

# AUV 向け水中給電ステーションにおけるコイル配置に関する基礎検討

佐藤 直樹\* 井上 鴻志 木船 弘康 (東京海洋大学)

## Study about Coil Layout of Power Supply Station for AUV in Seawater

Naoki Sato\*, Koshi Inoue, Hiroyasu Kifune (Tokyo University of Marine Science and Technology)

Authors have proposed a method using plural transmission coils as contactless power supply device for AUV. The layout of transmission coils have an impact on the power transferring efficiency and transmission success rate since there are multiple transmission coils. In this paper, the influence of the coil's layout is discussed through several experimental results. One of experimental results show that the power transferring efficiency in more than 80% when coupling coefficients is more than 0.3. Therefore, we investigated optimum layout to make the coupling coefficients more than 0.3 so that the contactless power transfer system obtains high efficiency at any spot of the power station's top plate. Three patterns of coil's layout were compared each other through experiments. As a result suitable coil layout was clarified to make coupling coefficient high.

キーワード：非接触給電，電磁誘導，AUV，水中給電，給電ステーション，マルチコイル化，コイルレイアウト  
(Keywords: contactless power transfer, electromagnetic induction, AUV, electric power supply in seawater, power supply station, multi-coil, coil layout)

### 1. はじめに

近年、日本近海での海洋調査、海洋開発が盛んに行われている。その中で活躍の場を広げているのが AUV (Autonomous Underwater Vehicle: 自律航行型無人潜水機) である。AUV はケーブルに繋がれておらず、自動で航行するため 1 度に広範囲の調査が可能だが、バッテリー駆動のため活動時間が制限されている。また、バッテリー交換のため船上に引き上げる作業では、ダイバーの手によってクレーンのワイヤロープを取り付ける作業を行うため危険を伴う。これらの問題を解決するため、筆者らは海底あるいは海中に給電ステーションを設け、水中で給電を行う仕組みを提案してきた。同時に給電ステーションと AUV の間で通信を行わせることで、調査情報のアップロードやミッション情報のダウンロードを行うことも可能となる。こうした仕組みの導入により、AUV の長期運用を実現させその有用性を高めることができる。

給電を水中で行うことを考えると電気的な接点を持つことは避けたい。そこで給電には電磁誘導を利用した非接触での給電を考える。給電ステーション、AUV の双方にコイルを配置し、電気的な接触を持つことなく、AUV のバッテリーを充電する。ただし、一般的に電磁誘導は送電コイル間の位置ずれに弱いという特徴がある。これは、給電ステーション側の送電コイルと AUV 側の受電コイルが正対、あるいは

はそれに近い状態でないと給電が行えないということを示す。送電コイル間の位置ズレを補正する方法としては、AUV のスラストを使う方法がある。しかし、海水という粘性流体中を、質量も体積も大きな AUV が強い外乱環境の中で数 cm 単位で位置制御や姿勢制御をすることは極めて困難である。このため AUV のスラストによる位置修正は現実的ではない。他には給電ステーション側のコイルを動かすという方法もある。しかし、可動部を持つことは故障リスクが高くなるということと同義である。水中への設置を想定した時、メンテナンスが容易にできないことを考慮すると、給電ステーションのコイルを動かすことは難しい。

そこで、筆者らが検討している給電ステーションはどの場所に着底しても給電が行えるように、給電ステーションのコイルを複数かつ多層に配置することを前提条件としている<sup>(1)</sup> (図 1)。また AUV 側にも複数のコイルを配置することで (図 2)、位置ずれが少なく、送電効率が良いコイル間での給電が行える“機会”を増やす。

本研究では給電ステーション、AUV 双方に配置するコイルのレイアウトを実験的に検討した。給電ステーションのレイアウト 3 パターンに対して、AUV 側のコイルが 1 枚の場合と 2 枚の場合の送電効率の分布を示すマップを作成し、比較を行った。これにより、マップ上の高効率エリアがなるべく広く分布しているコイルレイアウトを探し、安定して高い効率で給電できる給電ステーションを実現する。

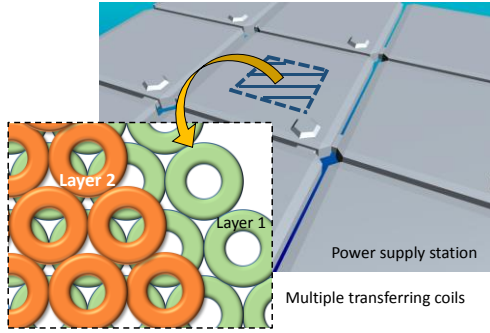


図 1 給電ステーションのマルチコイル化イメージ  
Fig.1. Image of multi-coil in power supply side.

