

# AUV 向け水中給電ステーションの最適なコイルレイアウトの条件について

東京海洋大学 ©佐藤直樹 木船弘康

## 1. はじめに

近年, 日本近海での海洋資源の調査・開発が活発に行われている. その現場では海洋資源の調査のため, AUV (Autonomous Underwater Vehicle) が広く利用されている. しかし, AUV はバッテリー駆動のため活動時間が制限される. また, バッテリーを交換し充電するため母船が洋上で待機している必要があり, その運行及び人員に莫大なコストがかかる. これらの問題を解決するため, 筆者らは海中あるいは海底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. この水中給電ステーションにより, AUV の長期運用を可能としその有用性を高める.

水中での給電となるので, 電気的な接触部を持つ方法は好ましくない. よって, 水中給電ステーションには電磁誘導方式の非接触給電を採用する. 給電ステーション, AUV 双方にコイルを配置し電気的には接触せずに AUV へ充電を行う. ただし一般的に電磁誘導方式は位置ずれに弱いという特徴を持つ. そこで, 給電ステーションに複数かつ多層にコイルを配置し (Fig. 1), AUV の着底位置によらず, 確実に充電が行えるようにする. また AUV 側のコイルも複数配置する (Fig. 2). これにより位置ずれが少なく, 送受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によって検討した. 実験条件として AUV 側のコイルを 2 枚とする. また, 給電ステーションのコイルレイアウトとして 3 つのパターンを提案し, その比較実験を行った. これらの条件で AUV 側と給電ステーション側のコイル同士の結合度を給電ステーション上の XY 平面座標上に表現した図 (結合係数マップ) を作成した. その結合係数マップを用いて給電ステーション側のコイルレイアウトを比較評価した. また, その比較結果から AUV 側のコイルレイアウトの最適化を行った.

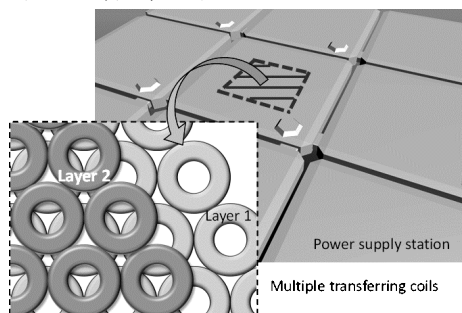


Fig. 1 給電ステーションのマルチコイル化

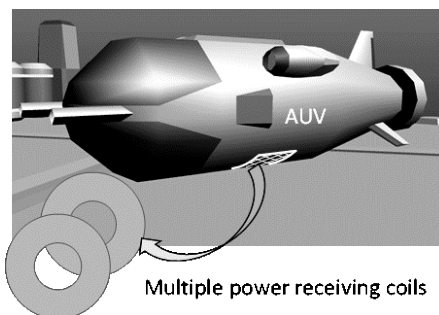


Fig. 2 AUV側コイルの複数コイルイメージ

## 2. 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, 実験によって結合係数のマップを作成した. Fig. 3 に試作した実験装置の主回路を示す. 計測対象は給電ステーション側電圧 $v_1$ と AUV 側電圧 $v_2$ の 2 点である.

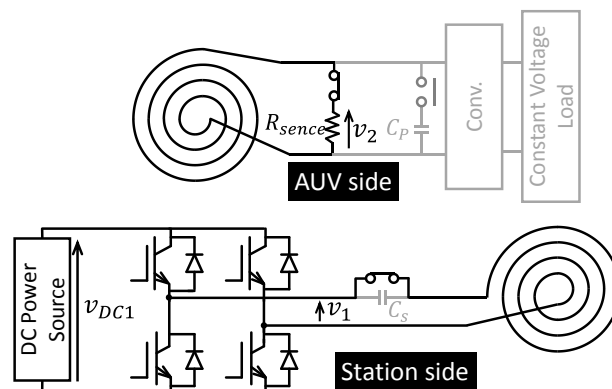


Fig. 3 試作回路概略図

給電ステーション側のコイルレイアウトを模擬するため, Fig. 4~Fig. 6 に示す実験装置を試作した. ステーション側のコイルは各パターンとも 2 層となっており, 下層をレイヤー1, 上層をレイヤー2 とする. これはコイルを配置した際にできる隙間を可能な限りなくすための配置方法である. AUV 側コイル及びステーション側コイルは, 共に巻き数 16, 外径 225mm, 内径 110mm のドーナツ型空芯コイルである. また, 表皮効果により生ずる銅通損失を低減するため, リッツワイヤーを使用している. 試作実験装置では AUV 側に 2 枚, ステーション側には複数枚配置した. 20kHz 時のコイルの自己インダクタンスは 51 $\mu$ H 程度である.

