

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 14 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(B)

研究期間：平成 21 年度～平成 23 年度

課題番号：21760664

研究課題名（和文） AUV に水中で非接触給電するための基礎研究

研究課題名（英文） A Study of Contactless Power Transmission System for AUV

研究代表者

木船 弘康 (KIFUNE HIROYASU)

東京海洋大学・海洋工学部・准教授

研究者番号：90323849

研究成果の概要（和文）：AUV（自立航行型水中ロボット）が自らの判断の下に海中で充電をするための仕組み作りが本研究の最終ゴールである。本研究助成で実施した研究内容は水中で電力を非接触で安全に受け渡すため、各デバイスの形状や特性把握を行った。特に送電コイルと受電コイルの位置ずれが給電能力に対してどのような影響を持つのかに着目した。両コイルともパンケーキ型のコイルが結合係数を高くできることがわかった。

研究成果の概要（英文）：Making structure for AUV to charge all over the sea under its judgment is the last goal of this research. The details of research carried out by this research support are form investigation and characteristic grasp of each device required to deliver electric power safely by non-contact underwater. It noted what kind of influence a position gap of a power transmission coil and a receiving coil would have to electric supply capability especially. It turned out that the coil of a pancake type coils can make a coefficient of coupling high.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
平成 22 年度	900,000	270,000	1,170,000
平成 23 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：AUV、非接触給電、送受電コイル、高周波インバータ、共振周波数追従

## 1. 研究開始当初の背景

国際情勢により化石燃料の価格は不安定であり、工業用資源も多国籍型巨大企業による独占状態が発生している。こうした背景により、我が国にとって「資源探査」と「資源獲得」は新たな課題として社会的に認知されつつある。そして世界第 6 位の排他的水域 (EEZ) を有する我が国において、資源探査の主な対象は必然的に海洋となる。一方、海水

中では電波が著しく減衰するため、電波を用いた計測手法では広範かつ詳細な海底資源の調査は困難である。そこで自律航行型海中ロボット (AUV) を利用した広域な海洋および海底調査の準備が進められている。

AUV は ROV のような有策ロボットと異なり、支援母船から切り離された瞬間から搭載する電池のみを主電源として自律的に航行・調査する。このため、三次元的に複雑な

形状をとる海底付近を細やかに移動・調査できる利点がある。しかしながら搭載電池の充電作業は支援母船の大型クレーンと複数人の作業員による回収作業が伴うため、省力化と運用コスト低下という点で改善の余地がある。また、数トンにも達する AUV を波浪中でクレーン吊り作業することになるため、作業員の作業リスクは大きい。

そこで本研究では、AUV が自律的な判断のもとに海中で、しかも自動的に充電する仕組みを提供することを主眼としている。これにより、AUV を運用していく上での大幅なコスト低減と危険作業の低減を目的とする。

## 2. 研究の目的

### (1) 非接触給電とは

AUV が海中で自動的に充電するために仕組みを考える場合、避けて通れないのが電氣的絶縁・漏電の課題である。これに対し、本研究では非接触給電方式を利用することでこの問題を根本解決する。

非接触給電とは、電力を電氣的接触部を持たずに電源から負荷側へ送電する仕組みの総称である。本研究では、現在の技術で最も効率よく大電力を送受信することが可能な電磁誘導型の非接触給電技術を採用した。これは、電力を高周波電流に変換し、これを送電コイル上で高周波電磁界として放射し、受電コイルでこれを受け止めることで再び電力として取り出す技術である。

### (2) AUV 向け非接触給電の仕組み

AUV に搭載する二次電池を充電するための仕組みとして、非接触給電を採用した時のイメージを図 1 に示す。海底に設置または海中に備え付けられた給電ステーションに AUV が自己の判断のもとにドッキングし、給電ステーションから非接触で電力の供給を受ける。給電ステーションへの電力供給は海底ケーブルを通じて陸側の電源系統から送電する仕組みが考えられる。あるいは海上に浮く大型ブイに太陽光パネルを設置し、ブイのバラストとして大型二次電池を据え付ける方法も考えられる。この方法では、発電された電力は一時的にブイの電池

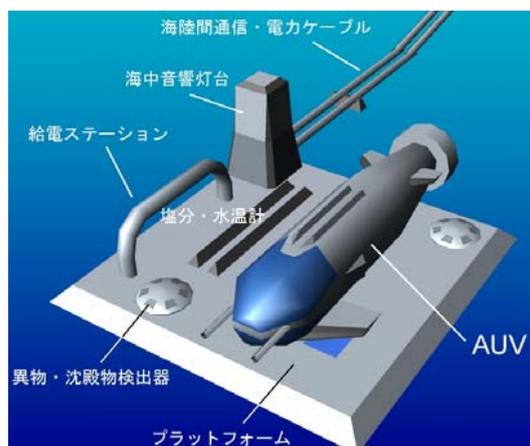


図 1 非接触給電を用いた AUV 向け給電ステーションイメージ

に蓄えられ、AUV が給電ステーションにドッキングした際に、係留用アンカーロープに沿わせた電力線を通じて給電ステーションに送電し、最終的に AUV へ電力供給することが想定される。