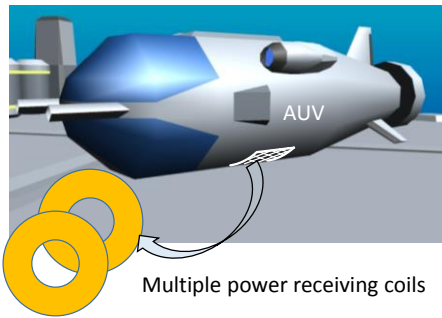


図 2 AUV 側コイルの複数コイルイメージ  
Fig.2. Image of multi-coil in AUV side.

## 2. 送電効率と結合係数の関係確認実験概要

結合係数と送電効率の関係を調べるため、実験を行った。図 3 は、実験用に試作した非接触給電装置のエネルギーフロー図である。直流電源からの電力  $P_{DC}$  はインバータを通して高周波電力  $P_1$  に変換される。その高周波電力が送電コイルを通して高周波の磁気エネルギーとなり、受電コイルへと伝送され、再び高周波電力  $P_2$  として取り出される。これがコンバータを通して直流電力  $P_b$  になることで充電回路と電池を模擬した定電圧負荷へと供給される。実験装置の主回路を、図 4、図 5 に示す。図 4 は効率測定時、図 5 は結合係数測定時の回路である。効率測定時は送電側には直列に、受電側には並列に共振コンデンサを接続し、共振状態で実験を行った。一方、結合係数測定時はコンデンサを切り離し、非共振状態で実験した。コイルは送電側、受電側共に巻き数 16、外径 225mm 程度、内径 110mm のドーナツ型コイルを使用した。20kHz 時のコイルの自己インダクタンスは  $51\mu\text{H}$  程度であった。

本実験ではパラメータとして送受電コイル間の距離  $\Delta a$  と  $\Delta b$  を図 6 のように定義している。 $\Delta a$  は 0~90mm の範囲を 10mm 間隔で、 $\Delta b$  は 2~62mm の範囲を 12mm 間隔で変化させ実験を行った。

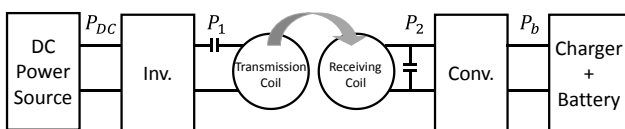


図 3 エネルギーフロー図

Fig.3. Energy flow on experimental circuit.

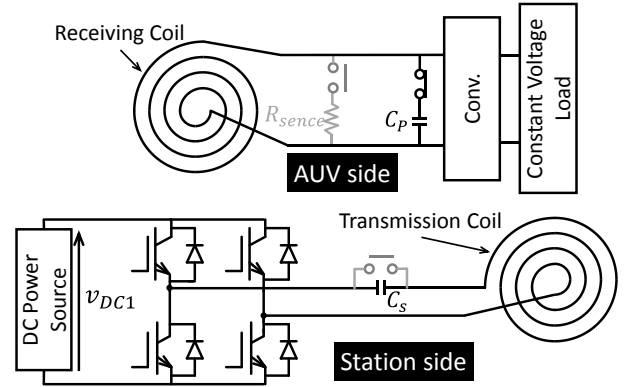


図 4 試作回路概略図 (効率測定時)

Fig.4. Experimental circuit diagram.  
(When measuring efficiency)