ステーション側のコイル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, AUV 側コイルと給電ステーション側コイルとの結合係数

の測定は、その繰り返し周期の XY 座標の範囲内において AUV 側のコイルを走査する形で行った。

結合係数マップは測定した結合係数を、XY 平面の各座標にプロットすることで作成した。

AUV 側のコイルは 2 枚あるため、2 つのコイルの相対位置関係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  $L$  を 0~180mm まで 10mm ずつ変化させて計測を行った。また、AUV のコイルが複数枚の場合、AUV が給電ステーションに着底した際の向きも考慮に入れなければならない。このため、Z 軸（垂直方向）周りの回転角度  $\theta$  を 0~90° の範囲で AUV 側コイル同士の位置関係を変化させて実験を行った。

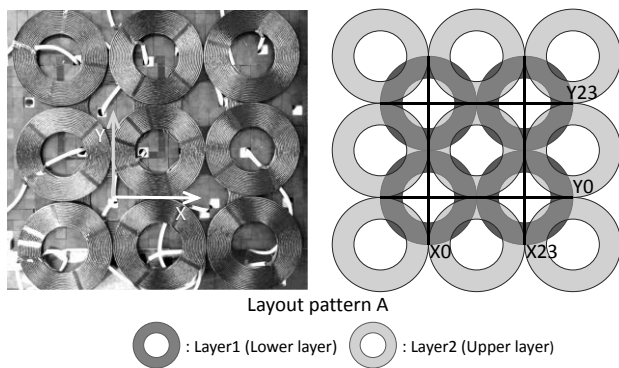


Fig. 4 提案したコイルレイアウト(パターン A)

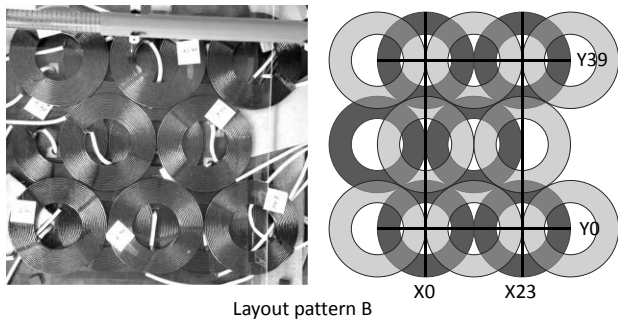


Fig. 5 提案したコイルレイアウト(パターン B)

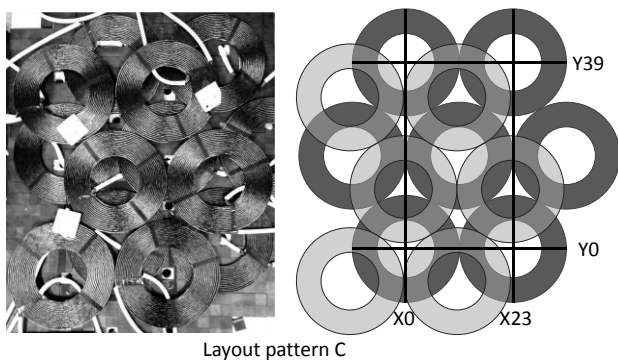


Fig. 6 提案したコイルレイアウト(パターン C)

実験により作成したマップを評価するための 2 つの基準を設けた。1 つ目の基準は、高効率で給電が行える範囲の広さである。以前の実験により結合係数が 0.3 以上で 85% 以上の給電効率が得られることがわかっている。この値を設定値として用いて、マップ上で結合係数が 0.3 以上となる点の割合を  $\gamma$  とする。 $\gamma$  が大きいほど、高効率で給電が行える範囲が広いことを意味する。