### (3) AUV 特有の姿勢制御の課題

AUV は海中で完全自律制御で駆動する。一般的に、位置・姿勢制御には、後方に取り付けられたメインプロペラの他、複数のサイドスラスタを用いる。位置情報は AUV 内に設置される高精度なジャイロにより、海水中での 3 次元的位置を推定することができる。ところで、陸上のロボットやレール上の車両であれば、外乱が少ないため、姿勢制御や位置制御が容易である。一方、AUV は海中にあるため、潮流や波の影響、さらには海中生物や付着物・汚損など、姿勢制御や位置制御に対する外乱が極めて多く、かつその影響度は甚大である。

加えて、AUV がその姿勢・位置制御にジャイロ以外に用いるセンサ類は海洋という環境制約上、海中ビーコンと超音波計測に頼らざるを得ないという事情がある。海中ビーコンはその性質上、数 m 程度の位置精度しか得られない。したがって広い海域内での大まかな位置制御には良いが、給電ステーションにドッキングするための制御情報としては不十分である。この場合、超音波による短距離計測が活躍することになる。

しかし、海底にはプランクトンなどの死骸や排出物が物理的に固まって降り積もるマリンスノーと呼ばれる現象があり、これらの影響を排して超音波計測で正確な位置情報を得るのは著しく困難である。

このようなことから、あらゆる環境因子を考慮した非接触給電のシステム構成と設計が必要となる。

### (4) AUV 向け非接触給電での課題

電磁誘導方式の非接触給電では、送電コイルと受電コイルとの距離（ギャップとも呼ぶ）が離れば離れるほど、送電電力の大きさに限界が生じる。そのギャップが数 mm 変わっただけで、その影響が送受電力の大きさに大きくかわるようになる。したがって、できるだけ効率よく大きな電力を送受電するためには、送電側と受電側とが絶縁されていても、近い位置関係にあることが望ましい。

一方、先にも述べた通り、AUV の位置・姿勢制御の能力には限界がある。このためたとえ数 mm でも、海中 AUV のように多少の動揺や位置ずれが想定される場合、陸上でいくつか実現化されている非接触給電

方式をそのまま採用することは不可能である。

#### (5) 検討すべき課題と目的

以上のことから、AUV に安定的に非接触給電するためには以下の事項を明らかにする必要がある。

##### a) 送受電コイルの形状把握

高周波電力を高周波電磁界に変換する送電コイルと高周波電磁界を受け取り電力として取り出す受電コイルの形状は非接触給電にとって重要な技術要素である。

b) 送受電コイルの位置関係と性能把握  
電磁誘導方式の非接触給電における実質的な送受電の到達距離を明確にすることで、非接触給電システムを設計する上での制約条件を明らかにする。また、送電コイルと受電コイルの相対的位置ずれが送電性能にどのような影響を与えるかを把握することも重要である。

##### c) 送電側高周波インバータの制御

送電側コイルと受電側コイルとの位置関係やギャップの大きさによって送電側高周波インバータから見た受電側の回路インピーダンスが変化する。このインピーダンス変化に対し、高周波インバータが無対策であると、送電電力の大きさや効率に甚大な影響が出る。このため、送電コイルと受電コイルとの位置関係によらず、安定的に電力を供給しうるための制御手法が必要となる。本研究では、この対策として、コンデンサや送受電コイルなどを総体的に共振回路とみなし、この共振周波数で駆動することにより、安定的な電力転送を実現することを課題とした。

##### d) 等価回路定数の把握

高周波インバータの出力端に接続される直列コンデンサ、送電コイル、受電コイル、AUV 側に搭載される並列コンデンサ、整流回路、DC バスコンデンサ容量、二次電池電圧などの各要素が共振周波数に対し、どのような影響を持ちうるのか把握する必要がある。これにより、電力転送の限界点をインバータ側で把握するための基礎データとする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 送受電コイルの形状把握について

先の 2.(5).a で述べたように、AUV の非接触給電システムに適したコイル形状を設計する必要がある。そこでパンケーキ型と E コア型のコイルを試作し、実験と電磁界解析により、送電コイルおよび受電コイルの形状を送受電性能を評価軸として実験検証する。

#### (2) 送受電コイルの位置関係と性能

2.(5).b で述べたように、送電コイルと受

電コイルの相対的位置関係が送受電性能にどのような影響を及ぼすのか把握する。このため、試作コイルによる実験と電磁界解析によるシミュレーションの双方で検証を進める。

#### (3) インバータ制御の高性能化

2.(5).c で述べたように、送電側の高周波インバータは共振周波数を追従する制御機能を有する必要がある。本研究代表者は共振追従に関する制御技術の蓄積はある。しかし、AUV に搭載する上で各種の保護回路等との連携をするためにもより一層の高性能化が必要である。そこで高周波インバータのデジタル制御化を進める。

