

令和 4 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

電界結合による海水中ワイヤレス電力伝送 利用法の基礎研究

令和 5 年 5 月

富士ウェーブ株式会社

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、富士ウェーブ株式会社が実施した令和4年度「電界結合による海水中ワイヤレス電力伝送利用法の基礎研究」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

① 内海、沿岸航路へのワイヤレス給電

一定の近海航路を走行する海上船舶に海底からワイヤレスで給電して、基本的に走行中給電を実現することを目指して、本研究では20cm程度の長さの模型船に対して50cm程度の深さの海水経由で50%以上の効率で10W以上の電力供給を行うことを目標とする。

② 海底探査用AUV(Autonomous Underwater Vehicle)などのワイヤレス充電

広く研究されている磁界結合型に対して電界結合型充電法を提案し、両者の利害得失を給電システムの寸法・重量、最適周波数、距離に対する伝送効率、人体へお影響、利便性などの点で比較対照する

1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

① 内海、沿岸航路へのワイヤレス給電

【要素課題】小型のボートに電気モータを装填しそれを用いて走行中給電実験を行う。実際に海上実験までは行かず10m程度の長い水路に給電線を敷設し、片端から高周波給電をして理論と対照し実用化への目途をつける。

(1) 先ず実験室内に断面 20x20cm、全長 2m 程度の水路を用意し、10cm 長程度の船を用いて海水給電の基本的特性を電磁界シミュレーションおよび実験によって検討する

(2) 次に敷地内に断面 50x50cm、全長 10m 程度の水路を用意し、20cm 長程度の船を用いて海水給電を行い、過大電圧を避けるため電力 10W、送電効率 50%を実現する。寸法や電源周波数による特性の違いにも着目する

② 海底探査用AUVなどのワイヤレス充電

【要素課題】実験室内に用意した 50cm 立方程度の水槽を用いてその中に 20cm 立方程度の磁界結合型、電界結合型 2 種の充電基地を設置し、10cm 長程度の各 1 種の AUV 模型との間で給電システムを構築して両方式の特性比較を行う

(1) 電磁界シミュレーションにより最適周波数、距離に対する伝送効率、利便性などについて 2 方式の利害得失比較を行う

(2) 実験による上記比較を行う

(3) AUV に自動走行装置を備えて自力で給電基地まで走行させることにより、両方式の上記比較を行う。

1. 3 要素課題に対する実施項目及び体制

① 内海、沿岸航路へのワイヤレス給電

(1) 我々が最近開発した正しい電界結合型 WPT(Wireless Power Transfer)システム設計法を利用して、結合に用いる容量をどの様に配置すれば最も高効率で安定なワイヤレス給電が可能となるかを見出す。(要素課題①--(1))

(2) さらに定期船の航行の特殊性を考えると一つの航路をある瞬間に航行している船は一艘だけであることが多く、EV(Electric Vehicle)の走行中給電とは大きく異なる。このとき電力源はおそらく一つ又は非常に少数で良いので電源配置、制御法は非常に単純になるであろう。この電源はできるだけ高周波(10MHz 台)であることが望ましいので、自らも開発力をつけるため岡山大学平木英治教授の指導を仰ぎ GaN-FET(Gallium Nitride-Field Effect Transistor)を用いた電源を試作する。(要素課題①-(2))

(3) 海水の持つ物質定数である誘電率(実数部、虚数部)と NaCl(Natrium Chloride)などのイオンによる導電率が電力伝送機構にどのような形で影響するかを解明して船用 WPT 技術を確立する。このとき高電圧による絶縁破壊、伝導電流につきものの感電を高周波化などによってどの様に避け得るかを定量的に示す。(要素課題①-(1)(2))

② 海底探査用 AUV などのワイヤレス充電

(1) 海水などの電氣的損失のある物体が伝送路内に入った磁界結合型、電界結合型それぞれのシステムの共振器周りの電磁界解析を電磁界シミュレーションソフトで行い、電磁界分

布とパラメータ依存性を比較する。(②-(1))

(2) 磁界結合理論と電界結合理論を用いた設計理論を駆使し、等価回路定数、共振器のQ値、共振器結合計数k、システム内のインピーダンス整合、共振周波数の海水の導電率(濃度)依存性、周波数依存性などの基本特性の評価を行う。(②-(2))

(3) 得られた知見を、結合法の違いによる比較としてまとめ、システム的最適設計法への資料提供を目指す。ここで用いるAUVは受電・走行能力だけを備えたもので作業能力は持たないものとするが、給電基地まで自走する制御装置を持つ。其の設計については山口大学水上嘉樹准教授の指導を仰ぐ。磁界結合にも存在する伝導電流と電界結合のそれとの役割の違い、感電の危険性の違いが有るかどうかが、さらに絶縁破壊の可能性も比較する(②-(3))

③ プロジェクトの総合的推進

各要素課題に関する研究の進捗を管理し、最終目標への総合的な到達度を評価しながら個々の課題の解決と必要な課題間の調整を図る。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

① 内海、沿岸航路へのワイヤレス給電

当初計画に従って、システムの電磁気的解析法としてYパラメータによる結合部の一般化表現法を提案して代表的な2つの結線法に対する簡潔な解表現を求めた。しかしその後水中ワイヤレス給電研究のプラットフォームの未確立に研究の足が引っ張られていることに気づき、当初計画から離れてその確立のための研究に移った。