もう 1 つの基準はマップ上の結合係数の最小値  $\kappa$  である。電磁誘導を利用するため、結合係数の低下は大幅な給電効率の低下を意味する。給電効率が低いと入力した電力が熱エネルギーとして放出される割合が高くなる。また低効率状態ではコイルに流れる電流が増えるため、インバータの電流制限によりコイルに入力できる電力が制限され、結果として小さい電力のやり取りしかできなくなる。他の点で高い給電効率を確保していても AUV 側コイルがピンポイントでその点に着底した場合給電を受けられないというリスクが生ずる。

また、結合係数が低下すると周囲に漏れる磁場を増加させる。漏れ磁場の増加は、精密機器を搭載している AUV に悪影響を与えるので、避けなければならない。そのため、局所的に結合係数が低い点を可能な限りなくす必要がある。給電の確実性と AUV の保護の観点から、本研究ではマップ上の結合係数の最小値が可能な限り高い値となるレイアウトが求められる。

AUV の電源供給という重要な責務を負うため、給電効率が低いこともさることながら、確実性の方がより強く求められる。そこで 2 点目の結合係数の最小値に特に重点を置いて比較を行う。

### 3. 実験結果

作成した結合係数マップの一例が Fig. 7 である。色が濃いほど結合係数が高く、薄いほど結合係数が低い。この図の右のマップは、結合係数の最小値  $\kappa$  が 0.28 と最も高い  $L$  および  $\theta$  の条件のマップを示している。この図では結合係数の高い場所が広く分布しており、確実に給電が行えるように見える。しかし、AUV 側コイルの条件によっては結合係数が低い部分が広く分布するマップも存在する。Fig. 7 のマップは双方とも  $L = 60\text{mm}$  という条件のマップであるが、左のマップでは結合係数の最小値が 0.20 と低い値を示している。 $L$  が同条件でも  $\theta$ 、つまり AUV の向きの違いによって Fig. 7 のようにまったく違う結合係数マップができる。本研究では  $\theta$  によらず、確実な給電ができるシステムを目指すため、評価対象とする条件は最悪の場合を想定して選定する。

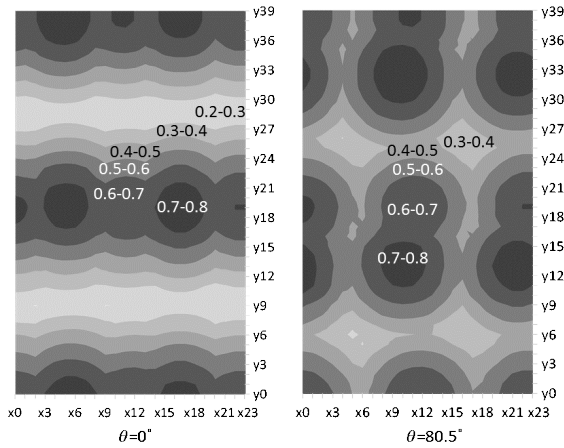


Fig. 7 パターン B の結合係数マップ例 (L=60mm)

すべての L および  $\theta$  の条件を考慮に入れて比較を行った結果が Fig. 8 と Fig. 9 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外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が 0.3 以上の割合  $\gamma$  とマップ上の結合係数の最小値  $\kappa$  がどのように変化するかがわかる。

$\kappa$  は、パターン A では AUV 側のコイル間距離が直径の 35.6% の時に  $\kappa=0.28$ 、パターン C では直径の 53.3% の時に  $\kappa=0.29$  と 0.3 に近い値を示した。先述の通り、この場所は AUV 側のコイルの中心間距離がそれぞれの値のとき、最も給電効率が低い場所である。ただ、結合係数が 0.3 に近い値を示しているため、この場所でもある程度の効率を確保して給電することが可能だと言える。また、同条件の時パターン A, C では  $\gamma$  は 99% 以上を示している。そのため、全体的に高い給電効率が確保できるといえる。

一方、パターン B では  $\kappa$  が低く、0.2 未満となっている。この状態では給電は行えるものの、高い給電効率を確保できないため充電に時間を要する。

