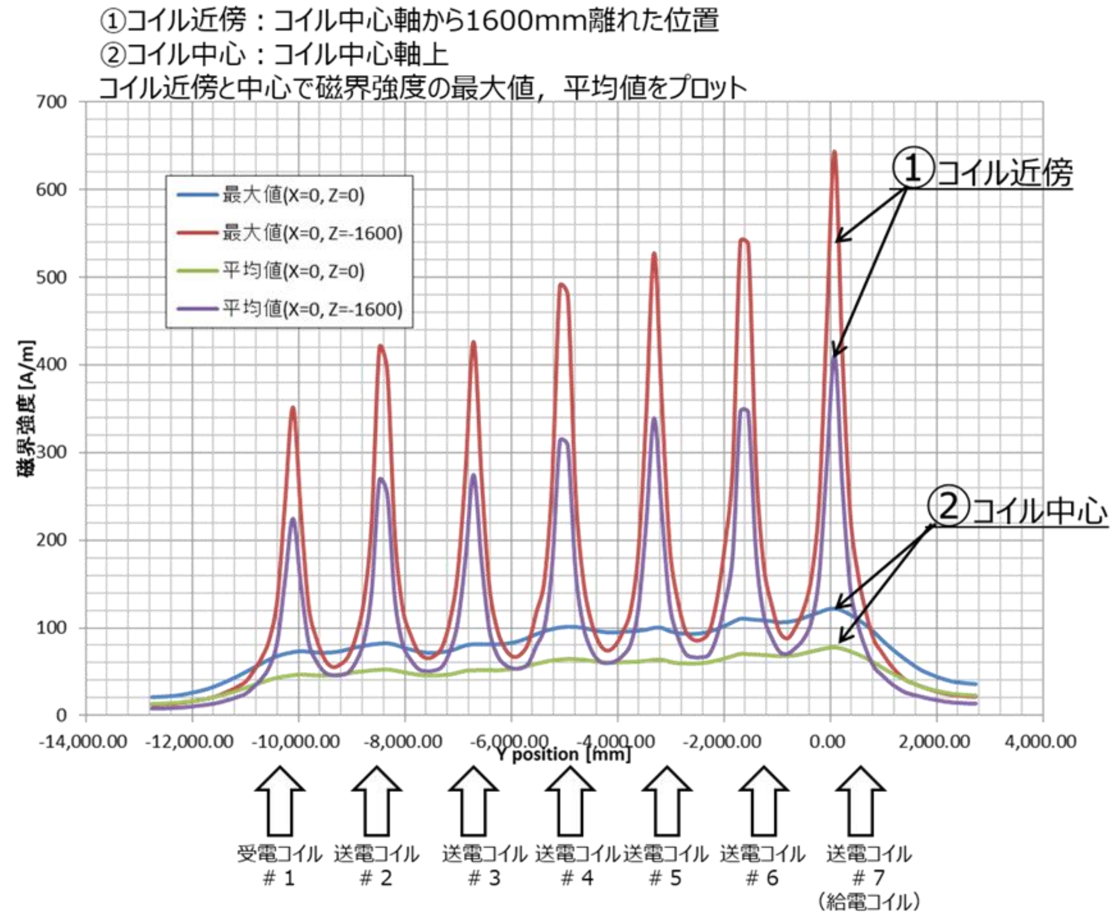


図 65　出力電力 100W での磁界強度シミュレーション(周波数：330Hz、入力電流：5.96A)

この結果、#7 コイルのコイル近傍での最大値は 643A/m、平均値は 410A/m で、コイル中心での最大値は 122A/m、平均値は 78A/m となっている。

これらより、海中試験では、図 65 のシミュレーションで示した最大 643A/m と推定される磁界強度下でのノイズ影響調査が実施出来たものと考えられる。

②深深度海中設置方法の一考察

今回の海中試験は深度 10m 程度のごく浅い海中で実施され、コイルシステムのハード面での問題は特には発生しなかったが、今後本方式のワイヤレス給電システムをより深い深度で使用して行く場合に考慮すべきコイルシステムの構造について考察する。