(1) 現実の大きさを持つ船舶への給電は短期間での実現には無理があるとの判断によって、それより小型のモデルを用いて研究を行うこととした。その第1歩としてまず定性的な特性を把握するため室内に簡易な水路を用意して、そこを航行する小型模型船に水底から無線給電する装置を作り、徐々に給電効率を高める実験を進めた。

・この実験に於いて効率測定に際して行う計算途中で負の抵抗が現れる事があり、物理的に許されない事だとの認識を持ったためこれまでの等価回路表示法を一旦停止してインミタンス行列表示法を採用する事を決めた。その定式化法と利用法については後述するが、本研究の数少ない使える成果の一つである。

・当初は極めて短い水路から出発したが、現実への対応を考えればできるだけ長い水路を航行させる必要があったため、例えばCRLH線路など位相定数を小さくして様な電界振幅を保つ工夫も始めた。

(2) 2年目には現実のシステムへの接近を目指して、寸法が従来の2倍の模型船と断面積が数倍の水路を用意し、淡水水路中を走行させる計画を作成した。

・図1-1のような水路で50%近い効率が得られたが、実システムにほど遠い小さな水路での結果である

・伝送電力はVNA出力10mWも目標には遠い。

水路：長さ1m×幅150mm×高さ150mm
水深：127mm
送電電極：長さ1m、 $\phi 1$
受電ホット電極：長さ150mm×幅50mm
受電グランド電極：長さ150mm×幅70mm
水：淡水(実測値14mS/m) 海水(実測値4S/m)

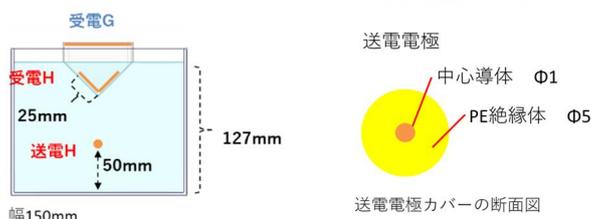
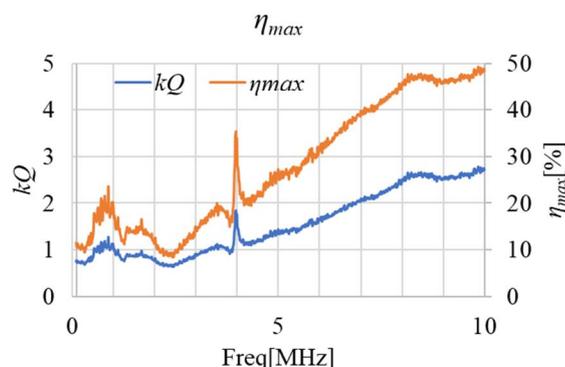


図 1-1 室内簡易水路による伝送実験



(3)より現実に近い断面寸法と長さを持つ図1-2のような水路を地面に掘削して作り通電試験を行ったところ、伝送効率の周波数特性が大暴れでその最大値でも予想の1/3以下という極めて低い実験結果に直面した

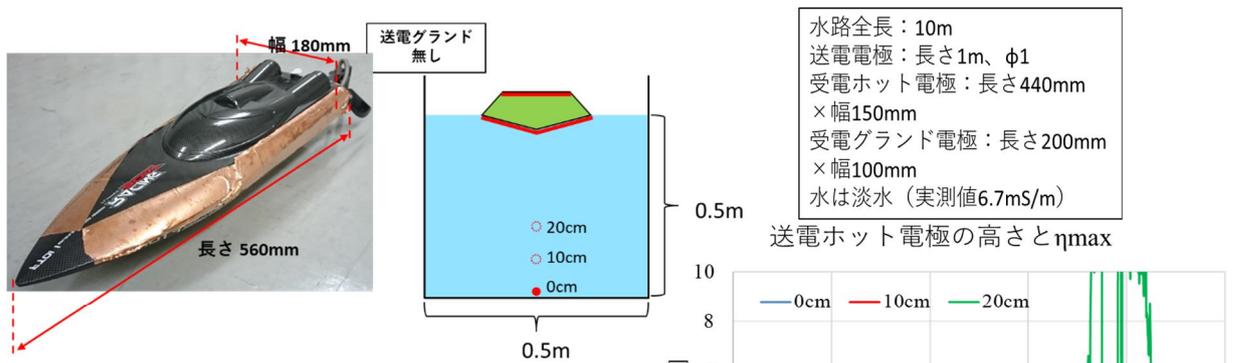


図 1-2 コモンモードによるより大きなシステムの実験

- ・その原因究明を図るなかで水路の問題点を考え始め、水路の境界条件が室内実験とは異なる事に気付いた。
- ・境界条件の差による結果の違いの検証は電磁界シミュレーションによるのが適切であり、その正しさの基準は現実の系の応答である。ところが現実の系は巨大すぎて実現が容易ではないというジレンマに悩むことになる。
- ・これにはスケール則の成立条件も絡んでトリレンマ（三つ巴の困難）となった。

・そこで U 字溝はやめて、水路の幅を 2m に広げて、さらに自然の河川に近づける試みを進めたが、山梨県本社空き地での土質が強い透過性であるため全く水を貯める事ができず、やむを得ずビニールシートの覆いの中での実験を試みた。

・しかしこの方法でも現実には水が土中に徐々に浸透するというテーパー状の電磁氣的媒質変化が実現できない為。結果は U 字溝とあまり変わらず現実の系の実現は失敗した。