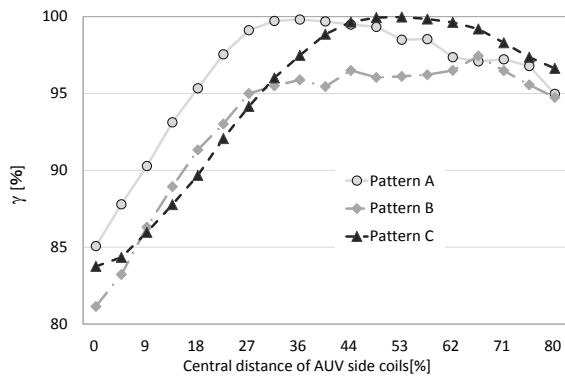


Fig. 8 結合係数が 0.3 以上の面積割合 ( $\gamma$ )

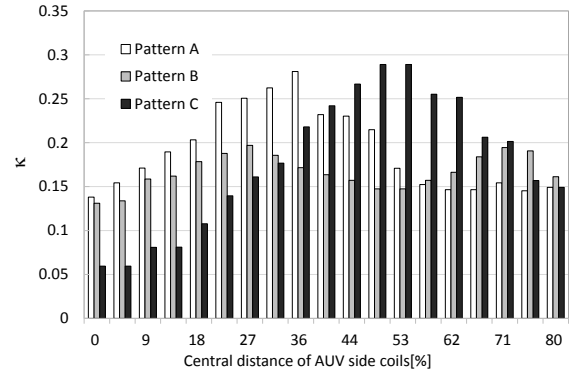


Fig. 9 結合係数の最小値( $\kappa$ )

#### 4. ステーション側レイアウトの最適化条件

実験結果から、給電ステーション側コイルのレイアウトを最適化する条件を考察する。今回実験を行ったコイルレイアウトの中ではパターン B においてマップ上の結合係数の最小値  $\kappa$  が全体的に低くなった。マップでは、結合係数が高い場所と低い場所が帯状に並び、AUV 側のコイルが 2 枚とも結合係数が低い場所に入る条件が発生した。これは、パターン B ではコイルの中心点（結合係数が最も高い点）が X 方向に一直線上に並んでいるからだと考えられる。その結果、高い結合係数が得られなくなるのである。

一方でパターン A とパターン C では結合係数の最小値が 0.28 以上という結果が得られている。双方のパターン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結合係数が高い場所が 360° 周囲を囲んでいるということが挙げられる (Fig. 10)。これにより、2 枚の AUV 側コイルのうちどちらか一方のコイルが必ず結合係数が高い領域に存在し、給電を受けることができることを意味する。すなわち条件の良い（結合係数が高い）方のコイルで受電できる。