現在コイルシステム形成に採用しているポリエチレンパイプに陸用のケーブルを何ターンか挿入する方式では、ポリエチレンパイプとケーブルの間に空気層が出来ていることになる。このため、使用深度が数十m、更には数百 m と言った深深度となった場合、数気圧から数十気圧の外圧により

ポリエチレンパイプが変形してしまい、最悪破壊してしまう事が考えられる。
この対策としては、概略、以下の２案が考えられる。

１）パイプ肉厚を増やす

ポリエチレンパイプの肉厚を、外圧に耐えるまで厚いものにする。但し、そのようなパイプを入手することは容易ではなく、場合によってはコイルシステム専用にパイプを製作する必要があり、非常に高価なものとなる可能性がある。また、肉厚増により重量が重くなり、それに伴う設置方法等などの種々の問題が発生する可能性もある。

２）均圧方式

ポリエチレンパイプとケーブルの空隙にシリコンオイル等の絶縁油を注入した均圧構造にする。この場合、外圧や温度変化による油の膨張や収縮を吸収するための均圧装置を装着する必要があり、更に圧力や温度による均圧油の収縮量を確実に把握して、必要量の油を注入する必要があるが、均圧方式は ROV で一般に採用されている耐圧方法であり、ROV での技術・ノウハウを適用することにより、問題無く対応できるものである。

一方、ケーブルに関しても素線とシースの間に空気層があることになるが、ケーブルの場合は、この空気層は極薄く空気量は微量であるため、シースの変形等による問題は無く、深度１万 m 用などの特殊なものを除いて、通常の ROV で使用しているテザーケーブルでは均圧油等は入れられておらず、コイルのケーブルも均圧油を入れる必要は無いと考えられる。

なお、コイルシステムの重量・浮量との関係から、海中設置に浮力材が必要になる場合が考えられるが、深度数百 m 対応の浮力材が市販されており、使用深度に対応した浮力材を用いることで問題は無い。

4) ノイズ影響調査まとめ

AUV に搭載された電子機器へのワイヤレス給電による影響の継続調査として、ボードコンピュータを収納したアルミニウム合金製小型耐圧容器を、台船からクレーンで海中に吊るされた伝送コイルシステム（直径 3.4m のコイル 7 個で構成）に対して、コンピュータを稼働させた状態で吊下げ、ワイヤレス給電による電磁波ノイズの影響調査を実施した。

試験は、伝送周波数 320Hz では出力電力 100W まで、耐圧容器（ボードコンピュータ）を水平方向はコイル近傍内側で、垂直方向は一番上の＃１送電コイルから一番下の#7 受電コイルまで、各段コイルと同じ 7 つの位置で行った。水平方向がコイル中心の場合は、垂直方向は、#7、#4、#1 の 3 つのコイル位置で調査した。伝送周波数 650Hz では出力電力 100W まで、耐圧容器を水平方向はコイル近傍内側で、垂直方向は一番上の#1 送電コイルから一番下の#7 受電コイルまで、各段コイルと同じ 7 つの位置で行った。

その結果、出力電力 100W でのシミュレーションで得られた磁界強度推定値で 643A/m の磁界強度までの試験を行ったが、今回の海中試験の範囲では、ボードコンピュータや付属の電子機器の作動異常や、温度センサからのアナログ信号の異常は認められなかった。

2.3.5　プロジェクトの総合的推進

① 定期的な進捗会議の実施

研究分担者の九州工業大学と定期的に進捗会議を実施し、情報共有・技術的課題の検討を実施。

No.	日時	場所
第 1 回	4 月 17 日　14:10-16:00	九州工業大学若松キャンパス
第 2 回	6 月 30 日　14:10-16:00	九州工業大学若松キャンパス
第 3 回	9 月　4 日　14:10-16:00	九州工業大学若松キャンパス
第 4 回	10 月 18 日　15:00-17:00	山口県下関市
第 5 回	1 月 12 日　14:10-16:00	九州工業大学若松キャンパス
第 6 回	3 月 14 日　15:00-17:30	パナソニック　福岡事業所