(4) 船の励振法として通常は送電電極±1 ペア、受電電極±1 ペアで合計 4 枚の電極構成が基本となるが、そのような 4 枚電極構成で作った小型伝送回路を精査した。

・図示はしないがまず 2 枚の相対する電極間距離に対する容量変化をシミュレーションにより調べたところ距離依存性が極めて小さいという予想外の結果が得られた。

・これを 2 ペア用意してその送受電効率を測定すると非常に低効率であったため、後述の Y パラメータ回路によって計算すると往路側の 2 経路は相互干渉によりほぼ伝送電力がキャンセルし、帰路側も同様で送電効率が限りなく低下する結果となった。

・そこで確認のため電極配置を変えた図 1-3 に示す実験を行った（# 1, # 3 送電電極, # 2, # 4 受電電極）。確かに低周波では 2 経路のキャンセルが生じたため極めて低い効率しか得られなかったが、なぜか高周波では回復するという驚くべき結果となった。これは後述する近傍界と遠方界の混成による新現象である。

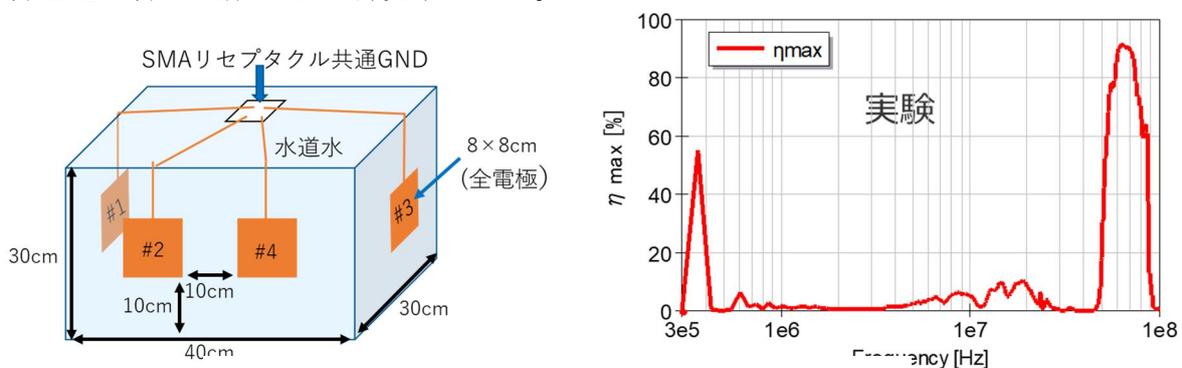


図 1-3 ノーマルモードによる広帯域伝送実験

(5) 水槽の断面を 50cmX50 cm とした場合、10mW の入力電力で、20% 近くの効率しか得られなかった。また当初計画した GaNFET による電源製作、絶縁破壊、感電の防御などは全く検討できなかった。

② 海底探査用AUV(Autonomous Underwater Vehicle)などのワイヤレス充電

このテーマについても上記と同様に途中で方針変更し、研究のプラットフォーム作成に必要な検討に切り替えた。定期航路船舶と比べると比較的給電対象は小型であるため、給電基地もそれに見合って小規模で良いと判断し、水底の電磁気的条件による影響を避ける必要を考え、図2-1のように床面に金属を敷くことによってシールドされた充電基地構造を前提とした。(図ではシステムを横倒して撮影しているため側面)

(1)

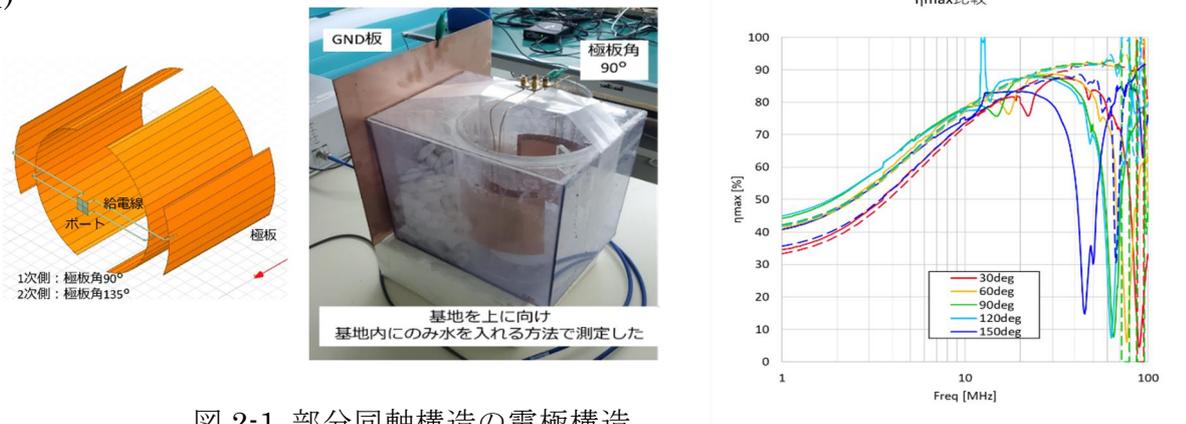


図 2-1 部分同軸構造の電極構造

- ・さらに不必要な複雑化を避ける為、対称性の高いノーマルモード励振構造に限るとした。
- ・電界・磁界結合方式の比較検討という主題であるため、公平な比較を目指して形状・寸法を両者に対して極力同一化するという方針に基づき AUV の形状を円筒形で統一する。そしてその頭部に受電機構、尾部は推進機構を備えるという方針を定めた。
- ・送受電機構は我々の専門であるが、動力推進機構特にその制御部には全く無知であるため、山口大学水上准教授の協力を仰ぐこととした。
- ・AUV の円筒型胴体をプラスチックで作製し、内部に円筒型電極を張り付ける構造を用いて、複数のパラメータ変更に対して電磁界シミュレーション・実験を行いデータを集めた。
- ・円筒型電極を縦半分に分断して各電極を±1組とする、送電側は外側に1組、受電側は内側に1組設置。
- ・内外電極は同じスパン角で30度から150度まで変えてみたがスパン角依存性はあまりない