これらの結果から給電ステーション側レイアウトの最適条件は「結合係数が高い場所が 360° 周囲を囲んでいること」である。

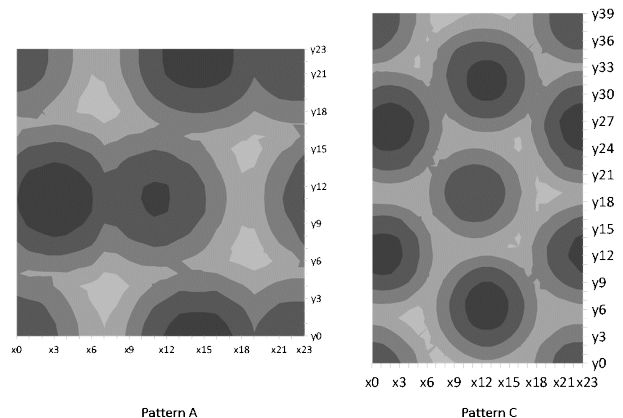


Fig. 10 パターン A, C の結合係数マップ例

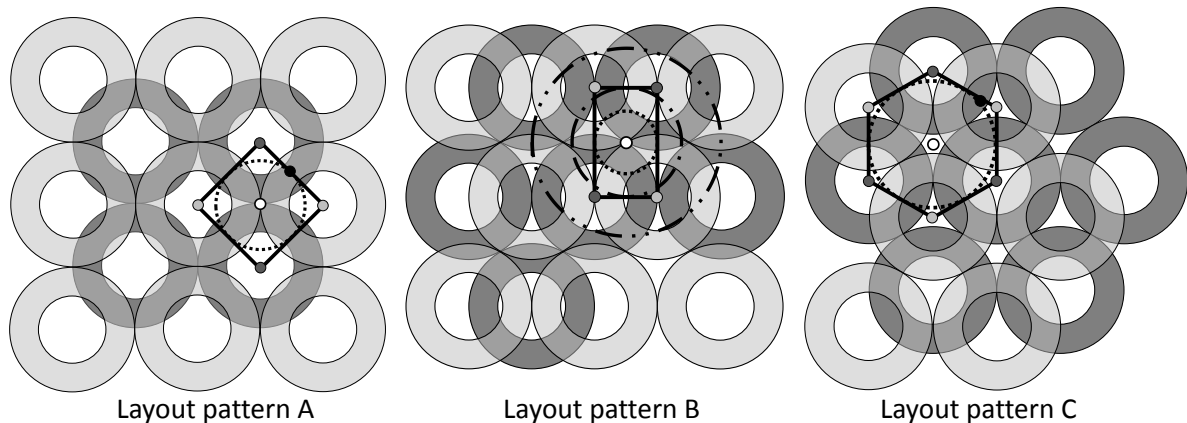


Fig. 11 各レイアウトの図形的な法則

### 5. AUV 側レイアウトの最適化条件

3つのパターンのコイルレイアウトを比較した結果から最適な AUV 側のコイルの中心間距離について考察する。Fig. 9 の比較結果を見ると給電ステーション側の各レイアウトによって最適な AUV 側コイルの中心間距離が異なることがわかる。AUV 側コイルの中心間距離をコイル直径に対する割合で示すとパターン A は約 36%，パターン B は約 27% と約 71%，パターン C は約 50% で  $\kappa$  が最も大きい値をとる。これらの結果を図形的な観点で見ると以下の様な法則がある。

パターン A とパターン C は Fig. 11 の両端の図ようになる。レイヤー1 とレイヤー2 のコイルの中心点（結合係数が最も高い点）を結んだ図形に注目する。その図形はパターン A では正方形，パターン C では正六角形となる。これらの図形の内接円が点線で示されている，この円の半径はパターン A の場合コイル直径の 35.4%，パターン C は 50% である。この値は実験結果によって得られた最適な中心間距離とほぼ同一の値を示している。この中心間距離は片方のコイルの結合係数が最も低い値となる場所にあった時，もう片方のコイルが確実に結合係数の大きい場所にあることができる。そのため，このような結果になったと考えられる。

一方でパターン B の場合は Fig. 11 の中央の図ようになる。先ほどと同様レイヤー1 とレイヤー2 の中心点を結ぶと図のような長方形ができる。この場合，できる図形が長方形であるので内接円は存在しない。そこで向かい合う 2 辺に接する円を考えると図のような点線の円と一点鎖線の円の 2 つがある。それぞれの円の半径を求めるとコイル直径に対して 25% と 43.3% となる。点線の円（コイル直径 25%）は実験結果より求められた AUV 側コイルの最適な中心間距離とほぼ一致した。しかし一方で一点鎖線の円（コイル直径 43.3%）は実験において結合係数の最小値が低く出た値に近い。これは，一点鎖線の円の軌跡が結合係数の低い点付近

を通っているため，双方のコイルで結合係数が低くなってしまいう可能性がある。つまり，一点鎖線の円の条件では双方のコイルとも給電効率が低く，確実な給電が実現できない可能性があり，そのリスクを回避できないのである。

ここで点線の円の半径を 2 倍，3 倍にした場合を考える。2 倍の場合は半径がコイル直径に対して 50% の円となる。この場合，結合係数が最も高くなる点を通るが，同時に結合係数が最も低くなる点も通る。このため，実験結果の 50% 付近を見ても，先ほどの一点鎖線と同様の結果となる。3 倍の場合は半径がコイル直径に対して 75% の円となる。この場合図の二点鎖線の円となり，実験結果からも最適な中心間距離であるといえる。

これらの結果から，AUV 側コイルの中心間距離は各レイヤーのコイル中心点を結んだ図形の内接円の半径，もしくは向かい合う 2 辺に接する円の半径になる。

本研究は JSPS 科研費 15K14261 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- (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)
- (3) 佐藤直樹・他，“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”，電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会，SPC-17-004，pp.19-24 (2017)