

令和2年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

自励双方向無線給電による 革新的な水中電力輸送に関する基礎研究

令和3年5月

マクセル株式会社

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、マクセル株式会社が実施した令和2年度「自励双方向無線給電による革新的な水中電力輸送に関する基礎研究」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

1. 1 研究課題の最終目標

本研究では水中における共振系の自励発振を双方向無線給電と電池制御に利用することにより、水中での電源運用性を向上させることを最終目標とする。この目標のために、共振系の自励発振を解析する手法を構築し、シミュレーション及び実験による確認を行うことによって、自励発振による周波数制御、及び回路技術であるソフトスイッチング技術と同期整流技術を構築する。また、試作機を作製し、これら技術を定量的に検証する。本研究にて研究対象から得られる知見及び、その知見をもって具現化する自励双方向無線給電の試作機の目標性能は以下である。

研究対象から得られる知見

- ・真水及び海水(塩水)を介して生じる自励発振の生起原理、送電共振系や受電共振系とは異なる第3共振系が自励発振にもたらす影響、及びそれらを双方向無線給電の発振制御に用いる原理
- ・上記自励発振に関する原理等を用いた双方向無線充電を高効率に達成し維持するための制御原理

試作機の目標性能

- ・機能：真水及び海水(塩水)を介しての双方向無線給電機能^{※1}
真水及び海水(塩水)を介しての双方向無線充電機能^{※1}
- ・電力：双方向無線給電パワー200W以上^{※1}
双方向無線充電パワー50W以上^{※2}
- ・送電距離：30cm以上
- ・伝送効率：真水を介してのコイル間伝送効率70%以上
海水(塩水)を介してのコイル間伝送効率50%以上

※1 1年目に試作する原理確認機を用いて確認を行う。

※2 2年目に試作する双方向無線充電装置を用いて確認を行う。

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) 真水及び海水(塩水)を介した共振系から得られる自励発振現象の解明

①各種電磁気結合状態が自励発振に与える影響度に関する研究

自励発振は、共振系を構成する物体（コイル、筐体、回路等）や周囲環境（水の透磁率や誘電率、その他周辺の物体、異物等）による電磁気的な結合状態に強く依存する。そのため、自励発振を双方向無線給電と電池制御に利用し水中での電源運用性向上を目指す上では、各種電磁気的な結合量及びその変化による自励発振現象の仕組みを解明し、自励発振を周波数制御等に適用することにより無線給電の高効率化を図る必要がある。

②伝送効率維持のために第3共振系を導入した時の自励発振の生起に関する研究

①にて自励発振の電磁気結合に関する受動的な側面からの仕組みを解明するが、それだけでは環境起因による外乱が大きい場合には効率維持ができない可能性がある。このため、自励発振の能動的な制御性に関する側面からもその仕組みを調査し、より深く自励発振現象の原理を解明する必要がある。

更に、それら原理を電力伝送効率の向上や維持等に実活用するためには、具体的な手段を考案する必要がある。共振系は相互に干渉し合う特徴があり、弊社の事前検討から第3共振系を導入すると周波数特性を効果的に変化させることができることが判明している。このため、第3共振系が自励発振の生起に及ぼす影響を調査し、また有効な具体的手段とすべく研究する必要がある。

(2) 真水及び海水(塩水)を介した高効率双方向無線給電の原理検討

③自励発振による発振トリガの原理的な活用に関する研究

様々な環境から生起された自励発振は、その環境を反映して様々なノイズ成分を含む微弱信号である。これを発振トリガとして無線給電に活用可能な信号品質とするためには適切な電気信号処理を行う必要がある。

また、高効率の双方向無線給電を実現するには、環境に応じて変化する自励発振に対応した送電部のソフトスイッチング動作や受電部の同期整流動作を連携し機能させる必要がある。

更に、自励発振は環境の非連続的な変化等により、永続的に継続されない可能性があり、そうした状態に耐えうる電磁气的若しくは電気回路的な仕組みを作る必要がある。また、ある電磁气的結合状態においては、伝送効率と無線給電電力がトレードオフの関係になることが弊社知見等から判明しており、そうした実使用上の課題に対応するアイデアや具体的な仕組みも考案する必要がある。

④高効率双方向無線給電へ適用するための原理確認機の作製

①から③の研究を実際の回路上で実現するために、中間段階として、無線給電機能に特化した原理確認機を作製し、無線給電装置を構成する機能要素（コイル、検出器、アンプ、フィルター、AD変換等）や部品、或いは配線パターン等の妥当性

を確認し、高効率の双方向無線給電が自励発振を用いて原理的に実現可能であることを確認する必要がある。

(3) 真水及び海水(塩水)を介した電力蓄電及び電力運搬性能に関する基盤研究と動作原理研究

⑤高効率無線充電を維持するための制御手段に関する研究

本項⑤以降、①から④で検討してきた無線給電の系に電池を加えた無線充電の系を対象とする。

本研究では、高エネルギー密度と高出力で実績のある弊社リチウムイオン電池(但し既製品、本開発では新規電池開発は行わない)を用いる予定であるが、リチウムイオン電池を安全に使用するためには精密な充放電電圧電流制御が必須である。一方、無線充電を行う電力や電位は、送電コイル受電コイル間の距離によって変動するとともに、環境の外乱による影響によっても変動し、通常、それらを制御しなければ効率が低減する。このため、安全かつ高効率で無線充電を維持するために、電池の精密な制御と無線充電の電力及び電位の制御を両立するための手段を研究する必要がある。

⑥各種状態遷移に対応する無線充電制御手段に関する研究

双方向無線充電を一連の機能として動作させるためには、⑤で取り組む比較的安定した状態で動作させる制御手段の他に、送受電開始時や終了時、或いは何らかの異常が起きた時の処理機能に関する手段を考案する必要がある。以下に、双方向無線充電における各状態で必要となる機能を示す。

- ・起動(送受電開始)時には、第一に送電部受電部の割り振りが必要となり、次に送電部と受電部との連携を行うことにより、送電部では主に自励発振による無線充電のための準備、受電部では電池の充電状態を調べ必要に応じてその充電状態に関する情報を送電部に伝達する必要がある。
- ・終了(充電完了)時には、急な電力送電停止を避け、必要に応じて無線充電状態に関する各種履歴を記録する等の処理を行う必要がある。
- ・異常時、特に無線充電時の共振電圧異常、電池状態異常及び温度異常等の際には、安全性を確保しながらも速やかな充電停止を行い、適宜通報等を行う機能を研究する必要がある。

(4) 原理検証のための装置試作及び最終目標の達成度検証

⑦双方向無線充電装置の試作

①から⑥における机上での検討や機能毎の検証だけでは、自励発振による双方向無線充電の一連の動作に関して評価し、機能検証することが困難である。また、

最終目標の達成度を定量的に測定し、達成状況を判断するためにも双方向無線充電装置の試作が必要である。

1. 3 要素課題に対する実施項目及び体制

4つの要素課題に取り組むために、以下の項目を実施する。外注予定である回路基板やソフトウェアの作製作業等を除き、マクセル株式会社1社内にて研究者が分担して取り組む。

(1) 真水及び海水(塩水)を介した共振系から得られる自励発振現象の解明

実施項目① 各種電磁気結合状態が自励発振に与える影響度に関する研究

自励発振は共振系を構成する物体や周辺環境による電磁氣的結合状態に影響を受けることから、まず共振系を構成する対象物を解析的に扱うために、原理的な等価回路や回路ブロックを作り、回路シミュレーション等にて自励発振の生起原理を調べる。具体的には、ある結合係数やQ値を持った共振系を作り、その共振系に対してホワイトノイズを与え、インパルス応答やステップ応答等を観測し、自励発振がこれら値や信号に対してどのように生起されるかを解析し、生起の仕組みを解明する。

また、電磁氣的に真水及び海水(塩水)の透磁率、誘電率等が自励発振に及ぼす影響を調べるため、電磁界シミュレーションにより電磁界分布等を解析する。この解析の中で無線給電に関する基本的な効率計算等も行い、次のステップで高効率化を行うためのアイデアを創案する。

なお、各解析パラメータの選択に関しては将来海水中で使うことを想定して、塩分濃度等を広く設定するようにする。

実施項目② 伝送効率維持のために第3共振系を導入した時の自励発振の生起に関する研究

第3共振系の導入による自励発振の変化や発振の生起を原理的に解明するため、送電共振系及び受電共振系に第3共振系を含んだ回路解析や各種構造モデルを作製して、実施項目①と同様に回路解析及び電磁界解析を行う。また、ベクトルネットワークアナライザ等を用いて水を介しての各共振系でのコイルのQ値や結合係数k等を測定し、その測定値を上記解析に用いる。

弊社の事前研究によると、第3共振系を導入することにより、共振系の周波数特性を効果的に変化させることができることが判明している。このため、自励発振を能動的に制御するための手段として第3共振系の導入が伝送効率の維持・向上にどのように有効に働くかを解明する。

(2) 真水及び海水(塩水)を介した高効率双方向無線給電の原理研究

実施項目③ 自励発振による発振トリガの原理的な活用に関する研究

自励発振を電気回路で検出し適切な信号品質にすることで発振トリガとして双方向無線給電に用いるために、自励発振信号を適切に検出する回路や適切な信号レベルにするための増幅回路等を考案するとともに、原理機能回路ブロックにおいてシミュレーションを行い、実施項目①②での自励発振現象の解明結果を踏まえて、自励発振による送電部のソフトスイッチング動作原理、及び受電部の同期整流動作原理を解析する。更に、双方向無線給電においては、負荷変動等に起因する送電部受電部間の結合係数変化量によっては各機能の動作に不具合が生じる可能性があり、これを解消若しくは代替となる制御手段を考案する。具体的には、ある電磁氣的結合状態においては自励発振が生起されないことや、或いは伝送効率と無線給電電力がトレードオフの関係になることが弊社知見等から判明しており、そうした課題に対応するアイデアや具体的な回路等を考案する。

この中で、第3共振系を導入した時の効果も調査し、上記制御手段としての適用可能性を研究する。

実施項目④ 高効率双方向無線給電へ適用するための原理確認機の作製

双方向無線給電の機能動作を確認することができる原理確認機を作製し、実施項目①から③の研究結果を検証する。具体的には、実施項目①から③の研究結果を元に、外部環境ノイズを含む信号から目的とする自励発振信号を検出するための検出回路、信号品質を確保するためのフィルター回路、検出した信号をある一定レベルの信号レベルまで引き上げるための増幅回路、増幅した信号を論理的に信号処理するロジック回路、その他ソフトウェア等を設計・作製し、それらを組み合わせることで双方向無線給電が機能的に動作する原理確認機として具現化する。

この中で、第3共振系を導入する際の設計事項を併せて考察することによって新規アイデアを創案し、無線給電の高効率維持のための制御手段としての適用可能性を研究する。

(3) 真水及び海水(塩水)を介した電力蓄電及び電力運搬性能に関する基盤研究と動作原理研究

実施項目⑤ 高効率無線充電を維持するための制御手段に関する研究

無線充電を行う電力や電位は、送電コイルと受電コイル間の距離によって変動する。また、リチウムイオン電池を安全に取り扱うためには精密な充放電電圧電流制御が必要である。この相反する特性を満たすために、昇降圧回路を適用しそれを最適に制御できる方法を見出す。

本研究の双方向無線充電においては送電系受電系とも可能な限り同一なハードウェアとするため、送電系受電系とも直列共振系で構成する。このような直列共振系で構成される無線給電の場合、弊社知見によると送電電圧と受電電圧を同じにすることが高効率で無線給電するために必要となることが経験的には判明しており、本昇降圧回路を開発するにあたってその点を留意しながら進める。更には、解析的な手段やシミュレーションを通して定量的な設計指針として確立できるようにする。具体的には、まず本電力蓄電の対象となるリチウムイオン電池の機能を最大限に引き出しながら安全性を保つために、電池電圧を正しく検出し、またそれを電池容量に換算する方法を研究する。

次に無線充電に関して、自励発振からの動作により高効率に電力伝送を維持するためには、送電系受電系で適切な電位を保つ必要がある。このため、目標とする電力や電位を決め、それに対して送電側は昇圧回路を介して、受電側は降圧回路を介して動作させるようにする。更には、環境の外乱による影響（無線充電コイルにおける位置ずれから発生する電位変化、負荷変動等）を最小限にする方法を考案する。また、外乱を発生させるジグ等を作製し、考案した方法の効果を確認する。

実施項目⑥ 各種状態遷移に対応する無線充電制御手段に関する研究

双方向充電における電池制御を適正に行うためには、実施項目⑤の結果を用いて定常状態における制御を行い、更には起動（再起動）、終了（充電完了）、異常時の各状態に対しての制御も必要になる。また、水中において制御通信が十分使用できないことを想定しての制御も必要となる。このため、基本的な電池制御とともに、想定される全ての状態遷移を検証しながら、一連の電力制御に関する手段を考案する。以下に、具体的な内容を示す。

- 双方向無線充電における送電部と受電部を決める手段を考案する。ここで、送電部から受電部に無線充電をさせる際に、送電部の電源となる電池残容量と受電部の蓄電部となる電池残容量を比較した場合、必ずしも前者が大きいとは限らないことから、上記決定手段を考案する。
- 起動（再起動）時の無線充電開始に関わる動作に関して、小電力によるテスト的な電力投入等を行い、装置全体が無線充電を行える状況にあるか否かを検出する方法を創案する。例えば、伝送効率が不十分で回路に無理な負荷（過電圧や規定外の温度上昇）が発生する場合にはこの段階で停止し、通報等の次の手段を取れるようにする。
- 終了（充電完了）時の動作に関して、終了動作をさせる判断基準と、急な電力送電停止を避ける等を考慮した終了方法を決定する。更には、次の再起動（無線送電再開）のために各種履歴を記録する機能を備えるようにする。

- ・異常時に対する動作に関して、特に無線充電時の共振電圧異常や電池状態異常、及び温度異常等の際には、安全性を確保しながらも速やかな充電停止を行い、適宜通報等を行う機能を考案し具現化する方法を研究する。

(4) 原理検証のための装置試作及び最終目標の達成度検証

実施項目⑦ 双方向無線充電装置の試作

各実施項目の総合的検証のために、実施項目①から⑥の研究結果を設計に反映し、自励発振による双方向無線充電の一連の動作を確認可能な双方向無線充電装置の試作を行う。また、試作した装置を用いて、真水及び海水(塩水)を介した双方向無線充電に関する特性評価を行い、最終目標の達成度を検証する。

(5) プロジェクトの総合的推進

本研究は原理検証に注力し、更にはその原理を用いた技術を具現化するための手段を構築することとし、研究実施者2名で適切に分担し研究を実施する。また、要素課題の中でも特にリチウムイオン電池に関わる内容に関しては弊社内で開発経験豊富なメンバーの知見を活かし、研究成果を着実に上げるように推進する。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

(1) 真水及び海水(塩水)を介した共振系から得られる自励発振現象の解明

実施項目① 各種電磁気結合状態が自励発振に与える影響度に関する研究

以下の研究成果が得られ研究目標を全て達成した。

- ・回路シミュレーションにより自励発振が電源投入時の突入電流等でも開始できることを明らかにし、また実際の電気回路において自励発振を安定して持続させるための方法を考案した。
- ・回路シミュレーション、磁界シミュレーション、及び実測により共振系の応答特性から自励発振の生起の仕組みを解明した。
- ・磁界シミュレーションにより海水中におけるコイルのQ値を定量的に見積もれることを示し、海水中での伝送効率低下の原因が、送受電コイル間の結合係数よりもQ値の低下にあることを明らかにした。

実施項目② 伝送効率維持のために第3共振系を導入した時の自励発振の生起に関する研究

以下の研究成果が得られ研究目標を全て達成した。

- ・目標性能である双方向無線給電パワー200W以上、送電距離30cm以上のめどとなる共振系の仕様を見出した。
- ・第3共振系の導入により、伝送効率を高効率に維持する周波数を広帯域化できることをシミュレーションにて見出し、実測にてこれを確認した

(2) 真水及び海水(塩水)を介した高効率双方向無線給電の原理研究

実施項目③ 自励発振による発振トリガの原理的な活用に関する研究

以下の研究成果が得られ研究目標を全て達成した。

- ・送電側の自励発振による高効率状態の維持の実現に関して、回路シミュレーションにより、共振系の周波数特性が変化した時でも送電側の自励発振により周波数追従を行うことができ、送電側電源から受電側負荷への無線電力伝送の高効率状態の維持ができることを確認した。
- ・受電側の同期整流による整流部の高効率化の実現に関して、受電側LC共振器を流れる電流の検出を使った同期整流を行い、同期整流動作を行わなかった時のボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流と比較して、受電回路の高効率な動作を実現した。
- ・双方向無線給電の検討に関して、双方向無線給電の検討として、送電側と受電側をほぼ同一回路にすることで送電側と受電側の容易な入れ替えを可能とした。

- ・ 負荷変動や結合係数の変化の確認に関して、受電側負荷の変動と送電受電間の結合係数の変化による双方向無線給電の動作への影響について確認し、それぞれに変動があった場合でも自励発振動作と同期整流動作が問題なく動作することを確認した。
- ・ 第3共振系を導入した時の自励発振動作の確認に関して、回路シミュレーションにより、第3共振系を含む共振系においても自励発振動作が可能であることを確認した。

実施項目④ 高効率双方向無線給電へ適用するための原理確認機の作製

以下の研究成果が得られ研究目標を全て達成した。

- ・ 原理確認機の作製に関して、フルブリッジ回路、制御回路、電流位相検出回路、及びLC共振器を組み合わせ、送電側と受電側両方に対応した原理確認機を作製した。
- ・ 原理確認機の機能確認に関して、大気中での機能確認により、試作した原理確認機において送電側の自励発振動作と受電側の同期整流動作が適切に機能していることを確認した。
- ・ 原理確認機の性能評価に関して、水(水道水)及び海水(人工海水、濃度3.7%、導電率5.5S/m)を介しての無線給電を行い、送電距離、無線給電パワー及び伝送効率について目標性能を達成していることを確認した。

(3) 真水及び海水(塩水)を介した電力蓄電及び電力運搬性能に関する基盤研究と動作原理研究

実施項目⑤ 高効率無線充電を維持するための制御手段に関する研究

以下の研究成果が得られ研究目標を全て達成した。

- ・ 目標とする無線充電性能を得るための送電電圧と受電電圧の範囲をシミュレーション解析等から見出し、7直リチウムイオン電池と昇降圧回路の組み合わせが有効であることを示した。
- ・ 実測にてシミュレーション解析の結果を確認し、送電電圧と受電電圧をおよそ等しくすることで高効率無線充電が可能となることを明らかにした。

実施項目⑥ 各種状態遷移に対応する無線充電制御手段に関する研究

以下の研究成果が得られ研究目標を全て達成した。

- ・ 送電電圧と受電電圧の比と自励発振回路の発振周波数(以後、自励発振周波数と呼ぶ)を利用することにより、送受電コイル間に金属異物が存在するか否かを判別可能となることを明らかにし、例えば無線充電を停止する等の制御が可能となることを示した。

- ・更に、送電電圧と受電電圧を同一電圧とし自励発振周波数を測定することにより、送電距離を見積もることが可能となることを明らかにした。即ち、自励発振周波数から電力伝送効率や送電電力が予想可能なことを明らかにした。
- ・昇降圧回路の制御を行うことにより、送電電圧と受電電圧の制御及びリチウムイオン電池の充放電制御等が可能となり、双方向無線充電が可能であることを具体的に示した。

(4) 原理検証のための装置試作及び最終目標の達成度検証

実施項目⑦ 双方向無線充電装置の試作

以下の研究成果が得られ研究目標を全て達成した。

- ・双方向無線充電試作機を作製し、真水中において85kHzの周波数で送電パワー及び伝送効率の目標を達成することを確認した。
- ・交流抵抗値の解析から、海水中ではより低周波の35kHzの方が送電パワー及び伝送効率が高められることを突き止め、35kHzにて海水中での目標を達成することを確認した。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

(1) 真水及び海水(塩水)を介した共振系から得られる自励発振現象の解明

実施項目① 各種電磁気結合状態が自励発振に与える影響度に関する研究

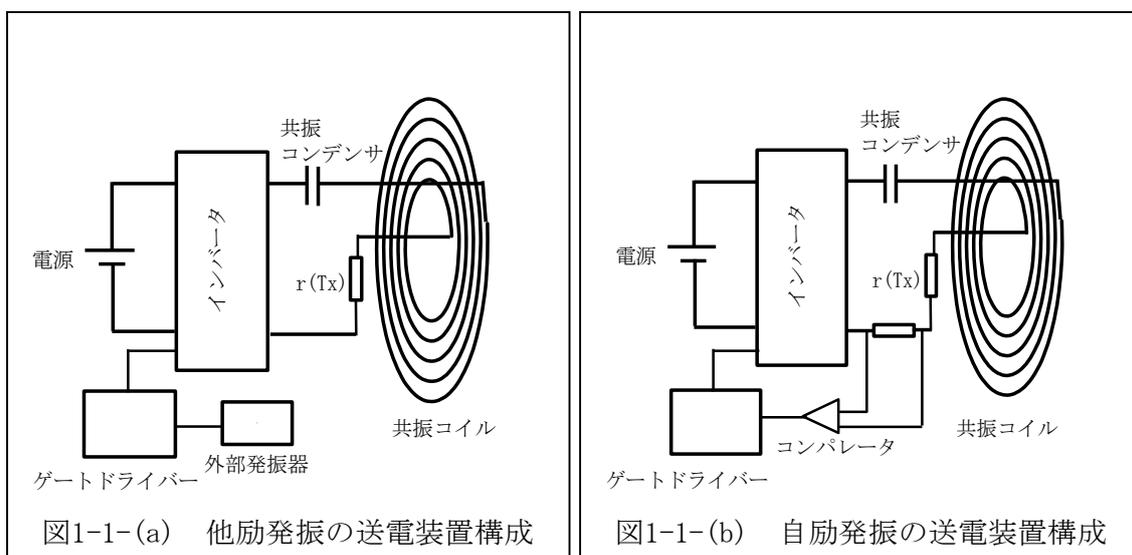
本実施項目では、回路シミュレーションと電磁界シミュレーション（主には磁界シミュレーション）を行って自励発振の原理的な考察や解析を進め、また実測によりシミュレーション結果を確認した。この結果、以下の研究成果が得られた。

- ・ 回路シミュレーションにより自励発振が電源投入時の突入電流等でも開始できることを明らかにし、また実際の電気回路において自励発振を安定して持続させるための方法を考案した。
- ・ 回路シミュレーション、磁界シミュレーション、及び実測により共振系の応答特性から自励発振の生起の仕組みを解明した。
- ・ 磁界シミュレーションにより海水中におけるコイルのQ値を定量的に見積もれることを示し、海水中での伝送効率低下の原因が、送受電コイル間の結合係数よりもQ値の低下にあることを明らかにした。

以下に順を追って説明する。

(i) 回路シミュレーションに関して

図1-1-(a)に他励発振による無線給電送電装置（以下、送電装置と呼ぶ）の概略構成を、図1-1-(b)に今回研究対象とする自励発振による送電装置の概略構成を示す。他励発振があらかじめ決めた外部発振器の周波数でしか発振できないのに対して、自励発振では共振コイルやコンデンサ等からなる共振系の周波数特性に応じて発振を起こす



ことができる。この自励発振の性質を利用すれば、無線給電装置の位置ずれや磁気的な外部環境変化がある場合にも適切な発振が可能となるため、無線給電性能を維持する上で非常に有効な手段となる。

本考察では、図1-1-(b)に示す自励発振の構成を元に、自励発振となる発振トリガがどのように発生し、またその発振がどのように継続するのかを調べた。共振系の構成要素となるコイルとコンデンサの詳細な仕様は本実施項目の(ii)電磁界シミュレーションにおいて後述するが、コイルとその共振容量を持つコンデンサを直列にして、またコイルの抵抗を $r(Tx)$ と表した。なお、後述するように、水や海水によるコイルへの影響はQ値の低下として現れるため、 $Q=\omega L/r$ (ω :角周波数、 L :インダクタンス、 r :抵抗)と抵抗値に反比例する関係から、この $r(Tx)$ の抵抗値に反映されることになる。

ここで、図1-1-(b)の送電装置に何等かのノイズが入った場合には、共振系の周波数特性を反映した応答信号が検出され、 $r(Tx)$ の抵抗値によってその応答信号の減衰度は異なることが予想される。本研究では、共振系の周波数特性を利用した自励発振を利用することを目的とするため、相当する応答信号を的確に捕捉しかつ減衰度に関わらず継続して捕捉を繰り返すことが重要となる。

図1-2-(a)に解析した自励発振回路のブロック図を示す。検知抵抗(0.2Ω)をコイルとグランドとの間に配置し、その検知抵抗の電圧をコンパレータに入力した。コンパレータで2値化した信号を後続のゲートドライバー等のクロックとして用いることにより、フルブリッジインバータを駆動するようにした。また、後述する共振コイルの仕様のため、インダクタンスを $57\mu\text{H}$ とし、共振周波数を 85kHz となるように共振コンデンサの値を 61.5nF に決めた。

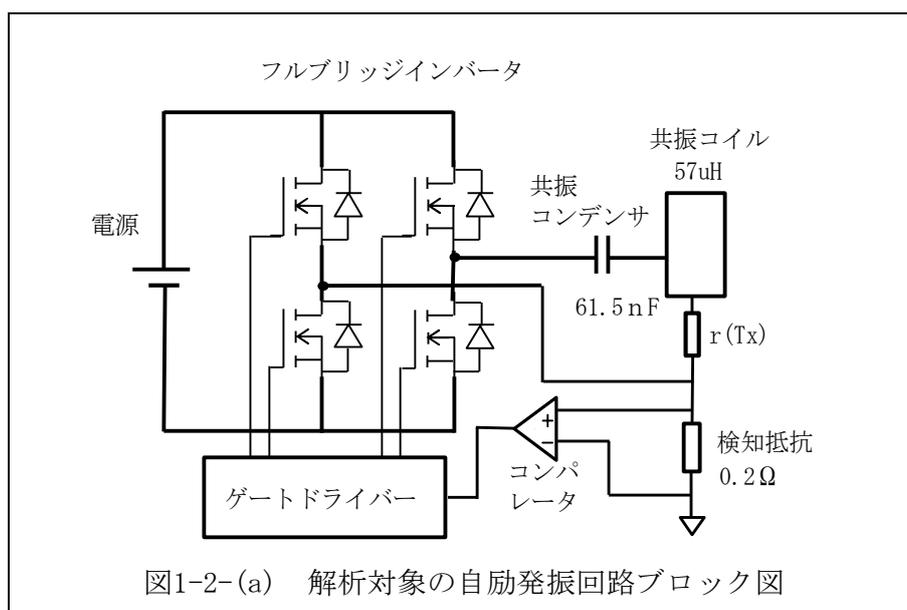
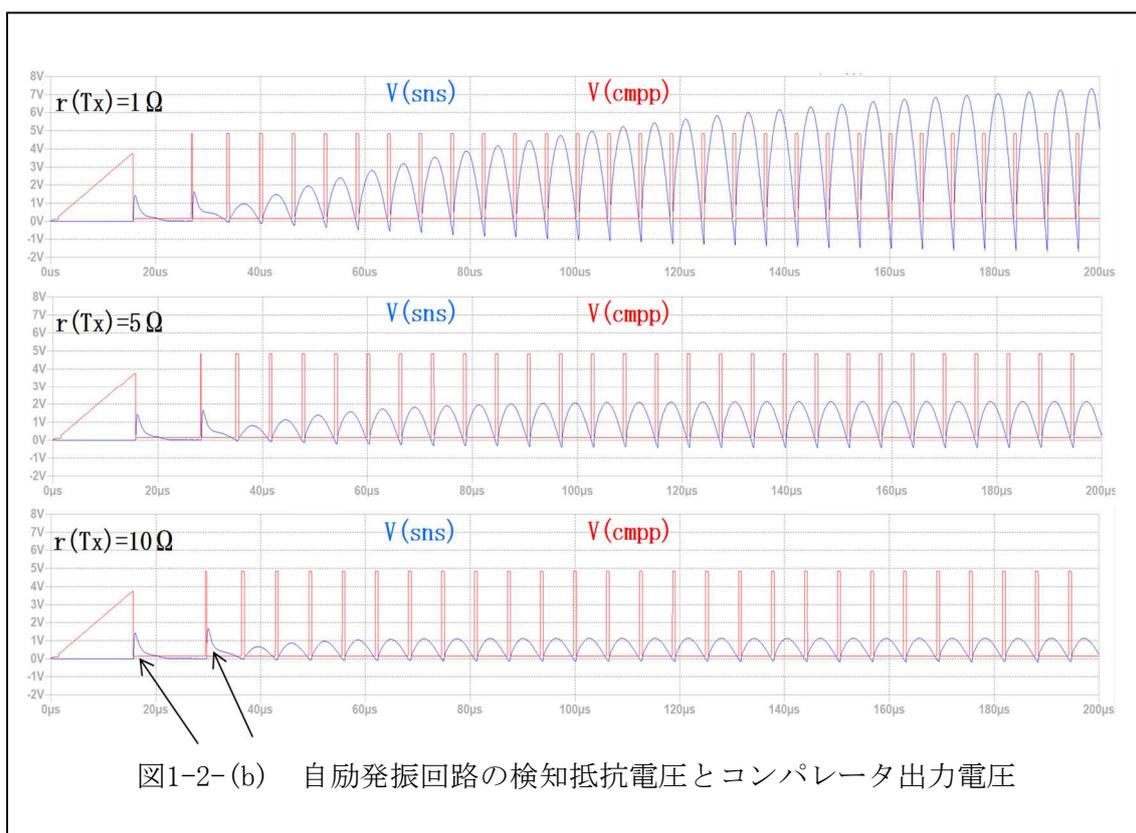


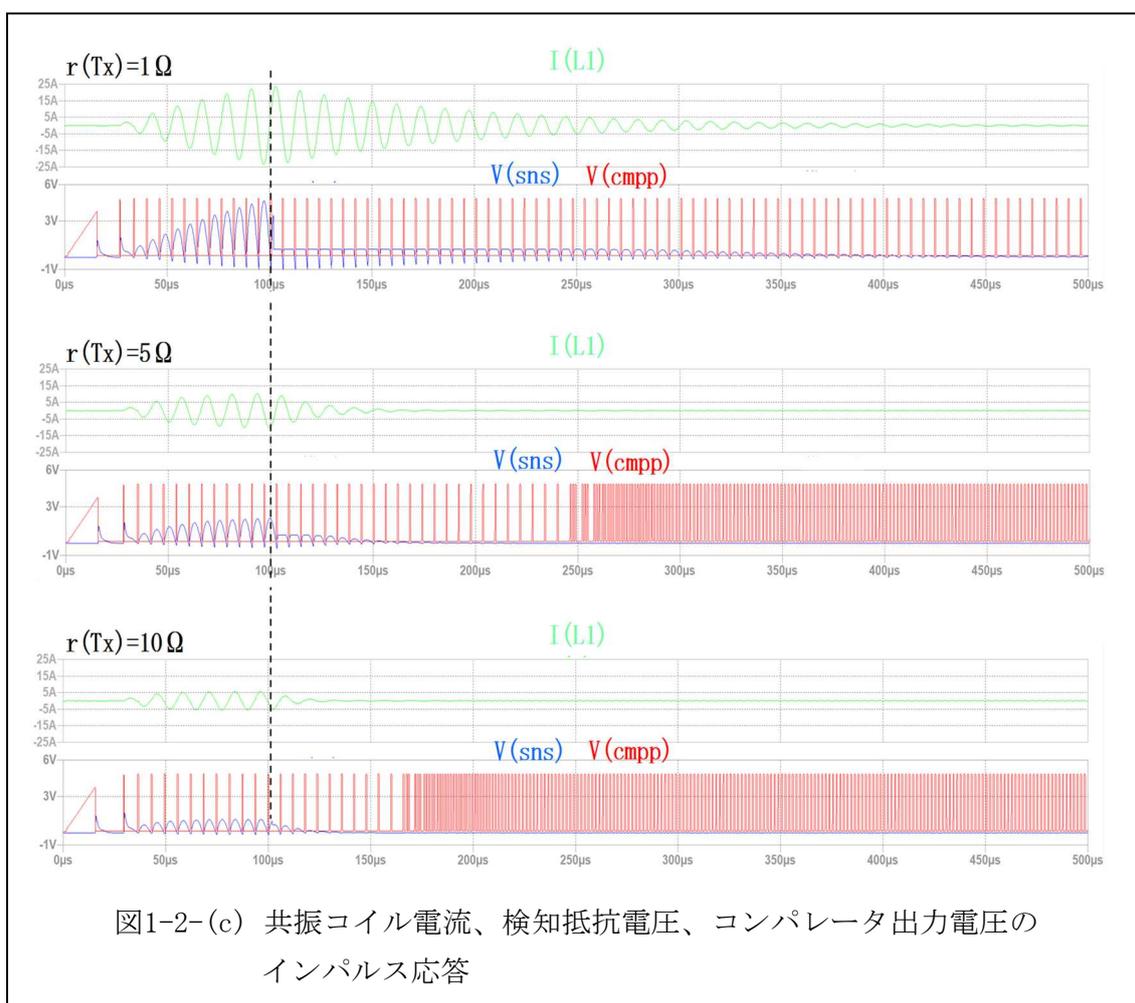
図1-2-(b)に、 $r(Tx)$ の抵抗値が 1Ω 、 5Ω 、 10Ω の時の電源投入時からの検知抵抗電圧 $V(sns)$ （図中青線）とコンパレータ出力電圧 $V(cmp)$ （図中赤線）のシミュレーション結果を示す。なお、回路シミュレーションはアナログ・デバイセズ社製LTspiceを用い、能動素子に関してはLTspiceのspiceモデルがインターネット等から入手できるものを用いた。

シミュレーション結果から、電源投入時におけるノイズ電流（図中矢印で示す回路起動時の電流と共振コンデンサの突入電流に相当する）により発振が開始され、電源投入時から短時間のうちに周期的なクロック動作をすることを確認した。また、 $r(Tx)$ の抵抗値を 10Ω まで上げてても上記動作ができることを確認した。即ち、一旦発振動作が開始され電力が供給され始めると、コイルの抵抗にあまり依らず自励発振が継続できることが分かった。なお、本報告書上シミュレーション結果は省略するが、受電装置を加えた場合に関して、送電コイルと受電コイル間の結合係数や受電装置の負荷抵抗を変化させても上記の結果に大きな違いはなかった。これは、一旦電力が供給されさえすれば、仮に周囲が海水となり $r(Tx)$ の抵抗値が相当に大きくなっても自励発振が可能であることを示唆している。



更に、発振開始後に電源を遮断した際の自励発振の継続性について調べた。図1-2-(c)に、電源を $100\mu s$ ($48V$)の単発パルス電源とし、 $r(Tx)$ の抵抗値を 1Ω 、 5Ω 、 10Ω とした時の応答信号を示す。抵抗値毎に、上段に共振コイルに流れる電流 $I(L1)$ （図中緑線）

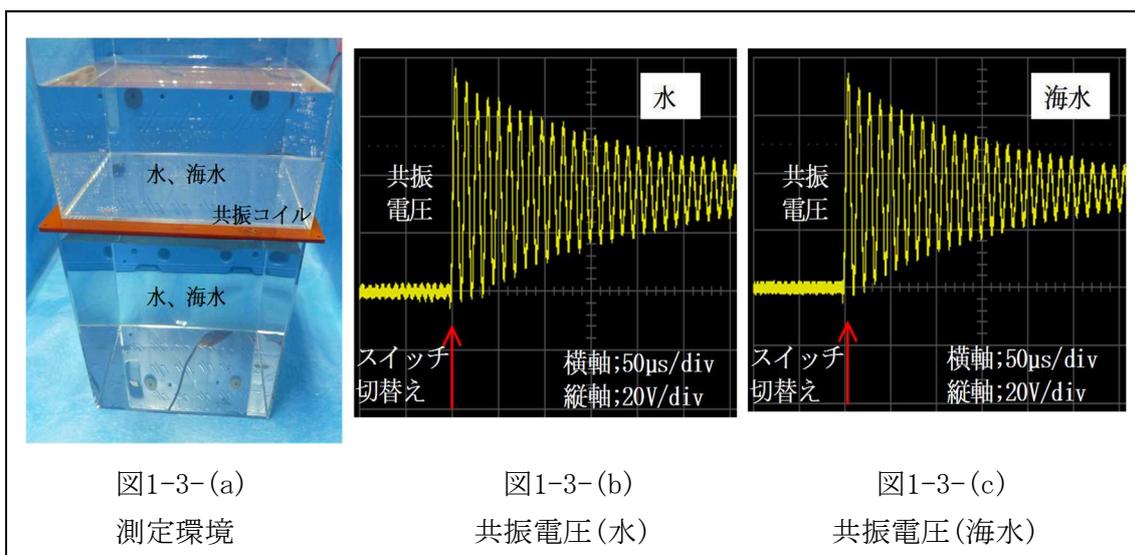
を、下段に図1-2-(b)と同様に検知抵抗電圧 $V(sns)$ とコンパレータ出力電圧 $V(cmpp)$ を示す。前述したように、電源投入時のノイズ電流により一旦発振動作は開始するものの、 $100\mu s$ 後（図中点線部）にパルス電源が $0V$ になると $V(sns)$ は低下する。一方、引き続き $I(L1)$ は減衰しながらも流れるため、 $V(cmpp)$ はクロックを出力する。 $r(Tx)$ の抵抗値が小さい場合には $I(L1)$ の減衰が小さいため、クロック出力は比較的長い時間継続する。しかし、 $r(Tx)$ の抵抗値が上がるに従って $I(L1)$ の減衰度が大きくなるため、 $V(cmpp)$ は共振系の周波数特性を反映したものとは異なり、その他のノイズによる誤動作によるものとなる。図から、 $r(Tx)$ の抵抗値が 5Ω の時にはパルス電源が $0V$ になった時点から $150\mu s$ 後辺りから、 $r(Tx)$ が 10Ω の時には $70\mu s$ 後辺りから上記誤動作が起こることが分かった。



次に、共振周波数が $85kHz$ の共振コイル及び共振コンデンサを備え、フルブリッジインバータやゲートドライバー等の電気回路から構成される簡易測定セット（送電回路は図1-2-(a)で示した回路に相当し、受電回路は全波整流と平滑コンデンサからなる簡易測定セット）を用いることにより、シミュレーションで見られた現象を確認することを試みた。ここで、本検討のために準備した簡易測定セットでは、シミュレーショ

ンで得たような電源投入時や電源遮断時の応答信号をうまく捕捉することができなかつたため、代わりにインバータのゲート信号を一定時間停止することにより、共振系の応答信号を調べた。

図1-3-(a)に測定環境を示す。測定は、図のように共振コイルの上下に水道水(以下、水と呼ぶ)及び人工海水((株)カイスイマレン社製の人工海水マリンソルトを用いて濃度3.7%、導電率5.5S/mの塩水を作製)(以下、海水と呼ぶ)を配置し、共振コンデンサを直列に連結して行った。図1-3-(b)(c)はそれぞれ水及び海水の場合における共振系の応答信号(共振電圧)を示す。図中のスイッチ切替えとして矢印で示すタイミングにおいてフルブリッジインバータのゲート信号を切替えし、約300 μ sの間そのままの状態を維持した。水、海水とも共振周波数を反映した周波数85kHzの振動波形が得られ、後述する共振電圧のフィッティングにより水中及び海水中の $r(Tx)$ はそれぞれ0.3 Ω 、0.35 Ω と見積もられた。これは回路シミュレーションで用いた値より十分低い値であり、その振動波形は水及び海水の導電率の影響を受けて減衰信号ではあるものの、自励発振が可能なだけの信号レベルにあることが分かった。即ち、実際の測定でもシミュレーションと同様な結果が得られた。