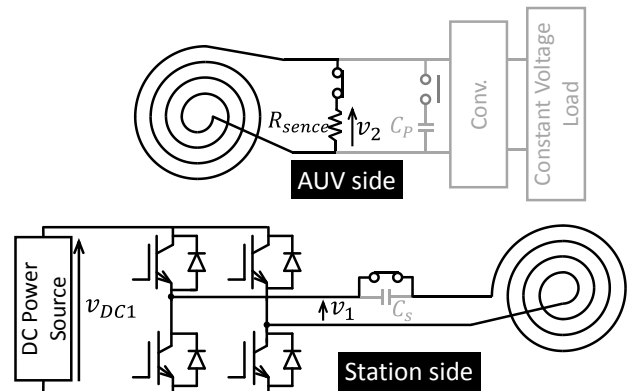


図 5 試作回路概略図 (結合係数測定時)

Fig.5. Experimental circuit diagram.  
(When measuring coupling coefficient)

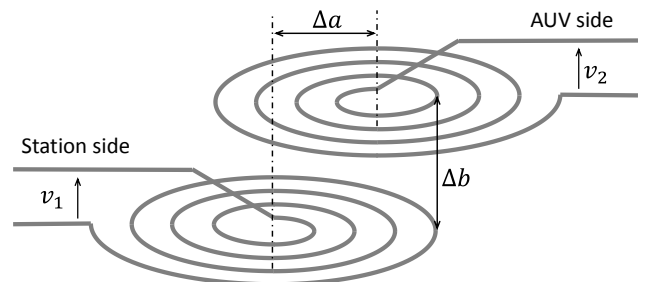


図 6 実験パラメータ

Fig. 6. Experimental parameters.

送電率は図 4 の回路の状態で測定した。図 3 の  $P_1$  が約 500W となるように  $v_{DC1}$  を調整し、その際の  $P_1$  と  $P_2$  の比を取ることによって送受電コイル間の効率を測定した。

結合係数は図 7 のような信号波形を計測し波高値の比をとって結合係数としている。計算式は以下の通りである。

$$k = \frac{1}{200} \sum_{p=1}^5 \sum_{n=6}^{45} \frac{v_{2pn}}{v_{1pn}}$$

kは結合係数、pは電圧パルス数を示す。今回は5つの電圧パルスを計測し、結合係数の測定を行った。nは立ち上がり（電圧が負の場合は立ち下り）からの測定点数である。測定は0.1 $\mu$ sに1回の測定を行った。立ち上がりから最初の5点（0.5 $\mu$ s）は波形の乱れがあるため計算からは取り除き、その後40点（4 $\mu$ s）分のデータを計算に使用した。40点 $\times$ 5波高で200点の波高値の比を計算し平均をとってパラメータ1点の結合係数としている。

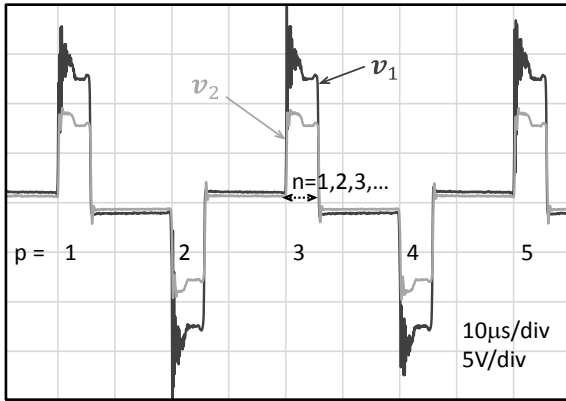


図7 測定波形例

Fig.7. Observed waveforms.

### 3. 送電効率と結合係数の関係確認実験結果

実験によって求めた送電効率と、結合係数をパラメータにしたがって対応させた結果が図8である。この図を見ると結合係数が0.3の時点で効率が約84~88%程度となることがわかる。また、結合係数が0.3以上では送電効率は90%以上の効率で、高いところでは94%である。つまり、結合係数が0.3以上であれば高効率が確保できる。この結果は、給電ステーション上に配置するコイルのレイアウトを比較する際の指標として用いることができる。