② 学会発表

3.の「成果の外部への発表及び活動」にある通り、2018 年 3 月の情報通信学会総合大会で 3 件発表。今回の研究に関する有識者の意見を収集し、検討につなげた。

③ 有識者ワークショップの開催

ワイヤレス給電、海洋関連の有識者を招いてワークショップを開催。今回の研究を詳細に説明し、有用な意見をいただいて、海上試験に向けた検討につなげた。

日時：2018 年 9 月 7 日（木）13：30-15：30

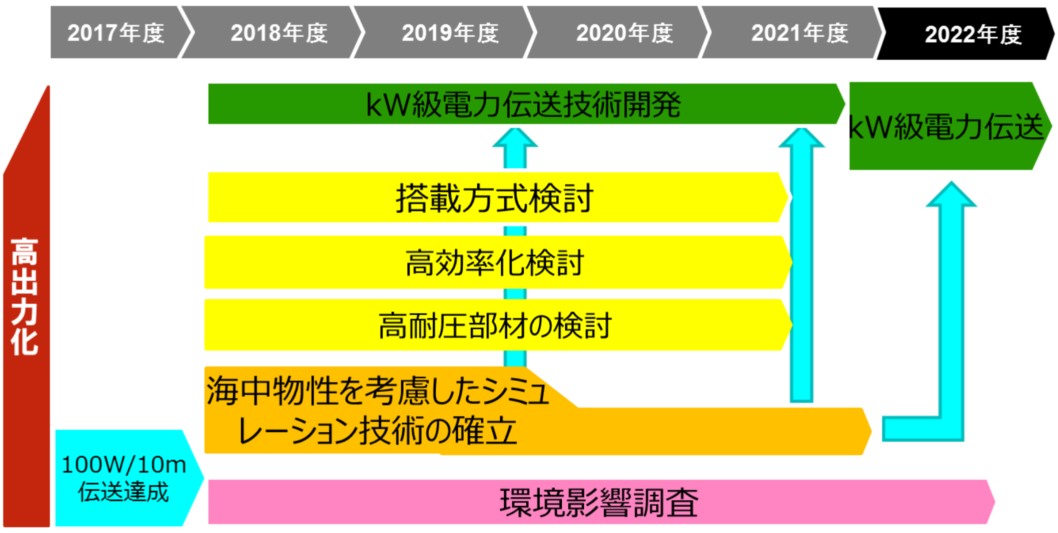
場所：パナソニック横浜事業所内

参加者：レビュアー3 名、防衛装備庁 2 名、九州工業大学 2 名、パナソニック 7 名

④ 実用化に向けたロードマップの作成

今回の研究で得られた成果・課題を考慮して、本技術の実用化までのロードマップを作成した。但し、検討課題の中には海洋物性等の基礎研究要素があり、検証を進めながら見直す必要がある。

海中給電技術の実用化技術ロードマップ



2.3.6　平成２９年度のまとめ

①　海中ワイヤレス電力伝送設計手法の開発

平成２７年度、２８年度の検討の電磁界シミュレーションより大きな領域を計算する必要があったため、コイル形状や電線断面積を多角形にすることで解析時間の短縮を行った。この設計手法を用いて 10m の電力伝送に必要なコイル直径の検討を行った。その結果、送電効率、重量、電線コスト、組立性、輸送性、実験時のハンドリングなどの制約条件を考慮し直径を 3.4m に設定した。3.4m コイルを 7 段接続し電磁界シミュレーションを行った。RX 1.7m コイルの場合 27.8%、RX 1m の場合は 22.5%となった。

②　100W／10m の海中ワイヤレス電力伝送実証実験

3.4m、1.7m、1m のコイルを製作し 3.4m コイル 7 段の伝送システムを構築した。陸上でインダクタンス、Q、伝送効率を測定した後、台船上からクレーンでコイルを海中に沈め伝送効率を測定した。その結果 650Hz の周波数の伝送実験で、#1⇒1.7m コイルの VNA での測定で 25.9%、PA で 100W 伝送した場合の測定で 20.7%の効率で伝送できることを確認した。