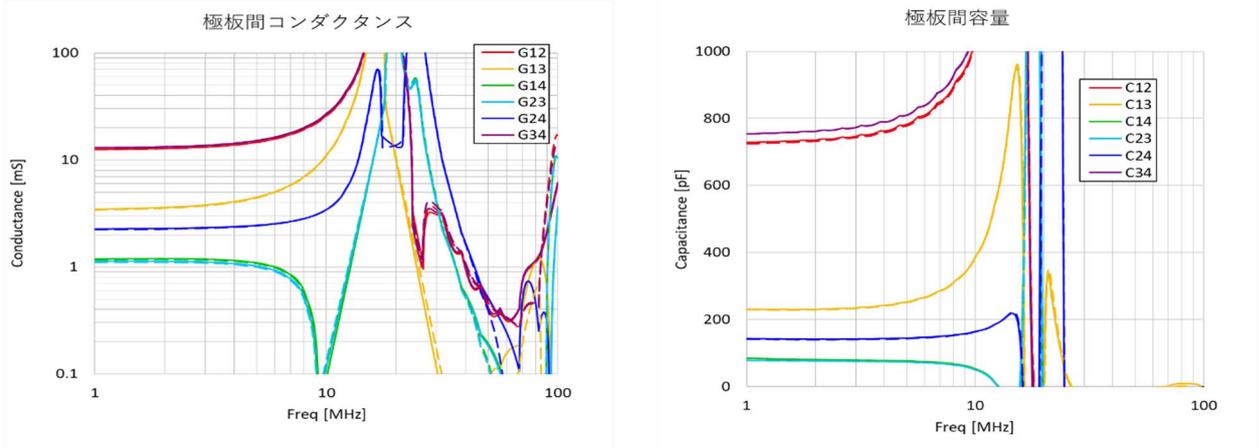
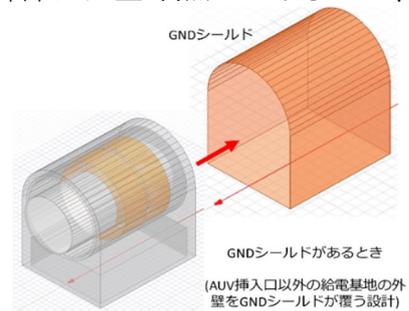


図 2-2 充電基地の外壁シールド効果

(2) 解析空間を狭めるため、図 2-2 のように充電基地外壁をシールドした結果、対地容量は別として電極間容量はシールド前後でほぼ変わらないのでノーマルモード使用は適切である。

(3) 一方磁界結合についてはまず Ansis 社製 HFSS と WiPL-D Japan 社提供 WiPL-D によるシ

ミュレーションの結果を比較することから始めて、両者の一致を見て WiPL-D 計算に移るとの方針を立てた。しかしかなり多くのモデルによる比較をしても後者の結果は物理的に納得できるものとならなかった。

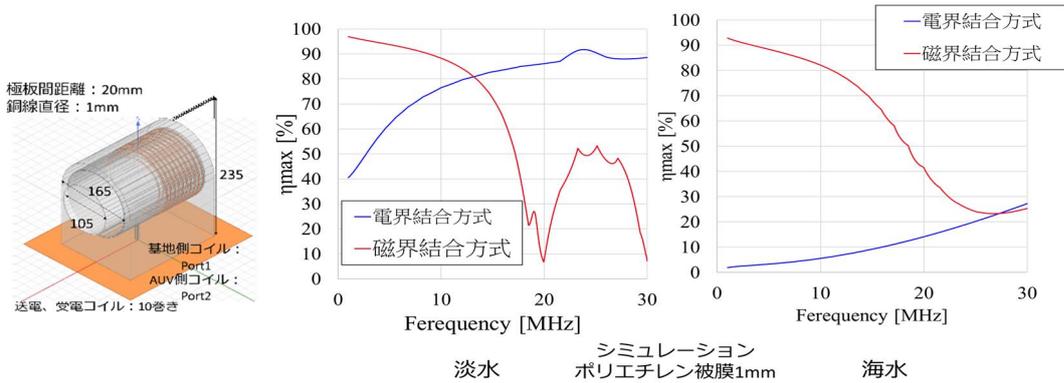


図 2-3 同じ直径の送受電コイル・電極を持つ磁界・電界結合回路の比較

- ・丁度この頃に磁界結合に対する電界の影響に気がつき、計算対象によってソフトを変更することの是非も含めて、磁界・電界結合ともに長年の使用により信頼度のより高い HFSS を用いる方針に切り替えた。しかしその結果は現時点では両結合方式ともに信頼性に欠け、図 2-3 のそれもさらなる検討が必要であるため両モード比較に至っていない。
- (4)当初計画の絶縁破壊、感電防止技術、磁界/電界結合の比較研究などには全くかかわる事が出来なかった。また自動走行装置開発は今夏プロトタイプ試運転の予定である