以上の結果から、自励発振は送電装置内の電源投入時のノイズ電流等でも生起されること、但し十分に電力が供給されない状態が続くと海水等の外部環境で自励発振ができなくなる可能性があることが分かった。

更に実際の回路においては、仮に自励発振が微弱な信号であっても十分に高く増幅する工夫が必要であり、またコンパレータにおいては自励発振の基準を決めるグランドレベルが変動しないようにすることも必要である。このため、自励発振を安定して実現することは必ずしも容易ではない。この課題を解決する手段の一つとして、送電装置内に自励発振を補助する外部発振器を持つことが有効と考えられる。共振電流が一定程度以上の電流値を保てば、各種誤動作をもたらすノイズや変動成分を無視でき

ることから、例えば $r(T_x)$ 等の抵抗で減衰する共振電流を補うような時定数で外部発振器を動作させるようにする。或いは起動時には他励発振とし、送電装置にある程度電流を供給した後に自励発振に切替えるようにする。これらの方法により、仮に何等か不具合が生じて自励発振は正常に動作し続けることが可能となる。

(ii) 電磁界シミュレーションに関して

前項のように回路シミュレーション及び簡易測定セットを用いて自励発振の動作原理は解析できたが、海水等の導電性媒体の特性をシミュレーション等に反映させる検討が不足していた。このため、次に電磁界シミュレーションを用いて、どのように導電性媒体の性質が共振系に反映されるか検討を行った。

ここで、電磁界シミュレーションを進め、更に本研究の年度目標となる原理確認機を作り上げるためには、無線給電コイルのサイズと形状を決めることが第一の課題となる。空気中における共鳴方式の無線給電では、コイルサイズ相当が送電距離の目安となるため、水中における本研究でもそうした知見を参考にできると予想した。本研究では水中で30cm以上の送電距離を達成する原理確認機を作り、更には後述する第3共振系の解析を行うため、原理確認機用には半径30cm程度のコイルを、第3共振系にはそれより小型のコイルを用いることを計画した。

図1-4に3次元CADで作成したコイルモデルの概略形状を示す。図中の構成①と②は第3共振系用の小型コイルに相当し、それぞれ磁性体（フェライト）が付加されていないものとするものとする。構成③と④は原理確認機用のコイルに相当し、同じくそれぞれ磁性体が付加されていないものとするものとする。

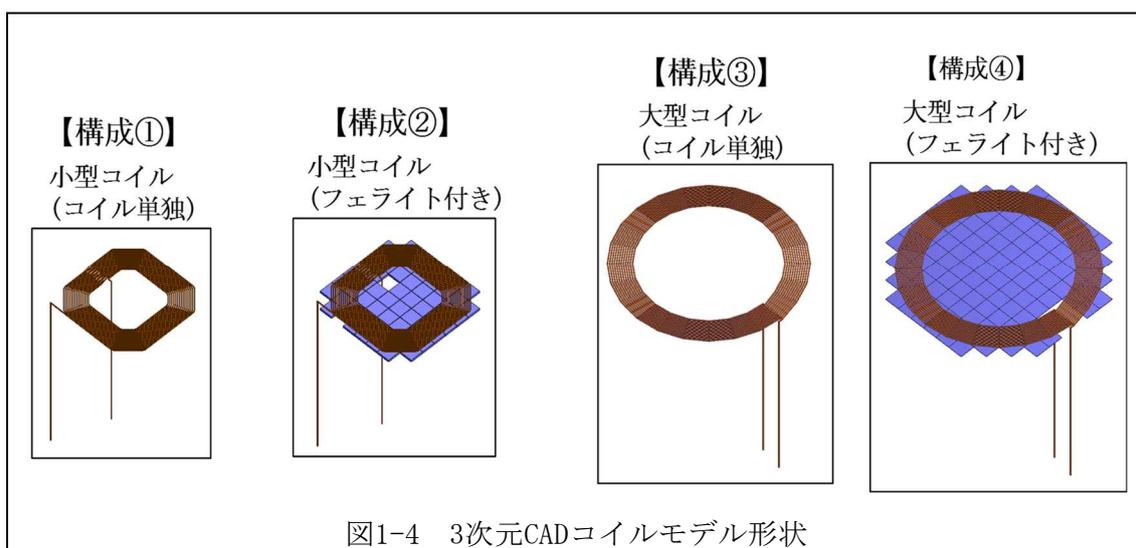


図1-4 3次元CADコイルモデル形状

表1-1に各構成のコイルの形状とインダクタンス値をまとめた。ここで、コイルに用いる線材は高周波抵抗を下げるためにリッツ線を用い、結合係数を上げるためにMn-Zn系の高透磁率ソフトフェライト（比透磁率2500）を付加することとした。導電性媒体

である水や海水での解析を行うため、コイルには誘電体（ガラスエポキシ）を配置することにより、直接コイルと水や海水が触れないようにモデルを工夫した。また、本解析ではリッツ線を電磁界解析でモデル化する代わりに、別途実測したリッツ線のAC抵抗値を用いた。なお、本報告書では電磁界シミュレーションの内でも磁界解析の結果を示し、ムラタソフト製FEMTET（有限要素法シミュレータ）による磁場解析とその過渡解析オプションを用いた結果を示す。

表1-1 コイル形状とインダクタンス

	構成①	構成②	構成③	構成④
コイル形状	角形	角形	円形	円形
内径／外径（mm）	145／263	145／263	400／540	400／540
ターン数／銅線径（mm）	15／1.5	15／1.5	12／4.0	12／4.0
フェライト付加	なし	あり	なし	あり
インダクタンス（ μH ）	66.3	93.0	111	165

以下に、シミュレーションで行った結合係数とQ値に関する解析結果を記載する。

(ii-1) 結合係数の解析結果に関して

図1-5に解析モデル例を示す。構成①の小型コイルを送電コイル(Tx)と受電コイル(Rx)として10cmの距離で対向して配置し、水及び海水を模した導電性媒体がコイルを囲むように配置した。

表1-2に、真水及び各種導電率を変えた海水で囲まれた場合の85kHz（共振周波数相当）における結合係数とインダクタンスの計算結果をまとめた。計算の結果、真水（導電率0.01S/m）及び通常の海水程度（導電率4S/m）では、結合係数に大きな違いは見られなかった。なお、本報告書での記載は省略するが、コイルとして構成②③④を用いた時、また各送電コイルと受電コイルの距離を変えた時の結合係数についても計算を行ったが、同様にして真水と海水で結合係数の有意な違いは得られなかった。更に、実測に関しても上記シミュレーションによる計算と同様にして、水と海水（塩分濃度3.7%、導電率5.5S/m）での差はほとんどなかった。即ち、今回構想したコイルや周波数においては、結合係数は周囲の導電性媒体の存在如何にほとんど依らないことが分かった。

一方で、表1-2に示すように、更に導電率を上げて20S/m（高導電媒体1）から40S/m（高導電媒体2）にすると、結合係数とインダクタンスが顕著に小さくなることが分かった。ここで、これまで解析を行った周波数(85kHz)より低周波にすれば導電性媒体中の磁場の透過度が高くなり結合係数が上がることが予想されたため、高導電媒体2を例にして、周波数を低くした時の解析結果を調べた。図1-6に85kHz、50kHz、20kHzの周波数における磁束密度分布（断面図）を、表1-3に結合係数とインダクタンスの結果を示す。85kHzでは送受電コイルの中間辺りで磁束密度が弱い（黄色の範囲120~160 μ Tがコイル中間にない等）のに対して、周波数が低くなるほどその磁束密度が強くなる（黄色の範囲120~160 μ Tがコイル中間にある等）結果となった。即ち、周波数が低くなるほどコイル中間の磁束密度が強くなり、それに伴い結合係数が上がる結果が得られた。

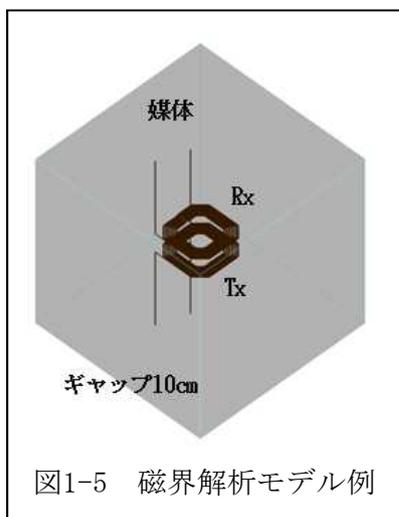


図1-5 磁界解析モデル例

表1-2 結合係数とインダクタンスの導電率依存

媒体種類	導電率 (S/m)	結合係数k	インダクタンスL (μ H)
真水	0.01	0.202	62.3
海水	4	0.201	62.3
濃海水	8	0.201	62.3
高導電媒体1	20	0.199	62.1
高導電媒体2	40	0.193	61.5
高導電媒体3	100	0.164	58.9

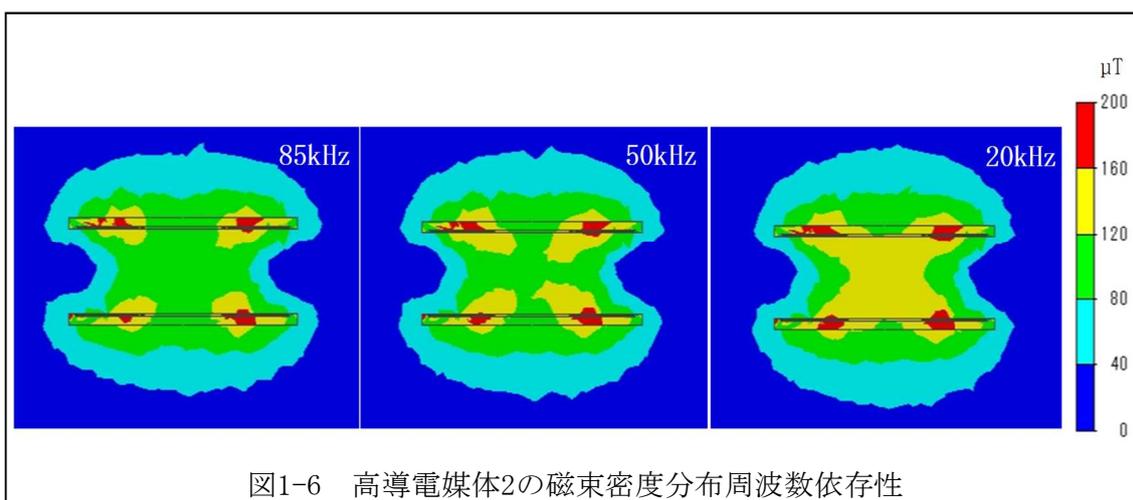


図1-6 高導電媒体2の磁束密度分布周波数依存性

表1-3 高導電媒体2における

結合係数とインダクタンスの周波数依存

周波数f (kHz)	結合係数k	インダクタンスL(μH)
85	0.164	58.9
50	0.184	60.7
20	0.198	62.0

(ii-2) Q値の解析結果に関して

磁場解析に加えて回路解析を連成させること（以下、磁場・回路連成解析と呼ぶ）により、Q値の求解を行った。

図1-7-(a) (b)にそれぞれ磁場解析モデル及び回路モデルを、図1-7-(c)にその解析結果の一例を示す。磁場解析モデルにおいては解析対象となるコイルを導電性媒体で覆うようにした。回路モデルでは磁場解析対象のコイルに加え、共振周波数が85kHzとなるように直列に共振コンデンサを配置し、また信号源として100μsの矩形波状のインパルス信号を加えた。Q値はそのインパルス信号に対するコイル電流応答信号の減衰度（ $\propto \exp(-\omega t/2Q)$ ）から見積もった。^[1] 例えば、図1-7-(c)は解析の結果得られた応答信号の減衰に対して包絡線のフィッティングを行うことにより、Q=100と導出した。

なお、計算は十分な分解能とするため1μs毎512ポイントとしたが、この場合1解析条件当たり12時間以上の時間を要した。このことから、更にサイズの大きなコイルモデルに対して同様な連成解析を行う際には、解析モデルや計算タイミング等の工夫が必要になると推察される。

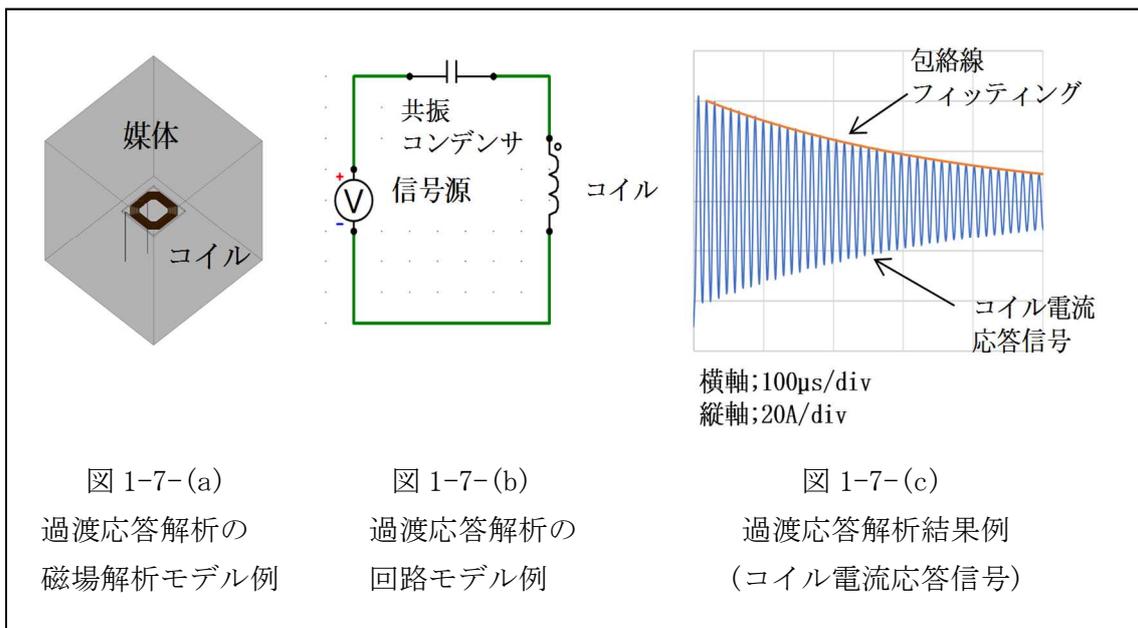


図 1-7-(a)
過渡応答解析の
磁場解析モデル例

図 1-7-(b)
過渡応答解析の
回路モデル例

図 1-7-(c)
過渡応答解析結果例
(コイル電流応答信号)

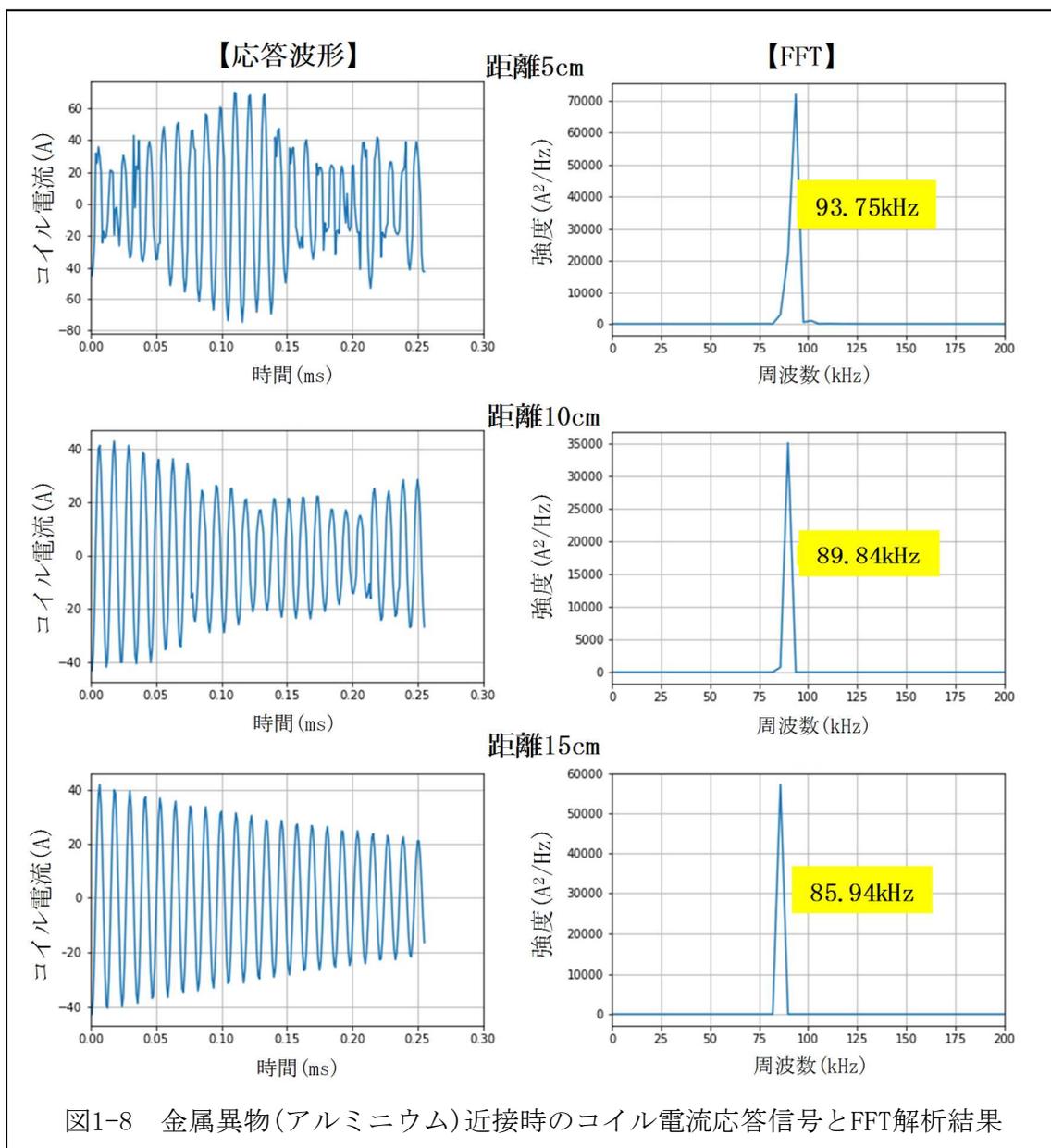
表1-4に、構成①②③④のコイルを用い、導電性媒体として真水、海水及び濃海水（導電率はそれぞれ0.01、4、8S/m）とした時のQ値の求解結果とその抵抗換算値をまとめた。Q値の求解は、前述した過程と同様に、磁場・回路連成解析から得られたコイル電流応答信号の包絡線をフィッティングすることによりQ値を見積もった。ここで、抵抗換算値とは、Q値から $r = \omega L / Q$ （ ω :角周波数 L:自己インダクタンス）として換算した場合の値を示す。なお、周波数は85kHz、自己インダクタンスは本過渡解析計算から得た値を用いている。その結果、真水と比較すると海水や濃海水相当では顕著にQ値が下がること、構成①②の小型コイルの場合より構成③④の大型コイルの場合の方がQ値の下がり方が大きいことが分かった。これにより、海水の影響はQ値に反映され、コイルのサイズが大きいほどQ値の低下が大きいこと、及び各回路解析においてはQ値に相当する負荷抵抗を付けて解析すれば良いことが分かった。

表1-4 各構成におけるQ値及び抵抗換算値

媒体種類	構成①		構成②		構成③		構成④	
	Q値	抵抗換算値 (Ω)						
真水	320	0.10	380	0.10	550	0.10	750	0.10
海水	100	0.32	110	0.34	53	1.0	73	1.1
濃海水	57	0.55	65	0.58	30	1.8	38	2.0

次に、共振系に意図していない磁気的な変動が加わる例として、金属異物が共振系近傍に配置された場合を解析した。図1-7-(a) (b) (c)で説明したシミュレーションと同様に、磁場・回路連成解析によってそのインパルス応答信号を調べた。具体的には、図1-7-(a)で示す解析モデル（構成①のコイルを用い、コイルを囲む導電性媒体として海水を用いた）にアルミニウムを追加配置し、そのサイズと共振コイルとの距離を変えて解析を行った。

図1-8に一例として、アルミニウムが10cmの立方体として、コイルの中心軸に沿ってコイルから5、10、15cm離れた場合のコイル電流応答信号の結果とその応答信号のFFT解析（サンプリング周波数1MHz、サンプリング数512ポイント）の結果を示す。アルミニウムがコイルに近いほど応答信号に乱れが生じ、更にFFT解析から共振周波数（図中黄色枠の数字）が高くなり、帯域もブロードになる結果が得られた。ここで、自励発振による無線給電を行う場合には、上記のような周波数遷移が発生しても送電周波数の適切な追従走査が可能となる。更には、金属異物に対しての不要な給電を避ける等のために積極的に応答信号の波形解析を行えば、より実際の使用に即した制御として用いることも可能である。



以上の結果から、導電性媒体である水や海水の影響（導電率の増大等）はコイル間の結合係数よりもコイルのQ値の低下に反映されること、無線給電の伝送効率^[2]は結合係数とQ値の積に比例することから、伝送効率を上げるためには水中においてもQ値を高く保つことが重要であることが分かった。更には自励発振に依れば、仮に金属異物による周波数遷移があったとしても送電周波数が適切に追従され、高伝送効率の無線給電が維持できると考えられる。

実施項目② 伝送効率維持のために第3共振系を導入した時の自励発振の生起に関する研究

本実施項目では初めに、原理確認機の目標性能を達成する共振系の仕様を電磁界シミュレーションにて求め、次にその結果を参考にして第3共振系を導入した場合における無線給電特性を解析した。この結果、以下の研究成果が得られた。

- ・ 本研究の本年度目標性能（双方向無線給電パワー200W以上、送電距離30cm以上）のめどとなる共振系の仕様を見出した。
- ・ 第3共振系の導入により、伝送効率を高効率に維持する周波数を広帯域化できることをシミュレーションにて見出し、実測にてこれを確認した。

以下に順を追って説明する。

(i) 共振系の仕様に関して

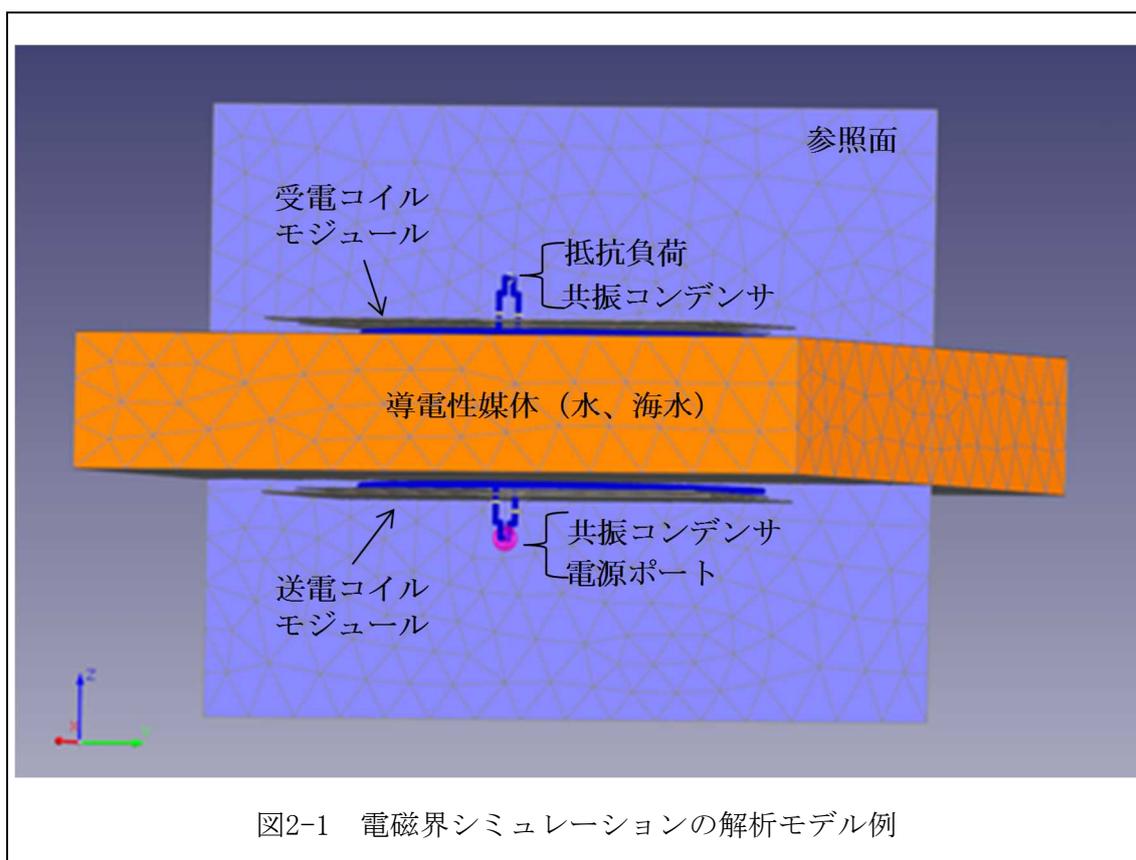
本年度研究では、海水中の無線給電において30cm以上の送電距離で200Wの無線給電パワーかつ50%以上の伝送効率を目指す。空気中での同様な研究はあるものの、海水中でこれら性能を具体的に実現する情報はない。このため、共振系の仕様を定め、本研究を円滑に進めるために電磁界シミュレーションによる解析を行った。なお、電磁界シミュレーションはJSOL製EMCoS（モーメント法シミュレータ）を用いた。

図2-1にいくつか設計したものの中でも上記目標性能を達成可能と考え、これを確認するためにシミュレーションを行った解析モデルの一例を示す。送電コイルと受電コイルは同じものとし、表1-1の構成④の円形状のコイルを用いた。コイルは高周波抵抗を低減するため、試作においてはリッツ線を用いる予定であったが、電磁界シミュレーション上ではリッツ線の3次元モデリングは困難である。このため、代わりに単線でのモデリングを用い、そのAC抵抗値として別途行ったリッツ線の実測値等を用いることとした。コイルの背面には、1mm厚のフェライト（比透磁率2500）と2mm厚のアルミシールドを配置するようにした（以下、コイルとフェライト及びアルミシールドを送電コイルモジュール、受電コイルモジュールと呼ぶ）。また、送電側には電源ポートと共振コンデンサを、受電側には共振コンデンサと負荷抵抗を配置した。送電コイルモジュールと受電コイルモジュールの間には、導電性媒体を配置するようにした。

図2-2-(a) (b)に、伝送効率及び送電電力の計算結果を示す。計算は、負荷抵抗を10Ω、送電電圧を48Vとして、送電周波数を60kHzから110kHzまで2kHz間隔で変化させて行った。また、導電性媒体として真水、海水及び濃海水（導電率はそれぞれ0.01、4、8S/m）に対し、送電コイルと受電コイル間の距離（以下、送電距離と呼ぶ）を変えて行った。なお、本研究の目標性能は無線給電パワー（送電コイルからの出力電力）で規定しているが、回路構成の都合から、本報告書上では送電電力（送電側の直流電源が供給する電力）で確認を行った。但し、本電磁界シミュレーション上では直流電源による回

路等をモデリングできなかつたため、代わりにコイル端に投入されるAC電源が供給する電力を送電電力としてシミュレーションを行った。

送電距離30cmにおける結果を比較すると、真水では90%以上の伝送効率と300Wの送電電力が得られるのに対して、海水では75%250W、濃海水では60%200Wと低下した。しかし、目標性能（海水を介して50%200W以上）としては満足できる見込みがあることが分かった。即ち、本電磁界シミュレーションの結果により、本年度の目標性能を達成する共振系の仕様に関してめどが立った。なお、送電距離が長くなると効率が落ちるが、これは送電距離が長くなるに従い結合係数が小さくなり受電電力が低下するからである。また、送電電力は送電距離が長くなるに従い上昇するが、これは送電距離が長くなるに従い結合係数が小さくなり送電側から見た負荷が減るためである。真水において送電距離40cmで送電電力のピークが見られるのは、計算の間隔（本計算では2kHz間隔でやや不十分だった）に起因し、送電電力が最大となる周波数を捉え切れていなかったためと考えられる。適切な計算間隔（例えば0.5kHz等）で計算を行えば、実際には単調に増加するものと考えられる。



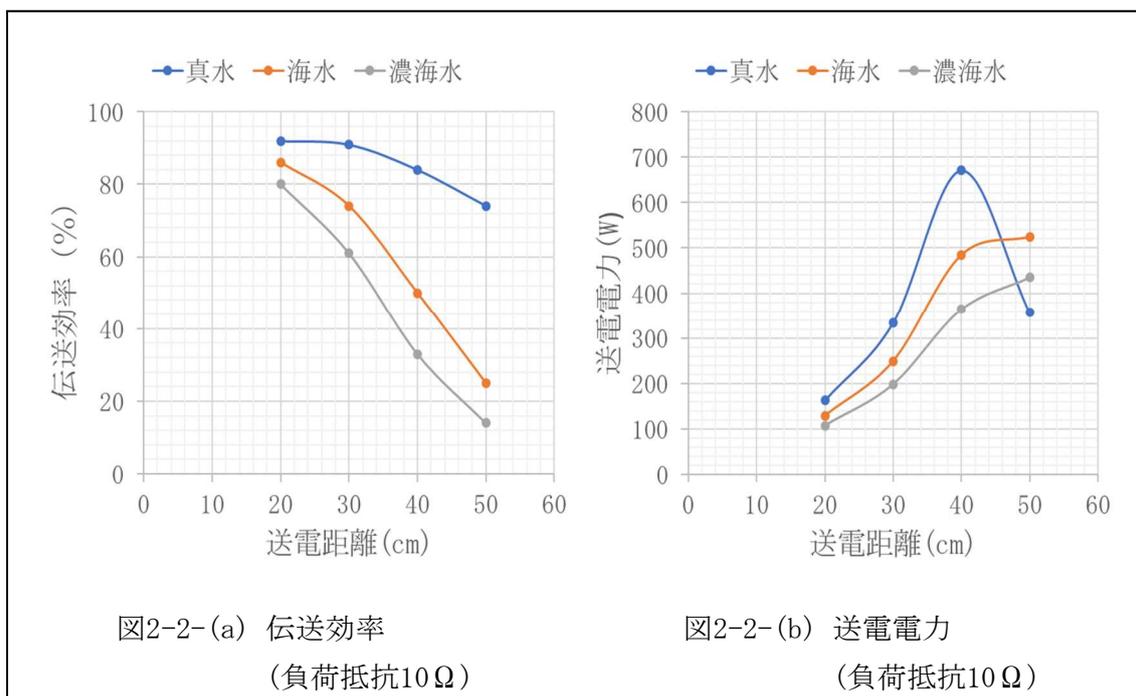


図2-2-(a) 伝送効率
(負荷抵抗10Ω)

図2-2-(b) 送電電力
(負荷抵抗10Ω)

(ii) 第3共振系の研究に関して

本第3共振系の研究は、送電コイルと対向して受電コイルの裏側にもう一つ共振系を加えて、構成された共振系全体の磁気的変化を調べ、無線電力伝送の性能向上を図るものである。このため、弊社内での事前研究結果も参考にしながら、以下の適用先見込みや知見を持って研究を進めた。

- ・ 無線給電の水中での適用先を考えると、無線給電部のサイズは小さいほど良い。
- ・ 本研究のテーマである水中電力輸送を考えると、電力輸送の一旦を担う移動体内に備える受電コイルモジュールのサイズは特に小さくする必要がある。
- ・ 弊社内での事前検討によると、第3共振系の効果を得るためには、受電コイルは送電コイルと第3共振系との間の磁気的結合を遮らないようにする必要がある。

(iii) 電磁界シミュレーション結果に関して

前項の見込みや知見から、受電コイルのサイズは送電コイル及び第3共振系を構成するコイルより小さいものとした。図2-3に解析モデル（左：斜視図、右：断面図）を示す。送電コイルと第3共振系コイルは図2-1で用いた送電コイルモジュールと同じものを用いた。受電コイルは内径150mmターン数14ピッチ4mmとし、フェライトやアルミシールドは配置せずにコイル単独とした。なお、計算モデルの都合上、導電性媒体は共振系を囲むように配置することができなかつたため、図2-3右図に示すとおり、代わりに送電コイルと受電コイル、及び受電コイルと第3共振系の上に導電性媒体を配置した。

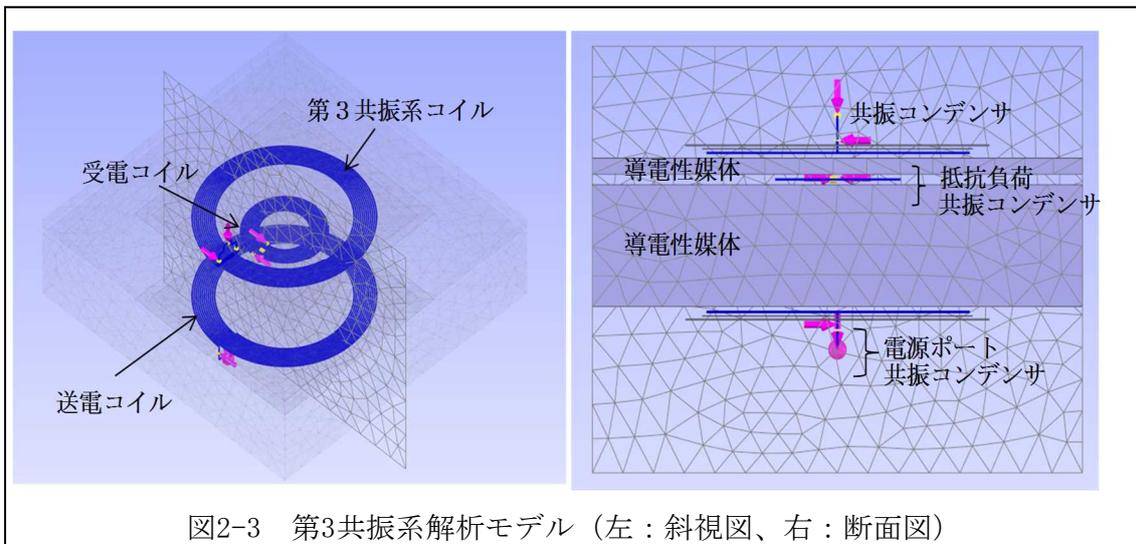
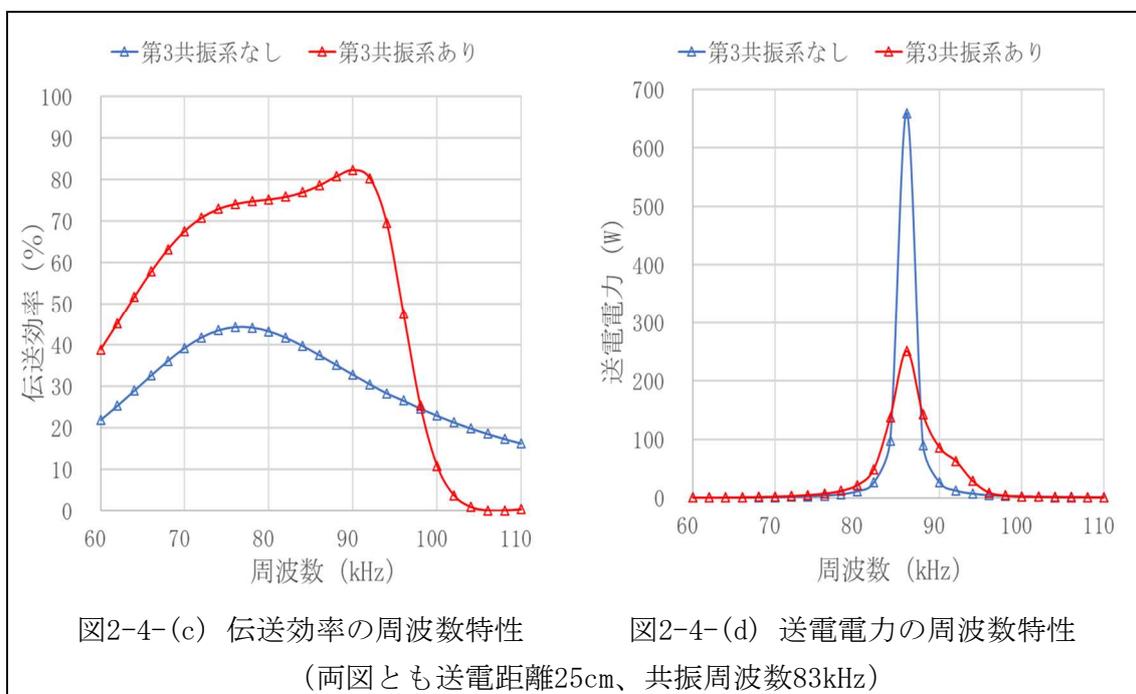
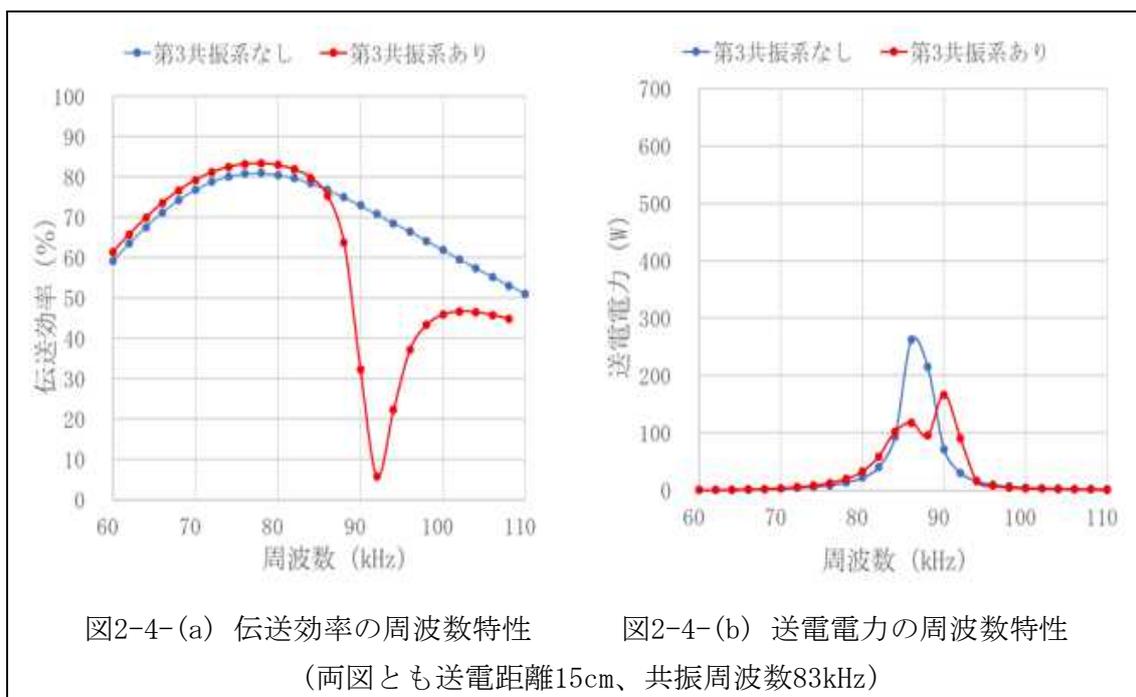