③水中ワイヤレス給電の構造体の設計

3.4m コイル製作にあたり、浮沈式生簀で実用化されているポリエチレンパイプ中に電線を入れる方式を採用した。また、T 型パイプを使って防水型のコンデンサボックスを接続しコイルにコンデンサを直結することができた。さらに 3.4m コイル間は実験での磁界への影響をなくすため非金属のロープで接続した。組立てたコイルは若干の余剰浮力があったが、海中での安定作業のため下部に重りを接続した。実験場は、高知県宿毛市新港岸壁と静岡県沼津市内浦港（オキシーテック）の 2 カ所を候補として検討した。初めての実験のため実験サポートが可能なオキシーテックを選定した。実験は陸上、内浦港内で台船上から海中にコイルを沈めて行った。結果は当初目標の 10m／100W の海中ワイヤレス電力伝送実験に成功した。

④海中移動体搭載の電子機器のノイズ影響調査

AUV に搭載された電子機器へのワイヤレス給電による影響の継続調査として、ボードコンピュータを収納したアルミニウム合金製小型耐圧容器を、台船からクレーンで海中に吊るされた伝送コイルシステム（直径 3.4m のコイル 7 個で構成）に対して、コンピュータを稼働させた状態で吊下げ、ワイヤレス給電による電磁波ノイズの影響調査を実施した。

試験は、伝送周波数 320Hz では出力電力 100W まで、耐圧容器（ボードコンピュータ）を水平方向はコイル近傍内側で、垂直方向は一番上の#1 送電コイルから一番下の#7 受電コイルまで、各段コイルと同じ 7 つの位置で行った。水平方向がコイル中心の場合は、垂直方向は、#7、#4、#1 の 3 つのコイル位置で調査した。伝送周波数 650Hz では出力電力 100W まで、耐圧容器を水平方向はコイル近傍内側で、垂直方向は一番上の#1 送電コイルから一番下の#7 受電コイルまで、各段コイルと同じ 7 つの位置で行った。

その結果、出力電力 100W でのシミュレーションで得られた磁界強度推定値で 643A/m の磁界強度までの試験を行ったが、今回の海中試験の範囲では、ボードコンピュータや付属の電子機器の作動異常や、温度センサからのアナログ信号の異常は認められなかった。

⑤プロジェクトの総合的推進。

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、分担研究機関平成２９年度は６回の進捗会議を行い課題の調整を実施。又、情報通信学会の総合大会で発表を行い、外部からの意見の吸収を行った。

又、有識者を招待したワークショップを開催し、研究に対する有意な意見をいただき、研究課題として今後共期待される分野で有る事が再認識できた。

3. 成果の外部への発表及び活動

１．学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者指名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
「海中ワイヤレス電力伝送の電磁界シミュレーション検討」，口頭発表	枷場 亮祐、岡本克也、出口 太志、江口 和弘、小柳芳雄	九州大学（電子情報通信学会　総合大会）	2016 年 3 月	国内
「複数コイルによる海中ワイヤレス給電の実験検討」，口頭発表	江口和弘、出口太志、川田壮一、岡本克也、枷場亮祐、小柳芳雄	北海道大学（電子情報通信学会　ソサイエティ大会）	2016 年 9 月	国内
「水中および塩水中における磁界強度の減衰量に関する実験的検討」，口頭発表	枷場 亮祐、岡本克也、出口 太志、江口 和弘、川田壮一、小柳 芳雄	北海道大学（電子情報通信学会　ソサイエティ大会）	2016 年 9 月	国内
「４ｍコイルを用いた水中ワイヤレス電力伝送の実験検討」，口頭発表	江口和弘、出口太志、川田壮一、岡本克也、枷場亮祐、小柳芳雄	名城大学（電子情報通信学会　総合大会）	2017 年 3 月	国内
「複数コイルを用いた１０ｍ海中ワイヤレス電力伝送実験」，口頭発表	江口和弘 、川田壮一、岡本克也、枷場亮祐、小柳芳雄	東京電機大学（電子情報通信学会　総合大会）	2018 年 3 月	国内
「海中ワイヤレス電力実験を考慮したコイル伝送系の検討」，口頭発表	枷場 亮祐、岡本克也、江口 和弘、川田壮一、小柳 芳雄	東京電機大学（電子情報通信学会　総合大会）	2018 年 3 月	国内
「海水中で１０ｍ超の無線電力伝送を実現するための海中給電技術」，口頭発表	小柳 芳雄、浦環	東京電機大学（電子情報通信学会　総合大会）	2018 年 3 月	国内
「給電可能エリアの広い海中移動体向け無線給電技術の開発」，口頭発表	小柳 芳雄、浦環	東京大学（第 61 回海中海底工学フォーラム）	2018 年 4 月	国内
Experimental Study on Over 10 Metric Magnetic Resonance Wireless Power	Ryosuke Hasaba, Katsuya Okamoto, Souichi Kawata, Kazuhiro Eguchi	Quebec, Canada（IEEE MTT-S Wireless Power	2018 年 6 月（予定）	海外