3. 委託業務における研究の方法及び成果

上述のように当初研究計画はほとんど何も実現しておらず、2つのサブテーマに共通して有効なシステムの数学的記述法と、それを用いた具体例の記述結果が得られたのでそれについて記述する。水中においては対地容量や線間容量が大きな役割を果たすことに気づいたため等価回路法ではなくより一般性の高い Y パラメータを用いることを提案し、その具体例を示して理解の助けとしたものである。

3-1 結合部の Y パラメータによる表現

WPT 回路は図 3.1 に示すように入力回路、結合回路、出力回路の 3 部分から構成される。そして入力回路、出力回路はそれぞれ 4 端子回路 (2 ポート回路) で前者はインピーダンス変換回路、電圧変換回路などを介して終端に高周波電源回路、後者も電圧変換回路、整流回路、インピーダンス変換回路などを介して終端に負荷抵抗を持つ。我々はこのうちの結合回路について論じる。い

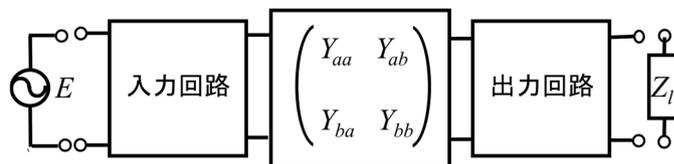


図 3-1 WPT 回路の構

結合回路は結局のところ左右の 2 端子回路に接続する 4 端子回路 (2 ポート回路) であるが、電界結合回路には浮遊容量があり入出力の GND (グラウンド) を共通にできないことが多い為、4 ポート回路として出発する。そしてその行列表現は次式のようなになる。これを図示すれば図 3-2 のようになる。図において式(3.1)より Y パラメータ素子数が少ないのは回路の相反性によって非対角項が互いに等しいためである。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

そこでポート 1, 3 を入力ポート、2, 4 を出力ポートと決めて、既存のポート番号との混同を避けるため前者をポート a 、後者をポート b と名付けると各ポートの電圧電流の関係は

$$\begin{aligned} I_1 = -I_2 = I_a, \quad I_2 = -I_4 = I_b \\ V_1 - V_3 = V_a, \quad V_2 - V_4 = V_b \end{aligned} \quad (3.2)$$

となるので式 (3.1) は

$$I_a = Y_{11}(V_a + V_3) + Y_{12}(V_b + V_4) + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \quad (3.3a)$$

$$I_b = Y_{21}(V_a + V_3) + Y_{22}(V_b + V_4) + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \quad (3.3b)$$

$$-I_a = Y_{31}(V_a + V_3) + Y_{32}(V_b + V_4) + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 \quad (3.3c)$$

$$-I_b = Y_{41}(V_a + V_3) + Y_{42}(V_b + V_4) + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4 \quad (3.3d)$$

と変換される。これらの式の(3.3a)と(3.3c)から I_a を、(3.3b)と(3.3d)から I_b を消去して V_3, V_4 を V_a, V_b で表せばよい。それを再び(3.3a), (3.3b)に代入して I_a, I_b との関係を求めるのが目標である。まず式 (3.3) から V_3, V_4 を算出すると次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} V_3 &= (1/D) [\{(Y_{12} + Y_{14})C - (Y_{11} + Y_{13})B\}V_a + \{(Y_{22} + Y_{24})C - (Y_{12} + Y_{23})B\}V_b] = v_{3a}V_a + v_{3b}V_b \\ V_4 &= (1/D) [\{(Y_{11} + Y_{13})C - (Y_{12} + Y_{14})A\}V_a + \{(Y_{12} + Y_{23})C - (Y_{22} + Y_{24})A\}V_b] = v_{4a}V_a + v_{4b}V_b \end{aligned} \quad (3.4)$$

ここに

$$\begin{aligned} A &= Y_{11} + 2Y_{13} + Y_{33}, \quad B = Y_{22} + 2Y_{24} + Y_{44}, \quad C = Y_{12} + Y_{14} + Y_{23} + Y_{34} \\ D &= AB - C^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

と置き換えた。

次に(3.4)に求めた V_3, V_4 を式 (3.3) の上 2 式に代入して

$$\begin{aligned} I_a &= \{Y_{11} + (Y_{11} + Y_{13})v_{3a} + (Y_{12} + Y_{14})v_{4a}\}V_a + \{Y_{12} + (Y_{11} + Y_{13})v_{3b} + (Y_{12} + Y_{14})v_{4b}\}V_b \\ I_b &= \{Y_{22} + (Y_{22} + Y_{24})v_{3a} + (Y_{22} + Y_{24})v_{4a}\}V_a + \{Y_{22} + (Y_{12} + Y_{14})v_{3b} + (Y_{22} + Y_{24})v_{4b}\}V_b \end{aligned} \quad (3.6)$$

となるが、これらを

$$\begin{aligned} I_a &= Y_{aa}V_a + Y_{ab}V_b \\ I_b &= Y_{ba}V_a + Y_{bb}V_b \end{aligned} \quad (3.7)$$