図2-3 第3共振系解析モデル（左：斜視図、右：断面図）

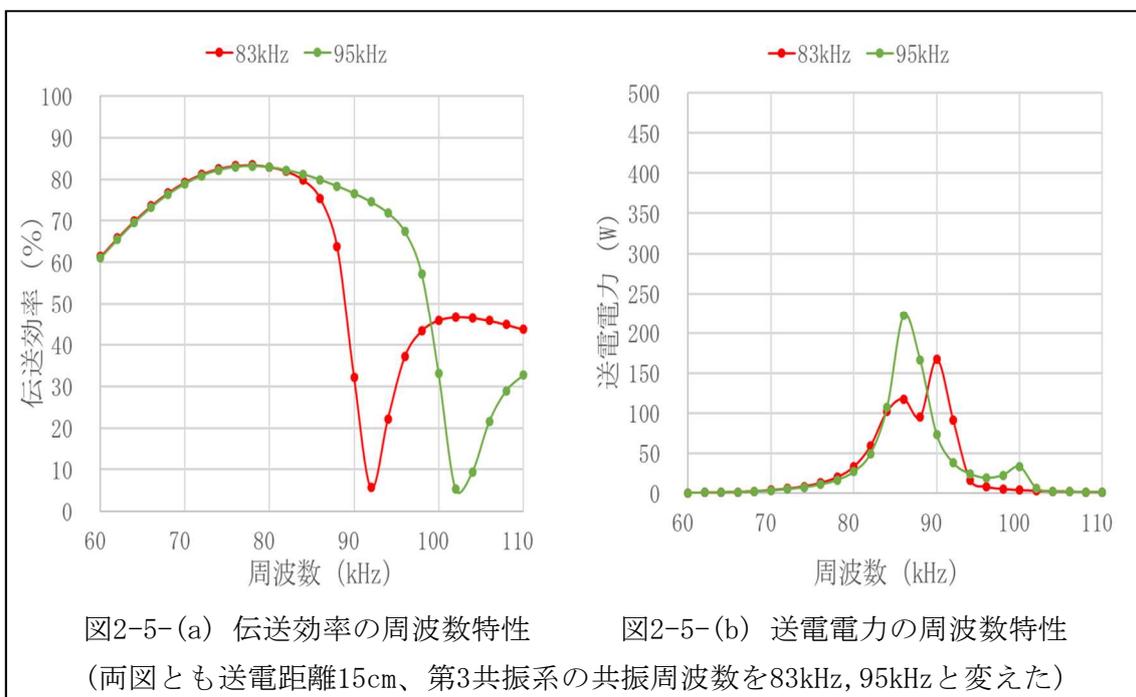
図2-4-(a) (b)に、送電距離を15cmとした場合の伝送効率と送電電力の周波数特性（送電周波数を変化させて伝送効率と送電電力を計算した結果）を示す。また、比較のために第3共振系がない場合も示す。ここで、第3共振系は送電コイルから30cmの距離に配置し、計算の都合上、共振周波数は送電共振系、受電共振系、及び第3共振系全てにおいて83kHzとした。図から送電距離15cmの場合には、第3共振系がない方が伝送効率の周波数特性も広帯域で、送電電力も大きいことが分かった。また、第3共振系がある場合の伝送効率の周波数特性として、92kHz付近に特徴的な伝送効率劣化も見られた。ここでその理由を考察すると、まず第3共振系がない場合には送電コイルと受電コイルの磁氣的結合のみ考えれば良いため、伝送効率を高く保つためには送電コイルと受電コイルが同じ共振周波数を持つことが重要である。一方、第3共振系コイルがある場合には、送電コイルと受電コイルの磁氣的結合のほか、第3共振系コイルと受電コイルの磁氣的結合及び第3共振系コイルと送電コイルの磁氣的結合が加わる（以下、この磁氣的結合をクロスカップリングと呼ぶ）。このため、送電コイルと受電コイルを同じ共振周波数を持つようにしておくと逆に最適な状態からずれることになる。即ち、本結果の92kHz付近の伝送効率劣化は上記クロスカップリングによるものであり、例えばこの伝送効率劣化を無くすためには各コイルの共振周波数をずらす必要があると考えられる。

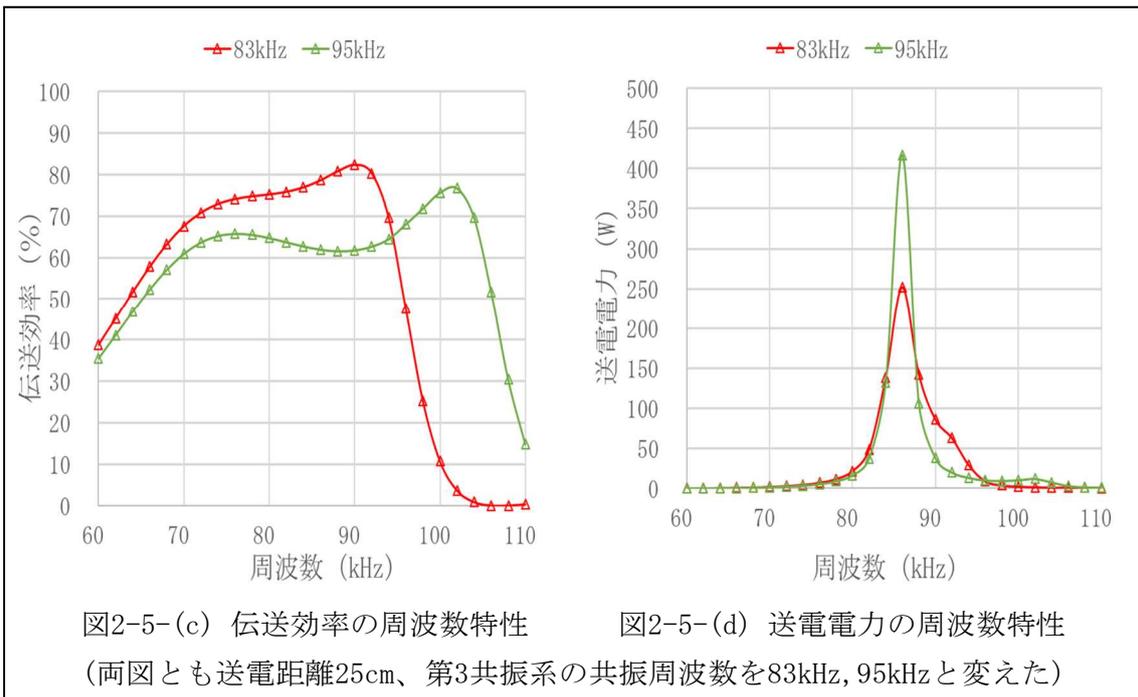
図2-4-(c) (d)に、送電距離を25cmとした場合を同様に示す。第3共振系がない場合には伝送効率の劣化が大きい（45%）のに対して、第3共振系がある場合は伝送効率の劣化が非常に小さい結果（80%）となった。ここでその理由を考察すると以下のようになる。まず第3共振系がない場合には、送電距離が長くなると送電コイルと受電コイル間の結合係数が小さくなるため伝送効率が低下する。第3共振系がある場合にも、同様なことが送電コイルと受電コイル間には起こる。しかし、第3共振系と受電コイル間は近接しその間の結合係数は大きくなるため、送電コイルから見た実効的な受電部が受電

コイルと第3共振系コイル一体となったものになる。このため、伝送効率が上がると考えられる。図2-4-(a)の結果ではクロスカップリングが伝送効率に対して悪影響を及ぼすものであったが、本配置の第3共振系による伝送効率向上は、クロスカップリングが伝送効率に良い影響を与える結果と考えられる。



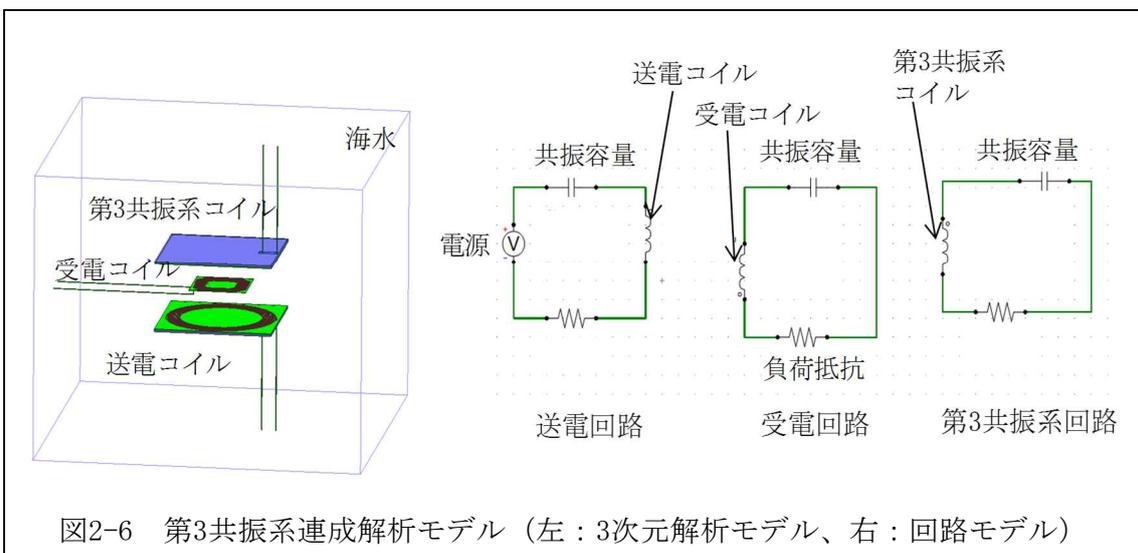
また、第3共振系の影響を調べるため、第3共振系の共振容量を小さくして共振周波数を上げた時（95kHzの場合）の計算結果を示す。図2-5-(a) (b)は送電距離15cmの場合を示すが、第3共振系がある場合における特徴的な伝送効率の落ち込みが高周波側になり、高伝送効率の領域が広帯域化される結果が得られた。また、図2-5-(c) (d)は送電距離25cmの場合における結果を示すが、同様に伝送効率は下がるものの広帯域化が図れることが分かった。ここでその理由を考察すると、第3共振系コイルがある場合にはクロスカップリングが発生するが、第3共振系の共振周波数を95kHzにすることにより第3共振系に起因するクロスカップリングが弱まるためだと考えられる。このため、伝送効率及び送電電力は第3共振系がない時の特性（即ち、伝送効率が広帯域化され、送電電力が上昇する）に近づく。





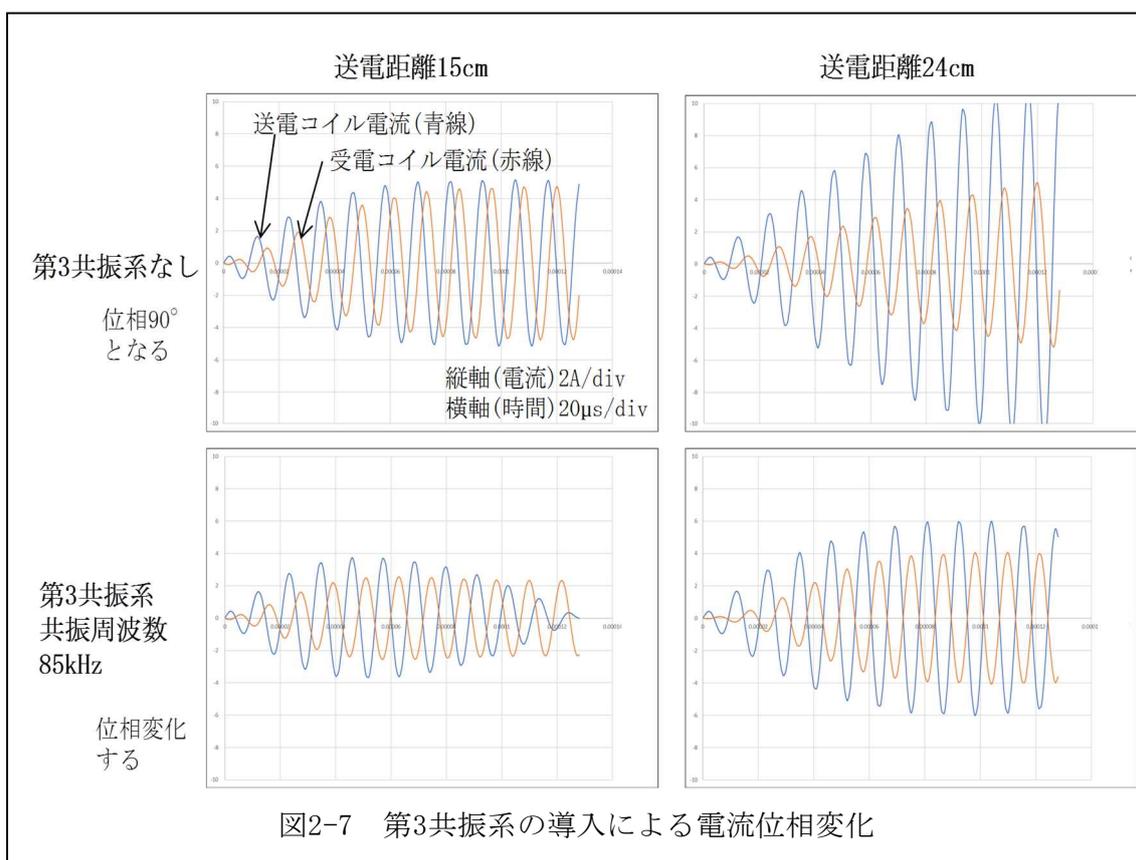
次に第3共振系における自励発振を調べるため、発生する電流位相等を解析した。具体的には、実施項目①で行ったようにムラタソフト製FEMTET（有限要素法シミュレータ）による磁場・回路連成解析を行い、第3共振系において発生する電流位相等を調べた。

図2-6左図に用いた3次元解析モデルの例を示す。図2-3のシミュレーションで用いたものと同じ送電コイル、第3共振系コイル及びフェライトを用いたが、本計算モデルの都合上アルミシールドは解析に入らず、また受電コイルには構成①のコイルを用いた。回路モデルを図2-6右図に示す。送電回路には48Vの正弦波電源、受電回路には10Ωの負荷抵抗を配置し、送電・受電・第3共振系それぞれの回路には85kHzの共振周波数に



相当する共振容量と、コイル抵抗(実測値)を配置した。なお、シミュレーション結果は解析の一例として、送電コイルと第3共振系コイルの間隔が30cmの場合のみ示す。

図2-7に、送電距離がそれぞれ15cm及び24cm（第3共振系は送電コイルから30cmの距離に配置）の場合における各コイル電流の解析結果を示す（図中の青線及び赤線はそれぞれ送電コイル及び受電コイルを流れる電流を示す）。なお、比較のために、第3共振系がない場合も示す。図から第3共振系がない場合には、送電コイルの電流に対して90°の位相遅れで受電コイルの電流が流れることが分かる。これに対して、第3共振系がある場合は、上記位相が送電距離15cmでは不安定に変化し、24cmでは180°となった。このような位相変化は第3共振系の磁氣的結合がもたらすものと考えられ^[3]、無線給電の特性を左右する。受電コイルの位置によって磁氣的な結合状態が変わるため、その制御性は良くないことが予想されるが、一方で、本研究で進めている方法、即ち送電コイルにて自励発振を行い、受電コイルにおいても受電した電流位相により同期整流を行う方法によれば、高効率の伝送を維持できると考えられる。



(iv) 簡易測定セットによる測定結果

シミュレーションによる伝送特性結果を確認するために、簡易測定セットを用いて実測を試みた。送電コイル及び第3共振系コイルは同じものを用い、表1-1の構成④の

コイル図面を元にして作製した。コイルにはソフトフェライト（比透磁率2400、厚さ1mm）及びアルミシールド（厚さ2mm）を付加した（以下、送電コイルモジュール及び第3共振系モジュールと呼ぶ）。また、受電コイルに関しては、表1-1の構成①のコイル図面を元にコイルのみ（モジュール化なし）を作製して用いた。送電コイルモジュールと第3共振系モジュールのインダクタンス測定値は141 μ H、受電コイルは68 μ Hであり、共振周波数が85kHzになるように直列接続する共振コンデンサ容量を決めた。なお、共振コンデンサは共振電圧が高まった際にも破壊されないために耐圧が1kV以上になるように多直化し基板化し、また第3共振系の共振周波数を変えるために基板を複数種類用意した。

図2-8に簡易測定セットでの測定状況を示す。本簡易測定セットの測定では、構造上、受電コイルと共振コンデンサ等を水中に入れることができないため、海水を入れたポリタンク（幅約12.5cm及び15cm）を送電コイルモジュールと第3共振系モジュールの間（約30cm）に置き、その隙間に受電コイルを挿入することにより、シミュレーションとほぼ同等な構成にして実測確認を行った。なお、実施項目①(図1-3-(a) (b) (c))の実測と同様に、海水は(株)カイスイマレン社製の人工海水マリンソルトを水道水に溶かして、濃度3.7%、導電率5.5.S/mとした。



図2-8 簡易測定セットによる第3共振系測定

図2-9-(a) (b)に送電距離15cmの総合効率と送電電力の周波数特性を、図2-9-(c) (d)に送電距離25cmの総合効率と送電電力の周波数特性を示す。ここで、送電距離15cmの測定の場合には受電コイルを挟んで両側に幅15cmの海水入りポリタンクを配置し、送電距離25cmの測定の場合には幅12.5cmの海水入りポリタンクを2段積みしたものを送

受電コイル間に配置し、受電コイルと第3共振系コイルの間には5cm厚のタンクが準備できなかったためアクリル材等を配置した。なお、図において、送電電力とは簡易測定セットの入力電源の電力を指し、総合効率とは簡易測定セット全体（送電回路、送電コイル及び受電回路）の総合効率を指す。

図から送電距離15cmの場合には、第3共振系ありの方が総合効率は狭帯域となること、第3共振系の共振周波数を上げるに従い広帯域化することが分かった。一方、送電電力に関しては、第3共振系の有無によって帯域に大きな差は見られなかった。また、送電距離25cmの場合には、第3共振系ありの方が総合効率は向上し広帯域化されること、送電電力も広帯域化されることが分かった。即ち、総合効率に関しては、実施項目②(iii)のシミュレーションの結果と同等の傾向が得られており、第3共振系による無線給電特性の向上（広帯域化）が実測でも確認できた。なお、総合効率に関してシミュレーション結果より実測値が低いのは、実測では回路、配線、コネクタ等の電気抵抗による損失が余計に加わるためである。また、送電電力に関してシミュレーション結果より実測値が低いのは、実測に用いた簡易測定セットには回路の損失が発生しており、更には電力制限をかけているためである。

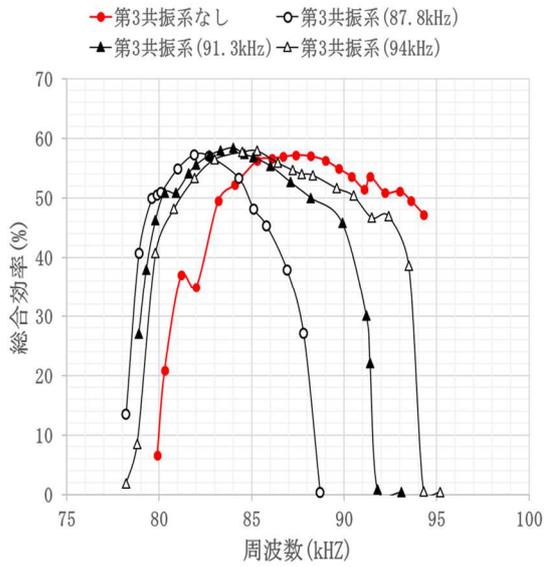


図2-9-(a) 総合効率の周波数特性
(送電距離15cm)

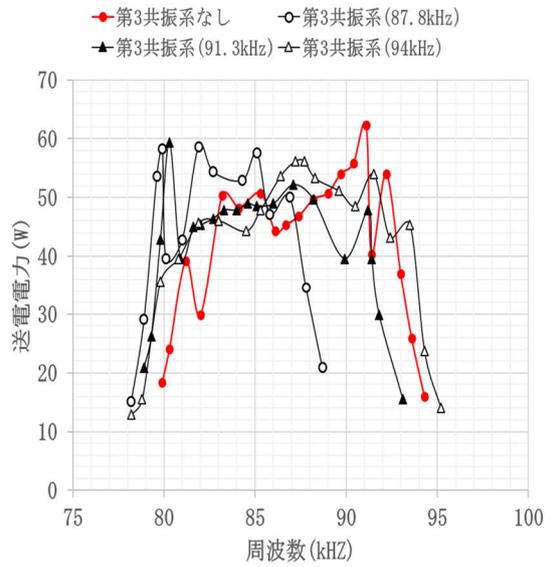


図2-9-(b) 送電電力の周波数特性
(送電距離15cm)

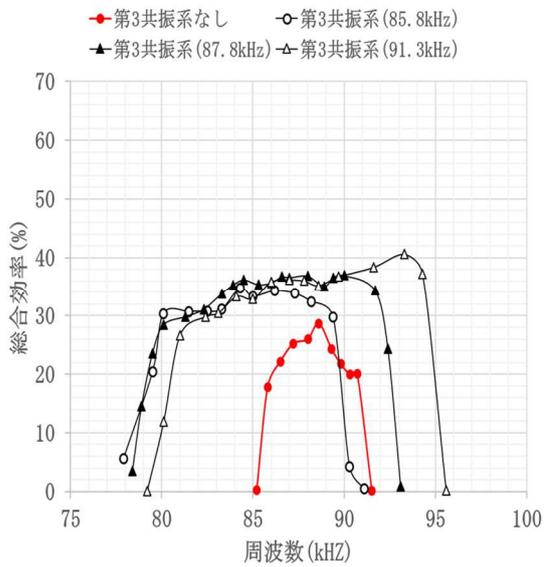


図2-9-(c) 総合効率の周波数特性
(送電距離25cm)

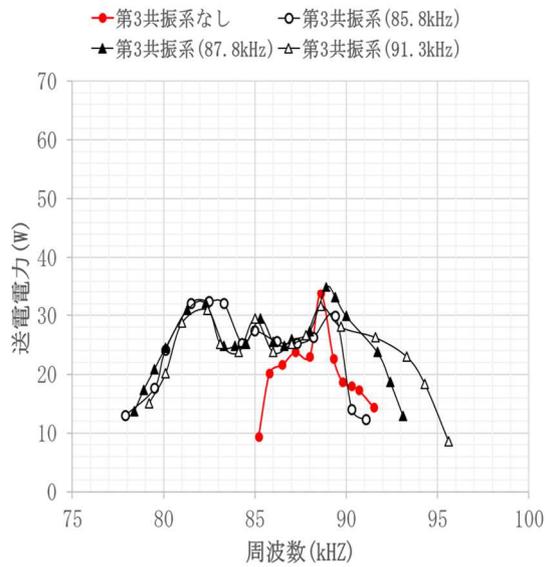


図2-9-(d) 送電電力の周波数特性
(送電距離25cm)

(2) 真水及び海水(塩水)を介した高効率双方向無線給電の原理研究

実施項目③ 自励発振による発振トリガの原理的な活用に関する研究

本実施項目では、双方向での無線給電を高効率で行うため、送電側と受電側について回路シミュレーションを行い、原理確認機の試作に向けた原理構想の研究を行った。その結果、以下の研究成果が得られた。

- ・ 送電側の自励発振による高効率状態の維持の実現
回路シミュレーションにより、共振系の周波数特性が変化した時でも送電側の自励発振により周波数追従を行うことができ、送電側電源から受電側負荷への無線電力伝送の高効率状態の維持ができることを確認した。
- ・ 受電側の同期整流による整流部の高効率化の実現
受電側LC共振器を流れる電流の検出を使った同期整流を行い、同期整流動作を行わなかった時のボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流と比較して、受電回路の高効率な動作を実現した。
- ・ 双方向無線給電の検討
双方向無線給電の検討として、送電側と受電側をほぼ同一回路にすることで送電側と受電側の容易な入れ替えを可能とした。
- ・ 負荷変動や結合係数の変化の確認
受電側負荷の変動と送電受電間の結合係数の変化による双方向無線給電の動作への影響について確認し、それぞれに変動があった場合でも自励発振動作と同期整流動作が問題なく動作することを確認した。
- ・ 第3共振系を導入した時の自励発振動作の確認
回路シミュレーションにより、第3共振系を含む共振系においても自励発振動作が可能であることを確認した。

以下に順を追って説明する。

(i) 自励発振回路の検討

(i-1) 無線給電機の基本的な構成

図3-1に磁界共鳴型無線給電機の基本的な構成を示す。送電側は直流電源をインバータで交流電源に変換し、送電側のLC共振器を駆動し交流磁界を発生させる。受電側のLC共振器は交流磁界を受け取り、整流器を通して負荷に直流電力を与える。この構成から、より高効率な送受電を行うため、送電側の自励発振回路と受電側の同期整流回路の検討を行った。

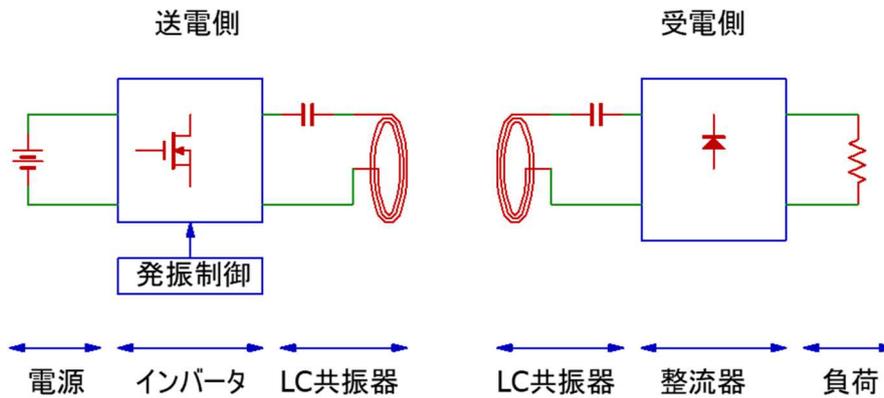


図3-1 無線給電機の基本的な構成

(i-2) 自励発振回路

磁界共鳴無線給電では、送電側のLC共振器と受電側のLC共振器の共振周波数 $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ と送電周波数を一致させることで、おおむね高効率の電力伝送を行うことができる。図3-2はLC共振器に発振器が共振周波数の矩形波を加える回路図、図3-3は共振周波数の発振器の発振波形とLC共振器を流れる電流のグラフである。このようにLC共振器と発振器が共振状態にある時、発振器のスイッチングとLC共振器を流れる電流の位相が一致し、発振器のスイッチングと電流のゼロクロス時点が一致する。

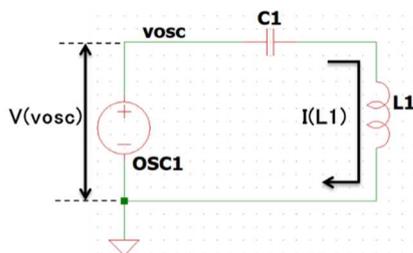


図3-2 LC共振器と発振器

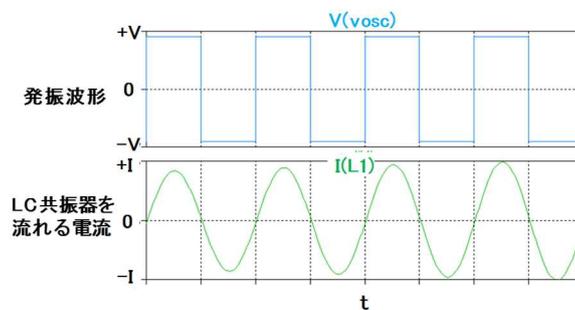


図3-3 発振波形とLC共振器を流れる電流(共振状態)

LC共振器の共振周波数が変化しない場合は発振周波数が固定のまま問題がないが、部品のばらつきや温度による変化、LC共振器周辺に配置された磁性体の影響によるコイルインダクタンスの変化、送電側共振器と受電側共振器の相互作用によるインダクタンスの変化などにより、共振周波数が変化するため、共振周波数の変化に応じて送電周波数を追従させる必要がある。特に、移動体に対する無線給電では位置や周辺環境の変化を想定する必要がある。

LC共振器の共振周波数に送電周波数を追従させる一方法として、LC共振器を流れる電流を電流センサで取り込み、必要に応じて増幅・フィルターを行い、電流の正負判

定による位相検出を使い、その情報でインバータのスイッチング制御を行うことにより、共振状態を継続する自励発振を行うことができる。増幅は電流センサの出力が過小な時に信号レベルを上げて位相検出に必要な信号品質にする働きを行う。フィルターは電流センサの出力がインバータのスイッチングノイズ等により位相検出に悪影響がある時に、ノイズを減らす働きを行う。図3-4に自励発振回路の概略ブロック図を示す。

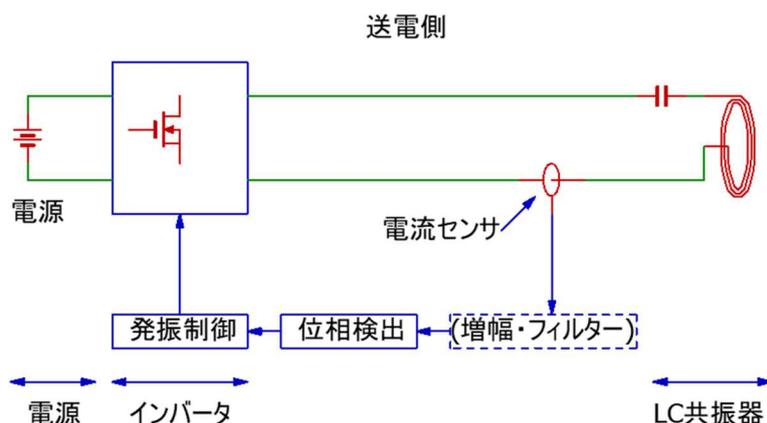


図3-4 自励発振回路の概略ブロック図

このブロック図を元に、アナログ・デバイス社製LTspiceで回路シミュレーションを行えるように構成した自励発振回路を図3-5に示す。この自励発振回路では、LC共振器を流れる電流をシャント抵抗で検出し、コンパレータで電流の極性を判定し2値信号に変換し、自励発振波形を作る。この時、電源からグラウンドにつながる上下2つのMOSFETが同時にオンになり過大な貫通電流が流れて回路の損傷などをもたらさないように、上下のMOSFETが同時にオンにならないように自励発振波形にデッドタイムをスイッチング毎に挿入し、デッドタイムを挿入した自励発振波形がMOSFETをスイッチングできる電圧に変換するゲートドライバーへ供給し、フルブリッジインバータ回路のMOSFETをスイッチングする。この際、電源投入後の自励発振の開始を確実にするため、動作開始後0.5msは85kHzの他励発振で動作を行い、その後自励発振に切替える動作とした。

増幅・フィルターについては、電流センサの出力が小さく、更にインバータのスイッチングノイズが発生することを想定して、増幅率2倍(デシベル表記で6dB)、フィルター出力が3dB減衰するカットオフ周波数85kHzのローパスフィルタを検討した。図3-6に増幅・フィルター回路の回路図と周波数特性を示す。

増幅・フィルターの要否と、必要な時は増幅率とカットオフ周波数の検討は、自励発振回路のシミュレーションの動作を確認して行うこととした。その結果、シャント抵抗の出力が位相検出を正しく行い自励発振動作が行えていることから、今回の検討では増幅・フィルターは不要と判断した。

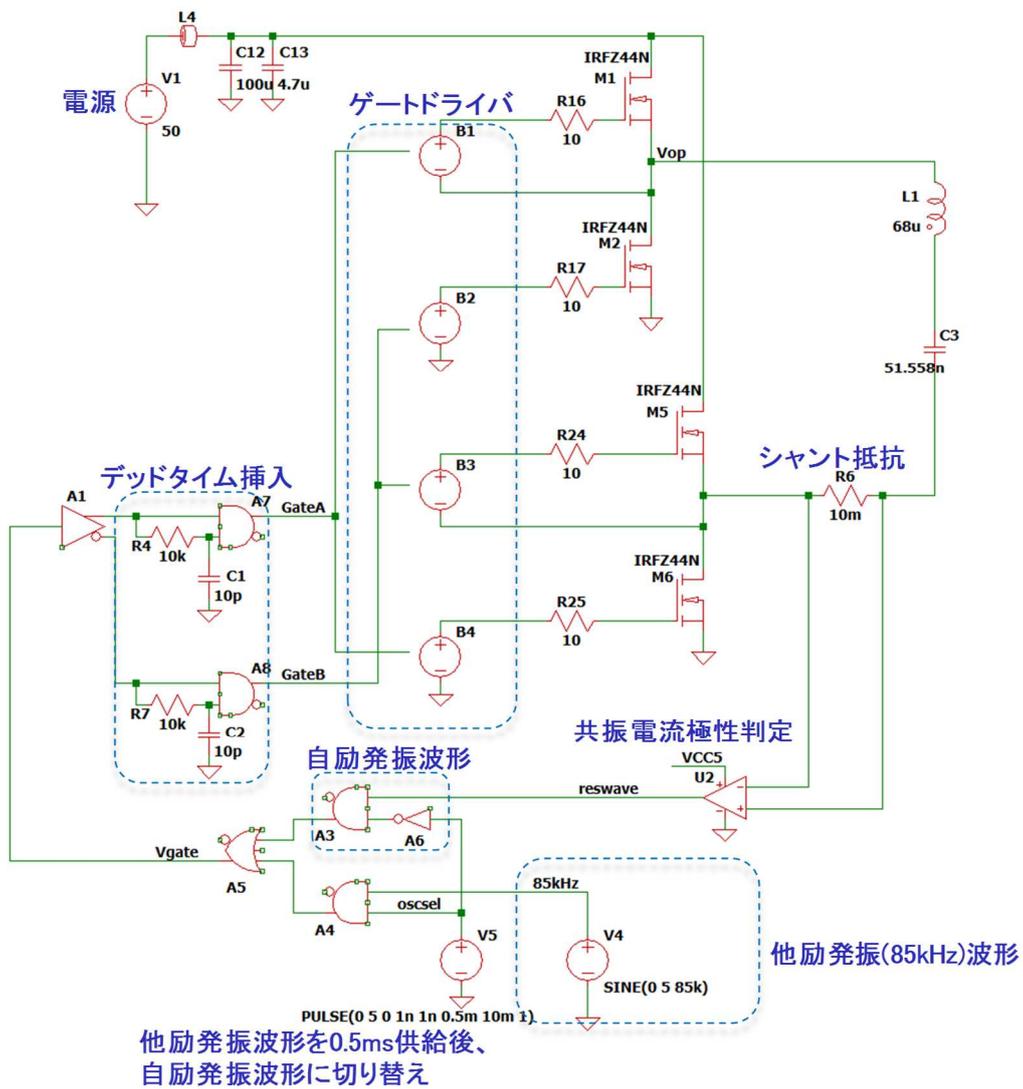


図3-5 自動発振回路の回路図

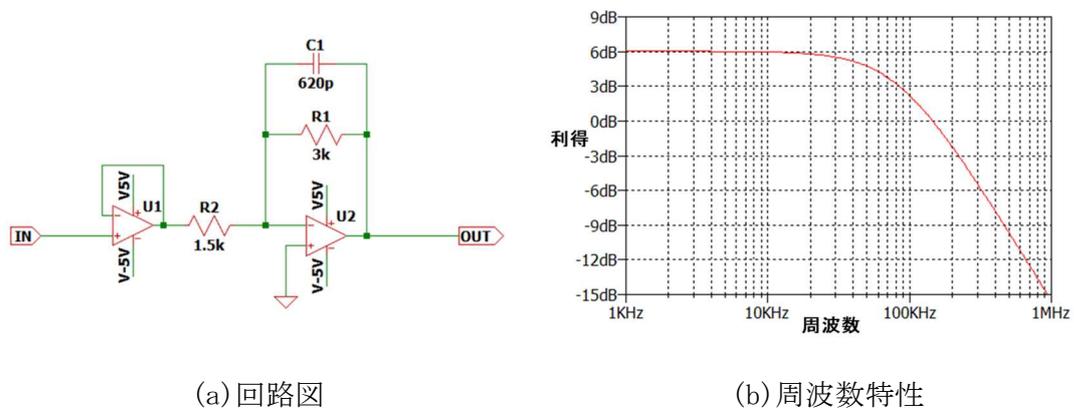


図3-6 増幅・フィルター回路の回路図と周波数特性

この自励発振回路を使い自励発振と他励発振(固定周波数発振)のシミュレーションを行い、総合効率の比較を行った。ここで、総合効率とは、「受電電力(受電側負荷電力) / 送電電力(送電側電源電力)」で計算される値で、無線給電システム全体の効率を示す。総合効率は「コイル間伝送効率×送電側回路効率×受電側回路効率」の関係があり、送電側回路効率と受電側回路効率は100%未満であるため、「総合効率<伝送効率」の関係が成立する。

送電側と受電側の共振器の共振周波数を、85kHzを中心に±10%変化させた時に、送電側を自励発振回路で構成した時と85kHz固定の他励発振回路で構成した時の総合効率の比較、及び自励発振周波数の変化を図3-7に示す。自励発振周波数はLC共振器の共振周波数に完全には一致しないものの追従した周波数で発振した。また、総合効率については、他励発振回路ではLC共振器の共振周波数が±5%以上の時に効率が大きく低下しているが、自励発振回路ではLC共振器の共振周波数が±10%変化しても総合効率の大きな低下は見られなかった。

以上のように、自励発振回路によってLC共振器の共振周波数の変動があっても発振周波数が追従することで、総合効率の低下を防げることが確認できた。

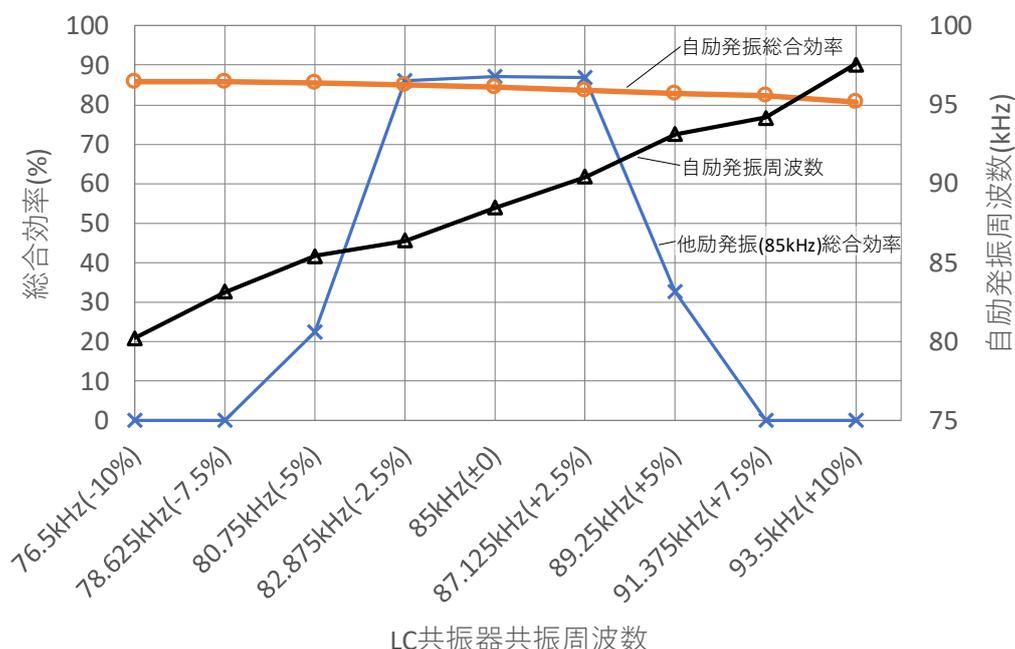


図3-7 LC共振周波数の変動に対する自励/他励発振による総合効率と自励発振周波数

(ii) 同期整流回路の検討

受電側における整流の高効率化の検討として、同期整流回路の検討を行った。

受電側が受け取った交流電力を直流電力に変換する時に、図3-8のダイオードブリッジ回路による整流が広く使われている。これに対し、図3-9の同期整流回路では整流す

る電流を流すMOSFETだけをオン制御することにより、整流での損失が低い、より高効率な整流を行うことができる。更に、MOSFETには構造上ボディダイオードが図3-9に図示した状態に形成されているため、各MOSFETの制御を行わずにオフにした時には、ボディダイオードによってダイオードブリッジ回路と同等の整流が行われる。