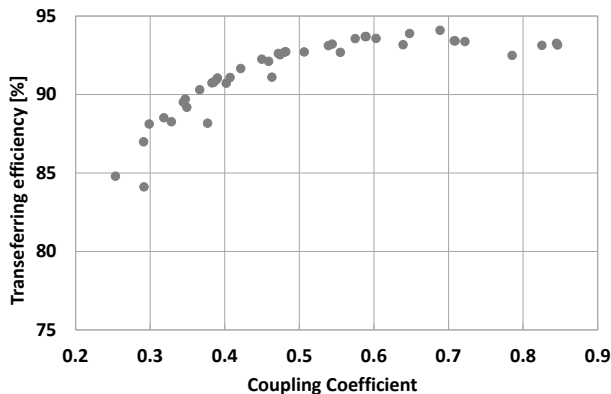


図8 送受電コイル間の送電効率と結合係数の関係

Fig.8. Relation of transferring efficiency and coupling coefficient between coils

### 4. 結合係数マップ作成実験概要

コイルレイアウトを検討するに当たり、実験によってレ

イアウトの結合係数マップを作成し、比較を行った。図9はマップ作成のため製作した実験装置である。使用したコイルは2章に記載のあるコイルと同様のものを使用した。

ステーション側の各レイアウトはパターンごとに図形的な繰返しの周期がある。そのため、測定は図10のようにX軸Y軸それぞれに1周期分をAUV側のコイルで走査することで、XY平面の1周期分の結合係数マップを作成する。ただし、コイルは円形であるため、Z軸(垂直方向)回りの角度については考慮しない。

結合係数マップは結合係数を測定し、配置したコイルの上に設定したXY平面上に数値をプロットすることで作成した。ステーション側のコイルは複数あるため、各座標ですべてのコイルの結合係数の計測、計算を行った。実際のシステムでは、最も送電効率の高い送受電コイルのペアで給電を行う方式を採用するため、最も結合係数の値が高いものをその座標の値として採用し、結合係数のマップを作成した。なお、実験対象としたコイルレイアウトを図10~図12に示す。

AUV側コイルが2枚の場合はコイルの相対位置についても考慮しなければならない。そのためAUV側コイルの中心間距離を0~150mmまで10mmずつ変化させて計測を行った。また、AUVの向きを考慮に入れるため、0~90°の範囲でコイルの回転を考慮したマップを作成した。

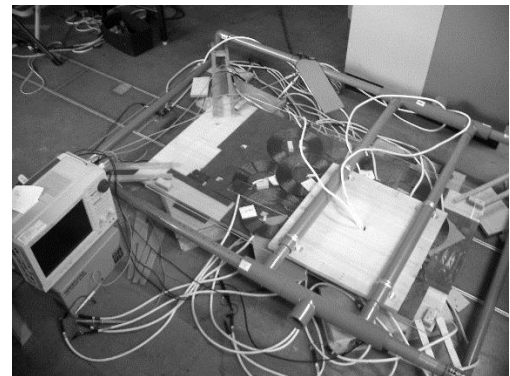


図9 実験装置概観

Fig.9. Picture of experimental equipment.

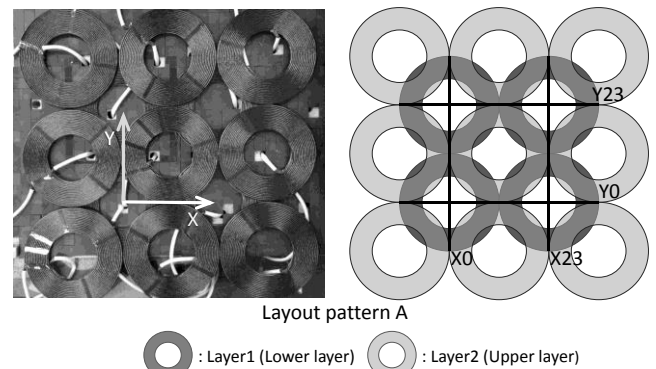


図10 実験を行ったコイルレイアウト(パターンA)

Fig.10. Experimented coil-layout. (Pattern A)