と書き換えて $Y_{aa}, Y_{ab}, Y_{ba}, Y_{bb}$ を求めれば最終の解を得る。

$$\begin{aligned} Y_{aa} &= Y_{11} + \frac{(Y_{11} + Y_{13})}{D} \{(Y_{12} + Y_{14})C - (Y_{11} + Y_{13})B\} + \frac{(Y_{12} + Y_{14})}{D} \{(Y_{11} + Y_{13})C - (Y_{12} + Y_{14})A\} \\ &= Y_{11} + (1/D) [\{(Y_{11} + Y_{13})(Y_{12} + Y_{14}) + (Y_{12} + Y_{14})(Y_{11} + Y_{13})\}C - (Y_{11} + Y_{13})^2 B - (Y_{12} + Y_{14})^2 A] \\ &= Y_{11} + (1/D) [2(Y_{11} + Y_{13})(Y_{12} + Y_{14})C - (Y_{11} + Y_{13})^2 B - (Y_{12} + Y_{14})^2 A] \end{aligned} \quad (3.8a)$$

$$\begin{aligned} Y_{ab} &= Y_{12} + \frac{(Y_{11} + Y_{13})}{D} \{(Y_{22} + Y_{24})C - (Y_{12} + Y_{23})B\} + \frac{(Y_{12} + Y_{14})}{D} \{(Y_{12} + Y_{23})C - (Y_{22} + Y_{24})A\} \\ &= Y_{12} + (1/D) \left[\begin{aligned} &\{(Y_{11} + Y_{13})(Y_{22} + Y_{24}) + (Y_{12} + Y_{14})(Y_{12} + Y_{23})\}C - (Y_{11} + Y_{13})(Y_{12} + Y_{23})B \\ &- (Y_{12} + Y_{14})(Y_{22} + Y_{24})A \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (3.8b)$$

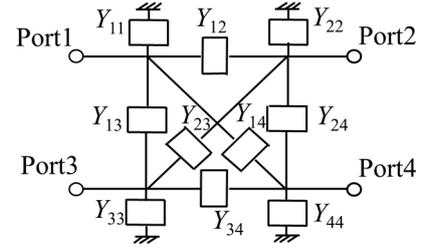


図 3-2 電界結合回路の標準的 4 ポート表現

$$\begin{aligned}
Y_{ba} &= Y_{21} + \frac{(Y_{12} + Y_{23})}{D} \{(Y_{12} + Y_{14})C - (Y_{11} + Y_{13})B\} + \frac{(Y_{22} + Y_{24})}{D} \{(Y_{11} + Y_{13})C - (Y_{12} + Y_{14})A\} \\
&= Y_{21} + (1/D) \left[\begin{array}{l} \{(Y_{12} + Y_{23})(Y_{12} + Y_{14}) + (Y_{22} + Y_{24})(Y_{11} + Y_{13})\} C - (Y_{12} + Y_{23})(Y_{11} + Y_{13})B \\ -(Y_{22} + Y_{24})(Y_{12} + Y_{14})A \end{array} \right] \\
&= Y_{21} + (1/D) \left[\begin{array}{l} \{(Y_{11} + Y_{13})(Y_{22} + Y_{24}) + (Y_{12} + Y_{14})(Y_{12} + Y_{23})\} C - (Y_{11} + Y_{13})(Y_{12} + Y_{23})B \\ -(Y_{12} + Y_{14})(Y_{22} + Y_{24})A \end{array} \right] \quad (3.8c)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y_{bb} &= Y_{22} + \frac{(Y_{12} + Y_{23})}{D} \{(Y_{22} + Y_{24})C - (Y_{12} + Y_{23})B\} + \frac{(Y_{22} + Y_{24})}{D} \{(Y_{12} + Y_{23})C - (Y_{22} + Y_{24})A\} \\
&= Y_{22} + (1/D) \{2(Y_{12} + Y_{23})(Y_{22} + Y_{24})C - (Y_{12} + Y_{23})^2 B - (Y_{22} + Y_{24})^2 A\} \quad (3.8d)
\end{aligned}$$

これらの表現は一般性が高いだけでなく、対称性が良く物理的にも納得しやすい形式となって居る。また回路の相反性の条件 $Y_{ab}=Y_{ba}$ を満たすものでもある。このように結合回路を4端子行列で表現することによってkQ 席理論を用いることが出来て、回路の電力伝送効率や最適負荷などが容易に求められる[1],[2]。

3-2 船への給電を例とした特別な場合の関係式

1. ノーマルモード

通常船舶の進行方向断面形状は左右対称的であるためノーマルモード励振に適している。図3-3のように送電側線路のホットとコールドを対称的に設定・配置すれば、舟側も同様な構造で対応出来るから好都合であろう。そしてこの構造は4電極板型であるのでそれに即した簡単化が可能である。またこの給電法では地面の存在は電気的には不要であるにもかかわらず、不本意であっても自動的に存在して、しかも後述のように有害ですらある。

図3-3の対称性を見ると、式(3.5)において次の関係が成立することが分かる。Yパラメータの添え字は図のポート1~4に対応する。

$$Y_{11} = Y_{33}, \quad Y_{22} = Y_{44}, \quad Y_{12} = Y_{34}, \quad Y_{14} = Y_{23} \quad (3.9)$$

この時式(3.5)に定義された量は

$$A = 2(Y_{11} + Y_{13}), \quad B = 2(Y_{22} + Y_{24}), \quad C = 2(Y_{12} + Y_{14}), \quad D = AB - C^2 \quad (3.10)$$