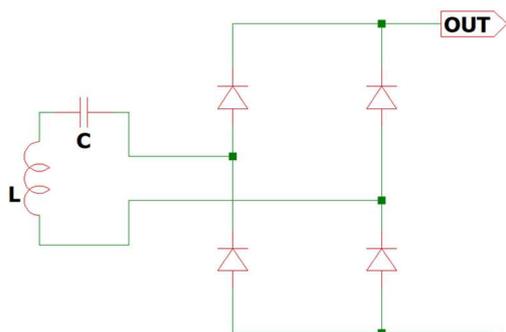


図3-8 ダイオードブリッジ回路

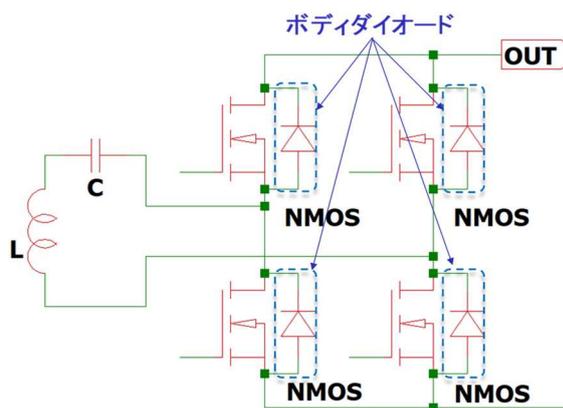


図3-9 MOSFETを使った整流回路

スイッチング電源回路では同一機器の中でインバータと同期整流を動作させるため、インバータのスイッチング情報を使って同期整流回路のMOSFETのオンオフを制御している。それに対し、無線給電の受電側は送電側のスイッチング情報を得ることが困難であるため、受電側単体で同期整流に使うMOSFETのオンオフを制御する必要がある。

次に、MOSFETのスイッチング制御方法として、ボディダイオード電流検出による同期整流回路とLC共振器を流れる電流検出による同期整流回路について検討する。

(ii-1) ボディダイオード電流検出による同期整流回路

受電側で同期整流回路のMOSFETのオンオフを制御するための方法として、MOSFETのボディダイオードを流れる電流を検出し、それを同期整流の制御に使う構成を検討した。

前述のとおり、MOSFETにはボディダイオードが存在するので、送電側のフルブリッジ回路と同じ回路を受電側に使った場合、各MOSFETをオフにした状態でボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流が行われる。この時、ボディダイオードを流れる電流であるMOSFETのドレイン電流を検出し、MOSFETのゲートをオンにする構成で同期整流を行うことができる。受電側のLC共振器で受電した交流電力の代用として、ここでは85kHzの正弦波の電源を配置した。図3-10に、この構成による同期整流の回路図を示す。

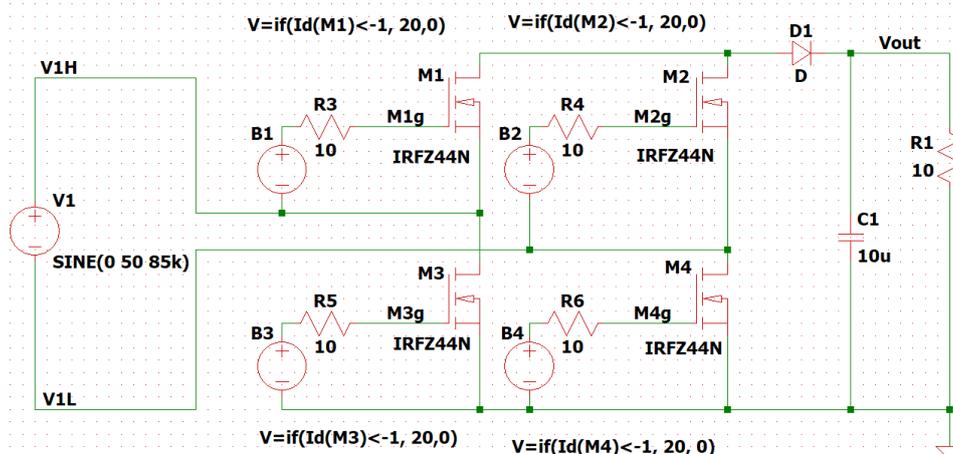


図3-10 ボディダイオード電流検出による同期整流回路

この回路構成で各MOSFETをオフにしたボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流とMOSFETの制御を行ったボディダイオード電流検出による同期整流の受電側整流回路効率を比較した結果を表3-1に示す。受電側整流回路効率は電源V1が供給した電力に対する抵抗負荷R1で消費した電力で計算した。ボディダイオード電流検出による同期整流によりボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流と比較して受電側整流回路効率が向上したことが確認された。

表3-1 ボディダイオード電流検出による同期整流の受電側整流回路効率

方式	受電側整流回路効率
ボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流	94.53%
ボディダイオード電流検出による同期整流	96.25%

(ii-2) LC共振器を流れる電流検出による同期整流回路

受電側で同期整流回路のMOSFETのオンオフを制御するための別方法として、送電側の自励発振回路とほぼ同一回路となる、LC共振器を流れる電流検出による同期整流回路を検討した。

この同期整流回路は、自励発振回路とほぼ同様に、LC共振器を流れる電流をシャント抵抗で検出し、コンパレータで電流の極性を判定し2値信号に変換することで同期整流制御波形を作り、電源からグラウンドにつながる上下2つのMOSFETが同時にオンになり過大な貫通電流が流れてLC共振器が受電した電力の損失などをもたらさないようにデッドタイム挿入を行い、デッドタイムを挿入した同期整流制御波形をゲートドライバーへ供給してMOSFETをスイッチングする。ここで、自励発振回路との違いはインバータによりMOSFETをスイッチングする極性が逆になることである。

図3-11にこの構成による同期整流の回路図を示す。丸印をつけたインバータで極性を逆にしている点が、送電側自励発振回路と異なる。また、同期整流制御波形と85kHzの発振波形の切替を同期整流制御波形に固定することにより、85kHzの発振回路はスイッチングに利用しない構成となっている。

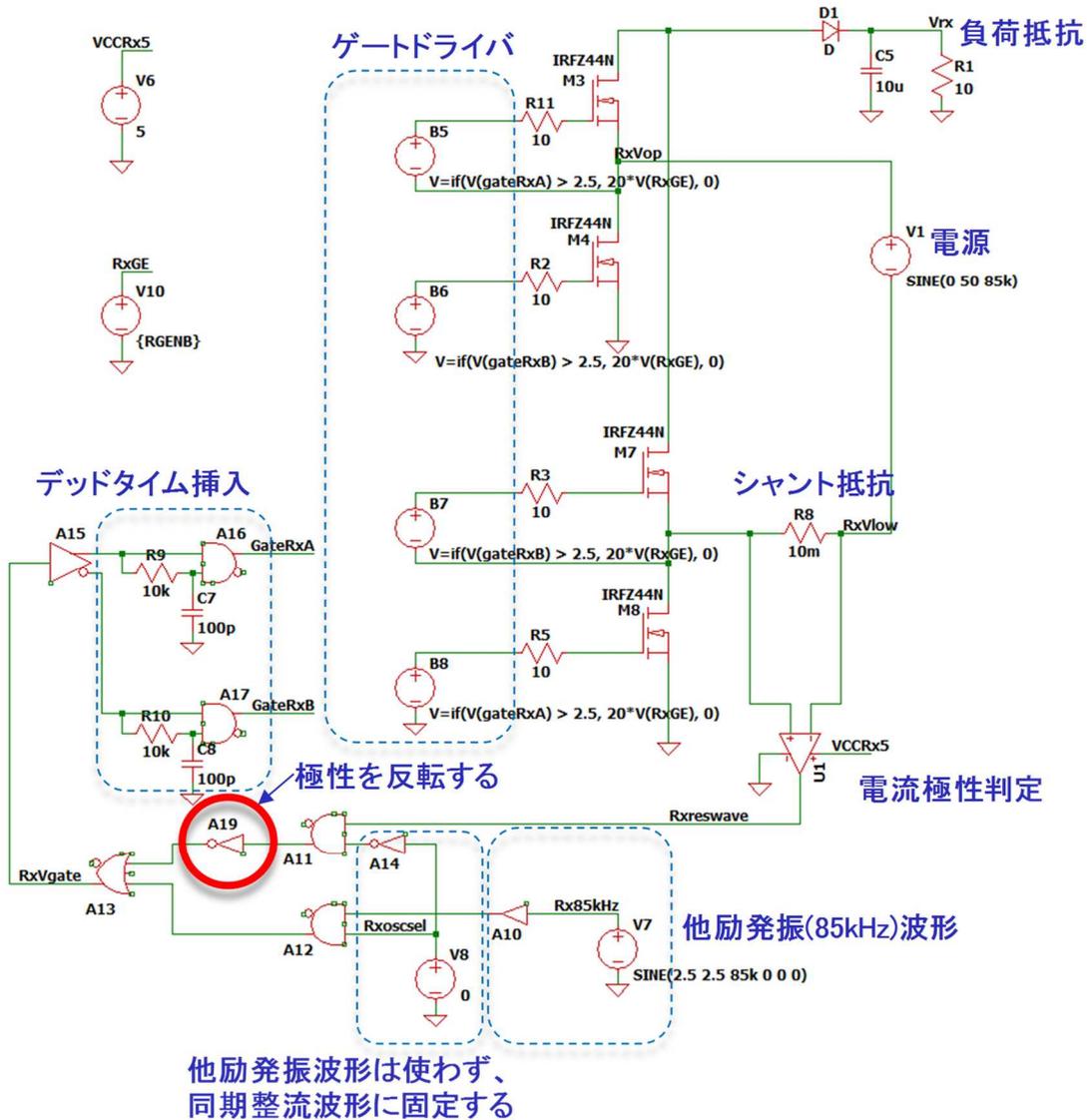


図3-11 LC共振器を流れる電流検出による同期整流回路

この回路構成で各MOSFETをオフにしたボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流とMOSFETの制御を行ったLC共振器を流れる電流検出による同期整流の受電側整流回路効率を比較した結果を表3-2に示す。受電側整流回路効率は、表3-1同様に電源V1が供給した電力に対する抵抗負荷R1で消費した電力で計算した。LC共振器を流れる電流検出による同期整流によりボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流と比較して受電側整流回路効率が向上したことが確認された。

表3-2 LC共振器を流れる電流検出による同期整流による受電側整流回路効率

方式	受電側整流回路効率
ボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流	94.14%
LC共振器を流れる電流検出による同期整流	96.38%

以上のように、ボディダイオード電流検出による同期整流回路とLC共振器を流れる電流検出による同期整流回路で、送電側のスイッチング情報を使わずに受電側の同期整流を行い、ボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流と比較して受電側整流回路効率が向上したことが確認された。本研究では双方向無線給電を対象としているため、送電側自励発振回路とほぼ同一回路で受電側同期整流回路を実現でき、回路の規模やコストの面でLC共振器を流れる電流検出による同期整流回路を受電側に使うことが望ましい。

次に、送電側に自励発振回路、受電側にLC共振器を流れる電流検出を使った双方向無線給電機の検討を行う。

(iii) 双方向無線給電機の検討

双方向無線給電機として、送電側及び受電側にフルブリッジ回路を使い、送電側は固定周波数で送電を行い、受電側はMOSFETのボディダイオードを使ったダイオードブリッジ整流を行う構成が公知となっている。^[4]

本研究では、同様に送電側及び受電側にフルブリッジ回路を使うが、これまでの検討結果を反映し、更に送電側の自励発振動作と受電側のLC共振器を流れる電流検出による同期整流動作を行うことで、共振周波数がずれた場合における周波数の追従と受電側における整流効率の向上を図る。図3-12に、この構成による双方向無線給電機の回路図を示す。送電側と受電側がほぼ同一回路となっているため、送電側と受電側の容易な入れ替えが可能となっている。

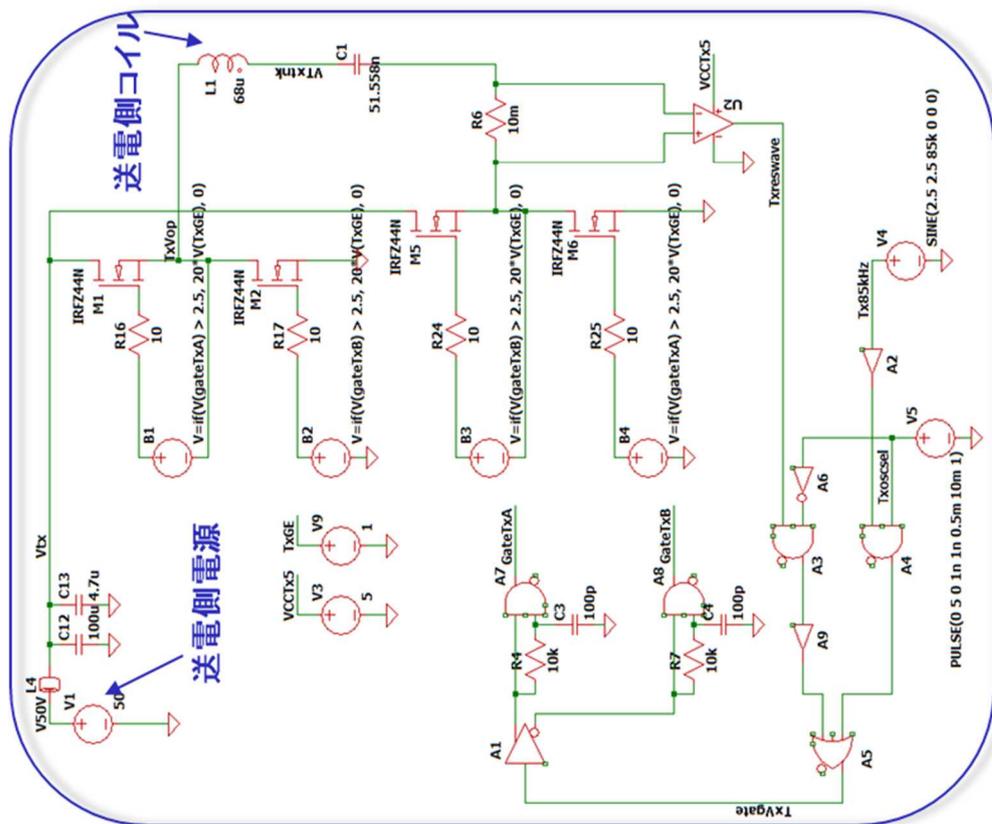
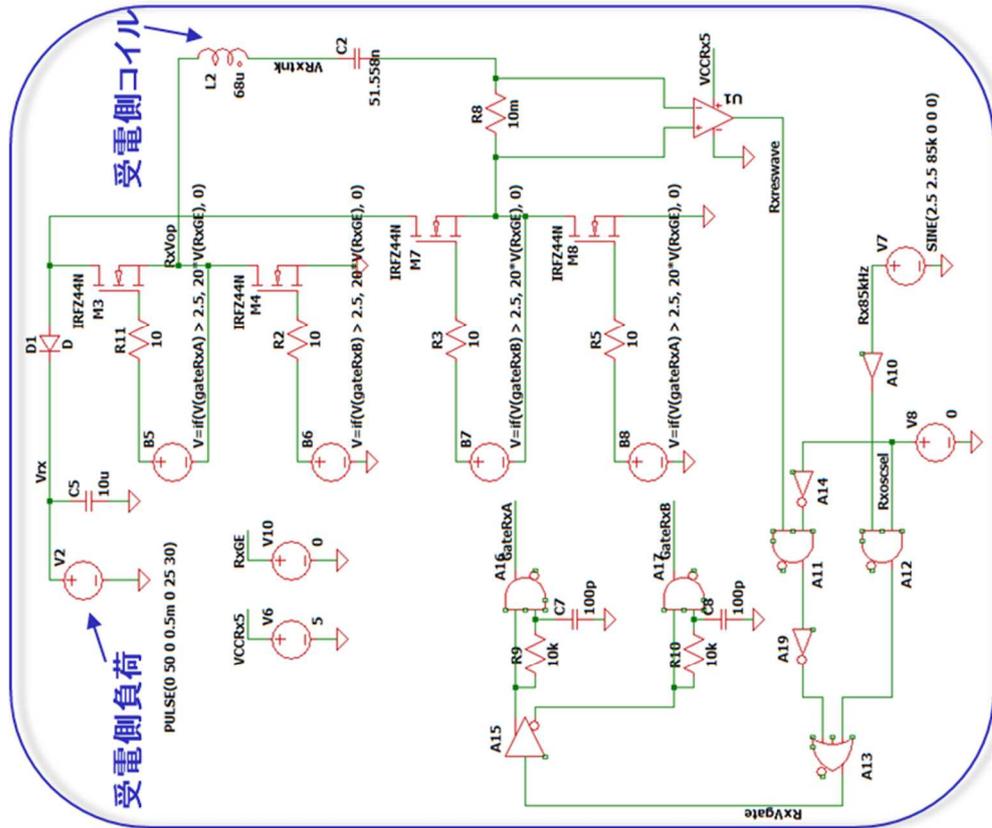


図3-12 自励発振回路と同期整流回路の組み合わせによる双方向無線給電機

無線給電機で水中移動体の充電機の充電を行う時、送電側及び受電側の充電機の充電状態により送電側の電源電圧と受電側の負荷電圧の相対的な電圧の変動及び、送電距離や周辺環境の変化で結合係数の変化が考えられる。今後、この回路の組み合わせにより双方向無線充電を実現する上で、受電側の負荷変動や結合係数の変化による各動作への影響について確認を行った。

(iii-1) 受電負荷の変化

磁界共鳴型無線給電では、送電側の電源電圧と受電側の負荷電圧をほぼ同一電圧にすると高効率の無線給電が行われる。しかし、送電側及び受電側を充電機で運用した場合には送電側と受電側の電圧が変動する。ここで、受電負荷が変化した時に各動作に不具合が出ないかを確認するため、図3-12の回路の受電側の負荷電圧を変化させて総合効率を解析した。図3-13に、送電側の電源電圧を50Vとし、受電側の負荷電圧を12.5V(送電側の電源電圧の1/4)から200V(同4倍)まで変化させた場合の総合効率の変化を示す。結合係数 k については、実施項目①の解析結果と距離の変動を考慮し、 $k=0.1$ 及び 0.3 とした。

図3-13により総合効率の変化が少なく送受電動作が行われたことから、受電側の負荷変動によって各動作に不具合が出ないことを確認した。

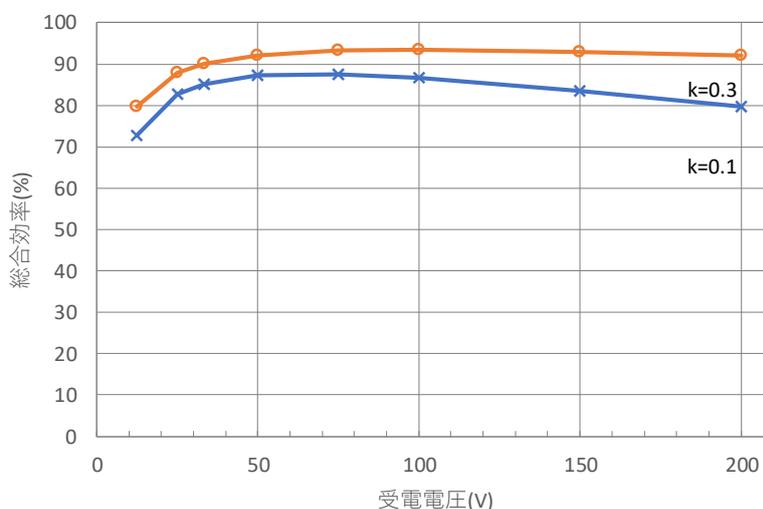


図3-13 受電側の負荷変動に対する総合効率の変化 (送電側の電源電圧50V)

(iii-2) 結合係数の変化

移動体間での無線給電のように、送電側と受電側の距離が変化した場合、送受電コイル間の結合係数が変化することになる。結合係数が変化した時に、各動作に不具合が出ないかを確認するため、図3-12の回路の結合係数を変化させて総合効率を解析した。図3-14に、結合係数を0.05から0.9まで変化させた場合の総合効率の変化を示す。

図3-14により総合効率の変化が少なく送受電動作が行われたことから、結合係数の変化によって各動作に不具合が出ないことを確認した。

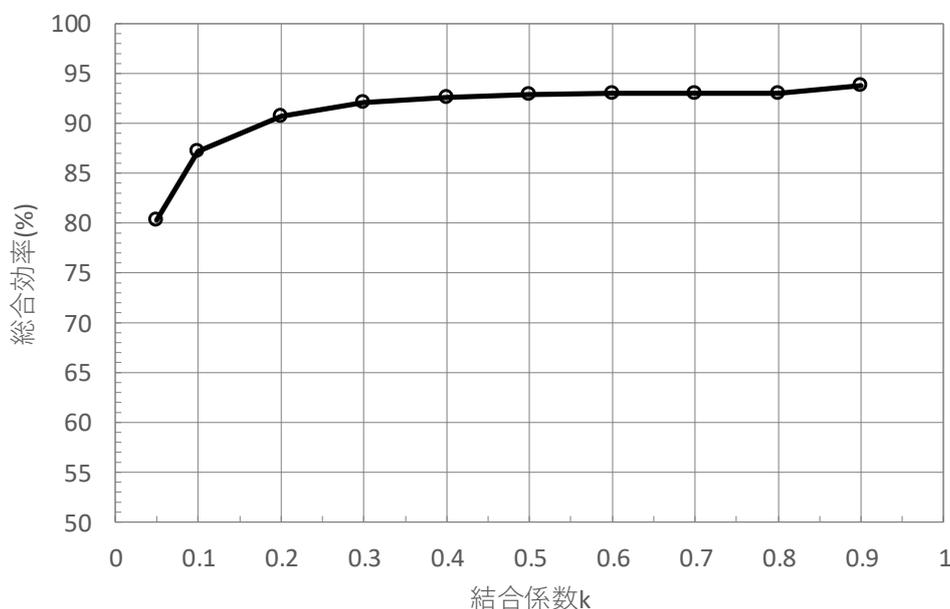


図3-14 結合係数の変化に対する総合効率の変化

以上から、送電側の自励発振回路と受電側の同期整流回路を組み合わせた双方向無線給電機が受電負荷や結合係数の変化による不具合がなく動作することを回路シミュレーションで示すことができた。

(iv) 第3共振系を導入した時の自励発振動作の確認

第3共振系に関して、実施項目②で行った磁場・回路連成解析の結果を参考にして、回路シミュレーションでどのような自励発振動作になるか試行を行った。

図3-15に第3共振系ありとなしのそれぞれの送電コイルと受電コイルの電流を示す。図3-15(a)の第3共振系ありの時に送受電が継続していることから、自励発振動作が可能であることを確認した。

一方で、図3-15(a)の第3共振系ありと(b)の第3共振系なしの送電コイル電流と受電コイル電流の位相関係に変化がない結果が得られ、実施項目②で行った磁場・回路連成解析で得た結果と異なるものとなった。これは、磁場・回路連成解析では第3共振系の物理的配置、即ち送電共振系、受電共振系、及び第3共振系が直列で並ぶ配置を含めて電気及び磁気の解析可能であるのに対して、回路シミュレーションではコイル間の結合係数によってしか磁気的な解析が入れられないことによると考えられる。

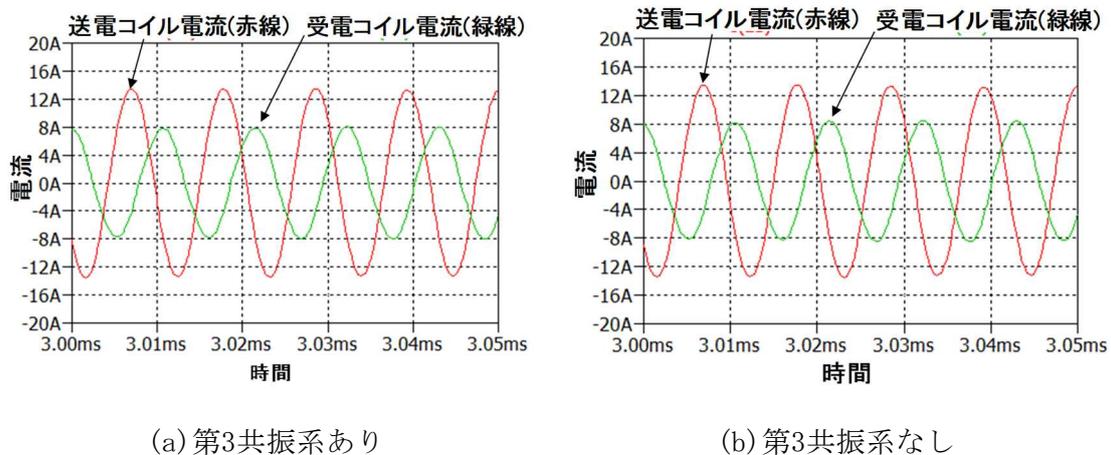


図3-15 第3共振系の導入による電流位相変化

実施項目④ 高効率双方向無線給電へ適用するための原理確認機の作製

本実施項目では、実施項目①から③で行ったシミュレーション等による解析とアイデア創出活動を元に原理確認機の作製を行い、機能と性能を確認した。その結果、以下の研究成果が得られた。

- 原理確認機の作製
フルブリッジ回路、制御回路、電流位相検出回路、及びLC共振器を組み合わせ、送電側と受電側両方に対応した原理確認機を作製した。
- 原理確認機の機能確認
大気中での機能確認により、試作した原理確認機において送電側の自励発振動作と受電側の同期整流動作が適切に機能していることを確認した。
- 原理確認機の性能評価
水(水道水)及び海水(人工海水、濃度3.7%、導電率5.5S/m)を介しての無線給電を行い、送電距離、無線給電パワー及び伝送効率について表4-1の結果を得た。これにより、目標性能を達成していることを確認した。

表4-1 原理確認機の評価結果

項目	目標性能	評価結果
送電距離	30cm以上	30.5cm
無線給電パワー	200W以上 ^{※1}	201W以上261W以下 ^{※2} (水) 200W以上263W以下 ^{※2} (海水)
伝送効率 (水)	70%以上 ^{※3}	77.2% ^{※4}
伝送効率 (海水)	50%以上 ^{※3}	76.2% ^{※4}

- ※1 送電コイルからの出力電力。
- ※2 今回の測定構成上、「受電電力（受電側の直流電子負荷で消費される電力）以上送電電力（送電側の直流電源が供給する電力）以下」で表記。送電回路と受電回路が消費する電力を含むため、無線給電パワーはこの範囲となる。
- ※3 真水または海水(塩水)を介してのコイル間伝送効率（受電コイルの受信電力／送電コイルの出力電力）。
- ※4 受電電力／送電電力より算出した総合効率。コイル間伝送効率とともに回路効率を含む全体の効率で、「総合効率<コイル間伝送効率」の関係となる。

以下に順を追って説明する。

(i) 原理確認機の作製

実施項目①から③で得られた結果を、送電側の自励発振と受電側の同期整流の各機能を含む一連の動作において確認するために原理確認機を作製した。原理確認機の作製にあたっては、以下について考慮した。

- ・ 無線給電パワー200W以上を実現すること。
- ・ 高電圧対応のため、インバータ容量などを余裕のある定格とすること。
- ・ 送電側と受電側をほぼ同一回路で構成することで、双方向無線給電を可能とする構成とすること。
- ・ 高効率の無線給電を実現するため、送電側に移動体の位置変動による共振周波数の変化に対応可能な自励発振回路、及び受電側に整流回路効率を上げる同期整流回路を実現すること。
- ・ 共振電圧の異常等が発生した場合に安全に停止するための安全機構を搭載すること。
- ・ 今後の研究に役立てるため、制御回路は汎用性を持たせること。

以上の要求を満たすため、図4-1の概略ブロック図による原理確認機を設計し、機能性能を確認するため2台作製した。各ブロックの詳細を次に示す。

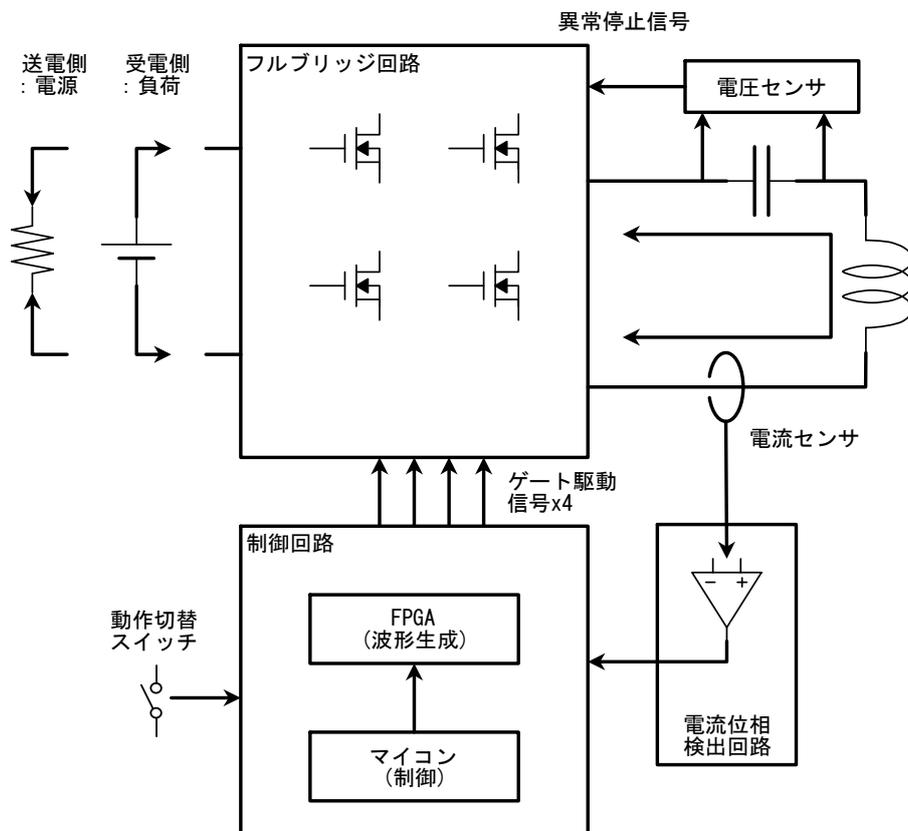


図4-1 原理確認機の概略ブロック図

(i-1) フルブリッジ回路

双方向無線給電を実現するため、送電側と受電側をほぼ同一回路とする必要がある。そのため、送電側で電源を高周波でスイッチングしてLC共振器へ電力供給する機能と、受電側でLC共振器が受電した高周波電力を整流する機能をほぼ同一回路で実現するためにフルブリッジ回路を使用した。その際、共振電圧が高電圧となること、及び将来の大電力での無線給電を想定して、表4-2に示す仕様のSiC MOSFETフルブリッジ回路を採用した。

表4-2 フルブリッジ回路仕様概略

項目	仕様	備考
インバータ定格容量	4kVA	単相インバータ200Vrms出力時
直流入力電圧範囲	0~400V	
直流入力電力定格	14.4A	4kW、DC280V時
交流出力電圧定格	20Arms	

(i-2) 制御回路

双方向無線給電における送受電切替、送電側の自励／他励発振及び受電側の同期整流等を制御する制御回路を作製した。電流位相検出回路から入力される共振電流の位相信号を元に85kHz前後の高速な波形生成を行い、高速で柔軟な給電制御を開発するため、制御回路は論理演算が高速なFPGAと、複雑なアルゴリズムを実施しFPGAの制御を行うマイコンの組み合わせで構成した。

図4-2に、制御回路の概略ブロック図を示す。

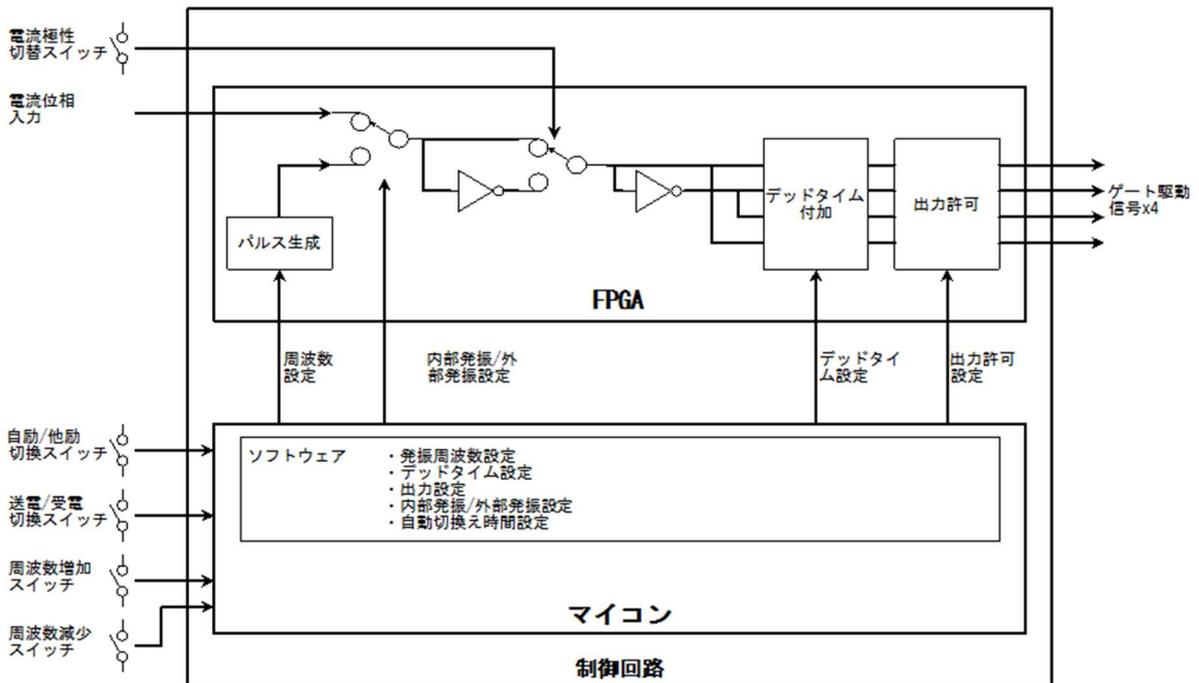


図4-2 制御回路の概略ブロック図

制御回路のFPGA及びマイコンに作り込んだ機能は以下の通り。

●FPGAの機能

- ・ パルス生成

送電側の他励発振動作及び、自励発振の生起に必要な共振電流波形を発生するためにマイコンから設定された周波数(50～200kHz)のパルス生成を行う。

- ・ 共振電流位相信号入力

外部(電流位相検出回路)からの2値の共振電流位相信号を入力する。

- ・ 内部発振/外部発振切替

マイコンからの設定により、パルス生成回路と電流位相信号入力を切替える。

- ・ 電流極性切替
外部入力（手動スイッチ）により、パルス生成回路の出力信号または外部発振（外部入力の電流位相信号）の極性を反転する。この切替えにより、送電側の自励発振動作と受電側の同期整流動作をほぼ同一回路で実現した。
- ・ デッドタイム付加及び出力許可
入力される信号を元に、フルブリッジ回路ゲート駆動用のデッドタイム付き4相PWM（パルス幅変調）信号の生成と停止を行う。

●マイコンの機能

- ・ 各種判定
外部入力（手動スイッチ）を元に、送電／受電の判定、送電時は自励発振／他励発振の判定を行う。
- ・ FPGAに対する設定
判定結果を元に、パルス生成の発振周波数、内部発振／外部発振切替、デッドタイム付加及び出力許可の制御を行う。
- ・ 状態のLED表示
送電側／受電側、内部発振／外部発振切替などの状態表示を行う。

図4-3に、マイコンに作り込んだ制御ソフトウェアの概略フローを示す。なお、状態のLED表示の機能は記載しない。主要動作の概略は以下のとおり。

(1)送電側・他励発振の時

- ・ 指定周波数（85kHz）の内部発振（パルス生成回路のパルス信号）を元に、出力を許可してゲート駆動信号を出力し、他励発振動作を行う。
- ・ 周波数増加スイッチ・周波数減少スイッチにより周波数の変更指示があった場合は周波数を変更する。これは周波数を変更した時の効率や電力などの特性を測定するために開発用の機能として用意した。

(2)送電側・自励発振の時

- ・ 自励発振の生起に必要な共振電流波形を発生させる動作として、他励発振と同様に85kHzの内部発振を元に、出力を許可してゲート駆動信号を出力する。
- ・ 指定時間（5ms）経過後に外部発振に切替え、共振電流位相信号に合わせて自励発振動作を行う。実施項目③の自励発振回路の検討では85kHzの発振動作を0.5msとしていたが、原理確認機では送電側の電源と受電側の直流電子負荷が安定動作に時間がかかることを考慮して5ms経過後に切替えることとした。

(3)受電側・同期整流の時

- ・ 外部発振（外部入力の共振電流位相信号）に切替え、出力を許可してゲート駆動信号の出力を行い、共振電流位相に合わせて同期整流動作を行う。

(4) 受電側・ダイオード整流の時

- 出力を禁止して、ゲート駆動信号の出力を停止する。この場合、フルブリッジ回路MOSFETのボディダイオードによるダイオード整流が行われる。この機能は整流効率の比較のために用意した。