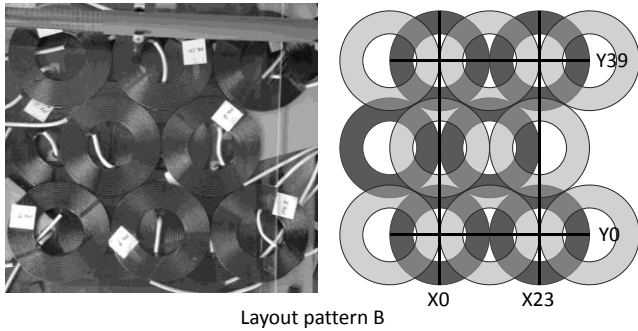


図 11 実験を行ったコイルレイアウト(パターン B)  
Fig.11. Experimented coil-layout. (Pattern B)

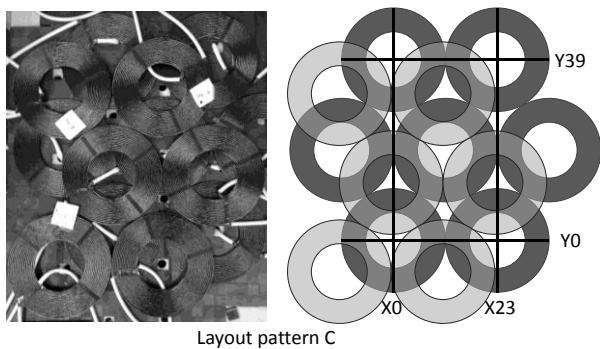


図 12 実験を行ったコイルレイアウト(パターン C)  
Fig.12. Experimented coil-layout. (Pattern C)

比較基準としては以下の 2 点を設定した。1 つ目はマップ上の結合係数の高さである。前述の通り、結合係数が 0.3 以上であれば高効率が可能であることがわかっている。そこでマップ上で結合係数が 0.3 以上となる面積の割合を「 $\gamma$ 」とし、これを比較評価の対象とする。2 つ目はマップ上の最小値の比較である。仮に結合係数が 0.3 以上の面積割合が全体的に高くても、マップ上に示される結合係数の最小値が極端に小さければピンポイントで給電の効率が著しく低下してしまうか、あるいは給電が困難となる場所 (Dead Spot) が発生することになる。これは本研究が目指す確実に給電が行えるステーションとは異なってしまふ。そこで、マップ上の結合係数の最小値を比較し、最も送電効率が悪い条件、場所でも最低限の効率を確保できるようなレイアウトを見つける。本研究では給電の確実さが最も重要なので、マップ上の最小値を重要視して最適なコイルレイアウト及び AUV 側コイルの中心間距離を検討していく。

### 5. 結合係数マップ作成実験結果・考察

結合係数の情報を元にマップ化した結果が図 13~図 15 である。座標はステーション側コイルの上に設定したもので、AUV 側コイルの中心位置の変化による結合係数の変化を示している。マップ上の色が濃い位置に AUV 側コイルの中心があると結合係数が高く、結果的に送電効率も高い。このマップは AUV 側のコイルが 1 枚の場合のマップである。

この時の比較結果を表 1 に示す。3 つのパターンすべてにおいて、結合係数 0.3 以上の面積割合が 80%を超えている。しかし、結合係数の最小値がパターン A,B では 0.13 程度、パターン C に至っては 0.06 未満と非常に低い値となった。

表 1 結合係数マップ比較結果

Table1. Result of comparison of coupling coefficient map.

Layout pattern	A	B	C
Rate of area that coupling coefficient is over 0.3 ( $\gamma$ )[%]	85.07	81.15	83.75
Minimum of coupling coefficient	0.1380	0.1310	0.0594

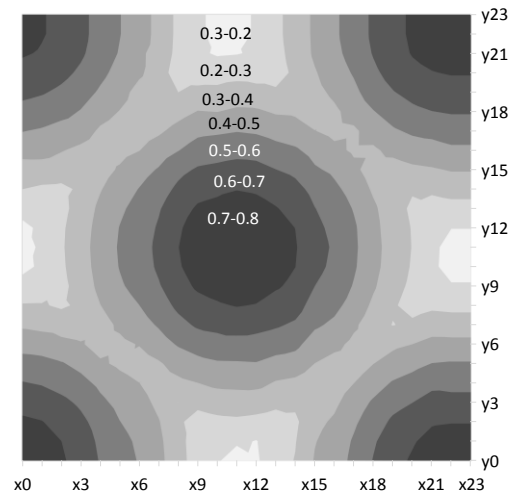


図 13 結合係数マップ (パターン A)  
Fig.13. Coupling coefficient map. (Pattern A)