Transfer under Sea with Coils	and Yoshio Koyanagi	Transfer Conference 2018)		

２．学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者指名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
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	江口 和弘、川田 壮一、岡本 克也、栁場 亮祐、小柳 芳雄	電子情報通信学会 和文論文誌Ｂ	2018 年 11 月（採録）	国内

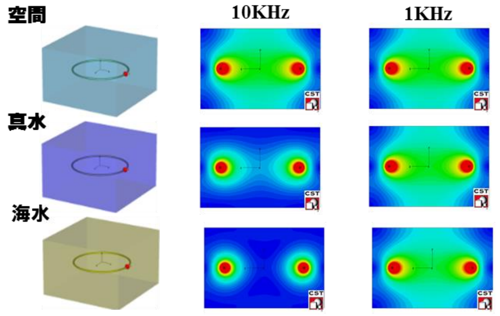
4. まとめ、今後の予定

4.1 まとめ

（平成２７年度のまとめ）[6]

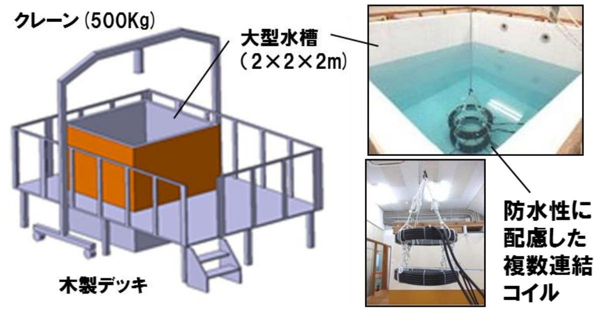
①設計手法の開発（シミュレーション系構築）

空間，真水，海水の磁界分布特性の計算を実施
海中での高効率伝送の条件（周波数等）を明確化



③水中ワイヤレス給電の構造体の設計

電力伝送実験系の構造を検討（Pana＆九工大）
大型水槽を設置し、複数コイルによる実験を開始



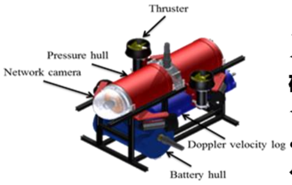
②10W／1m実証実験実施（伝送効率確認）

送電周波数	実験結果（伝送効率）	
	空間	水道水
1KHz	69%	69%
3KHz	70%	70%
40KHz	82%	67%

伝送実験実施

低周波ほど空間vs水中の伝送効率の差が小さく、高効率に伝送できることを実証

④海中移動体搭載の電子機器のノイズ影響調査

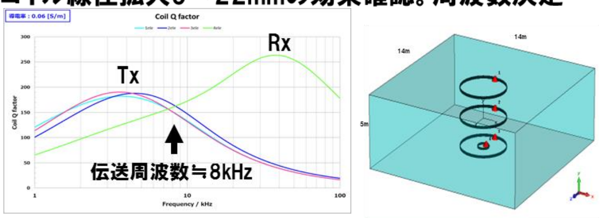


ノイズ影響の課題を検討
<内機器>耐圧容器材質差による磁界透過やアース要否の確認必要
<外部配線>配線のアンテナ化によるノイズ侵入が課題。金属シェル製水中コネクタの採用必要