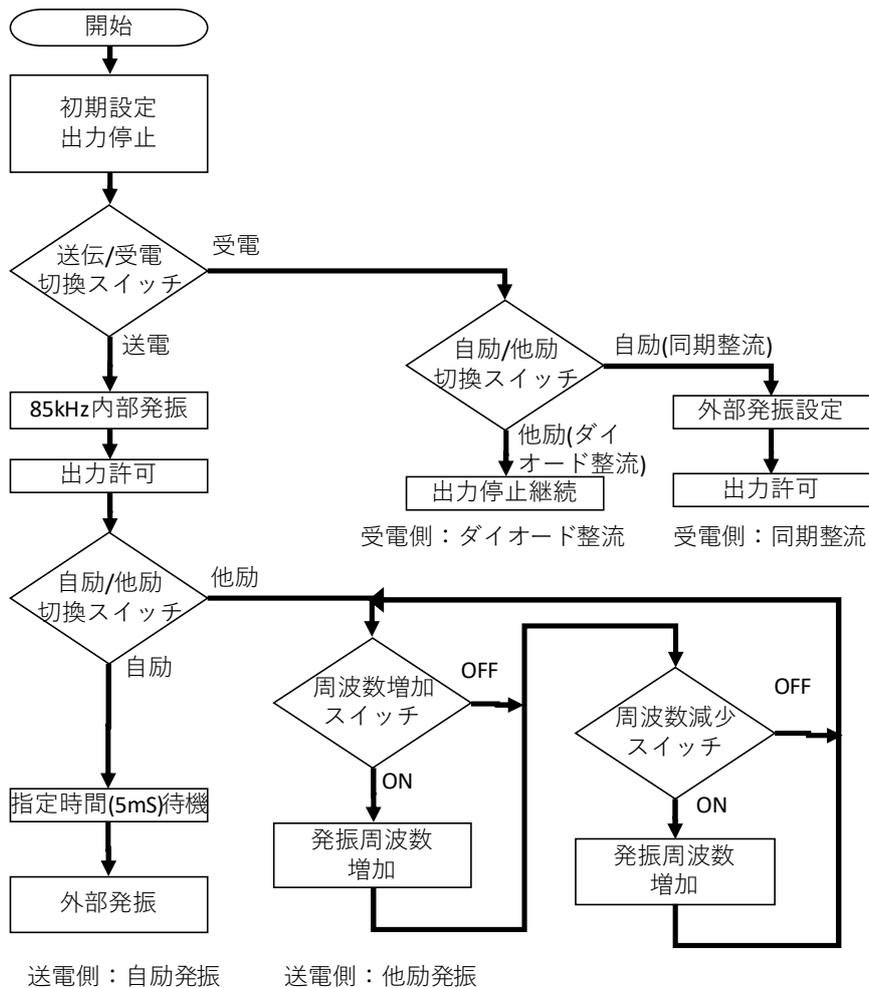


図4-3 制御ソフトウェアの概略フロー

(i-3) 電流位相検出回路

実施項目③の自励発振回路の検討では、送電側の自励発振信号を検出するための電流検出回路として、LC共振器を流れる共振電流の位相検出を使用した。双方向無線給電を実現するためには、送電側と受電側がほぼ同一回路であることが望ましいが、実施項目③の同期整流回路の検討でMOSFETをスイッチングする極性を反転させる必要があったため、制御回路のFPGAの電流極性切替で対応することとした。

共振電流位相検出には、ホール素子を用いた非接触電流プローブを使い、検出した共振電流位相信号に応じた2値の信号にするためにコンパレータを使用した。

研究当初、電流センサに入り込むノイズ等の影響を考慮していたが、コンパレータのみで共振電流位相検出が実現できたため、今回は必要な信号を取り出すフィルターや増幅回路の検討は必要なかった。今後ノイズなどの影響が無視できない時には、フィルターや増幅回路による処理や、信号をマイコンまたはFPGAに取り込みデジタル処理により、ノイズ低減処理を行う対応についても検討する。

(i-4) 安全機構

原理確認機の安全機構として、共振電圧監視による自動停止を導入した。磁界共鳴型無線給電では、LC共振器を高い共振状態で動作させるため、共振コイル及び共振コンデンサには高い電圧が発生する。特に受電側が存在しない時や遠方にある時には送電側の共振電圧が非常に高くなり、共振コンデンサなどの部品の破壊を起こすことがある。今回は、共振コンデンサ両端の電圧を直接検出して一定以上の電圧となった時に、マイコンとFPGAによる制御が介在することなく、直接フルブリッジ回路のゲート信号を遮断して送電を停止する安全機構とした。図4-4に安全機構の概略ブロック図を示す。

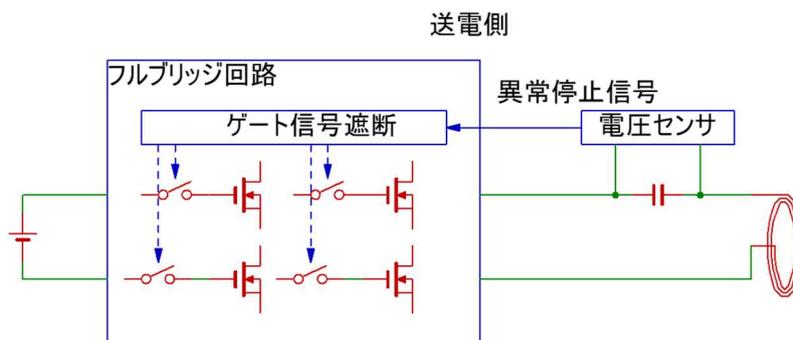


図4-4 安全機構の概略ブロック図

(ii) 原理確認機の機能確認

試作した原理確認機の自励発振回路及び同期整流回路の機能を確認するため、別途検証用に小型のコイルを用意し、表4-3に示す仕様のLC共振器を用いて、空気中で送電側の自励発振動作と受電側の同期整流動作を確認した。ここで、LC共振器は、共振コイル、コイルに付加したソフトフェライト（比透磁率2400、厚さ1mm）及び共振コンデンサからなる構成のものをいう。

図4-5に原理確認機の外観写真を、図4-6に原理確認機の機能確認概略図を示す。送電回路は図4-1及び図4-2で示した、電流センサ、電流位相検出回路、制御回路、フルブリッジ回路で構成され、制御スイッチの送電/受電切替スイッチを送電に、自励/他励切替スイッチを自励に設定した。受電回路も同じ構成で、制御スイッチの送電/受電切替スイッチを受電に設定した点が異なる。

表4-3 機能確認用のLC共振器仕様概略

項目	仕様
共振コイル径	260mm 8角形
共振コイルインダクタンス	94.37 μ H (@100kHz)
共振コンデンサ容量	35.91nF
共振コンデンサ耐圧	2400V @100kHz
共振周波数	86.46kHz

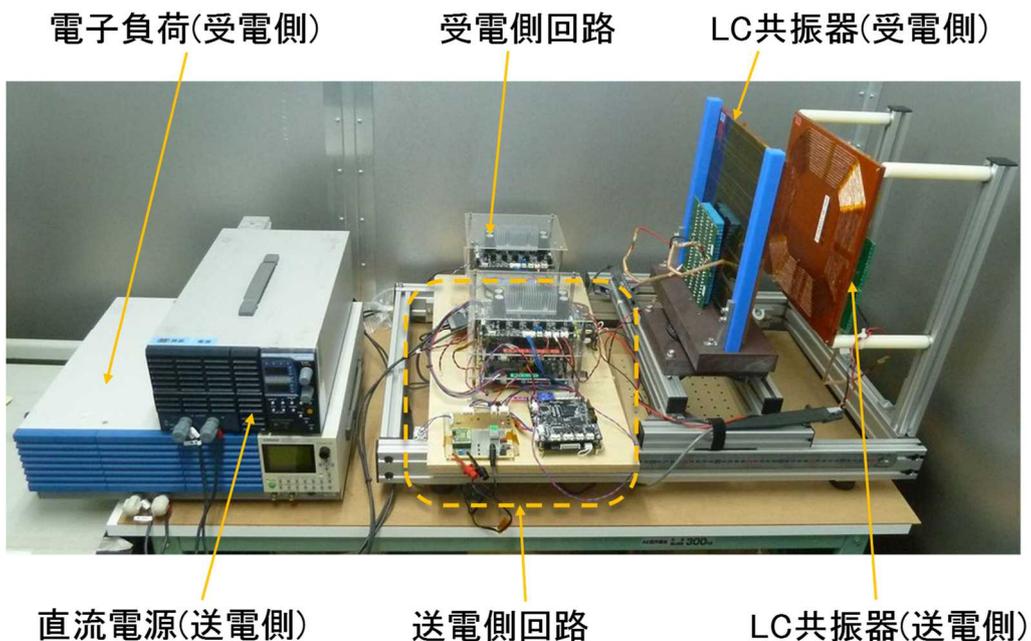


図4-5 原理確認機の外観写真

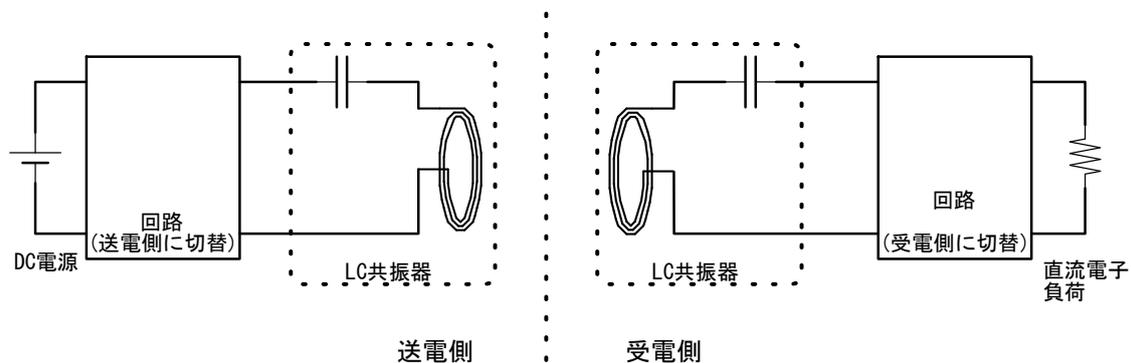


図4-6 機能確認概略図

(ii-1) 自励発振動作

送電側における自励発振動作について、他励発振動作との周波数特性比較により確認した。図4-7に、自励発振及び他励発振による総合効率と送信電力の結果を示す。ここで、自励発振は送電距離に依存する発振周波数での結果を、他励発振は外部発信器により周波数を0.5kHz間隔で81kHzから91kHzまで振った結果を示す。また、送電距離は15cm及び20cmとした。

図に示すように、他励発振動作においては送電距離が15cmと近い場合には比較的広い帯域の周波数特性が見られるものの、送電距離が20cmに離れると帯域が狭くなる結果となった。

次に、表4-4に、送電距離が15cm及び20cmの時の自励発振の発振周波数、総合効率及び送信電力の結果を示す。

表に示すように、自励発振動作においては送電距離15cmの時には自励発振周波数が83.85kHz、送電距離20cmの時には84.86kHzで動作し、他励発振動作で確認した周波数特性との比較により送信電力と総合効率が高い周波数で動作していることを確認した。

以上のように、周波数特性が変化した時でも送信電力が大きく総合効率も高い範囲にある周波数で自励発振動作することを確認し、自励発振動作が適切に行われていることを確認した。

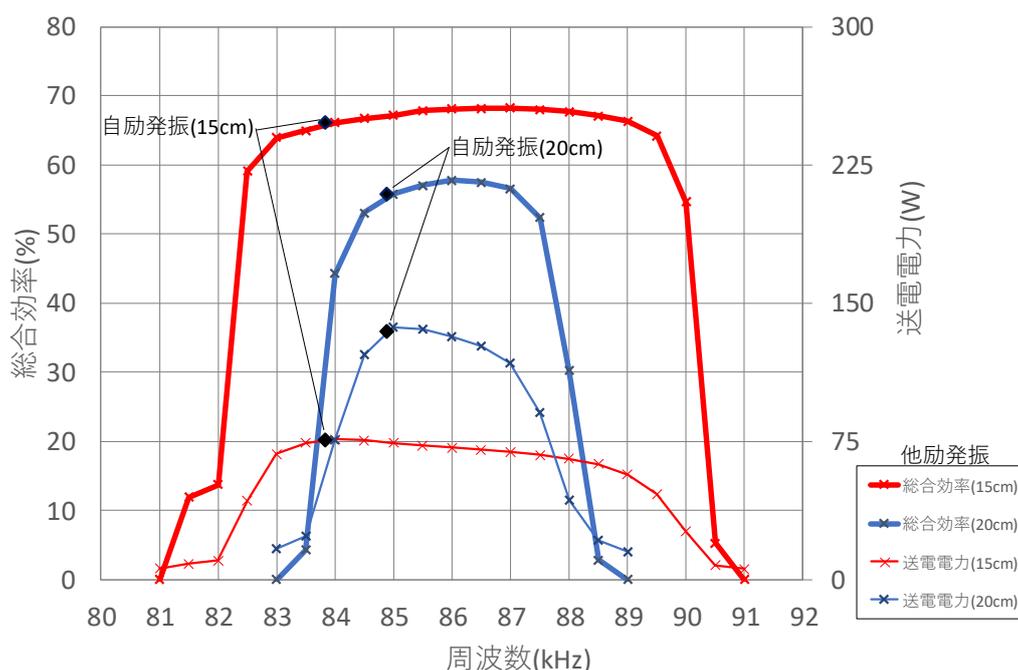


図4-7 自励発振動作と他励発振動作の周波数特性

表4-4 自励発振動作の確認結果

送電距離 (cm)	自励発振周波数 (kHz)	送電電力 (W)	受電電力 (W)	総合効率 (%)
15	83.85	75.4	49.8	66.0
20	84.86	134.6	74.9	55.6

(ii-2) 同期整流動作

受電側における同期整流動作について、ダイオード整流動作との総合効率と送電電力の比較により確認した。図4-8に、表4-3のLC共振器を使い、送電距離を15cm、他励発振周波数を85kHzとし、送電電圧（送電側の直流電源電圧）を5V間隔で10Vから45Vまで変化させた際の結果を示す。また、弊社知見から送電電圧と受電電圧を同じとすることで高効率となることから、各測定において、送電電圧である送電側の直流電源電圧と受電電圧である受電側の負荷（直流電子負荷）の電圧が同じとなるように直流電子負荷の電圧を設定した。

図に示すように、送電電力についてはほぼ同じであったが、総合効率については同期整流の方がダイオード整流に比べて高効率であった。また、同期整流の総合効率は送電電圧が変化してもほぼ安定して高効率であるのに対し、ダイオード整流では送電電圧が小さくなると効率が大きく低下している。これはMOSFETの損失の差によるもので、ダイオード整流の時に電流がMOSFETのボディダイオードを流れるために順方向電圧によって損失が発生することに因る。今回、原理確認機に使用したSiC MOSFETはバ

ンドギャップが広く、電流が1Aの時に順方向電圧が約1.8Vとなるため、この時のMOSFET 1個の損失は1.8Wとなる。それに対し、同期整流ではMOSFETのオン抵抗による損失が発生するが、同じSiC MOSFETで電流が1Aの時にオン抵抗が約33mΩであるため、この時の損失は33mWとダイオード整流と比較して非常に小さい。なお、送電電圧が大きくなると全体の損失の中でMOSFETでの損失が占める割合が小さくなるため、両者の効率の差は縮まることとなる。採用するMOSFETによって同期整流とダイオード整流の損失の差は異なるが、一般的に同期整流の方がダイオード整流よりも損失が小さい。

以上のように、原理確認機で同期整流動作が適切に行われていることを確認した。

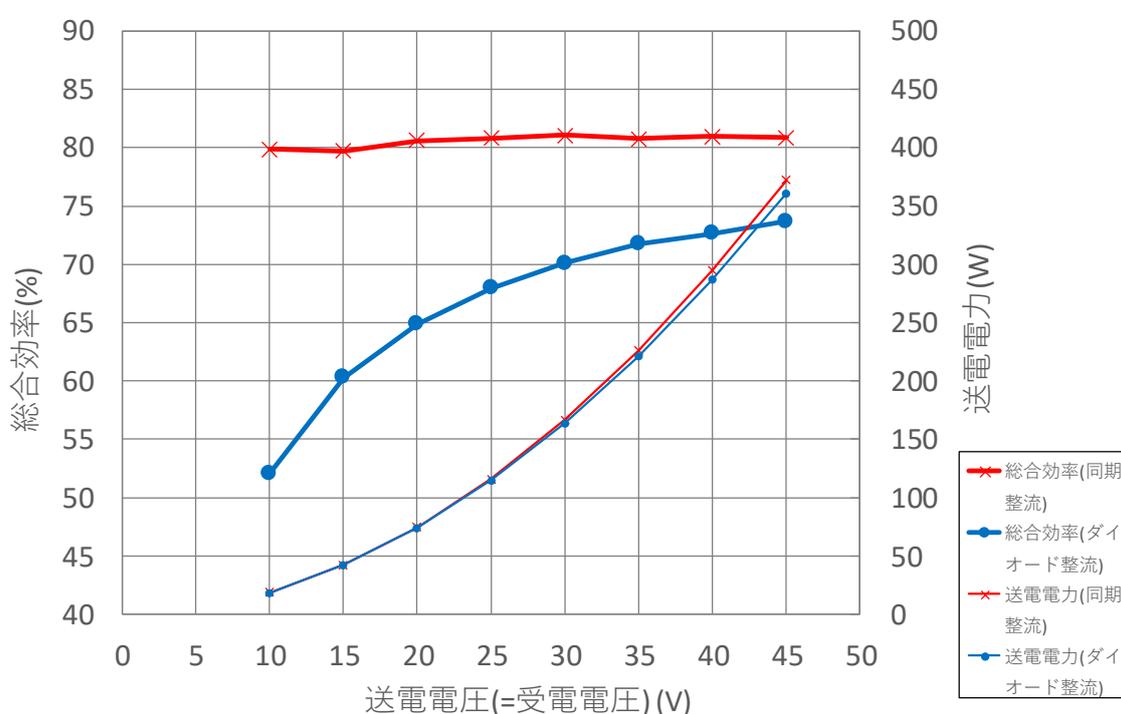


図4-8 同期整流とダイオード整流の送電電力と総合効率

(iii) 原理確認機の性能評価

試作した原理確認機及び表4-5に仕様を示すLC共振器を用いて、図4-9に示す試験系により、双方向無線給電に関する機能と性能（無線給電パワー、送電距離、伝送効率）を評価し、最終目標を満足していることを確認した。

ここで、送電コイルと受電コイルは、図1-4構成④のコイルモジュールを使用し、水槽（ダイライト社製ポリエチレン製容器 RL-200L）に水及び海水を張り、図4-10に示すようにコイルモジュールを水中に入れない状態で対向させて水平に配置した。この際、海水は実施項目①②の実測と同じ海水（濃度3.7%、導電率5.5S/m）を用いた。

表4-5 性能評価試験用のLC共振器仕様概略

項目	仕様
共振コイル径	φ 540mm
共振コイルインダクタンス	166.5μH (@100kHz)
共振コンデンサ容量	21.57nF
共振コンデンサ耐圧	2400V @100kHz
共振周波数	83.98kHz

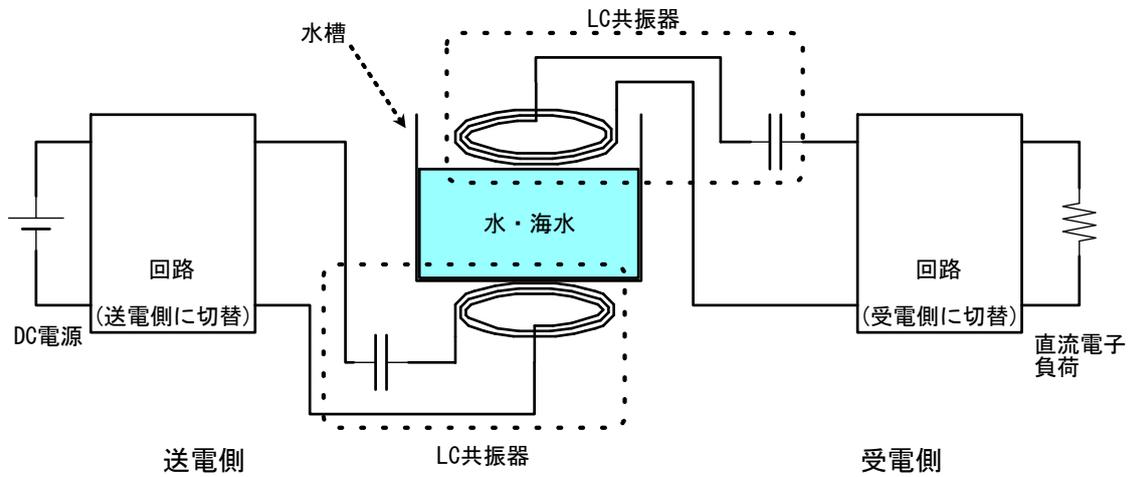


図4-9 性能評価試験構成のブロック図

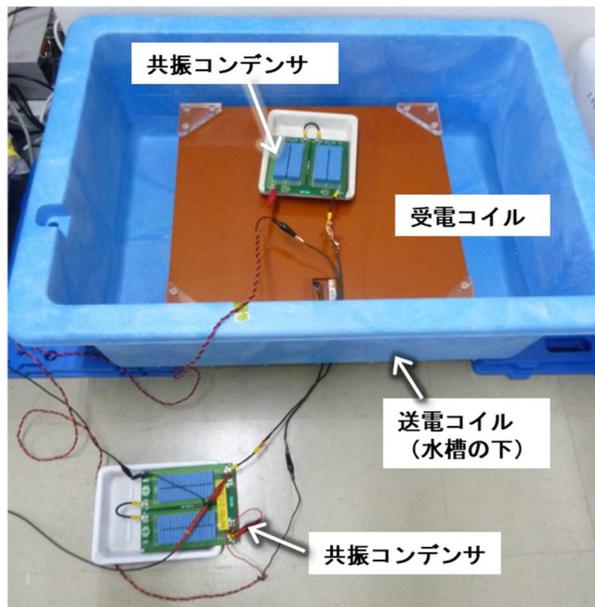


図4-10 評価状況 (水槽とLC共振器の配置)

(iii-1) 送電距離30.5cmでの性能評価

まず送電距離の目標性能（30cm以上）における送電電力・受電電力及び総合効率を確認するため、送電距離30.5cmでの測定を行った。図4-11と図4-12に送電電圧を10Vから50Vまで変化させて送電した時の水及び海水を介した状態での送電電力・受電電力及び総合効率を、表4-6に送電電圧50Vにおける各性能値を示す。

ここで、目標性能を定義する無線給電パワーとは、送電コイルからの出力電力のことである。即ち、無線給電パワーは、送受電回路の損失も含む送電電力よりも低く、受電回路の損失を含む受電電力よりも高い値となる。今回は測定の都合上、送電電力と受電電力により無線給電パワーの達成状況を確認した。同様に、総合効率とは、送電側の直流電源と受電側の抵抗負荷（直流電子負荷）の間の電力効率であり、これには送受電回路の損失を含むため、コイル間の伝送効率より低い値となることから、今回はこの総合効率により目標性能である伝送効率の達成状況を確認した。

更に、送電側と受電側のLC共振器と回路は同一の構成であり、制御回路の切替スイッチで送電側と受電側の動作を切替えていることから、双方向無線給電が行えることが確認できた。

以上により、目標性能としていた、真水及び海水（塩水）を介しての双方向無線給電機能について、送電距離30cm以上、無線給電パワー200W以上、コイル間伝送効率50%以上に対して、真水を介して送電電圧50Vの条件において目標を上回る送電距離30.5cm、送電電力261W、受電電力201W、総合効率77.2%、海水（塩水）を介して送電電圧50Vの条件においても目標を上回る送電距離30.5cm、送電電力263W、受電電力200W、総合効率76.2%の結果を得ることができた。

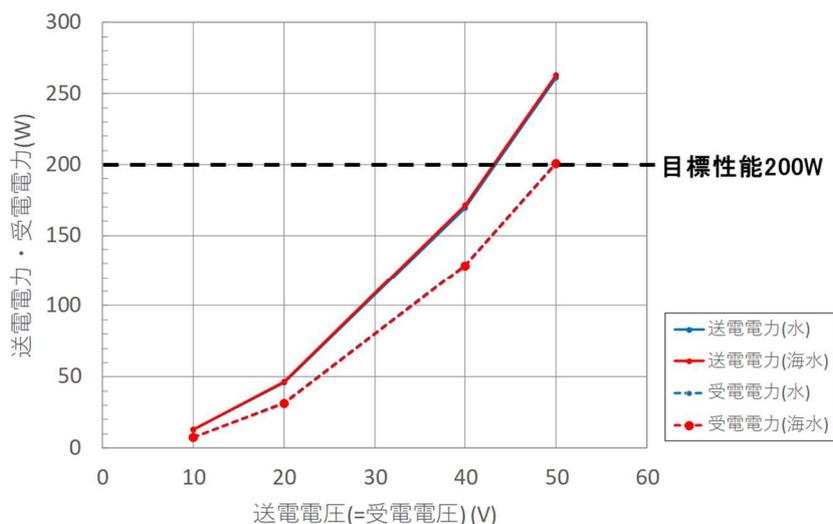


図4-11 水・海水を介した送電電力と受電電力

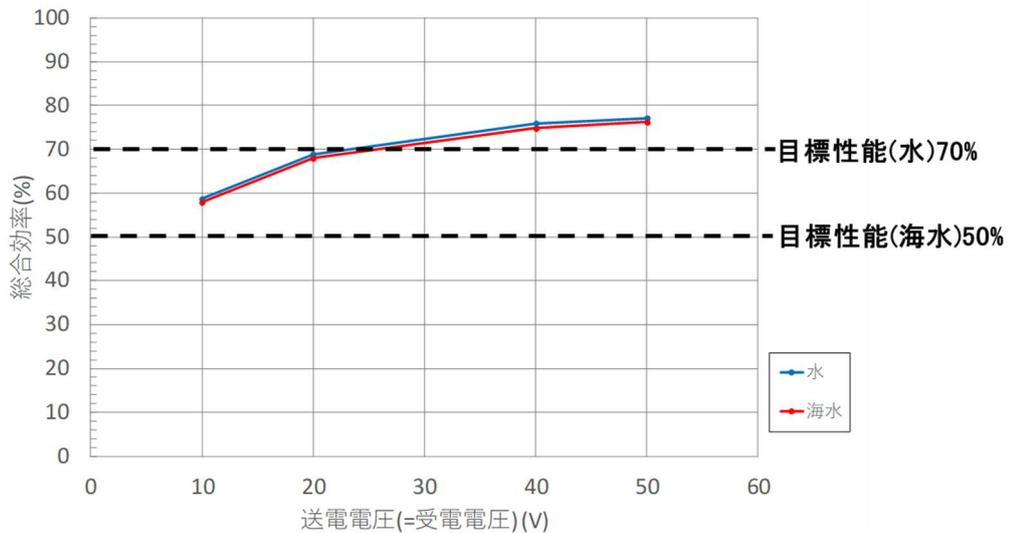


図4-12 水・海水を介した総合効率

表4-6 水・海水を介した送電電力、受電電力、総合効率
(送電電圧50V)

	送電電力 (W)	受電電力 (W)	総合効率 (%)
水	261	201	77.2
海水	263	200	76.2

(iii-2) 送電距離を変化させた時の動作評価

前項において、送電距離が30.5cmの条件で目標性能を上回っていることが確認できたが、参考として同じ試験系で、海水を介して送電距離と送電電圧を変化させた時の送電電力・受電電力及び総合効率を確認した。図4-13に、LC共振器へのアルミシールド付加の有無による比較を行った結果を示す。ここで、送電距離については、シールドありの場合は211mmと311mmの100mm間隔で2パターン、シールドなしの場合は211mm、261mm、311mm、361mmの50mm間隔で4パターンを測定した。

図4-13より、送電電圧が30V以上では送電電圧にほぼ比例して送電電力が得られており、また総合効率については、前述した受電側の同期整流の効果により送電電圧に拠らず高効率でほぼ一定の状態が得られている。更に、アルミシールド付加の有無については、シールドありの場合は結合係数が小さくなり送電側から見た負荷が小さくなるため、シールドありの方が低い送電電圧で大きな送電電力が得られていることが分かった。なお、送電距離が離れるほど送電電力が大きくなる傾向は、実施項目①で確認した結合係数の低下による送電側から見た負荷が小さくなるためである。

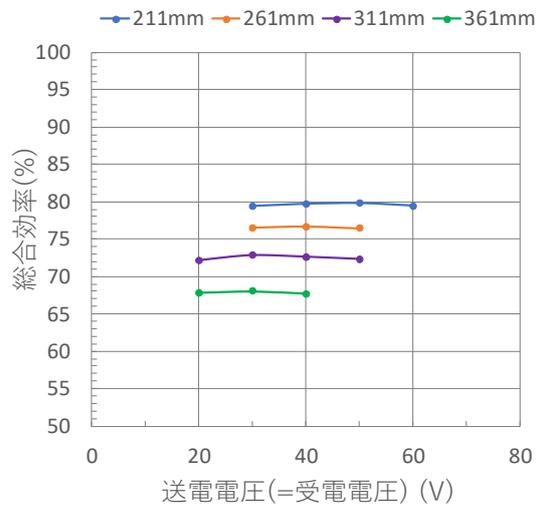
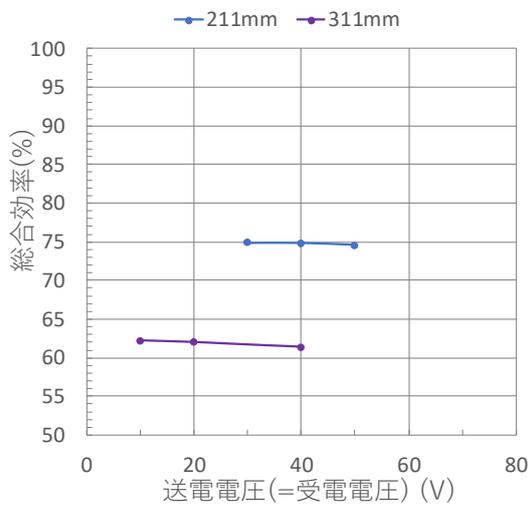
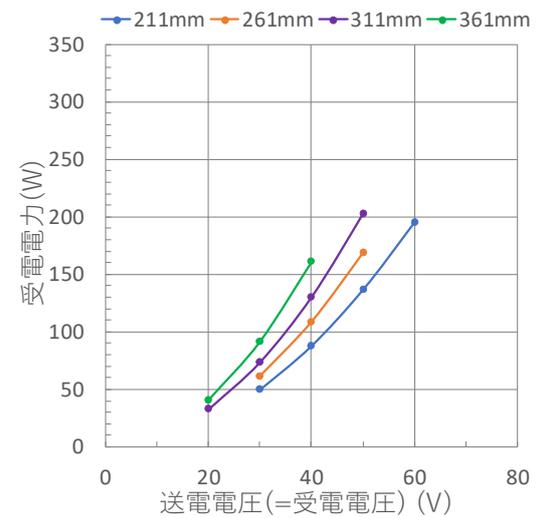
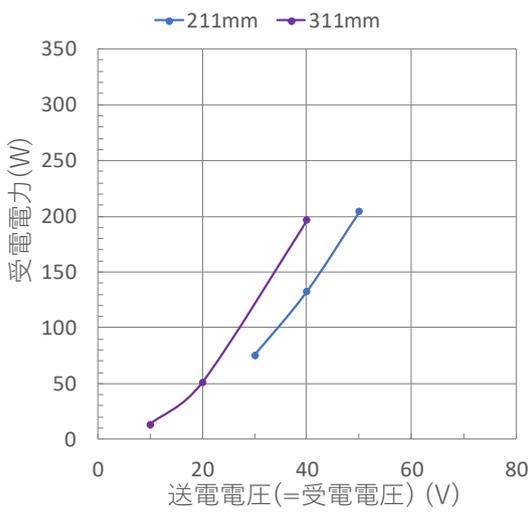
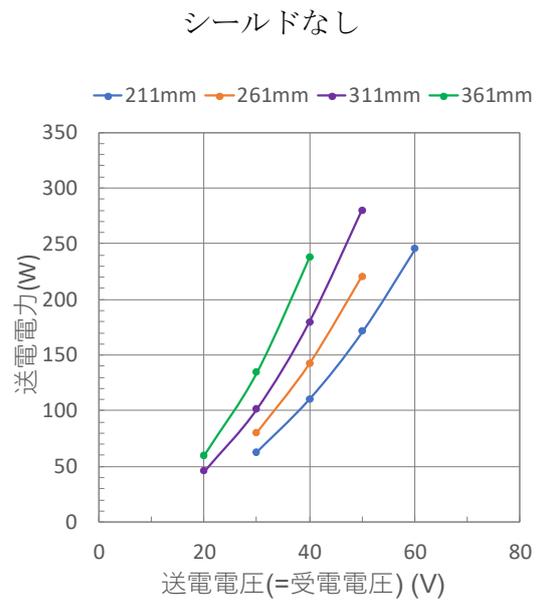
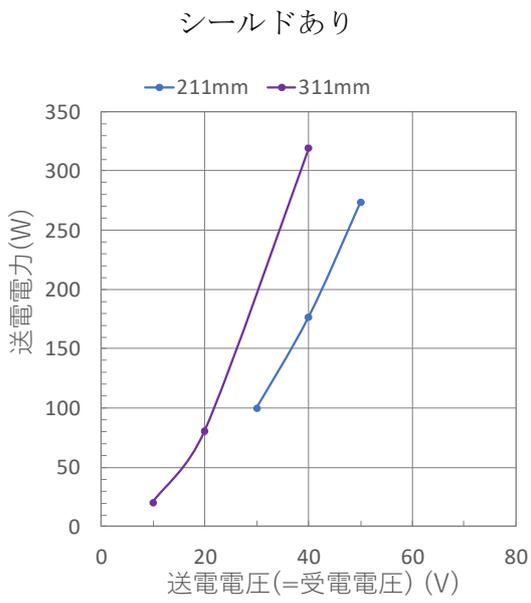


図4-13 海水を介して送電距離を変化させた時の送受電電力と総合効率

(3) 真水及び海水(塩水)を介した電力蓄電及び電力運搬性能に関する基盤研究と動作原理研究

実施項目⑤ 高効率無線充電を維持するための制御手段に関する研究

本実施項目では、リチウムイオン電池を用いた無線充電を高効率で行うために、直流電圧源と直流電圧負荷における回路シミュレーション解析を行い、平行して送受電電圧及び送受電コイル位置を変えながら無線充電特性を測定可能な装置を作り、また実測を行い、各結果の比較検討を行った。この結果、以下の研究成果が得られた。

- ・目標とする無線充電性能を得るための送電電圧と受電電圧の範囲をシミュレーション解析等から見出し、7直リチウムイオン電池と昇降圧回路の組み合わせが有効であることを示した。
- ・実測にてシミュレーション解析の結果を確認し、送電電圧と受電電圧をおよそ等しくすることで高効率無線充電が可能となることを明らかにした。

以下に順を追って説明する。

(i) 回路シミュレーション解析に関して

送電電圧（インバータへの入力電圧）と受電電圧（整流後の出力電圧）をおよそ等しくすることが高効率の無線給電を行う上で有効な方法の一つであることが本研究その他で分かっている。この方法がリチウムイオン電池を用いた場合においても同様に有効であるかを回路シミュレーションにより確認した。初めに、他励発振におき負荷が抵抗負荷の場合には解析解が求められるためこれを示し、次に自励発振と同期整流による回路シミュレーションの結果を示し、結果を比較する。

図5-1に解析の対象とする回路図を模式的に示す。本研究の双方向無線充電では送電装置と受電装置をほぼ同一構成とすることを目指しているため、送電装置と受電装置は直列共振で構成する。また、外部発振器によりゲートドライバー及びインバータが駆動し、その発振周波数はコイルとコンデンサで決まる共振周波数と同一となるようにする。受電側は全波整流を行い抵抗負荷とする。ここで、本研究で行う自励発振及び同期整流を含めた解析式を立てることはできないが、特に目標とする長い伝送距離においては磁気的な結合が小さくなるため、上述したような他励発振と類似した状態になる。即ち、送電電圧と受電電圧及び受電電力との関係は類似する状態になると推測され、後述する回路シミュレーションや実測の参考になると考えた。

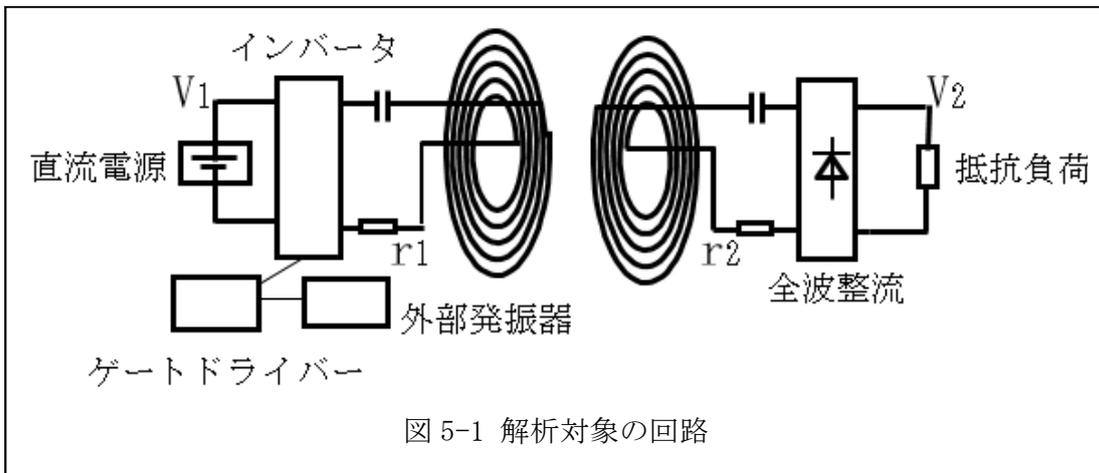


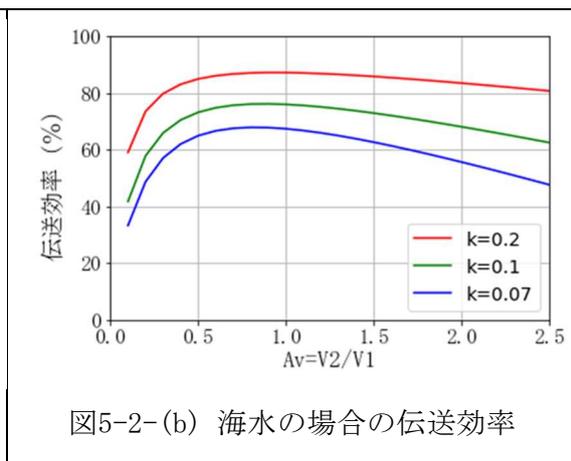
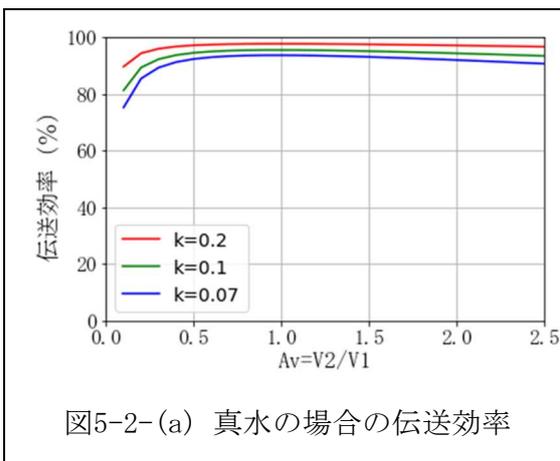
図5-1の伝送効率 η は以下のような解析式で表すことができる。^[5]また、特に受電電圧と送電電圧の比 (A_v とする) に注目し、結合係数 k をパラメータにして伝送効率を百分率にてグラフで表すと、図5-2-(a) (真水中の場合) 及び5-2-(b) (海水中の場合) のようになる。

$$\eta = \frac{V_2(\omega L_m V_1 - r_1 V_2)}{V_1(\omega L_m V_2 + r_2 V_1)}$$

(送電電圧; V_1 受電電圧; V_2 角周波数; ω)