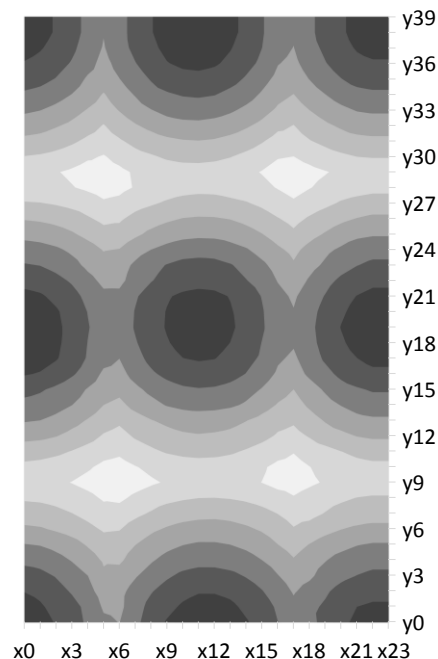


図 14 結合係数マップ (パターン B)  
Fig.14. Coupling coefficient map. (Pattern B)

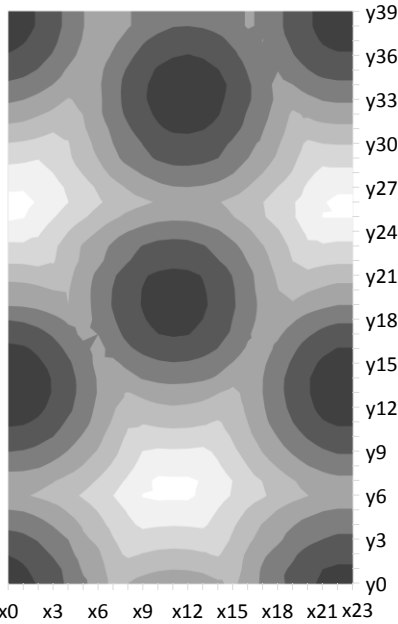


図 15 結合係数マップ (パターン C)

Fig.15. Coupling coefficient map. (Pattern C)

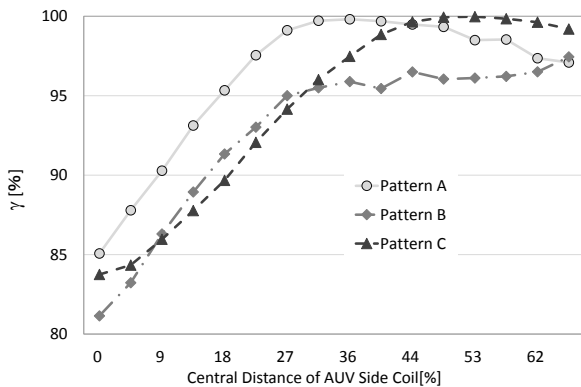


図 16 結合係数が 0.3 以上の面積割合(γ)

Fig.16. Rate of area that coupling coefficient is over 0.3(γ).

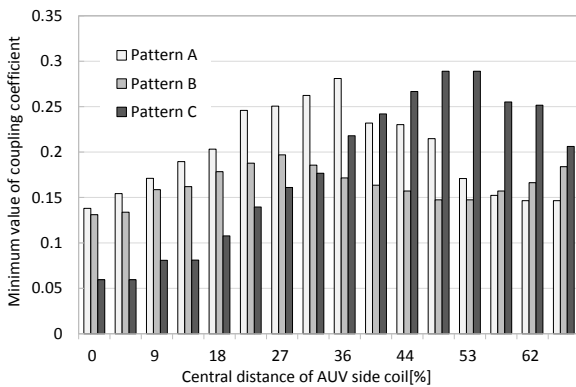


図 17 結合係数の最小値

Fig.17. Minimum value of coupling coefficient.