（平成２８年度のまとめ）[7]

①設計手法の開発（シミュレーション設計）

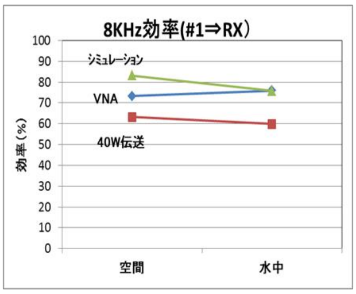
水中伝送に適したコイル等の設計条件を明確化
コイル線径拡大9→22mmの効果確認。周波数決定



②10W／5m実証実験実施（伝送効率確認）

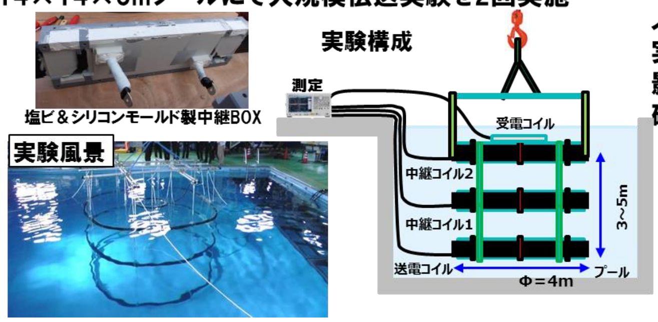
真水では効率60%で3m越のワイヤレス給電ができることを確認（5m伝送に目処）

項目	伝送効率[%]	
	空間	水中
計算（SIM）	83	76
低電力（VNA）	73	76
40W伝送	63	60



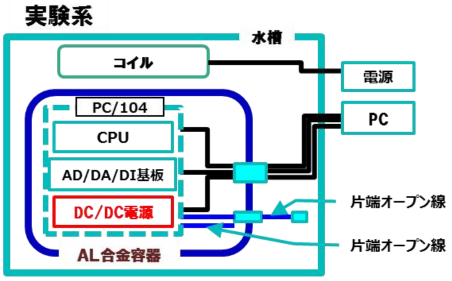
③水中ワイヤレス給電の構造体の設計

φ4m×3段の複数コイルによる実験構造を検討
14×14×5mプールにて大規模伝送実験を2回実施

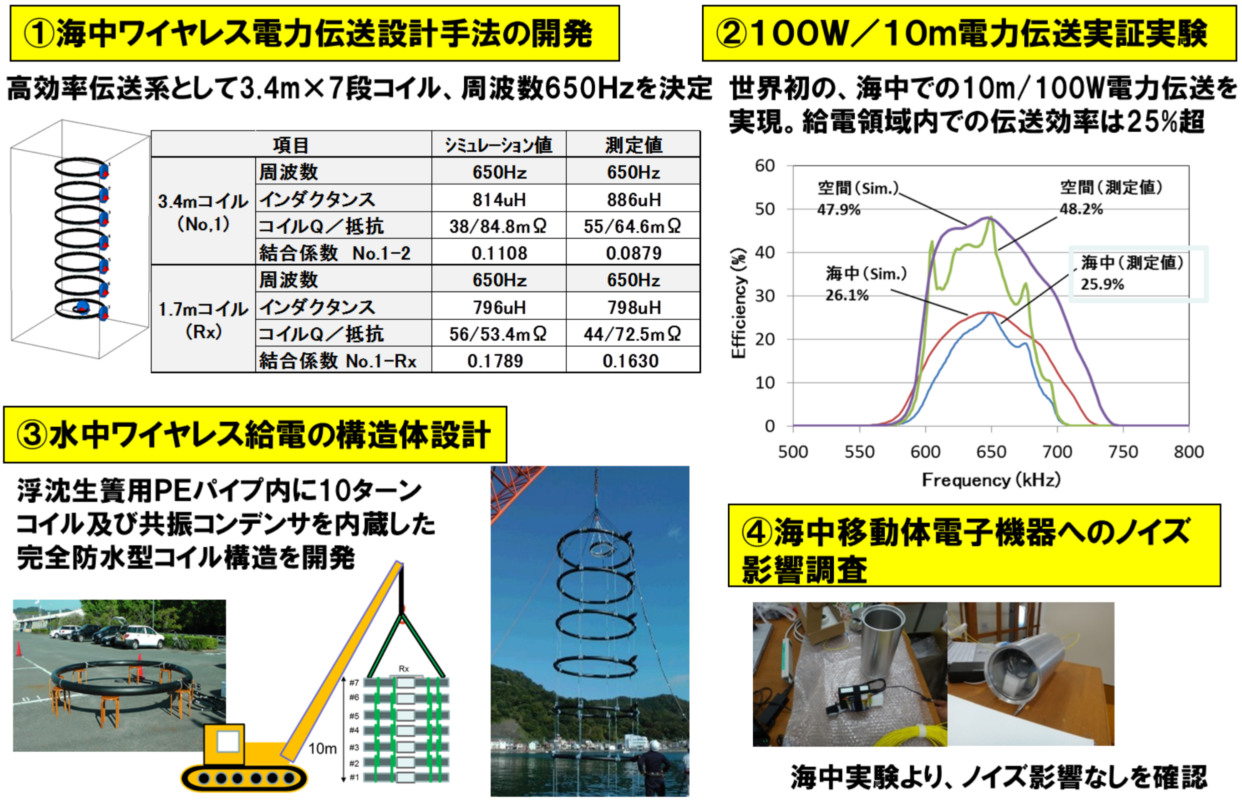


④海中移動体搭載電子機器のノイズ影響調査

ノイズ影響実験より、影響なしを確認



（平成２９年度のまとめ）



	項目	シミュレーション値	測定値
3.4mコイル（No.1）	周波数	650Hz	650Hz
	インダクタンス	814uH	886uH
	コイルQ／抵抗	38/84.8mΩ	55/64.6mΩ
	結合係数 No.1−2	0.1108	0.0879
1.7mコイル（Rx）	周波数	650Hz	650Hz
	インダクタンス	796uH	798uH
	コイルQ／抵抗	56/53.4mΩ	44/72.5mΩ
	結合係数 No.1−Rx	0.1789	0.1630

4.2 今後の予定

①シミュレーションデータと実験データで差がある。シミュレーションで設定している海水の伝導率、複素誘電率やコイルの電線の導体損失の周波数特性などの実測データが無いためと考えらる。今後は kW 級伝送のため強電磁場でのデータを取得し、さらにシミュレーション精度の向上の検討を進める。