送電装置の抵抗値; r_1 受電装置の抵抗; r_2 相互インダクタンス; L_m

$L_m = k \times \sqrt{L_1 L_2}$ k ; 結合係数 L_1 ; 送電側コイル自己インダクタンス L_2 ; 受電側コイル自己インダクタンス)



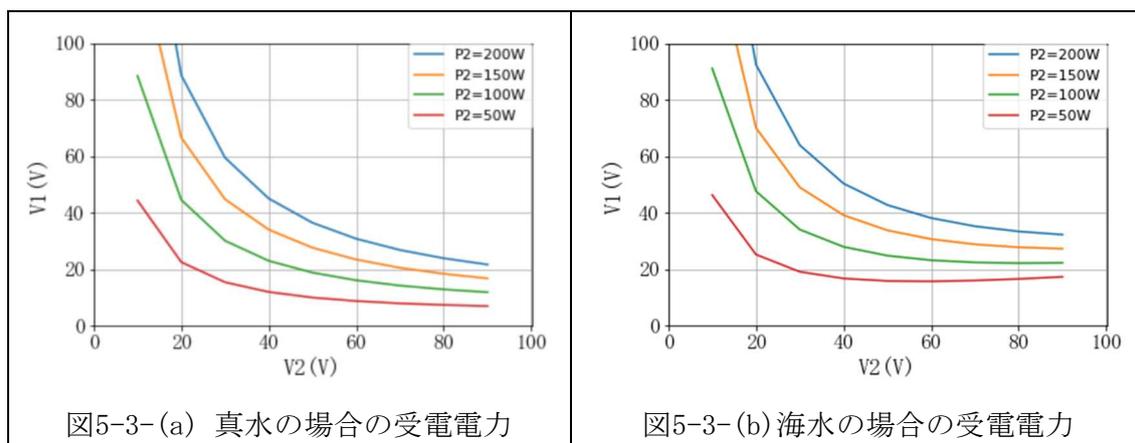
ここで、実施項目①の研究から海水の影響はコイルの付加抵抗で等価的に示すことができることが分かったため、付加抵抗値としては表1-4の構成④の抵抗換算値(真水

の場合 0.1Ω 、海水の場合 1.1Ω)に端子接触抵抗等 0.1Ω を見込んで真水の場合 0.2Ω 、海水の場合 1.2Ω とした。また、コイルのインダクタンス値は表1-1の構成④の値($165\mu\text{H}$)を用い、共振周波数 85kHz として相当する共振コンデンサ値として 21.3nF とした。なお、図中で示した結合係数 $k=0.2, 0.1$ 及び 0.07 は、実施項目④で作製した原理試作機の伝送距離(送電コイルと受電コイルの間の距離)がそれぞれ $19\text{cm}, 29\text{cm}$ 及び 35cm の場合に相当する。

図から、 A_v 値が 1.0 付近であれば効率が維持できること、但し海水の場合には結合係数が 0.07 以下になると伝送効率が低く A_v の制御が必要であることが分かった。

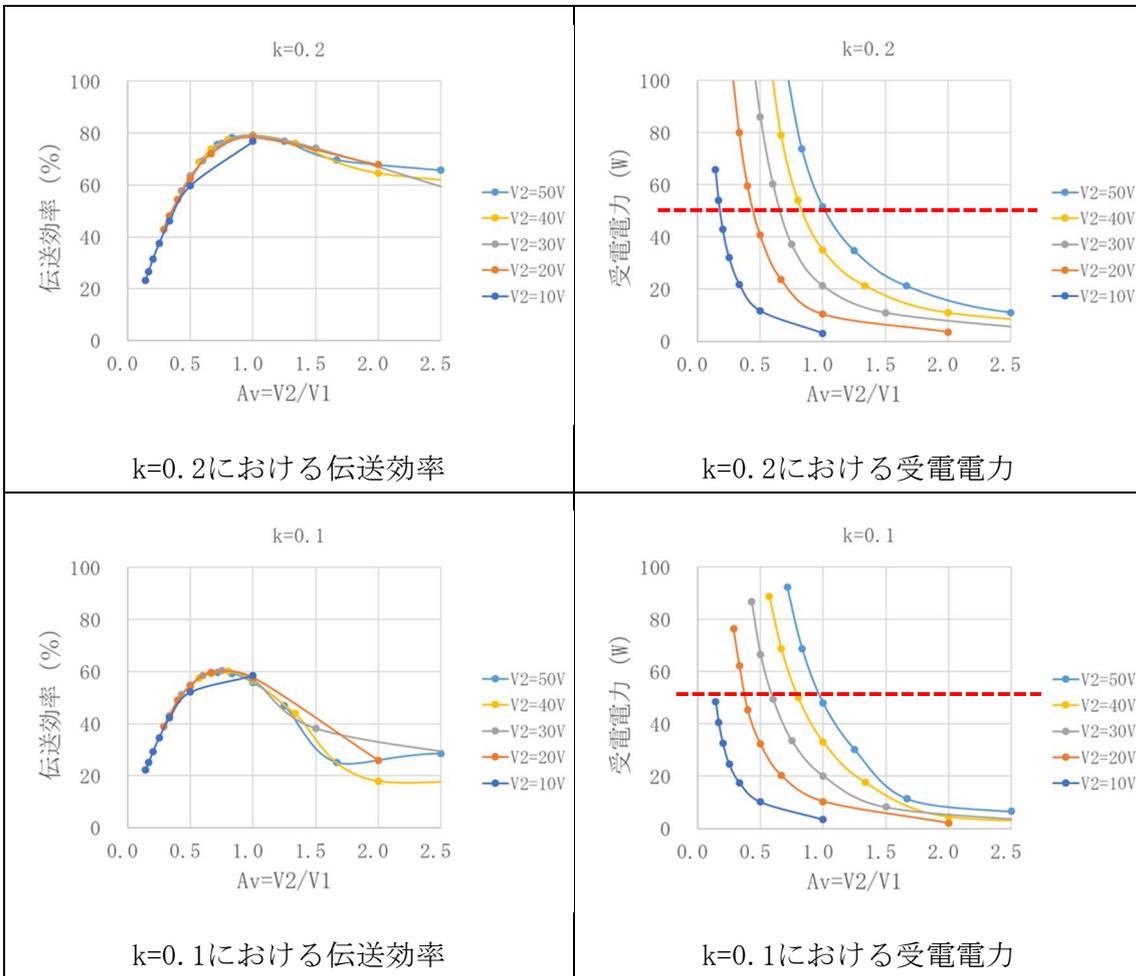
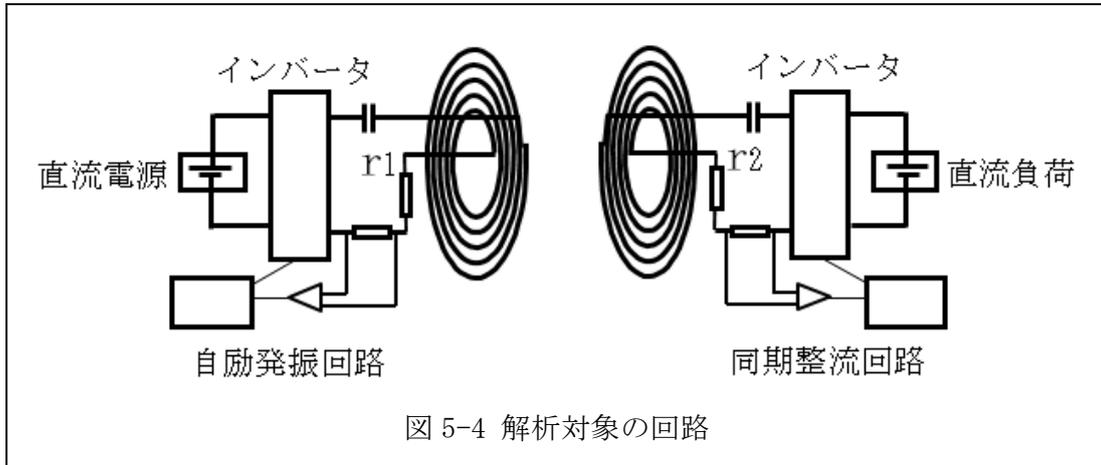
更に、送電電圧と受電電圧及び受電電力(P_2 とする)の関係は以下の式で表すことができ^[5]、目標である伝送距離 30cm 付近の結合係数 0.1 を用い、受電電力をパラメータにしてグラフで表すと図5-3のようになる。

$$V_1 = \frac{r_1 \left(r_2 + \frac{V_2^2}{P_2} \right) + \omega^2 L_m^2}{j\omega L_m \frac{V_2^2}{P_2}} \times V_2$$



図から真水より海水の方が受電電力を得るためにより大きな送電電圧及び受電電圧が必要になる傾向にあることが分かり、目標である 50W 以上の受電電力を得るためには、海水中では送電電圧及び受電電圧が 30V 以上必要であることが分かった。

次に回路シミュレーションの結果を示す。図5-4に回路シミュレーションを行った回路図を模式的に示す。実施項目③図3-12に示した回路モデルを修正したものに相当し、具体的には上記解析解と同様に原理確認機の試作で得られたインダクタンスや付加抵抗値等のパラメータを入れ、送電電圧及び受電電圧を相互に変化させてその特性を調べた。特に受電電圧と送電電圧の比(A_v とする)に注目し図にまとめた。



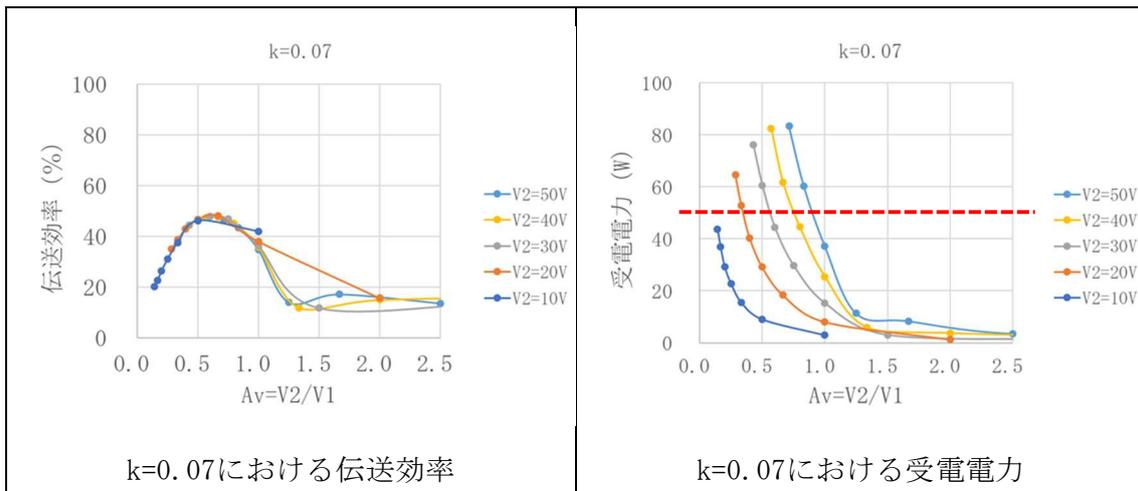


図5-5 回路シミュレーションの結果

図5-5に、 $k=0.2$, 0.1 , 0.07 における伝送効率と受電電力の回路シミュレーション結果を示す。付加抵抗値としては表1-4の構成④の海水の場合の抵抗換算値である 1.1Ω に端子接触抵抗等を 0.1Ω と見込んで 1.2Ω とした。また、コイルのインダクタンス値は表1-1の構成④の値($165\mu\text{H}$)を用い、共振周波数 85kHz として相当する共振コンデンサ値として 21.3nF とした。図から、伝送効率に関しては Av (受電電圧と送電電圧の比)が約 0.5 から 1.2 の範囲で最大となり、結合係数が低いほど Av 値が小さい方でより伝送効率が高くなることが分かった。この結果($0.5 < Av < 1.2$)を元に受電電力を考えると、目標とする 50W (図中に赤点線で示した)を達成するには受電電圧 $V2$ を 30V 以上に保つ必要があることが分かった。なお、送電電圧は Av 値から 25V から 60V 程度となる。

以上の解析式及び回路シミュレーションの結果から、 Av (受電電圧と送電電圧の比)の制御で伝送効率を高めながら、送電電圧及び受電電圧で受電電力を制御することが可能であることが分かった。

(ii) リチウムイオン電池及び電池モデルを用いた回路シミュレーションに関して

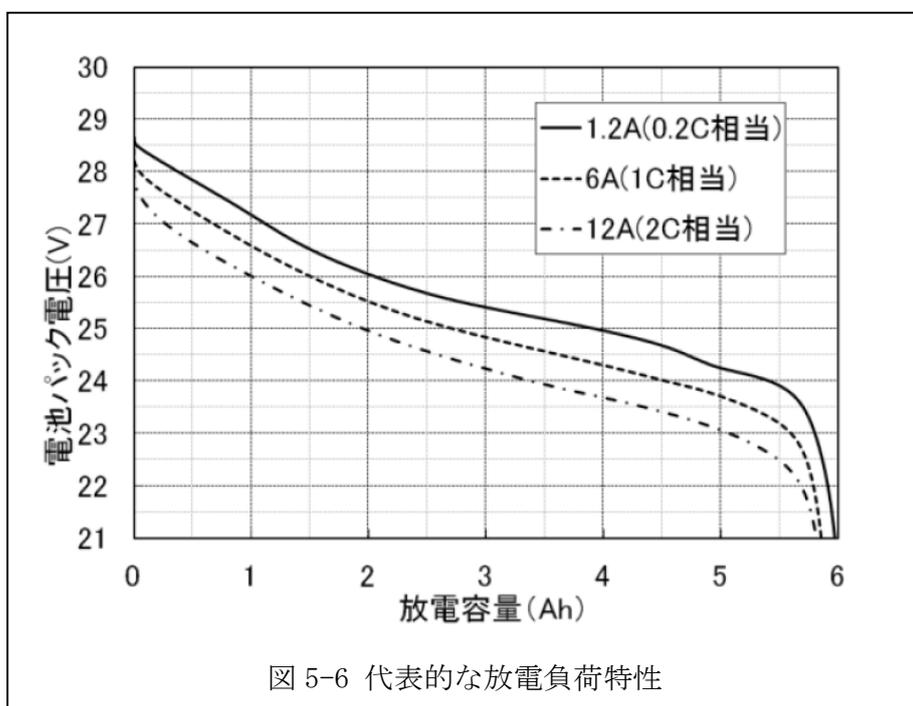
本研究では弊社にて開発済みの7直リチウムイオン電池を用いた。主な仕様を図5-6に示した。また代表的な放電負荷特性を図5-7に示した。充電は通常CCCV(定電流定電圧)方式に依り、基本的には放電終止電圧の 21V 以上から最大充電電圧の 29.35V 以下で充電及び放電を行う必要がある。このため本リチウムイオン電池を用いて無線充電を行う際には、送電側(放電側)には昇圧回路を用いて無線充電に適切な電圧まで昇圧する必要があり、受電側(充電側)には降圧回路を用いて無線充電に適切な電圧まで降圧する必要がある。

ここで無線充電電力を考えると、最大の充電電圧・電流が 29.35V 、 2.0A であるため、最大の充電電力(受電電力)は充電末期フル充電付近で 58.7W となる。即ち、目標とする 50W はクリアできるものの余裕はない。このため別途ファームウェアを修正し、充電電

流として5.0Aまで対応できるようにした。放電に関しては最大放電電流が12Aであり200W以上を見込めるため、目標を達成する上で十分であると考えた。

表5-1 本研究で用いたリチウムイオン電池の主な仕様

品名・形式	品名	7LPL0678G8C1-1M01
	セル形式 / 構成	L0678G8C1 / 7直列1並列(7S1P)
寸法・重量	外形寸法 / 質量	約 195 x 87 x 79 mm / 約1.3kg
充電仕様	最大充電電圧 最大充電電流 充電方式	29.35V 2.0A CCCV (定電流定電圧充電)
放電仕様	放電終止電圧 最大放電電流	21.0V (3.0V/セル) 12A
定格	公称電圧 定格容量(#1)	25.2V (3.6V/セル) 5.3Ah (充電時間:約3.5時間 (#2))
通信仕様 #3	通信規格 通信内容	SMBus 電池状態(電圧、残量等)
環境仕様	充電温度範囲 放電温度範囲	+5~+45°C -10~+50°C



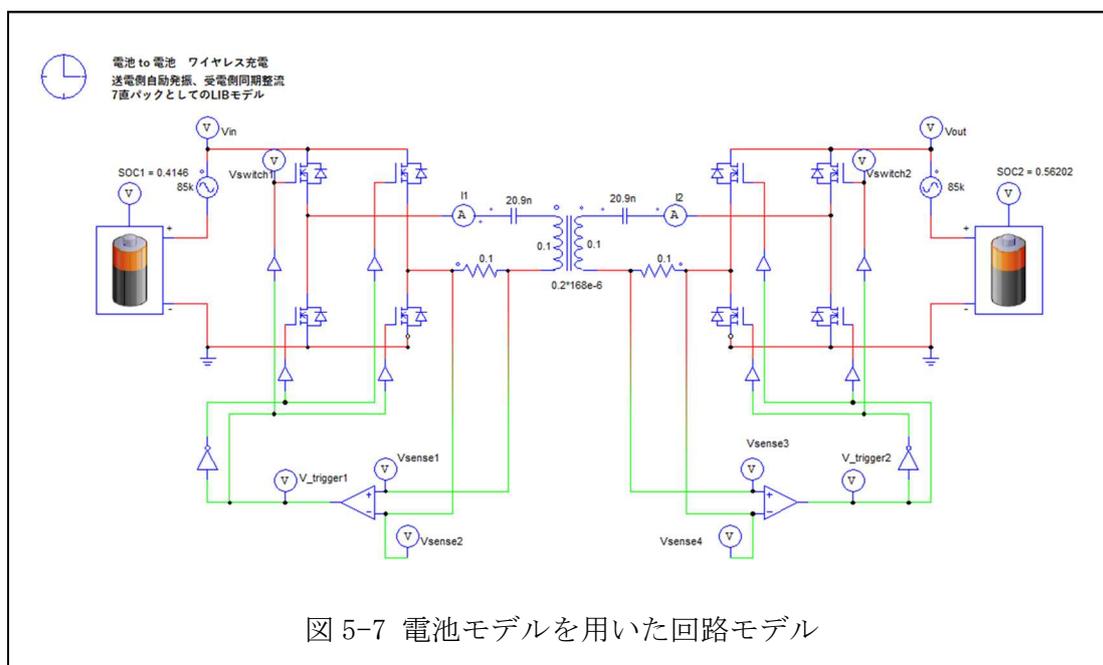
次に本電池の特性を回路シミュレーションモデルに記述して、無線充電の特性を検討した。本検討では回路シミュレーターとしてPSIM(販売元 Myway プラス株式会社)を用い、Renewable Energy Module オプションを用いて解析を行った。PSIMにおいて

はFET等の能動素子やダイオード等の非線形素子を理想素子として扱え、また上記オプションにてリチウムイオン電池を定量的に扱えるため回路設計指針を得る上で有効となると考えた。

まず電池モデルを立てるために、2つの放電負荷特性（図5-6で示した0.2C(1.2A)と1C(6A)の放電負荷特性等）を用いて充電状態SOC(state of charge)と開放端電圧OCV(open circuit voltage)間の特性及びSOCと放電時の内部抵抗($R_{\text{discharge}}$)間の特性を調べ、また充電特性(不図示)と上記SOCとOCV間の特性を用いてSOCと充電時の内部抵抗(R_{charge})間の特性を調べた。このとき、放電時及び充電時の電池電圧はそれぞれ以下のように表される。

$$\text{放電時； } OCV - I R_{\text{discharge}} \quad \text{充電時； } OCV + I R_{\text{charge}}$$

次に、送電側は自励発振、受電側は同期整流として回路モデルを作成した。図5-7に作成した回路モデルを示す。図中電池を模式的に描いた箇所が上記した電池モデルとなる。しかし、インバータによる高速のスイッチング(約85kHz 即ち約 $10\mu\text{s}$)と電池充電放電のような数時間を要する遅い状態に対して、同一の回路シミュレーターで解析することは現実的ではないことが途中で判明した。このため、電池モデルの容量を1/1000にして解析時間を省略するようにした。その結果を図5-8に示す。送電側に配置する電池モデルと受電側に配置する電池モデルを同一とし、解析開始時点と共にSOC50%としている。図から、時間と共に送電側電池のSOCが減っていき受電側電池のSOCが増えていくことが確認できた。



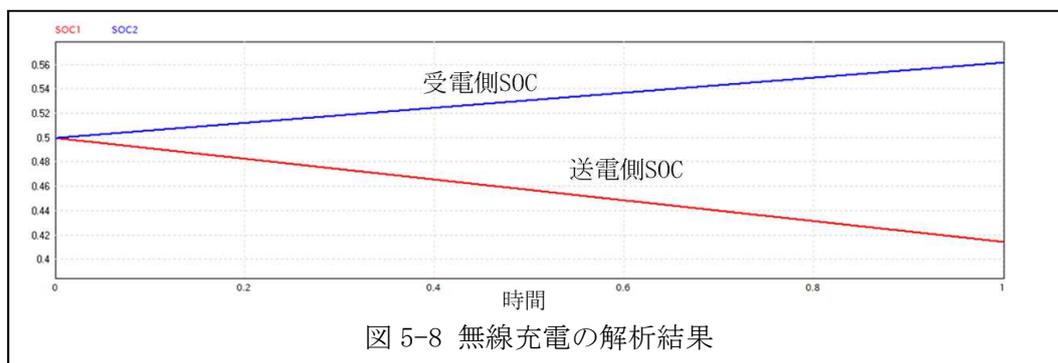


図 5-8 無線充電の解析結果

以上から、実際に用いるリチウムイオン電池から回路シミュレーターで扱える電池モデルを作成し、それを自励発振及び同期整流を行う無線充電回路に取り込んでシミュレーション解析することができた。一方で、上記した解析時間の問題があることや、リチウムイオン電池の充放電に備えるべき充放電回路や昇圧降圧回路を本理想状態のシミュレーションで扱うのは適切でないと考え、別途実施項目⑦で実際の回路により近いモデルにて再検討することとした。

(iii) 実測に関して

実施項目④で作製した原理試作機を用い、海水中にて実測を行う計画にて臨んだ。しかし、測定開始時にスイッチング時と推測されるノイズによりインバータ回路の一部が破損してしまい、自励発振動作及び同期整流が動作不良となった。このため、ここでは原理試作機を用いた測定は他励発振による参考測定とし、実施項目③の測定で用いた簡易試作セットを用いて各測定を行った結果を詳細に記載する。

初めに海水中での測定にあたる準備に関して、防水コイルと評価用ソフトの2点に関して説明し、次に実測結果を説明する。

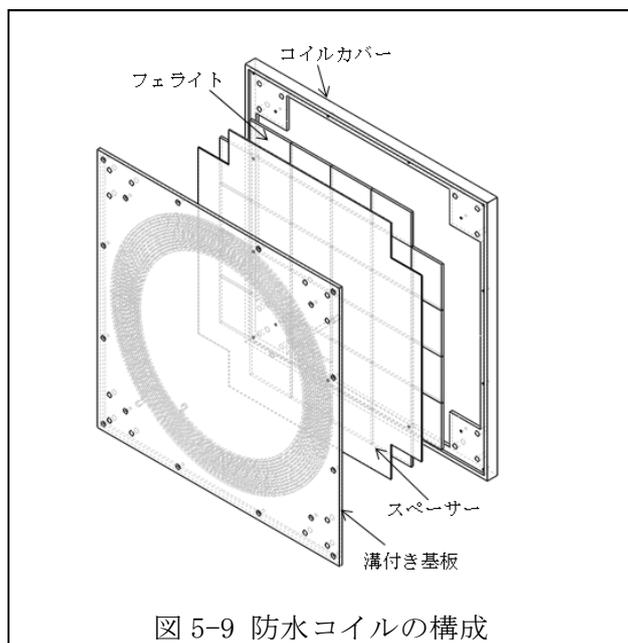
以下に、防水コイルに関して記載する。これまでは周囲を海水に浸せなかったコイルの代わりに、海水中に沈められる防水コイルを新たに設計し作製したものである。コイルを構成するリッツ線やコイル形状は原理試作機で用いたものと同一にしながら防水設計を行ったが、伝送効率をより高めるためにフェライトを再選定した。表 5-2 に作製したコイルの特性比較を示す。実施項目①に記載したようにあらかじめ磁界シミュレーションを行うことにより、フェライトの厚み及びコイルとフェライト間の距離等の最適値を決めておき、以下のような部材作製と組立作業を行った。

図 5-9 に作製した防水コイルの構成を示す。コイル部は塩化ビニル製の板の表面にスパイラル状の溝を形成し、その溝にリッツ線を嵌めこむことにより形成した。(図中、溝付き基板) また、蓋状に加工した塩化ビニル板を用意し(図中、コイルカバー)、外縁部に凹凸部を配置して上記2つの板が適切に嵌合するようにした。フェライトは導電性を有するため、コイル部とフェライト間に絶縁のための塩化ビニル板

(図中、スペーサー)を挟んだ。組立ての際には、嵌合部付近からコイル全体に渡って電気絶縁性が高いシリコンゴム接着剤(信越化学工業製 KE-348)を充填し、十分な時間硬化することにより防水構造とした。なお共振コンデンサは、設計値より高い電圧が発生した場合には容易に破損してしまう懸念があったため、防水コイル内には収めず外部に配置した。

表 5-2 コイル特性比較

	原理試作機コイル	防水コイル
コイル形状	円形	円形
内径/外径 (mm)	400/540	400/540
ターン数/導体断面積 (mm ²)	12/4.0	12/4.0
フェライト特性 透磁率/飽和磁束密度 (mT)	2500/530	3300/490
フェライトサイズ/厚み (mm)	46□/1	100□/5
インダクタンス (μH)	168	193
抵抗値 (85kHz)	0.09	0.21



次に評価用ソフトに関して記載する。評価用ソフトは、送電電圧(インバータ入力電圧)と受電電圧(整流後出力電圧)をPC上で変えられるようにすることにより、誤操作無く測定を円滑にかつ進めることを目指したものである。また今後の研究において、必要に応じて制御をリモート化し、PCで無線充電内の状況を監視制御することも可能である。装置全体の構成を図 5-10 に模式的に示す。シリアルポート(RS232C)によりPCから直流電源電圧と電子負荷電圧を設定し、それぞれの電圧値(実際の出力

値)及び電流値を読み取りログデータ化する。これにより誤動作無く測定データを記録することが可能となった。

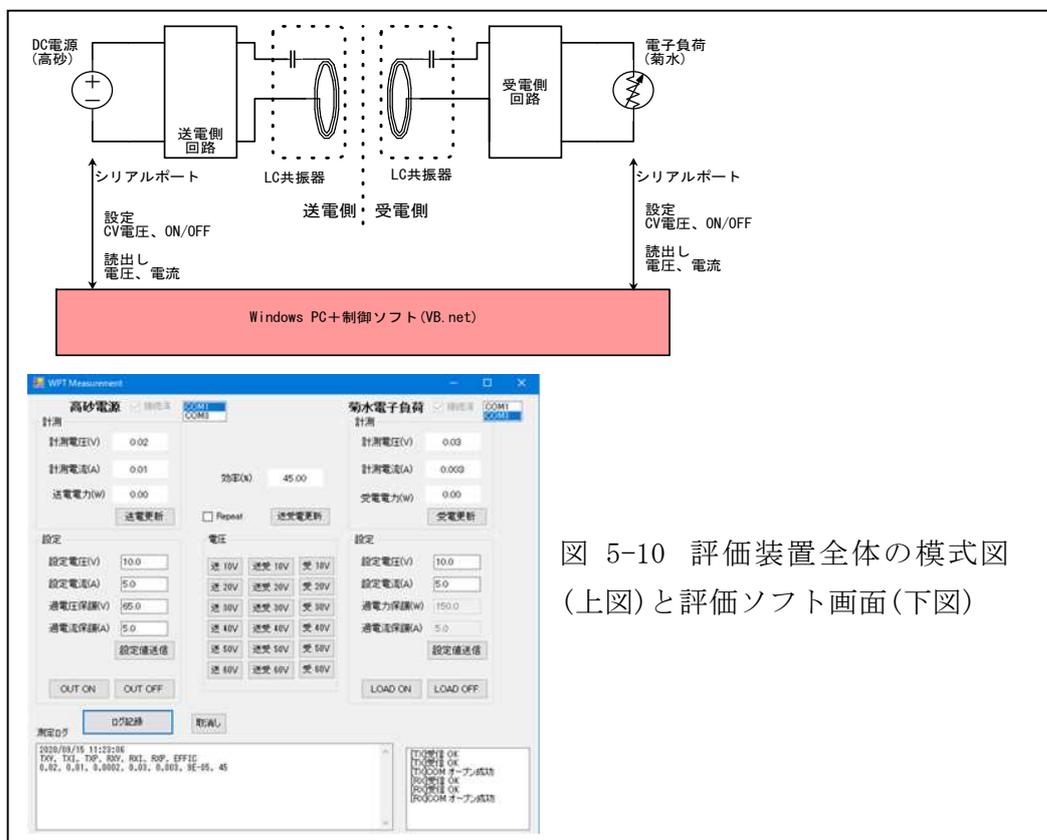


図 5-10 評価装置全体の模式図 (上図)と評価ソフト画面(下図)

次に原理試作機での測定結果に関して記載する。前述したように装置の一部が破損してしまったので、他励発振による空気中での参考測定結果となる。図5-11-(a)及び図5-11-(b)にそれぞれ伝送効率及び受電電力の結果を受電電圧と送電電圧の比 A_v を横軸にして示した。送電距離33cmにおき測定の都合上送電電圧 V_1 をパラメータとした結果である。図から A_v が0.7付近で最大となり、また受電電力も同様に最大となることが分かった。

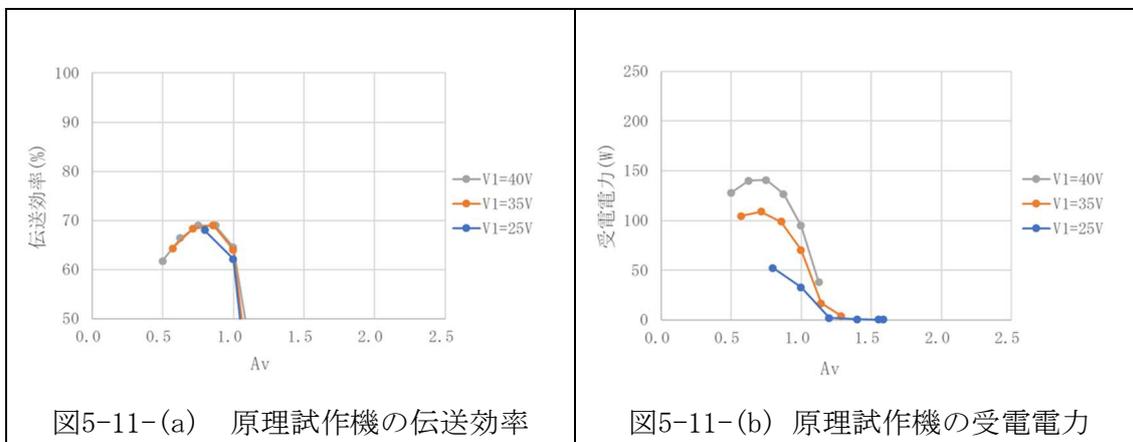


図5-11-(a) 原理試作機の伝送効率

図5-11-(b) 原理試作機を受電電力

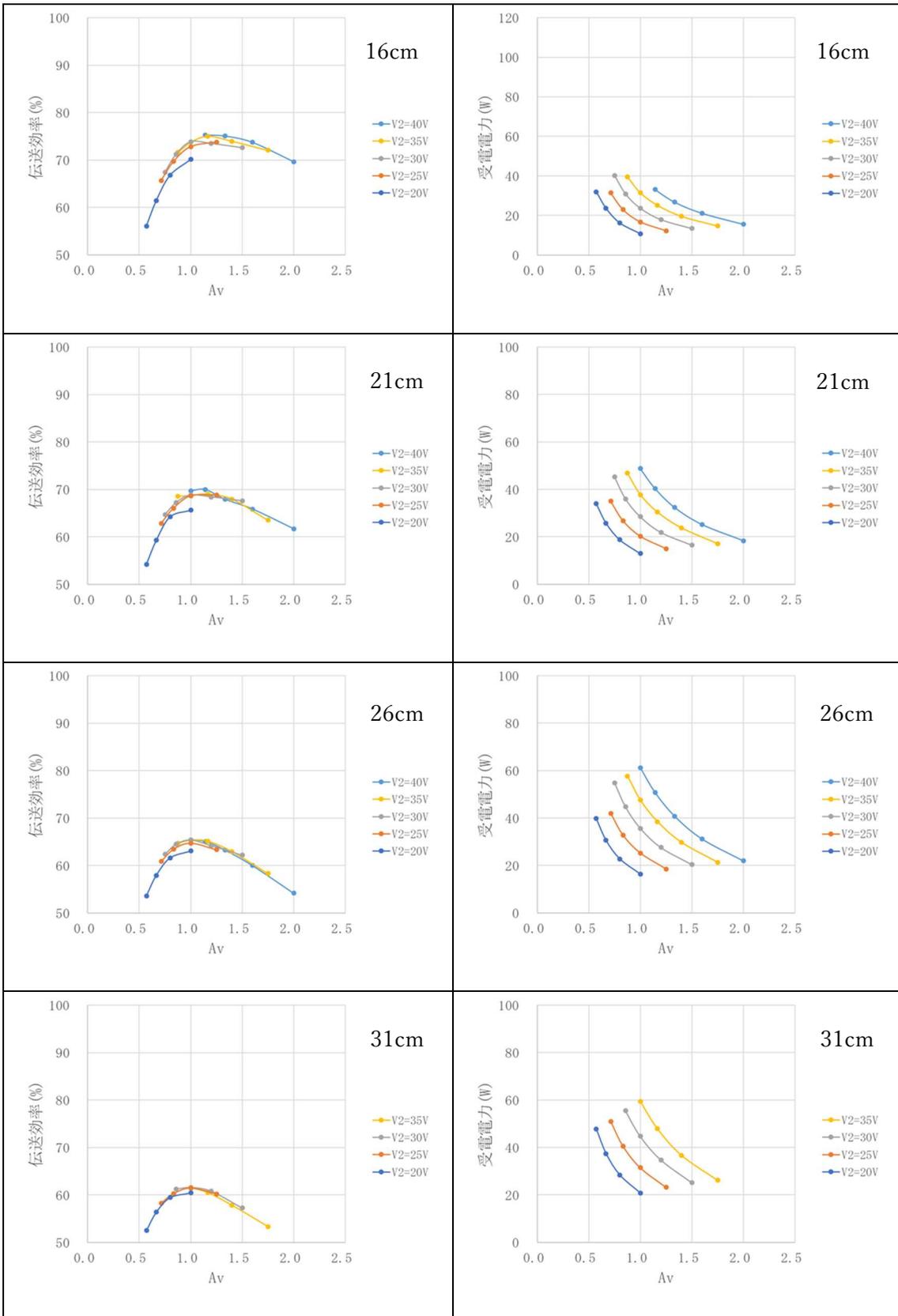


図5-12 簡易試作機の海中での伝送効率(左列)と受電電力(右列)

次に簡易試作機における測定結果を図5-12に示す。前述した防水コイルを海水中に配置して送電距離（送電コイルと受電コイルの間の距離）を16cm、21cm、26cm及び31cmとして、伝送効率と受電電力の結果に関してそれぞれ横軸を A_v 値としている。伝送効率は16cmにおいては A_v が1.2付近で最大となるものの、他の送電距離では A_v が1.0付近で最大となっている。受電電力は伝送距離が大きくなるほど目標とする50Wを得るための送電電圧及び受電電圧の範囲が拡大する。伝送効率及び受電電力の A_v に対する傾向は A_v が1.0以下では回路シミュレーションの結果と類似しているが、受電電力に関しては絶対値のずれは相当に有る。回路シミュレーションにおいて $k=0.1$ の結果とおおよその結合係数に相当する伝送距離31cmの結果を図15-13-(a) (b)に比較した。図におき例えば $V_2=30V$, $A_v=1.0$ におき、伝送効率は実測及び回路シミュレーションでそれぞれ62%、57%であり、受電電力はそれぞれ45W、20Wである。この受電電力の差は回路シミュレーションのモデルの限界に起因すると推察され、特に受電側の定電圧負荷のモデリングに課題が有ると考えられる。

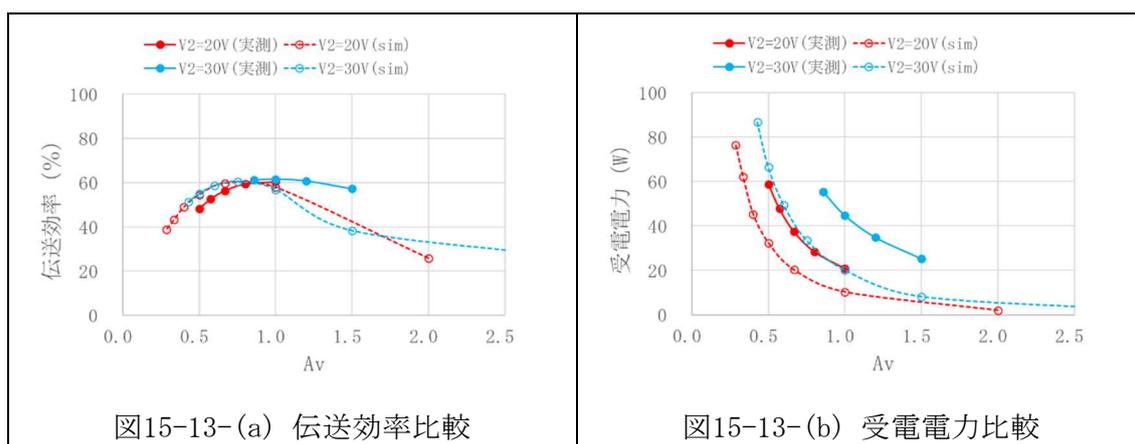


図15-13-(a) 伝送効率比較

図15-13-(b) 受電電力比較

実施項目⑥ 各種状態遷移に対応する無線充電御手段に関する研究

本実施項目では、起動から終了までの一連の無線充電が適切に行われ、かつ異常時には停止するため、これまでの実験結果をより詳細に調べることによりそれら制御方法を研究した。また、その制御方法を実現するために必要となる昇降圧回路に関して、具体的手段を研究した。

この結果、以下の研究成果が得られた。

- ・送電電圧と受電電圧の比と自励発振回路の発振周波数（以後、自励発振周波数と呼ぶ）を利用することにより、送受電コイル間に金属異物が存在するか否かを判別可能となることを明らかにし、例えば無線充電を停止する等の制御が可能となることを示した。

- ・更に、送電電圧と受電電圧を同一電圧とし自励発振周波数を測定することにより、送電距離を見積もることが可能となることを明らかにした。即ち、自励発振周波数から電力伝送効率や送電電力が予想可能なことを明らかにした。
- ・昇降圧回路の制御を行うことにより、送電電圧と受電電圧の制御及びリチウムイオン電池の充放電制御等が可能となり、双方向無線充電が可能であることを具体的に示した。