と計算され、図のようなノーマルモード構造では文献[2]を参照してそのレスポンスをkQ 積理論[3]に適合するように記述すると

$$Y_{aa} = Y_{11} + \frac{1}{D} \left(2 \frac{A}{2} \frac{C}{2} C - \frac{A^2}{4} B - \frac{C^2}{4} A \right) = Y_{11} + \frac{A}{4D} (C^2 - AB) \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned}
&= Y_{11} - \frac{A}{4} = Y_{11} - \frac{1}{2} (Y_{11} + Y_{13}) = \frac{Y_{11}}{2} - \frac{Y_{13}}{2} \\
Y_{ab} = Y_{ba} &= Y_{12} + \frac{1}{D} \left\{ \left(\frac{A}{2} \frac{B}{2} + \frac{C^2}{4} \right) C - \frac{A}{2} \frac{C}{2} B - \frac{C}{2} \frac{B}{2} A \right\} = \frac{Y_{12}}{2} - \frac{Y_{14}}{2} \quad (3.12)
\end{aligned}$$

$$Y_{bb} = \frac{Y_{22}}{2} - \frac{Y_{24}}{2} \quad (3.13)$$

となって簡潔な表現が得られた。

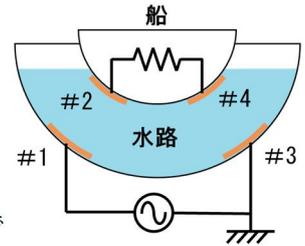


図3-3 ノーマルモード給電例

さてこれから具体的に4枚電極を用いたノーマルモード励振タイプの航行中給電ではどのようにして電力伝送効率が計算されるかを見よう。図3-3に対応して図3-2のポート1, 3に送電電極、ポート2, 4に受電電極を接続して図3-4を得る。図を見ると合計10個の素子が回路を構成しているが、後述の対称性条件により回路素子は左右対称的に同じ値をとるため、合計6種の素子で構成されていることがわかる。アドミタンス行列素子との混同を避けるため、電極間アドミタンスは図3-4においては小文字で示している。この時図3-2の各要素は

$$\begin{aligned} Y_{11} &= y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14} \\ Y_{22} &= y_{12} + y_{22} + y_{23} + y_{24} \\ Y_{33} &= y_{13} + y_{23} + y_{33} + y_{34} \\ Y_{44} &= y_{14} + y_{24} + y_{34} + y_{44} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} Y_{12} &= -y_{12}, \quad Y_{13} = -y_{13}, \quad Y_{14} = -y_{14}, \\ Y_{23} &= -y_{23}, \quad Y_{24} = -y_{24}, \quad Y_{34} = -y_{34}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

という関係になるので、これらを式(3.10)に代入すれば

$$\begin{aligned} A &= Y_{11} + 2Y_{13} + Y_{33} = 2(y_{11} + y_{12} + y_{14}), \\ B &= Y_{22} + 2Y_{24} + Y_{44} = 2(y_{22} + y_{12} + y_{14}), \\ C &= Y_{12} + Y_{14} + Y_{23} + Y_{34} = -(y_{12} + y_{14}) \\ D &= AB - C^2 = 4\{(y_{12} + y_{14})(y_{11} + y_{22}) + y_{11}y_{22}\} \end{aligned} \quad (3.17)$$

なる関係が得られる。また回路の対称性から式(3.9)と同様な

$$y_{11} = y_{33}, \quad y_{22} = y_{44}, \quad y_{12} = y_{34}, \quad y_{14} = y_{23} \quad (3.18)$$

が成立するので、これらを式(3.13)から式(3.15)に代入して

$$Y_{aa} = y_{13} + \frac{y_{11} + y_{12} + y_{14}}{2} \quad (3.19)$$

$$Y_{ab} = Y_{ba} = \frac{y_{14} - y_{12}}{2} \quad (3.20)$$

$$Y_{bb} = y_{24} + \frac{y_{22} + y_{12} + y_{14}}{2} \quad (3.21)$$

となる、この関係を用いればノーマルモードの最大伝送効率や最適負荷の導出が可能である。しかし伝送効率に直接関係する式(3.20)は2項の差になっており、この2項はほぼ同じ値になるので極めて結合係数が小さくなる可能性を予告している

2. コモンモード

コモンモードの意味はかなり広く、送電HOTラインは別として帰線としてのGNDラインは回路自身のGNDラインを用いるとともに大地もそれに加えて一部を担うのが通常である。しかし図3-5の給電システムはコモンモードの極端な例であり、帰線として回路自身は全く用いずすべての電流を大地経由で電源に戻す形式であって、純正コモンモードとでも名付けるべきかもしれない。送電線路は一本だけに絞って船舶への走行中給電を目指しており、水底に設置する給電線をできるだけ簡素な構造にしたいとの要請にこたえるものである。

図3-2における4ポート回路のポート3を接地するという特徴を持つため、回路のY行列要素は以下のように計算される

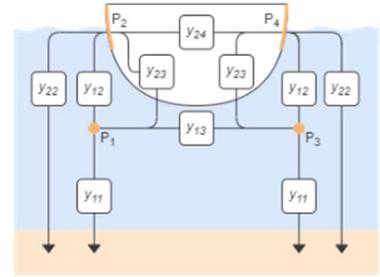


図 3-4 ノーマルモード4枚電極構造

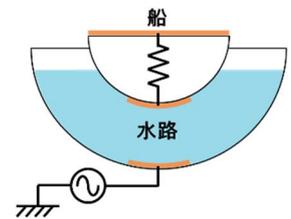


図 3-5 コモンモード給電例

$$Y_{33} = \infty, A = \infty, \frac{B}{D} = 0, \frac{C}{D} = 0, \frac{A}{D} = \frac{1}{B}, B = Y_{22} + 2Y_{24} + Y_{44} \quad (3.22)$$