②AUV 等の海中ロボットに給電するには 1kW 以上の高電力伝送が必要である。今回の実験では、法規制等の制約もあり 100W までの実験に留まったが、今後は kW 級の高電力伝送の技術課題や環境影響などの抽出や実際のシステムを構築した研究開発の検討を進める。

③本検討の構造体は深度数百 m に耐える性能を考慮したが、実験では深度十数 m までの水深での耐久性能は確認できた。さらに深度数百 m での運用も必要であり実験で耐久性能の検証が必要であり、検討を進めていく。

参考文献

[1] 理科年表 平成 28 年, 国立天文台編、p426, 丸善, 2015.

[2] N. S. Midi, K. Sasaki, R. Ohyama, N. Shinyashki, “Broadband Complex Dielectric Constants of Water and Sodium Chloride Aqueous Solutions with Different DC Conductivities,” IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol.9, Issue S1, pp. S8-S12, Oct. 2014.

[3] 石井 幹, "ネットワークアナライザによるインピータンス測定", KEYSIGHT , Mar.2014.

[4] http://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/2014/20140925-1.html

[5] https://www.sainsmart.com/sainsmart-uno-r3-atmega328p-development-board-2-channels-relay-free-usb-cable-compatible-with-arduino.html

[6] 平成２７年度防衛装備庁安全保障技術研究推進制度成果報告書
（海中ワイヤレス電力伝送技術開発）

[7] 平成２８年度防衛装備庁安全保障技術研究推進制度成果報告書
（海中ワイヤレス電力伝送技術開発）