次に、AUV 側コイルを 2 枚にし、同様な比較を行った結果が図 16 と図 17 である。グラフの横軸は AUV 側コイルの中心間距離をコイルの直径との割合で示している。図より、各配置パターンにおいて、AUV 側コイルの中心間距離の違いによって結合係数 0.3 以上の面積割合  $\gamma$  (図 16) と、マップ上の結合係数の最低値 (図 17) がどのように変化するかはわかる。パターン B では全体的に結合係数の最小値が低く、0.2 未満となっている。この状態では、給電ステーションの全域において給電は行えるものの、送電効率を確保することができないため、充電作業に時間がかかってしまう。パターン A ではコイル間距離が直径の 35.6% の時に 0.28、パターン C では直径の 53.3% の時に 0.29 と最小値でも結合係数が 0.3 に近く、給電が最も悪い場所でもある程度の効率で給電が可能である。また、パターン A、C で最小値がもっとも高い時、結合係数が 0.3 以上の面積の割合は 99% 以上を示しており、全体的に高い効率が確保できているといえる。作成したすべてのマップの中で、結合係数の最小値が最も高い条件の各配置パターンの結合係数マップは図 18 ~ 図 20 の通り。

図 18~図 20 を見ると AUV 側コイルが 1 枚の場合に比べ、結合係数の値が低い部分がほとんどなくなっていることがわかる。これは AUV 側コイルが 2 枚になったことで、一方の AUV 側コイルでは給電ステーション側コイルとの結合度が低い場合でも、もう一方の AUV 側コイルでは高い結合度になるためである。ただし、図 18~図 20 は結合係数の最小値が最も高かった場合のマップであり、条件によっては AUV 側のコイルが 1 枚の場合と大きな差が出なかった条件もある。特にパターン B ではその条件が出現しやすい傾向にあり、図 16 の  $\gamma$  や、図 17 の結合係数の最小値が全体的に他のパターンと比べて低いという結果に繋がっている。

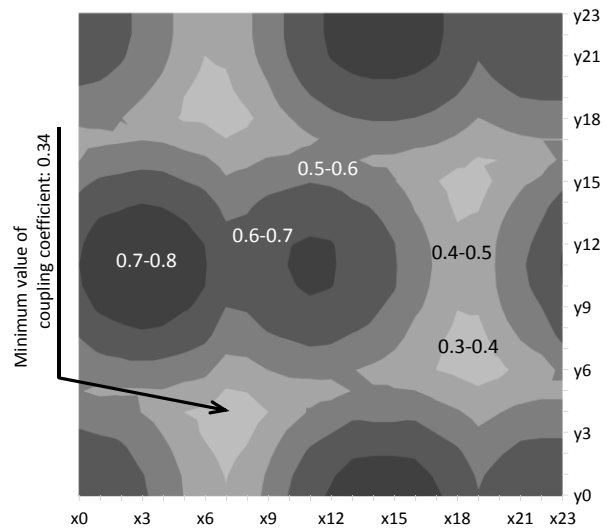


図 18 結合係数の最小値が最も高い時のマップ (パターン A)

Fig.18. Map when minimum of coupling coefficient is maximum. (Pattern A)

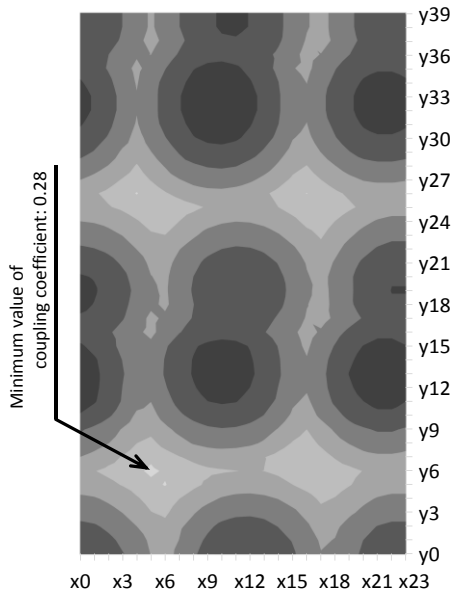


図 19 結合係数の最小値が最も高い時のマップ (パターン B)

Fig.19. Map when minimum of coupling coefficient is maximum. (Pattern B)