以下に順を追って説明する。

(i) 自励発振の周波数特性に関して

これまでの研究におき、送電電圧と受電電圧の比 A_v が無線充電の特性を左右するパラメータであることを示してきた。更に、図5-11等に示したような評価装置を用いて通常より広い範囲の電圧で評価測定を行ったところ、 A_v に対して自励発振周波数が特徴的な変化を示すことが判明した。そこで、改めて自励発振周波数に関する諸特性を注目し、それらを制御に活用できるかを検討した。

初めに簡易試作機におき、 A_v に対する自励発振周波数を測定した結果を図6-1に示した。比較のため送電距離21cmと31cm測定におき海水中と空気中の結果を示している。

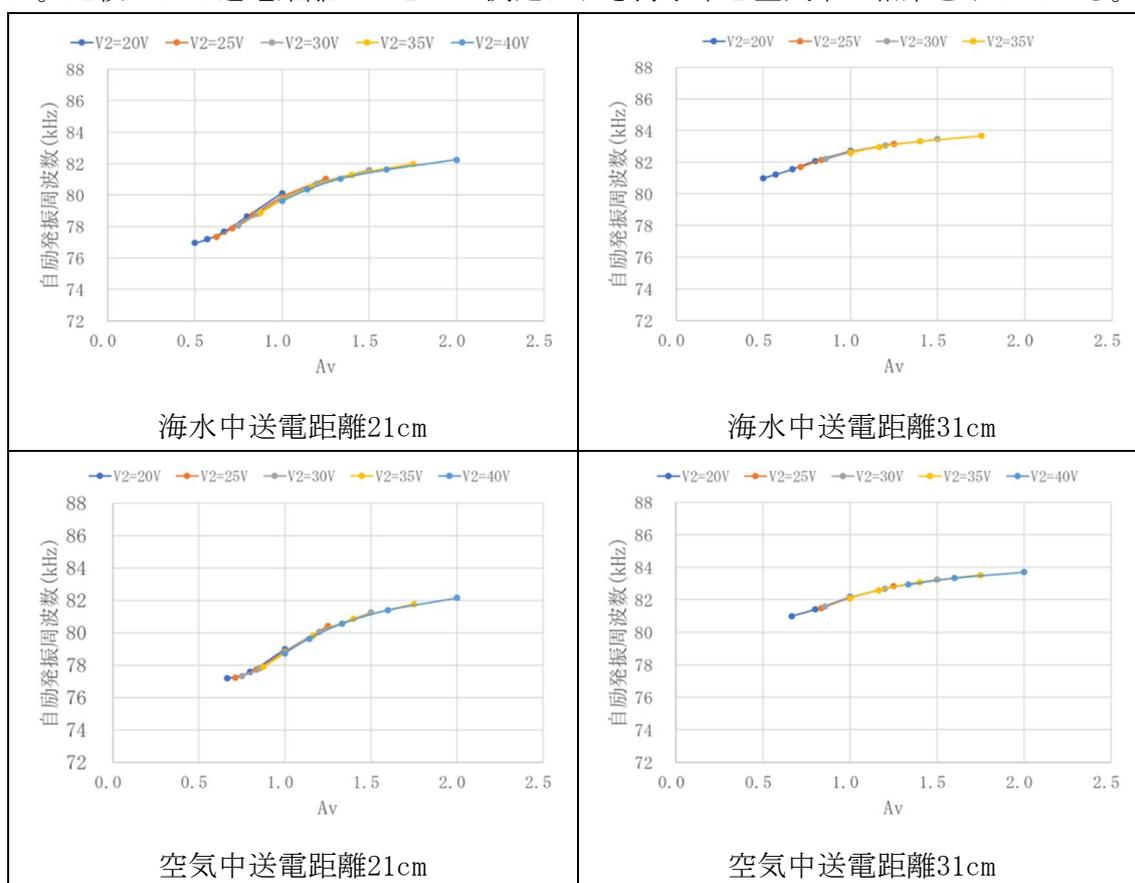


図6-1 簡易試作機での自励発振周波数

図から、海水中空気中共に20Vから40VのどのようなV2電圧(受電電圧)においても、ある一定の送電距離(本図では21cm, 31cm)においてはAv値により自励発振周波数が一意に決まることが分かる。即ち、送電距離と自励発振周波数との関係をあらかじめ別の手段で調べておけば、自励発振周波数の測定のみによって送電距離が予測できることになる。また、空気中に比べ海水中の方において自励発振周波数が高周波になることから、海水の導電率により自励発振周波数が影響を受けていることが分かり、更にそうした自励発振周波数の遷移を制御に積極的に使えることが期待された。

ここでこの制御性を調べるため、実験的に簡易試作機の送受電コイル間に介在物を配置し、自励発振周波数を測定した。図6-2に、1辺28cm厚み1mmのアルミ板(以後、これを金属異物と呼ぶ)を、送電コイルから15cm離れた状態で配置し自励発振周波数を測定した結果を示した。なお、測定の都合上空気中の結果である。

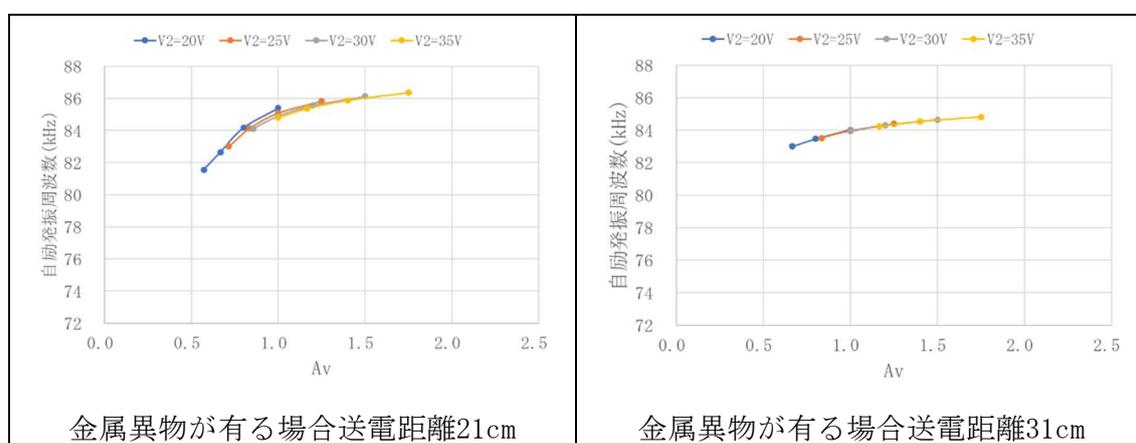


図6-2 簡易試作機での自励発振周波数(金属異物が有る場合)

図から図6-1の金属異物が無い場合と同様にして、金属異物が有る場合でも20Vから35VのどのようなV2電圧(受電電圧)においても、ある一定の送電距離(本図では21cm, 31cm)においてはAv値により自励発振周波数が一意に決まることが分かる。また図6-1の金属異物が無い場合と比べ金属異物が有る場合には、自励発振周波数が顕著に高周波になることが分かる。

これらの結果をより明確にするため、送電距離を16cmから31cmに変化させた場合の自励発振周波数測定結果を、金属異物が無い場合と有る場合に関して図6-3に示した。なお、測定の都合上いずれも空気中の結果であり、金属異物が有る場合の送電距離16cmにおける測定結果は無い。図から金属異物が無い場合と有る場合を比較すると、両者の自励発振周波数値やAvに対する距離依存性に顕著な違いが有ることが確認できる。即ち自励発振周波数を調べることにより、規定以上の自励発振周波数の場合には金属異物が送受電コイルの間に存在すると判定し、等無線充電を停止する制御が行える。

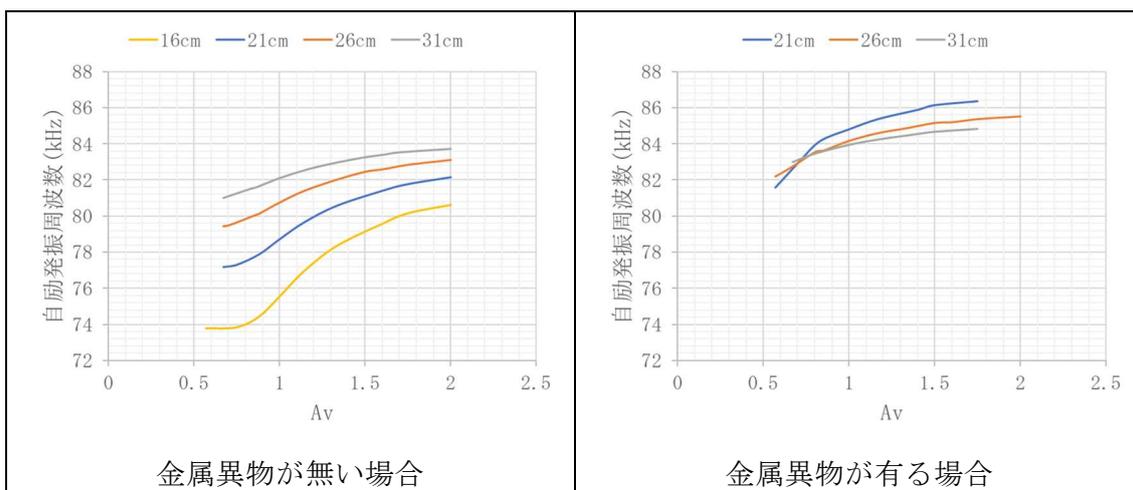


図6-3 簡易試作機での自励発振周波数の送電距離依存

以上の結果は、 A_v 値を決めて制御を行う場合に関するものであり、適用できる送電電圧及び受電電圧の範囲は広い。一方で、実際には複雑な制御となる。これまでの結果から V_1 (送電電圧)と V_2 (受電電圧)を同一とすることにより送電電力、伝送効率は共に目標を達成できる見込みが立っていることから、制御が簡易化できるためにも $V_1=V_2$ の方が望ましい。そこで $V_1=V_2$ とした結果を図6-4に示した。

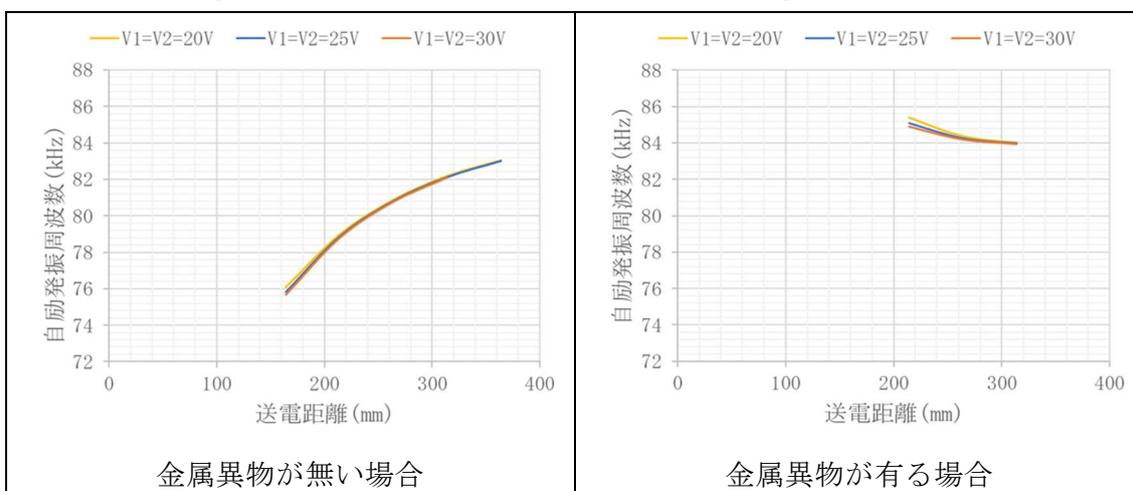


図6-4 $V_1=V_2$ での自励発振周波数の送電距離依存

図から、金属異物の有無にかかわらず $V_1=V_2$ (20V~30V) では送電距離に対して自励発振周波数が一意に定まることが分かる。また金属異物が無い場合と有る場合で顕著な違いが見られる。即ち、自励発振周波数から送電距離を見積もることができ、更には金属異物の有無も判定可能である。

(ii) 自励発振周波数を用いた制御方法に関して

自励発振は送電装置内及び受電装置内の共振コイルと共振コンデンサからなる共振系の磁気的な結合のもと、受動的なノイズや外部発振器をトリガにして生起される。このため、その自励周波数は上記結合状態の影響を受ける。(i)に記載した自励発振の周波数特性は、特に無線充電の開始時の制御や無線充電中の異常を検出し停止する際に有用となる。

送電装置及び受電装置が海水中にある場合等自励発振が継続しない場合に備え外部発振器による他励発振機能も備えるとして、図6-5に基本的な制御フローチャートを示した。図中 f_0 とは送電装置内にある共振系の共振周波数であり、 f_s とは自励発振周波数を示す。他励発振での仮起動の後に自励発振に切り替えるようにするが、自励発振が継続せず規定回数以上に他励発振と自励発振の切替えが起こるようであれば、異常が発生していると見なし、通知の後に送電を中止する。また自励発振が継続しても規定外となるようであれば通知し、送電を中止する。仮起動に際しては小さい電力とするが、インバータ等の回路が正常動作しかつ自励発振が生起されるのには十分な電力とする。前述したように、送電電圧と受電電圧はあらかじめ同一とすることで実際の制御はより簡単にできる。

ここで図中には示していないが、電池状態の監視は送電装置受電装置の両方とも常時行う必要があり、送電装置側の電池に対しては特に過放電を注意し、受電側の電池に対しては特に過充電を注意する。即ち、無線充電の開始前から電池状態を常時モニターし適切な制御を行うようにする。また、各装置内の温度(特に電池、スイッチ素子)や電圧(特に共振電圧)もモニターし、規定以上になった場合には通知や装置停止を行う。

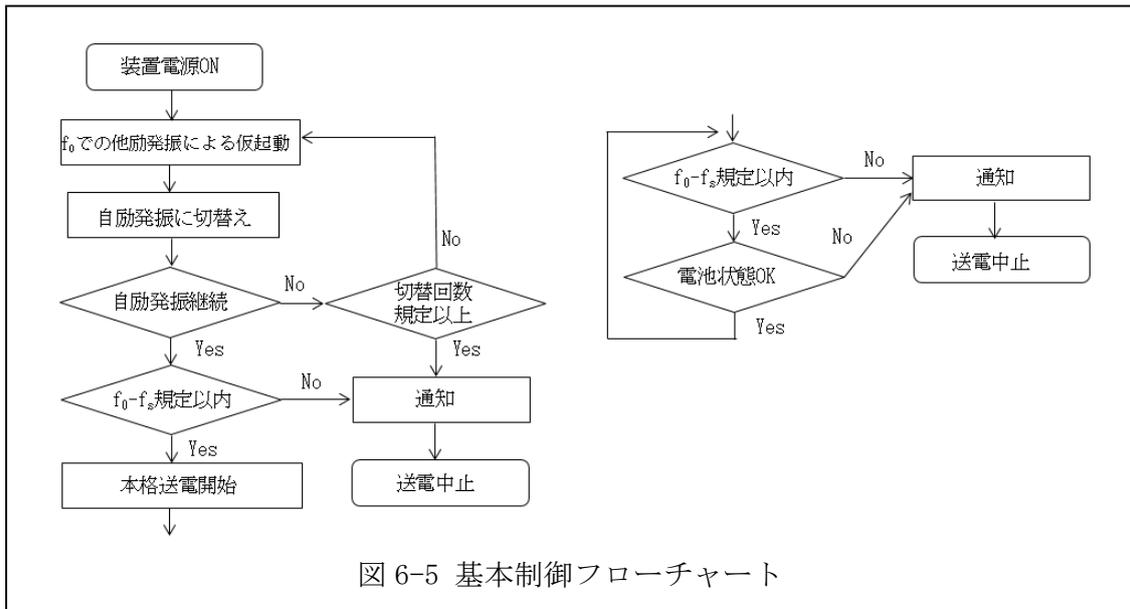


図 6-5 基本制御フローチャート

(iii)昇降圧回路を用いた制御に関して

以降は、電池制御や送電受電電力の調整等に関する具体的な検討事項を記載する。初めに、実施項目④で作製した原理確認機の仕様と、7直のリチウムイオン電池が使用可能な双方向昇降圧DCDCコンバーターを検討した。特に耐圧が高いものが必要であることや設計ツール等が備わっていることから、アナログ・デバイセズ製LT8708が好適であることが分かった。図6-6にLT8708の概略図(スキーマティック)を示すと共に表6-1に主な仕様を示した。^[6] 図で示したように4つの内蔵スイッチにより双方向に昇降圧を行う。また、表に記載したように6つの内蔵エラーアンプにより入力電圧(VIN)、出力電圧(VOUT)、入力電流(順方向と逆方向)、及び出力電流(順方向と逆方向)の6つを制御する。なお、順方向とは図6-6中VINからVOUTへの電力の流れを指す。

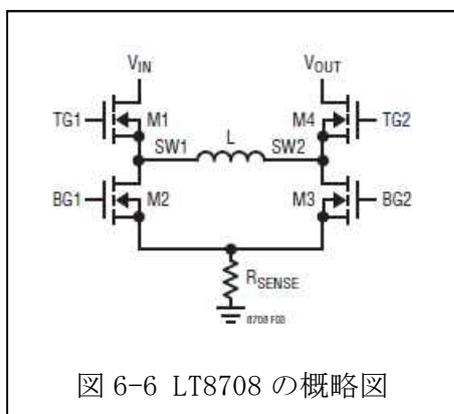


図 6-6 LT8708 の概略図

表6-1 LT8708の主な仕様

概要	双方向機能を備えた同期 4 スイッチ昇降圧 DC/DC コントローラ
VINCHIP 範囲	2.8~80V(入力電圧、動作電圧)
VOUT 範囲	1.3~80V(出力電圧)
同期整流動作効率	最大 99%
チップサイズ	40 ピン QFN (5x8mm)
レギュレーション	6 個の独立したレギュレーション <ul style="list-style-type: none"> ・ VIN 電流(順方向と逆方向) ・ VIN 電流(順方向と逆方向) ・ VIN 電流(順方向と逆方向) ・ VIN と VOUT の電圧 充電時：電圧と VOUT 電流で CVCC 充電 放電時：VOUT 電圧で供給電圧

図6-7に、LT8708(以後、昇降圧回路と呼ぶ)を用いて表5-1で示した7直リチウムイオン電池を試行的に充電した結果を示す。また、図6-8に用いた充電構成を示す。直流電源から30Vを昇降圧回路に供給し、昇降圧回路を7直リチウムイオン電池に対する充電

回路として機能するように制御した。また、7直リチウムイオン電池にはFG(Fuel Gauge)が備わっており、そのFGからSMBus(System Management Bus)を介して電池の電圧(V(smb))、電流(I(smb)及びSOC(State of Charge:充電率、満充電時100を1/100とし図示した)をワンボードマイコンであるArduinoによって読み出し可能とした。図6-7から、約170分後に定電流充電(以後、CC充電と呼ぶ)から定電圧充電(以後、CV充電と呼ぶ)に移り約210分後に満充電となっていることが分かる。即ち、昇降圧回路を制御することにより、昇降圧回路を7直リチウムイオン電池に対する充電回路としても用いることが可能となった。

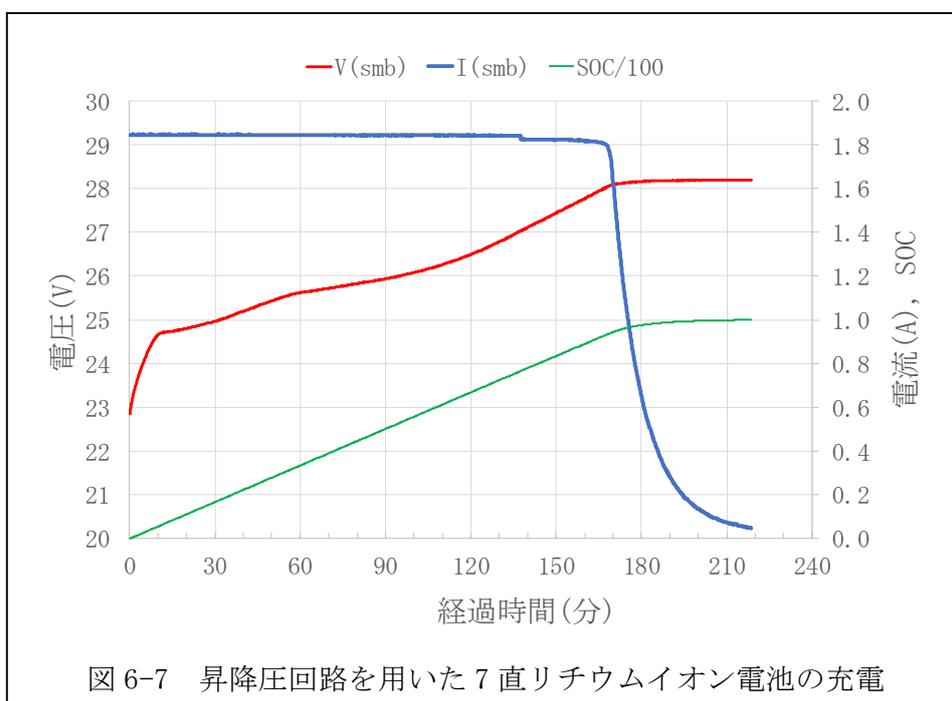


図 6-7 昇降圧回路を用いた7直リチウムイオン電池の充電

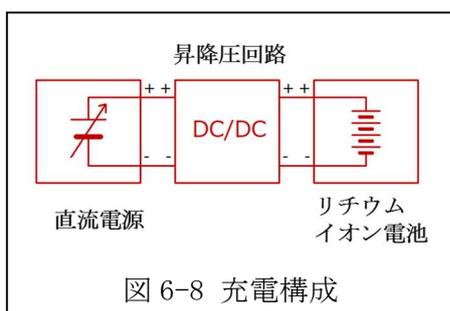
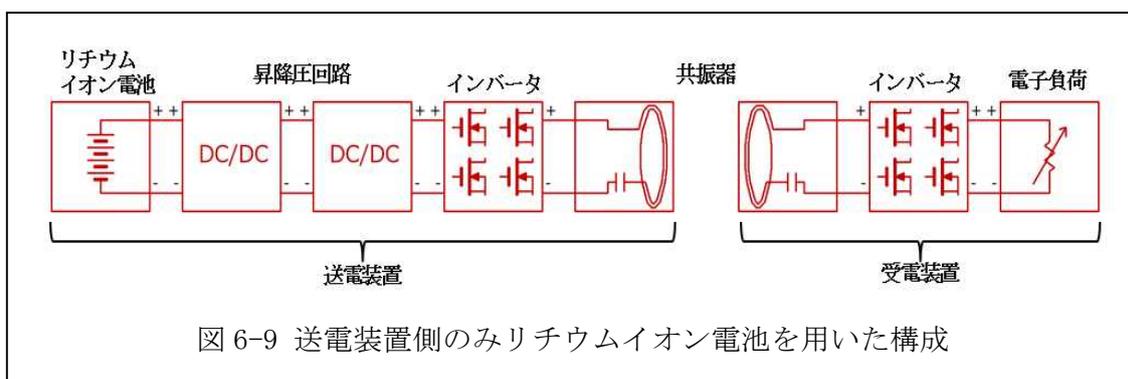


図 6-8 充電構成

次に、実際に無線充電を行うに当たり、種々の技術的課題を解決するためにステップを持って臨んだ。

まずリチウムイオン電池の放電による無線送電を確認するために、送電装置側のみにリチウムイオン電池を用い、受電装置側は電子負荷とした。図 6-9 に用いた構成を示す。送電装置側には昇降圧回路を 2 つ配置し、リチウムイオン電池に近い方を主に電



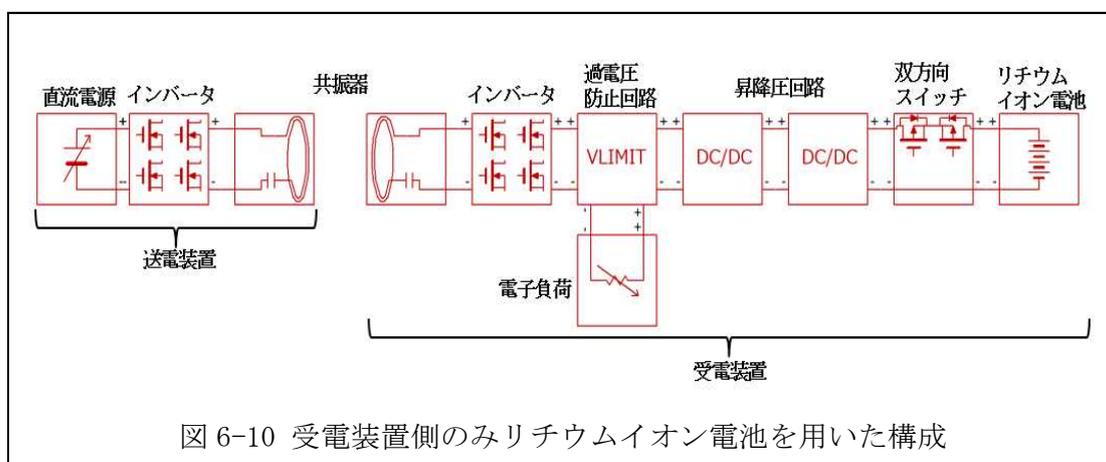
池放電制御とし、インバータに近い方を主に送電電圧制御として用いた。なお、受電装置側のインバータはゲートをオフし、実質上全波整流器として機能させた。

測定結果を表 6-3 に示す。電池電圧の約 27.9V を昇降圧することにより送電電圧を約 7.7V から 38.7V まで変化させ、受電電圧を約 20V にて電子負荷で受けた。昇降圧回路の特性及び無線充電の特性から送電電圧が 28V 付近で効率約 83% となった。

表 6-3 測定結果

電池電圧 (V)	送電電圧 (V)	送電電流 (A)	送電電力 (W)	受電電圧 (V)	受電電流 (A)	受電電力 (W)	伝送効率 (%)
27.892	7.702	0.294	8.200	19.97	0.18	3.59	43.8
27.847	17.884	0.532	14.815	19.96	0.47	9.38	63.3
27.791	28.497	0.803	22.316	19.96	0.93	18.56	83.2
27.741	38.746	1.053	29.211	19.96	1.06	21.16	72.4

次のステップとして、受電装置側のみリチウムイオン電池を用い、送電装置側は直流電源とした場合の結果に関して記載する。図6-10に用いた構成を示す。



受電装置側には昇降圧回路を2つ配置し、リチウムイオン電池に近い方を主に電池充電制御とし、インバータに近い方を受電電圧制御として用いた。受電装置側のインバータはゲートをオフし、実質上全波整流器として機能させた。ここで本研究のように直列共振にて無線充電を行う際には、位置ずれや負荷変動等により受電電圧が設計値以上に高電圧となる可能性がある。このため、受電装置側のインバータの後段には過電圧防止回路を設け、設計以上の高電圧が入っても昇降圧回路等が破損しないようにした。更に、想定外の高電圧が掛かってもリチウムイオン電池を用いた実験が安全に進められるように、過電圧防止回路と並列に電子負荷を配置した。また、昇降圧回路に対してリチウムイオン電池を活線挿入可能とし、かつ安全に双方向充放電できるように、昇降圧回路とリチウムイオン電池の間には2つのFETからなる双方向スイッチを配置した。

測定結果を表6-4に示す。送電電圧を50Vとし受電電圧を約25Vで受けるように昇降圧回路を制御することにより、リチウムイオン電池が無線充電できることを確認した。

表 6-4 測定結果

送電電圧 (V)	送電電流 (A)	送電電力 (W)	受電電圧 (V)	受電電流 (A)	受電電力 (W)	伝送効率 (%)
50.0	1.59	79.5	24.97	1.829	45.67	57.45

以上の結果から、昇降圧回路で送電受電電圧を制御しかつリチウムイオン電池の無線充放電が可能となったため、双方向で無線充電を行うための技術基盤が完成した。

(4) 原理検証のための装置試作及び最終目標の達成度検証

実施項目⑦ 双方向無線充電装置の試作

本実施項目では、これまで得た知見の検証や最終目標の達成度を調べるために実際に装置の試作を行い、真水中及び海水中での測定を行った。

この結果、以下の研究成果が得られた。

- ・真水中においては85kHzの周波数においても送電パワー及び伝送効率の目標を達成することができた。一方で海水中においては送電パワーにやや不足が生じた。
- ・交流抵抗値から、海水中ではより低周波(35kHz)の方が送電パワー及び伝送効率が高められることが予想されたため、35kHzにて再度測定を行ったところ海水中での目標を達成することができた。

以下に順を追って説明する。

(i) 装置の試作に関して

海水中において送電距離、共振周波数、送受電電圧等の各条件を測定可能とするため、昇降機、共振コンデンサ、外部制御可能な回路、及びソフトを作製した。

まず昇降機に関して記載する。昇降機は、製造ライン等で用いる電動ステージ等から組立を行うことを当初計画したが、想定以上に高価になること及び移動幅が不足することから不相当と判断し中止した。代わりに、図7-1に示したような市販の昇降デスク（FLEXISPOT社製電動式昇降デスク型番；EN1）の上下機構を用い、またアルミフレ

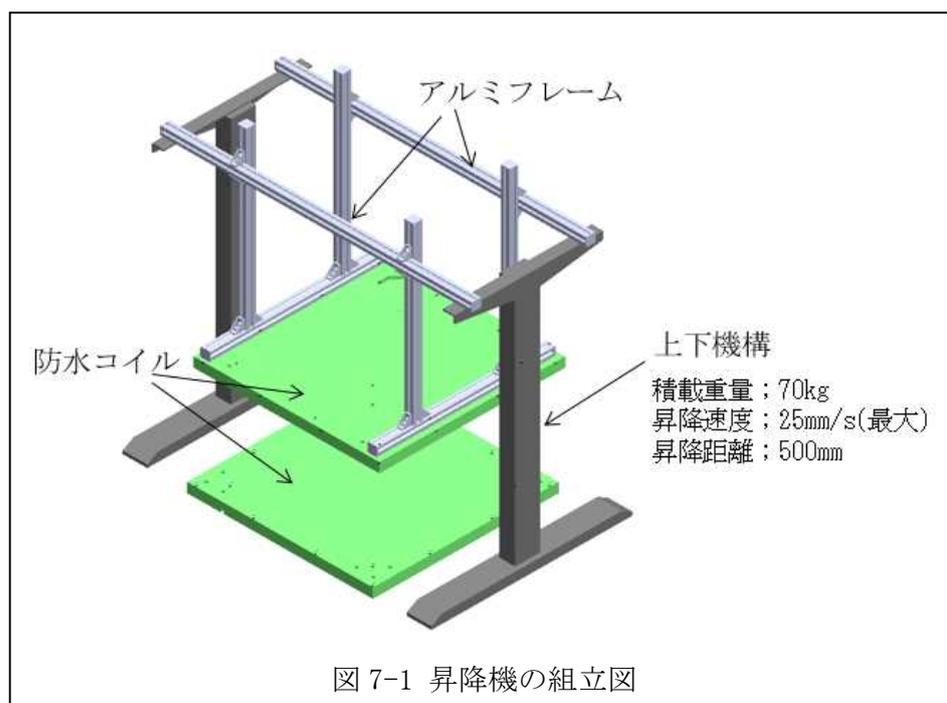


図 7-1 昇降機の組立図

ームと防水コイル(図5-9に図示)とを連結するように追加配置することにより、安価な構成にてかつ十分な量、防水コイルを海水中で上下移動可能とした。ここで、上下機構部は別途用意した水槽(カイスイマレン社製角型槽KH300)の外側に配置しながら、防水コイルは海水中に全て囲まれるようにした。

図7-2に用いた水槽及び作製した昇降機の写真を示す。水槽内の下側に配置する防水コイルがシールドルーム床面の影響を極力受けないようにするために、樹脂製(ポリプロピレン)のスペーサにより約10cm床面から離し、また防水コイル前面に海水が回り込むように、水槽と防水コイルの間には約1.5cmの間隔を設けた。

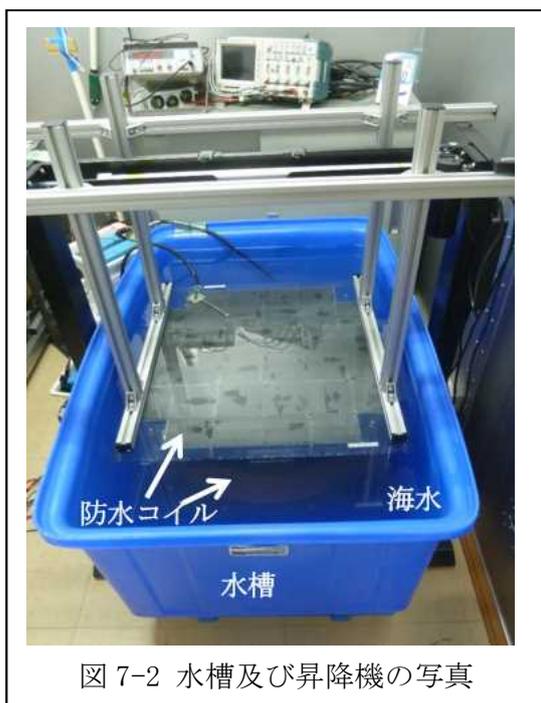


図 7-2 水槽及び昇降機の写真

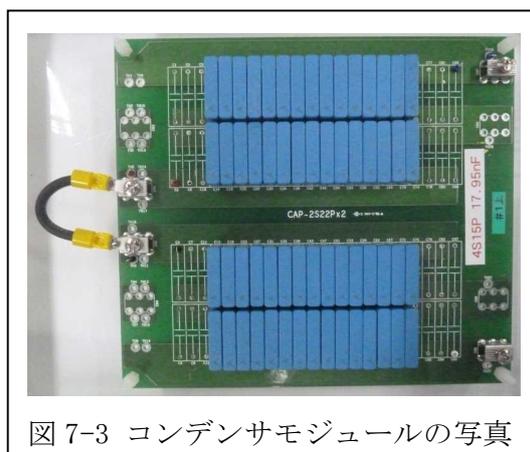


図 7-3 コンデンサモジュールの写真

次に共振コンデンサに関して記載する。直列共振とするため共振コンデンサには高い電圧が掛かる。そこで、共振コンデンサは防水コイルと一体構造とはせず防水コイルから海水中外に出るリード線部を作り、そこに共振コンデンサを配置して必要に応じて交換等ができるようにした。共振コンデンサは1kV以上の高い電圧に耐え、防水コイルのインダクタンスに沿った共振容量を持たせるためモジュール状にした。(以下、コンデンサモジュールと呼ぶ) 図7-3に、用いたコンデンサモジュールの例を示す。4.7nFの耐圧1kV(60Hz)のフィルムコンデンサを2直若しくは4直にして耐圧を高め、適当な数を並列にすることにより共振容量を持つようにした。また、共振容量が広く設定できるように、基板毎に直並列可能とするための端子を設けた。防水コイルのインダクタンスと共振コンデンサモジュールの共振容量を実測し、共振周波数になるべく同一となるように調整した結果、防水コイルと共振コンデンサモジュールからなる共振系の共振周波数は85.42kHz及び85.38kHzとなった。

次に回路及びソフトに関して記載する。まず回路に関しては実施項目④で試作した回路に、実施項目⑥の(iii)で記載した昇降圧回路を追加することにより、送受電電圧の昇降圧及びリチウムイオン電池の充放電が可能となるようにした。図7-3にブロック図を示す（送電受電コイル及びコンデンサモジュールは不図示）。送電装置及び受電装

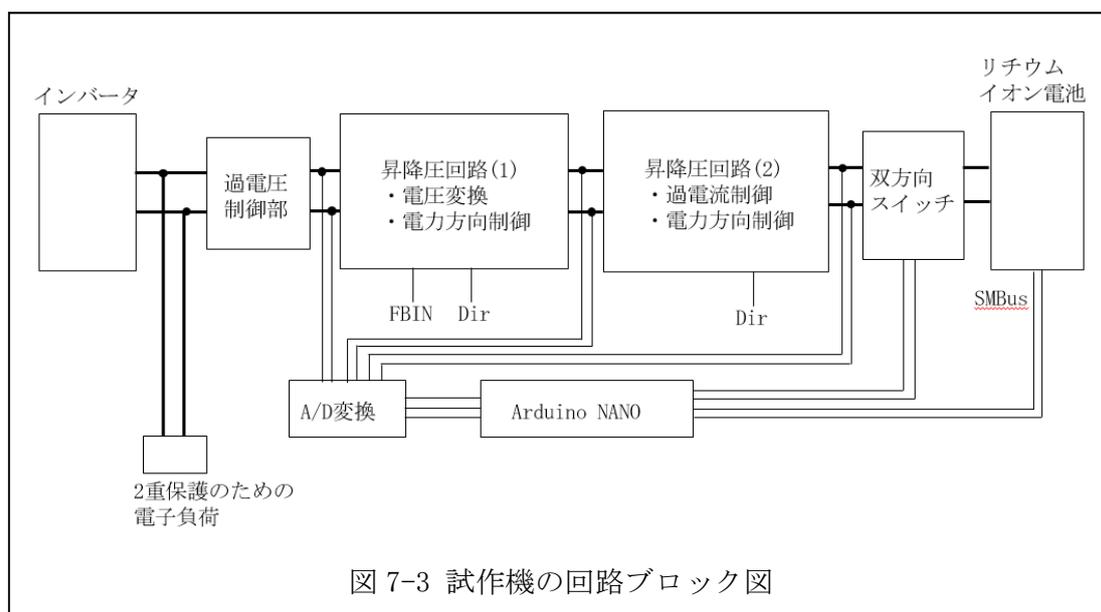


図 7-3 試作機の回路ブロック図

置とも同じ回路構成になるが、送電装置の場合には電力は図の右から左へ流れ、受電装置の場合には電力は図の左から右へ流れる。ここで、送電装置の場合にはリチウムイオン電池から放電された電力(以下、放電パワーと呼ぶ)に対して、双方向スイッチ及び2つの昇降圧回路(1)(2)によって電力の方向制御が行われ、昇降圧回路(1)により適当な電圧(送電電圧)まで昇降圧される。インバータでは自励発振によって発振が行われ、上記送電電圧がDC-AC変換され送電コイルに送電電力が供給される。また受電装置の場合には、受電コイルを介してインバータで受けた交流電力が同期整流により整流され、昇降圧回路(1)により適当な電圧(受電電圧)まで昇降圧される。また昇降圧回路(1)(2)及び双方向スイッチにより電力の方向制御が行われ、昇降圧回路(2)にてリチウムイオン電池に対して適切な電圧と電流に変換され、双方向スイッチを通して充電される。(以後、充電パワーと呼ぶ)ここで、送電受電電圧、昇降圧回路(1)と(2)間の電圧、昇降圧回路(2)と双方向スイッチの間の電圧に関しては、A/D変換を介してArduino Nanoにて検出を行い、リチウムイオン電池の電圧やSOC等の状態はSMBusを介して同じくArduino Nanoにて検出を行った。また、インバータと昇降圧回路(1)の間には過電圧制御回路を設け、規定以上の電圧が入出力されないようにした。更に、リチウムイオン電池を用いた無線充放電を安全に進めるために、電子負荷を過電圧制御回路と並列に配置して2重保護として機能するようにした。