これらの値を式 (3.8) に代入すると

$$Y_{aa} = Y_{11} - \frac{(Y_{12} + Y_{14})^2}{B} = G_{aa} + jB_{aa} \quad (3.23)$$

$$Y_{ab} = Y_{ba} = Y_{12} - \frac{(Y_{12} + Y_{14})(Y_{22} + Y_{24})}{B} = \frac{Y_{12}(Y_{24} + Y_{44}) - Y_{14}(Y_{22} + Y_{24})}{Y_{22} + 2Y_{24} + Y_{44}} = G_{ab} + jB_{ab} \quad (3.24)$$

$$Y_{bb} = Y_{22} - \frac{(Y_{22} + Y_{24})^2}{B} = \frac{Y_{22}Y_{44} - Y_{24}^2}{B} = G_{bb} + jB_{bb} \quad (3.25)$$

というこれも比較的整った関係式が得られた。

ここでも更に4枚電極回路の具体例を調べるためにノーマルモードと同様に図 3-2 の4つのポートに4枚極版を接続する。そして図 3-3 に倣ってポート3を接地すると例えば y_{11}, y_{13} は並列の接地回路となり、他の同例と合わせて

$$y_{11} + y_{13} = y'_{11}, y_{22} + y_{23} = y'_{22}, y_{44} + y_{34} = y'_{44} \quad (3.26)$$

とまとめられる。それらを用いれば式(3.23) ~ (3.25)は

$$Y_{aa} = y'_{11} + \frac{(y_{12} + y_{14})(y'_{22} + y'_{44})}{y_{12} + y'_{22} + y_{14} + y'_{44}}, \quad (3.27)$$

$$Y_{ab} = Y_{ba} = -\frac{y_{12}y'_{44} - y_{14}y'_{22}}{y_{12} + y'_{22} + y_{14} + y'_{44}}, \quad (3.28)$$

$$Y_{bb} = y_{24} + \frac{(y_{12} + y'_{22})(y_{14} + y'_{44})}{y_{12} + y'_{22} + y_{14} + y'_{44}} \quad (3.29)$$

となって独立な項はノーマルモードと同じく6項となってかなり簡単化されるので、具体的に計容易となる。非対角項の式(3.28)はノーマルモードと同様に直接的に結合にかかわるが、構成する項数が多いだけに工夫の余地があると思われる。

参考文献

- [1] T. Ohira, "Power Transfer Theory on Linear Passive Two-Port Systems," IEICE Trans. Electron., Vol.E101-C, No.10, pp. 719-726, 2018
 [2] 粟井郁雄, "ワイヤレス給電システムのkQ積理論再考-消費電力と入射電力比からの導出-", 信学技報 WPT2016-44, 2017年1月, pp. 11-16

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

今回の報告で我々が最も主張したい成果は当初計画の基盤を形成するもので非常に多岐にわたる。それは、水中無線電力伝送システム研究の基盤(プラットフォーム)があまりにも貧弱でこのままでは研究を進めることができないという判断で、研究の方向をプラットフォーム構築に切り替えたためである。

その結果として当初計画とは直接関係のない原理的課題に関する下記の解決すべきテーマが見いだされた。

- ・電極の絶縁必要性和その効果
- ・水がWPTシステムに与える電磁氣的擾乱とその回避
- ・電磁界シミュレータにおける水底の記述

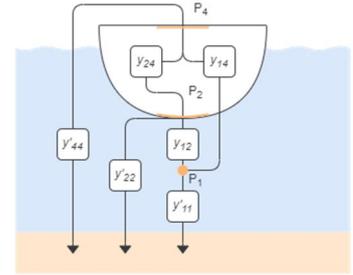


図 3-6 コモンモード4枚電極構造

- ・スケール則の構築
- ・海水中の電磁波（界）の伝送損失
- ・近傍界と遠方界
- ・水中における磁界結合の変容

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

今回の研究テーマは海中ワイヤレス給電であってワイヤレス通信（無線通信）ではないが、電力伝送も通信も電磁エネルギーの伝送に変わりはなく、特に「海水中の電磁波（界）の伝送損失」は海中通信とのかかわりが強い。それゆえもし我々の疑問に対して肯定的な答えが得られれば大きなインパクトが期待できる。我々の理解の範囲では現在の状況はあってはならない内容なので、おのれの非力は覚悟のうえで課題にチャレンジしたいと思う。

一定の資金の確保ができたので水中ワイヤレス給電のプラットフォーム作りのためコンソーシアムを立ち上げる予定である。今賛同者を募っておりすくなくとも5つの教育・研究団体の参加が見込めるところまで到達した。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

我々の提案内容が（少なくとも我々にとって）あまりにも大胆であるため、大々的に学会発表することに怖気づいていた面がある。その結果、学会発表は常に控えめに行ってきたため特筆すべきものはない。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

従来は特になし。しかし今後はコンソーシアム形成とその展開・発展のために相当な努力・工夫が必要となるであろう。

5. 2 経費の効率的執行

特になし

6. まとめ、今後の予定

前述のようにコンソーシアムを作り、代表者の年齢を考えて2年計画で決着をつけるつもりである。そのうえでもし幸運にも海水中電磁波伝搬の我々の考え方が正しいと証明されれば、1年だけ延長して海水中通信の実現を目指す。

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	5件
展示・講演	1件
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

半年以内に5件以上出願予定

（3）その他特記事項

該当なし