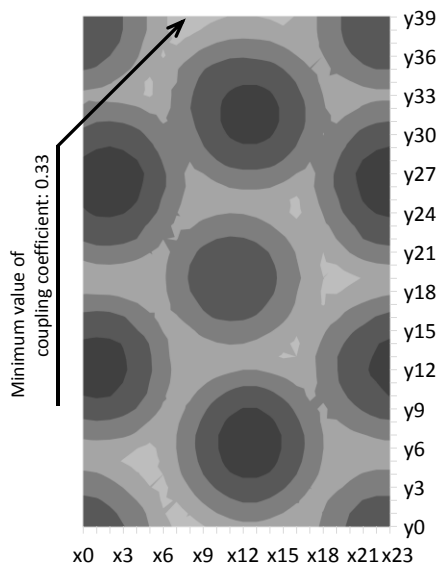


図 20 結合係数の最小値が最も高い時のマップ (パターン C)

Fig.20. Map when minimum of coupling coefficient is maximum. (Pattern C)

ここで、パターン B で結合係数の最小値が全体的に低くなった理由を考察する。図 14 や図 19 のマップを見ると、パターン B の並べ方では、結合係数が低い場所が X 軸方向に帯状に一直線で繋がって広がっている。このため、AUV 側のコイルが 2 枚とも結合係数が低い部分に入ってしまう、パターン B では高い結合係数が得られなかった。

一方で、パターン A とパターン C が結合係数の最小値において 0.28 以上という結果が得られている。双方のマップ

に共通する特徴として、結合係数が低い場所を中心として 360° 周囲を結合係数が高い場所が囲んでいるということが挙げられる。これにより、AUV 側の 2 枚のコイルが 2 枚とも結合係数の低い場所にとどまることがなく、常にどちらか片方が結合係数が比較的高い領域で給電を受けることができたからだと考えられる。このため、結合係数が極端に低くなることがなかった。また、パターン A とパターン C で最小値が最も高くなるコイルの間隔が違う理由として、ステーション側コイルの間隔が違うことが挙げられる。つまり、AUV 側コイルの中心間距離がステーション側のコイル間隔に対して適切な距離である必要がある。

これらの結果から、給電の確実性が高いステーション側コイルの配置条件は「結合係数が低い場所を中心として 360° 周囲を結合係数が高い場所が囲んでいること」であるとわかった。また同時に AUV 側コイルの中心間距離はステーション側のコイル配置に対して適切な距離に設定しなければならない。この条件を満たすことで、AUV がどの場所に、どの向きに着底しても高い送電効率を確保し、確実な給電を行える。

## 6. おわりに

AUV 向けの水中給電システムでの確実な給電を目指すために、給電ステーションに複数かつ多層にコイルを配置することを想定する。そこで本研究では給電ステーション、AUV 双方のコイル配置を実験によって検討した。まずは、結合係数と送電効率の関係を調べる実験を行った。この実験により、結合係数 0.3 以上で送電効率 80% が確保できることがわかった。次に給電ステーションのコイル配置を比較する実験を行った。実験ではレイアウトパターン A、B、C の 3 パターンを検討対象とした。結合係数のマップを作成し、結合係数が 0.3 以上の面積割合と、マップ上の結合係数の最小値を比較する方法をとった。その結果、パターン A とパターン C の配置が最適だといえる。この 2 つのレイアウトの特徴は、結合係数が低い場所を結合係数が高い場所が囲んでいるということである。つまり、給電ステーションに配置するコイルが満たすべき条件として上記のコイル配置であるということが挙げられる。

ただし、実際にコイルを海底に配置する際には費用や工事の際の手間からもコイル枚数についても考える必要がある。これを考慮に入れると今回検討した 3 つのレイアウトの中ではパターン A が最適なコイル配置である。

本研究は JSPS 科研費 15K14261 の助成を受けたものである。

## 文 献

- (1) 木船弘康・他：「AUV 向け非接触給電装置の基礎検討」, 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-15-117, pp.29-32 (2015)
- (2) 佐藤直樹・他：「水中での非接触給電を想定した電力通信に関する基礎研究」, 第 85 回マリンエンジニアリング学術講演会 講演論文集, pp.213-214 (2015)