次にソフトに関しては上記電圧をモニターするとともに、昇降圧回路(1)(2)に配置されている制御端子の内の主に2つ(図中 Dir;電力の方向制御 FBIN;昇降圧電圧制御)を制御するようにした。ソフトはArduino内に配置し、別途PCによりパラメータ入力等が可能ないようにした。なお、ソフトによる制御は行わずに固定値としたが、昇降圧回路には予め上限電圧値電流値を設定する抵抗器等を配置した。

図7-4に実際に作製した双方向無線充電装置の試作機及び周辺装置の写真を示す。写真で示したように、制御用ノートPCを挟んで両側に同じ構成の送受電装置を設け(但し都合上、2重保護用の電子負荷は1台のみ)、また装置の送電受電状態が目視でモニターできるようにテスターを4台配置した。ここでコイル間の伝送効率、電力、発振周波数を測定するために日置電機(株)製電力計PW6001-16及び電流プローブCT6862(共に写真には掲載無し)を用いた。

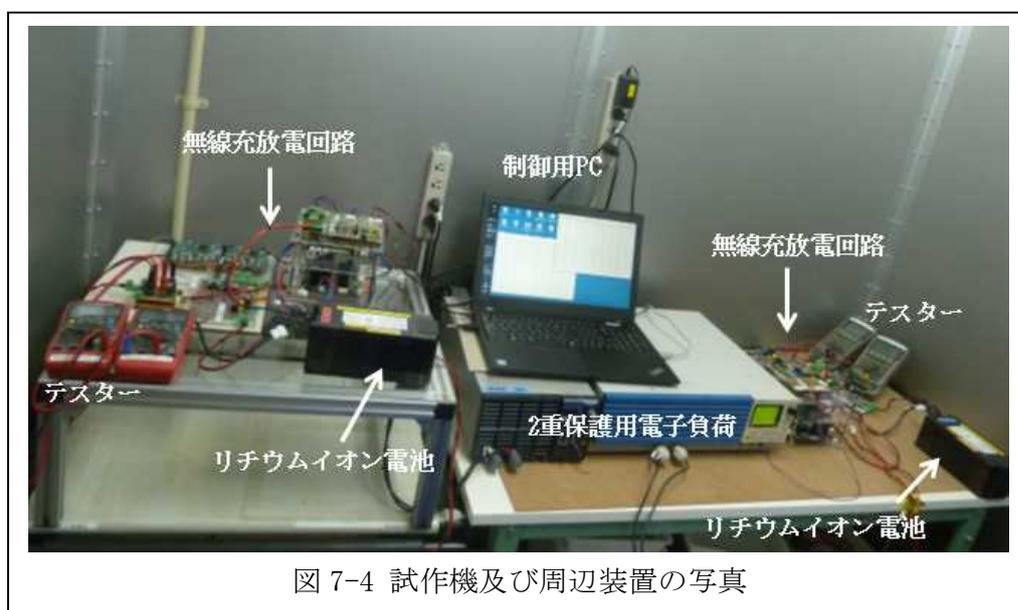


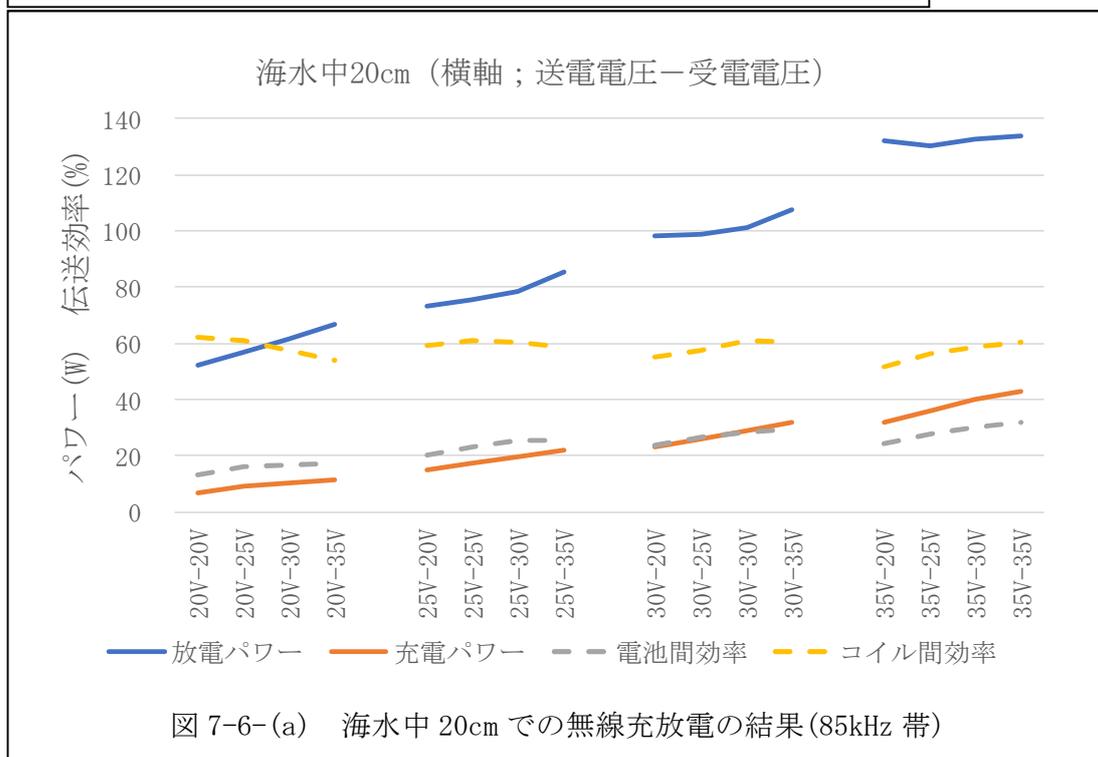
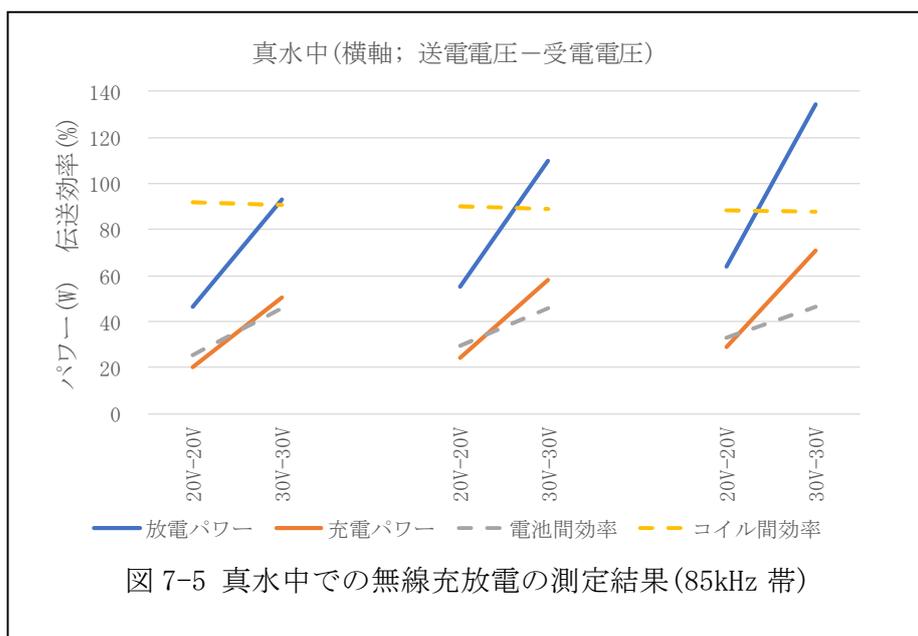
図 7-4 試作機及び周辺装置の写真

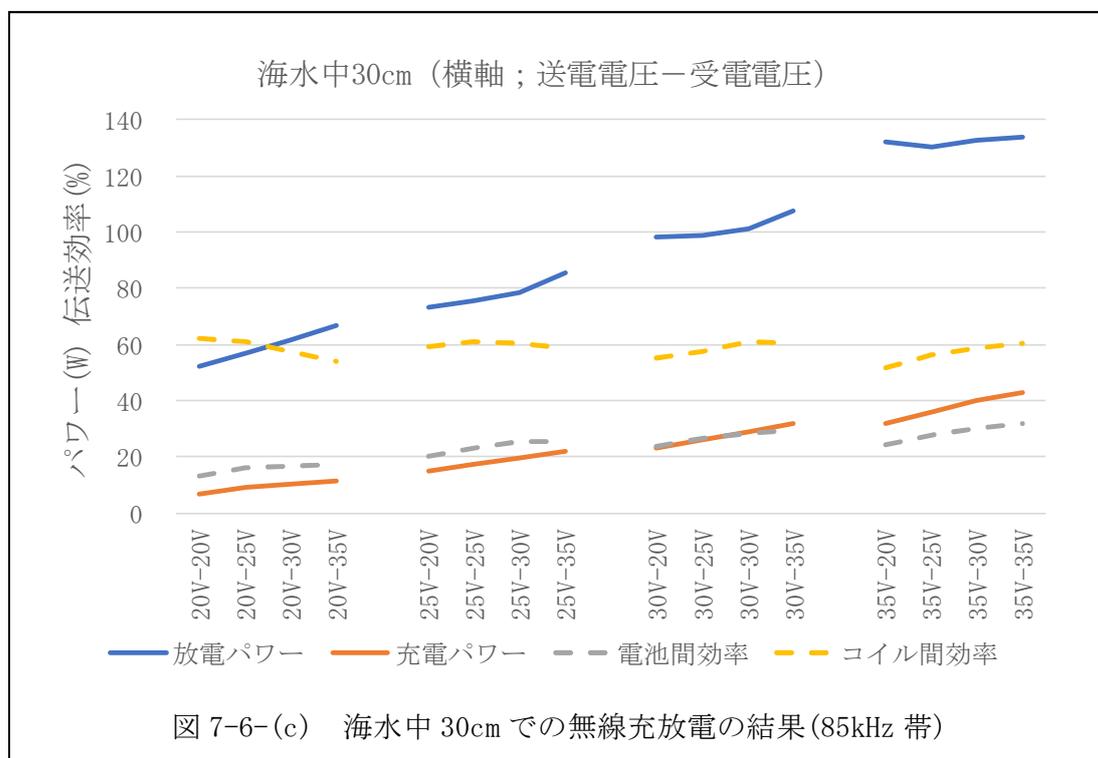
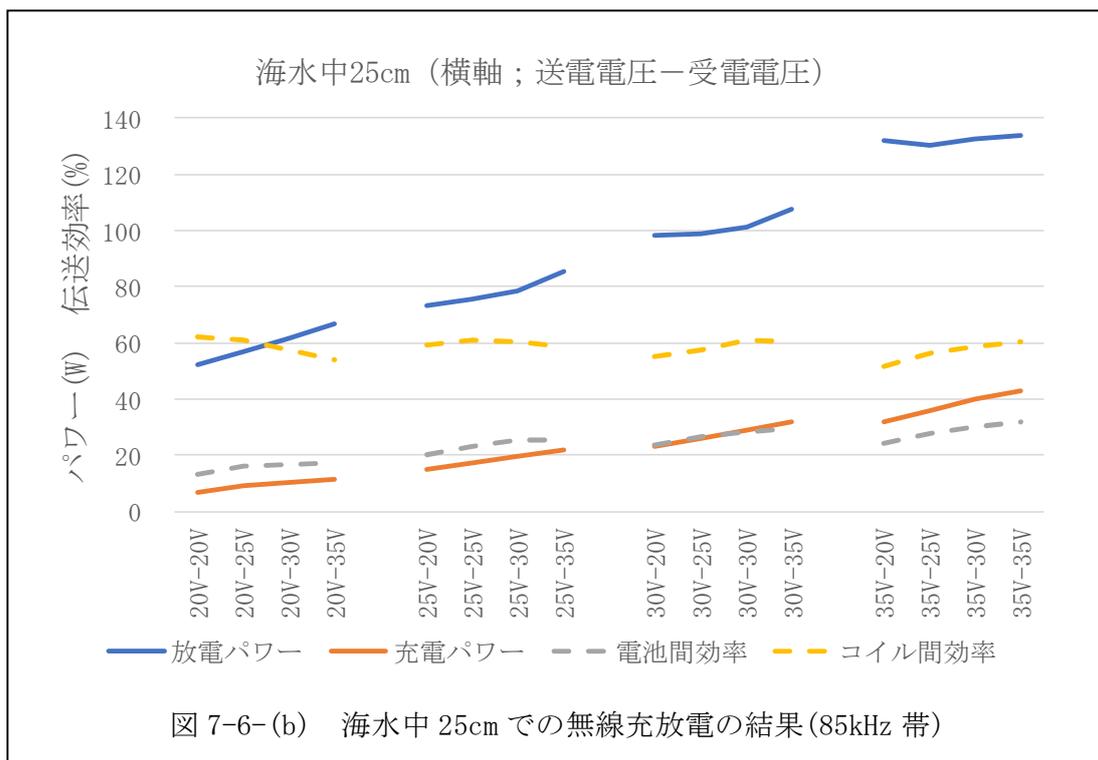
(ii)測定結果に関して

以下に、(i)に記載した昇降機及び回路・ソフト等によって行った測定結果を記載する。図7-5に、真水中にて送電距離を20cm、25cm、及び30cmとした場合のパワー及び伝送効率を示す。ここでパワーはリチウムイオン電池からの放電パワー及び充電パワーを示し、効率は電池間効率(放電パワー/充電パワーx100)とコイル間効率の両方を示した。なお、本測定では送電電圧と受電電圧は同一として20Vと30Vとして測定を行った。送電距離30cm送受電電圧30Vにおき、コイル間効率は約90%、充電パワーは約70Wであり、目標値であるそれぞれ70%以上及び50W以上をクリアした。

図7-6-(a)(b)(c)に、海水中にて送電距離をそれぞれ20cm、25cm、及び30cmとした場合のパワー及び伝送効率を示す。なお、前述したように共振周波数は約85kHzの共振系を用いた。送電距離30cm送受電電圧35Vにおきコイル間効率は約60%、充電パワーは約

40Wであり、目標値である伝送効率50%以上は達したが、50W以上はクリアできなかった。電圧を40V以上に上げれば充電パワーはクリアできると予想されたが、再度周波数の検討を行うことにより、効率の更なる改善と共に充電パワーの目標をクリアすることを目指した。なお、コイル間効率は前述したように約60%となり、送受電電圧が等しい条件でブロードなピークを持つが、電池間効率に関しては送受電電圧が高い方が効率は高くなった。これはインバータの性能や昇降圧回路の特性に起因し、本測定条件より高い負荷の方が効率を高められると考えられる。





ここで改めて、防水コイルの交流抵抗と、その交流抵抗値から $Q = \omega L / R$ (ω :角周波数 L :自己インダクタンス R :交流抵抗)として2MHzまでのそれぞれの周波数特性を測

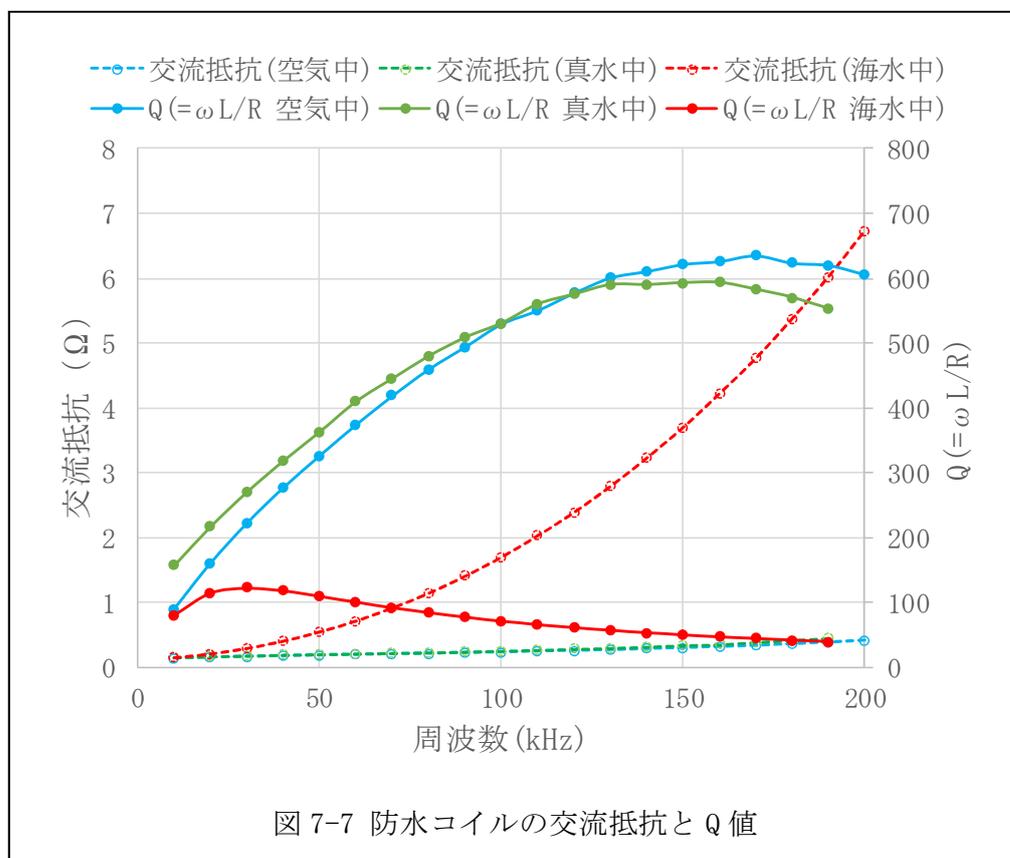
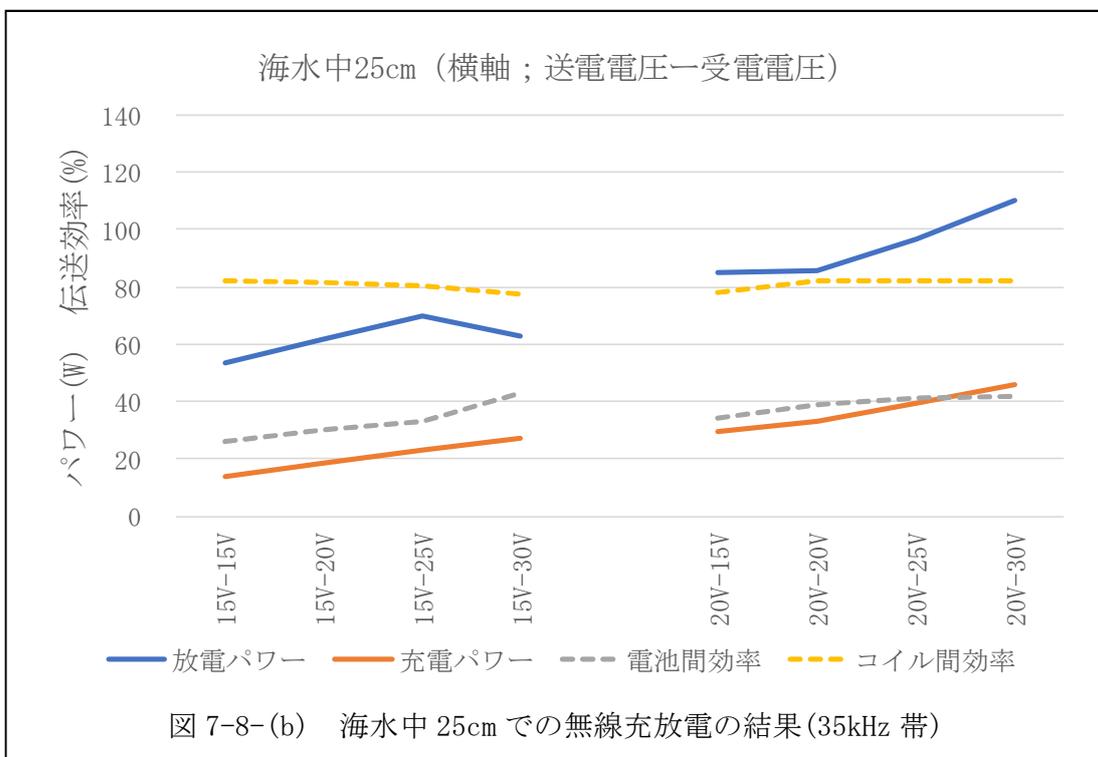
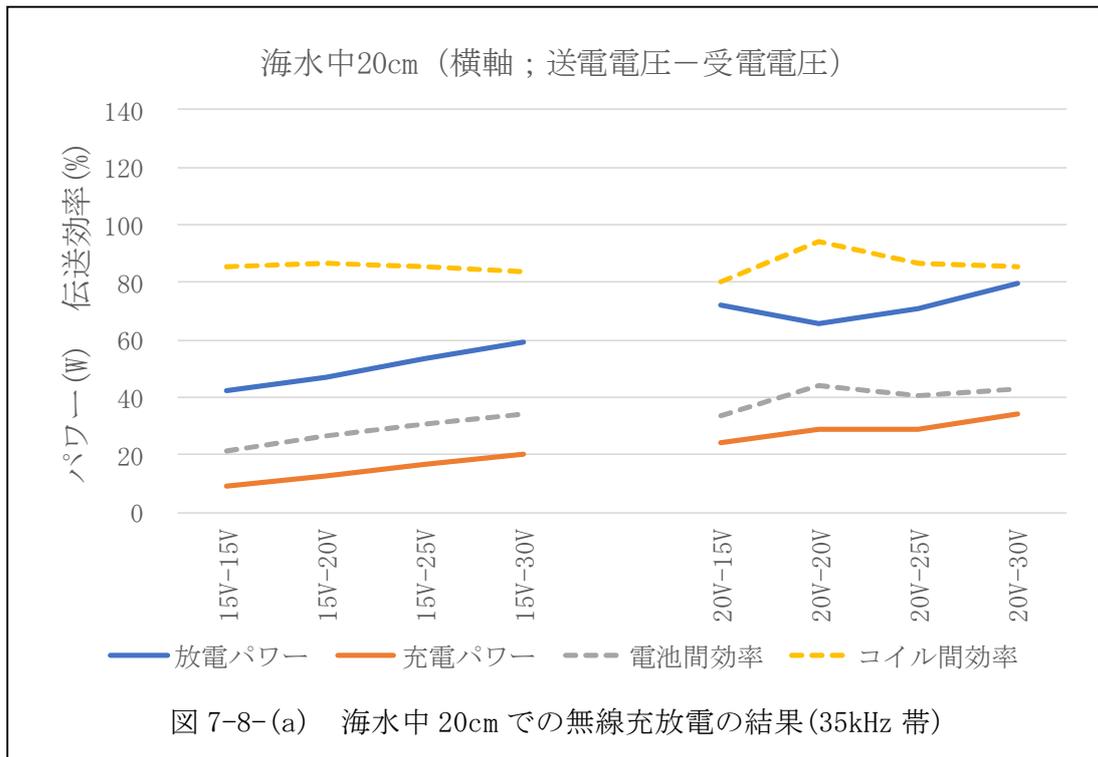
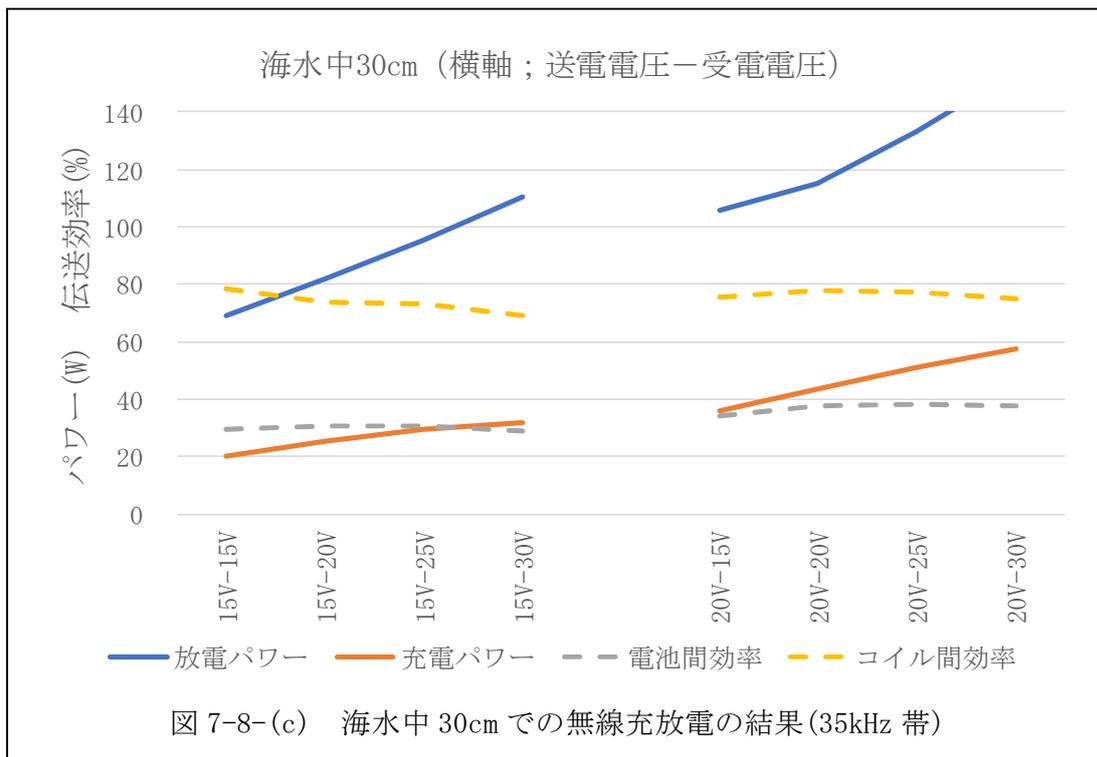


図 7-7 防水コイルの交流抵抗と Q 値

定した。図7-7にその結果を示す。図から空気中及び真水中における交流抵抗は、例えば100kHzで0.2Ω以下と低いのに対して海水中では約2Ωとなり、更に上昇する傾向にある。Q値で比較すると、空気中及び真水中ではそれぞれ170kHz, 160kHz付近でピークとなりその値は約630, 590になるのに対して、海水中では30kHz付近でピークとなり約120となる。即ち、Q値に注目して伝送効率を高めようとする、空気中及び真水中ではこれまでの測定の85kHz付近より倍程度周波数が良く、海水中では半分程度以下の周波数が良いと推測される。

図7-8-(a) (b) (c)に、共振周波数が約35kHzとなるようにコンデンサモジュールの容量値を調整した共振系を用い、海水中にてそれぞれ送電距離を20cm、25cm、及び30cmとした場合のパワー及び伝送効率を示す。送電距離30cm、送電電圧20V受電電圧30Vにおきコイル間効率は約75%、充電パワーは約58Wであり、目標値である伝送効率50%以上、50W以上をクリアした。ここで85kHzよりも35kHzの方がコイル間効率は約15%改善しており、上記のようにQ値を注目して伝送効率を高める方法が有効であることが示された。





次にリチウムイオン電池の充電状態に対する双方向無線充電特性を調べた。本測定においても共振周波数が約35kHzとなるように調整した共振系を用いた。但し、本測定に限ってはリチウムイオン電池の充放電時間を短くするため、インバータ内のFPGA回路等に対しては約8Wの外部電源供給（およそ待機電力に相当）を行った。また長時間の測定となるため、熱設計が十分でないスイッチング素子に加熱に懸念が生じたため、外部電源供給の小型のFAN(消費電力数W)を用い、特に双方向スイッチ部に風を当てるようにした。

初めに海水中での送電距離を20cmとして、送電距離を約5cm近づけたり遠ざけたりしてリチウムイオン電池に対する双方向無線充電が特に問題無く行われることを確認した。次に、海水中にて送電距離を30cmとした結果を以下に記載する。

図7-9に、ある決めた方向(以後、順方向と呼ぶ)及びそれとは逆方向の電力で行った、リチウムイオン電池に対する双方向無線充電の結果を示す。測定の都合上、順方向の測定においては放電側の電池が電圧約28V(SOC約95%)のものを用い、充電側の電池は電圧約25V(SOC約20%)のものを用いた。また、逆方向の測定においては放電側の電池が電圧約26.7V(SOC約80%)のものを用い、充電側の電池は電圧約26V(SOC約58%)のものを用いた。図から、順方向と逆方向で大きな特性の差は無く、リチウムイオン電池に対して双方向に無線充放電ができることが確認された。

ここで改めて電池間効率の結果に関して考察する。図7-10に示したように電池間効率は、放電側電池の昇降圧効率(放電回路効率含む) η_1 、DC-AC効率 η_2 、コイル間効率 η_3 、AC-DC効率 η_4 、及び充電側電池の昇降圧効率(充電回路効率含む) η_5 の掛け算で決まる。コイル間効率に関しては、海水中では共振周波数を低周波にすることにより改善したことは前述した通りである。一方、本試作機においては、制御ソフトを原理的に検証するためFPGAをインバータのゲートドライブ等に用いたため、無線充電に関わらない待機電力相当の消費電力が多かった。また用いたリチウムイオン電池は弊社開発済みのもので(7直21V~29V, 最大5A充電)、やや充放電能力が不足したため、昇降圧回路の高負荷での高効率性能を十分に引き出すまでには至れなかった。即ち、FPGAに抛らずマイコン等によりインバータ制御を行い、更に高出力のリチウムイオン電池を用いることにより、電池間効率は上げることができると予想される。表7-1に本試作機の効率と改善見込みを示した。本試作機では44%の電池間効率であるが、60%程度までは改善見込みが有る。

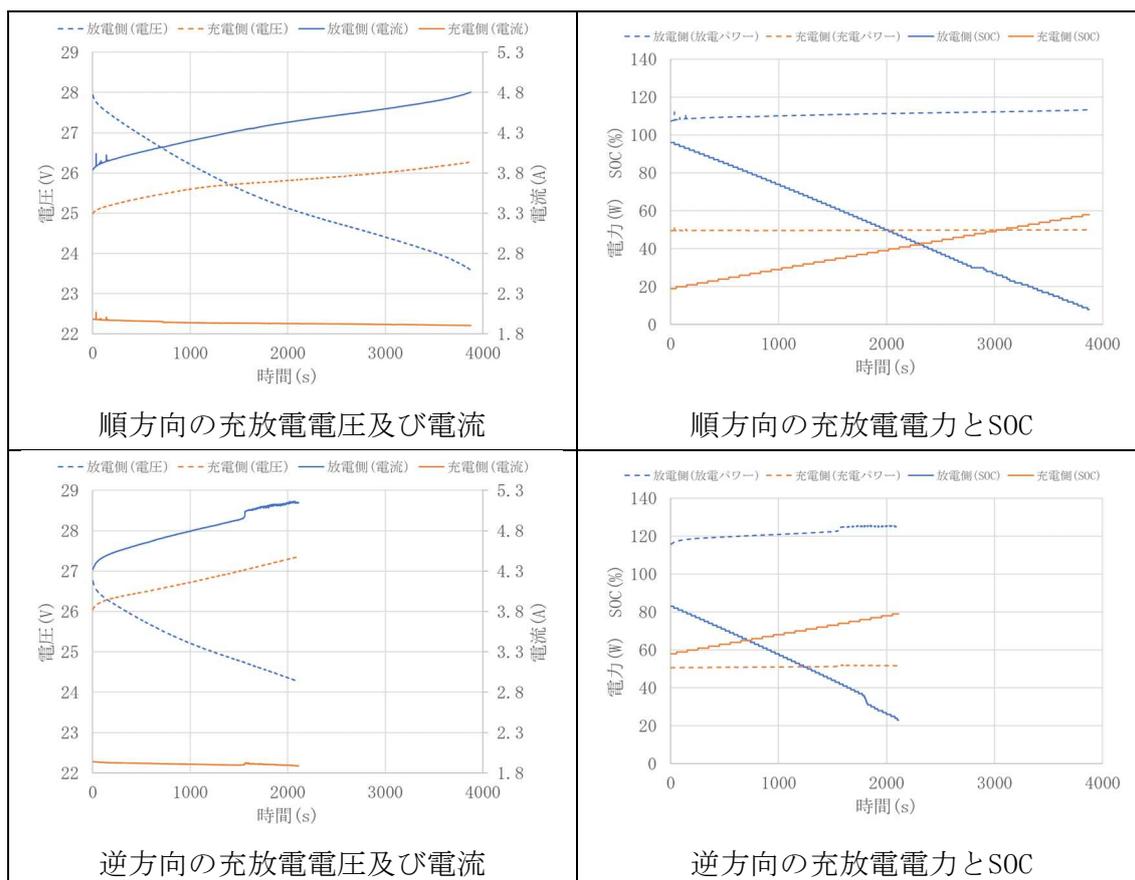


図7-9 双方向無線充電の結果

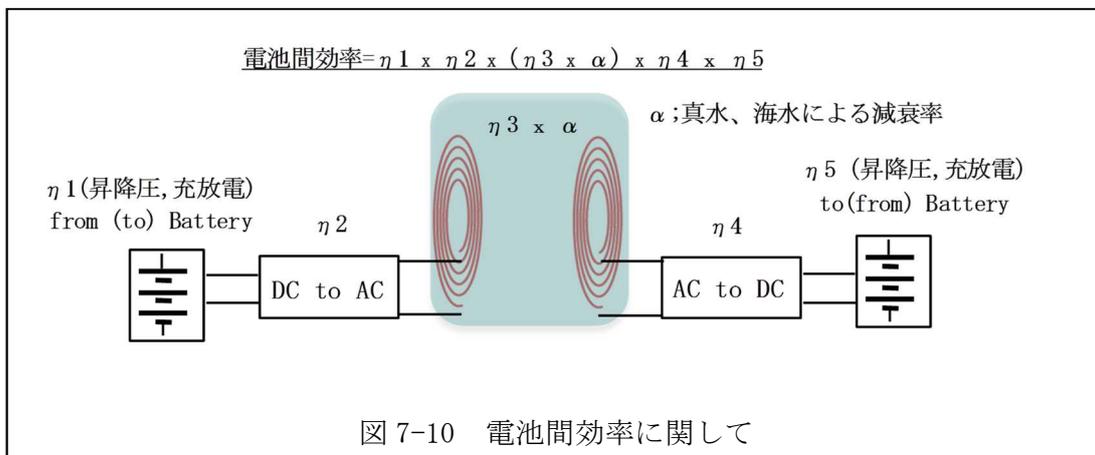


表 7-1 試作機の効率と改善見込み

	η_1	η_2	$\eta_3 \times \alpha$	η_4	η_5	$\eta_1 \times \eta_2 \times (\eta_3 \times \alpha) \times \eta_4 \times \eta_5$
本試作機	0.78		0.75	0.76		0.44
改善見込み	0.9		0.75	0.9		0.6

参考文献

- [1]石田、栗井、杉山, Measurement of resonator parameters for wireless power transmission system, IMWS-IWPT2011 Proceedings
- [2]栗井、小森、石田、石崎, 共鳴型ワイヤレス電力伝送に用いる共振器の比較検討, 信学技報Technical Report of IEICE WPT2010-01(2010-4)
- [3]居村, 磁界共振結合のワイヤレス電力伝送における中継アンテナの等価回路化, 電気学会論文誌D Vol. 131 No. 12 pp. 1373-1382
- [4]名雪 琢弥ほか, 双方向非接触給電システムに向けた要素技術開発, 電力中央研究所研究報告H09015, 2009
- [5]居村、堀, 電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論, 電気学会論文誌D Vol. 135 No. 6 pp. 697-710
- [6]ANALOG DEVICES LT8708データシート

3. 成果の外部への発表及び活動

本成果の外部発表は行っていない。

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

弊社のこれまでの知見等から、送電電圧と受電電圧を等しくすることが無線給電を高効率に行う上で有効であることが分かっていた。更に本研究を進めていく過程におき、送電受電電圧の制御に加え自励発振周波数を用いることにより、送電距離をあらかじめ見積もることが可能であることが判明した。このため、実際の海水中において対象の位置が様々にずれる場合にも適切な制御が可能となり、無線充電が安全に高効率に実施可能となる。本成果は特許出願を行った。

現在世界的にEVの充電を無線充電化する動きがあるが、規格化や互換性の点から無線充電の周波数は固定となる。本研究は一旦それら動向には関わらず、周囲環境を含めた共振系から生起される周波数（自励発振周波数）を積極的に活用したものであり、技術的広がりの方が大きいものだと期待される。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

本研究で用いたリチウムイオン電池は弊社基幹製品であり、現在はスマートフォン等民生機器が主要な適用先ではあるが、今後水中での用途拡大も期待される。この中で本研究成果は、水中でのリチウムイオンの充電にとって欠かすことができない重要な技術となりうる。また、本研究の自励発振技術、双方向での無線給電制御技術、及び電池制御技術は、水中での電源運用性を画期的に向上し、将来の展開先として民生分野以外のBtoB製品やインフラ点検等にも適用可能と期待される。また現在弊社では全固体電池の開発を積極的に進めており、将来本制御技術を応用できると考えている。

5. プロジェクトの総合的推進

本研究は原理検証に注力し研究実施者2名で適切に分担し研究を実施したが、課題の中でも特にリチウムイオン電池に関わる内容に関しては弊社内で開発経験豊富なメンバーの知見を活かし、研究成果を着実に上げるように推進した。

6. まとめ、今後の予定

自励発振の原理解析を行い、またその原理を水中及び海水中における双方向無線給電及び双方向無線充電に適用することにより、伝送効率を高効率化できることを示した。本研究によって得られた知見及び試作機により確認された性能は以下であり、予定していた研究目標は全て達成できた。

得られた知見

- ・自励発振の生起の仕組み
- ・第3共振系の導入による、伝送効率を高効率に維持する周波数の広帯域化
- ・共振コイルの電流検出から自励発振を得る方法
- ・リチウムイオン電池と昇降圧回路による双方向無線充電の高効率化方法
- ・自励発振周波数を制御に用いる原理的方法

試作機（1年目原理確認機）の性能

- ・機能：水及び海水を介しての双方向無線給電機能
- ・電力：双方向無線給電パワー
 - 水 201W以上261W以下（目標200W以上）
 - 海水 200W以上263W以下（目標200W以上）
- ・送電距離：30.5cm（目標30cm以上）
- ・伝送効率：水を介してのコイル間伝送効率77.2%以上（目標70%以上）
海水を介してのコイル間伝送効率76.2%以上（目標50%以上）

試作機（2年目双方向無線充電装置）の性能

- ・機能：水及び海水を介しての7直リチウムイオン電池双方向無線充電機能
- ・電力：双方向無線充電パワー
 - 水 70W（目標50W以上）
 - 海水 58W（目標50W以上）
- ・送電距離：30cm（目標30cm以上）
- ・伝送効率：水を介してのコイル間伝送効率90%（目標70%以上）
海水を介してのコイル間伝送効率75%（目標50%以上）

以上の結果から、今後具体的な設計を進めれば、無線双方向充放電の更なる高効率化及び高電力化を行うことができ、水中での電源運用性が画期的に向上することが期待される。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	該当なし
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	該当なし

(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）
無線給電システム	井戸寛 田中淳史	出願	特願2021-508014 (2021年2月16日)	特許	日本	
ワイヤレス送電装置	田中淳史 井戸寛	出願	特願2021-508010 (2021年2月16日)	特許	日本	
無線給電送電装置	井戸寛 田中淳史	出願	特願2021-029284 (2021年2月25日)	特許	日本	
ワイヤレス受電装置	井戸寛 田中淳史	出願	特願2021-029285 (2021年2月25日)	特許	日本	

(3) その他特記事項

該当なし