#### (4) 等価回路定数の検証

高周波インバータの高性能化を目的としたデジタル化は、単に送電能力の向上だけでなく、安全・保護動作についても高度な性能が求められる。これを高周波インバータが自律的に判断して動作するためには、等価回路定数の把握が不可欠である。等価回路定数の把握には、試作インバータ回路を用いて実稼働域での検証を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 送受電コイルの形状について

図 2 は試作したパンケーキ型コイル(左)と E コア型コイル(右)である。非接触給電



図 2 試作した送受電コイル

では、これらのコイルを向い合せて送受電することとなる。各コイルは自己インダクタンスが  $80\mu\text{H}$  となるよう、コイル巻き数を調整した。この試作コイルを電磁界解析モデルと比較した。その結果、表 1 および表 2 に示すように、実機と解析モデルは良い相関が得られた。

表 1 パンケーキ型コイルの評価

	実測	電磁界解析
自己インダクタンス	$80.1\mu\text{H}$	$89.3\mu\text{H}$
結合係数	0.6925	0.7099
漏れインダクタンス	$24.6\mu\text{H}$	$25.9\mu\text{H}$

表 2 E コア型コイルの評価

	実測	電磁界解析
自己インダクタンス	80.0 $\mu$ H	76.7 $\mu$ H
結合係数	0.1537	0.1765
漏れインダクタンス	67.7 $\mu$ H	63.2 $\mu$ H

このためコイルの形状や位置ずれに関する検討は、電磁界解析によることとした。なお、コイル形状としてはパンケーキ型コイルの方が高い結合係数を持つため、送受電コイルとして有望であることが推察される。

(2) 送受電コイルの位置関係と性能

電磁界解析により、各コイルの相対的位置関係が結合係数にどのように影響を与えるかシミュレーションした。図 3 が解析に用いた 3D モデルである。

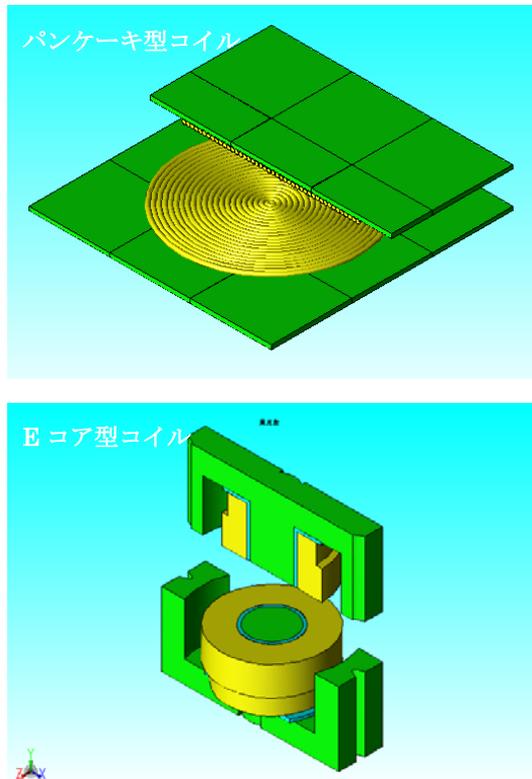


図 3 各コイルの電磁界解析モデル

図 4 に解析結果の一例を示す。コイルを水平方向に 55mm 移動させたときの磁束密度を示している。各コイル間の垂直距離（ギャップ）は 30mm である。パンケーキ型コイルでは、下側の送電コイルが発生した磁束が上側の受電コイルに伝達している様子がわかる。一方、E コア型コイルでは、下側の送電コイルが発生した磁束は上側の受電コイルに十分に到達しておらず、電力転送という点で不利である。

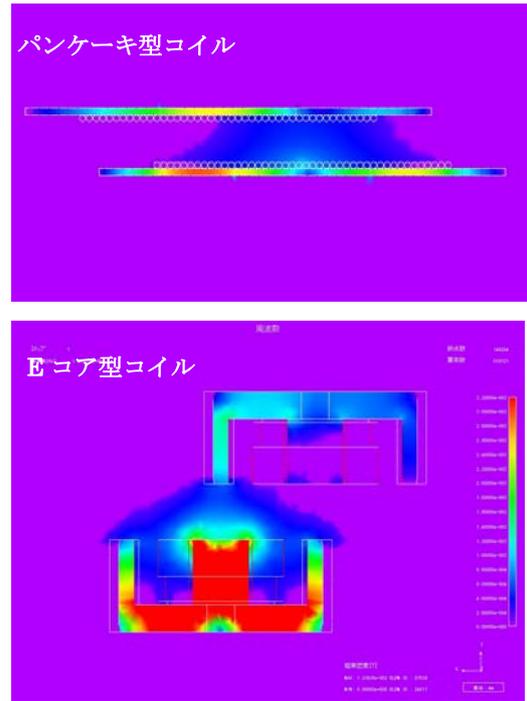


図 4 磁束密度分布

位置ずれの大きさが結合係数に与える影響についてシミュレーションした結果の一例を図 5 に示す。どちらのコイルも相対的な位置ずれが大きいほど結合係数が低下するが、パンケーキ型コイルの方が結合係数を高くするという観点では有利であることがわかった。

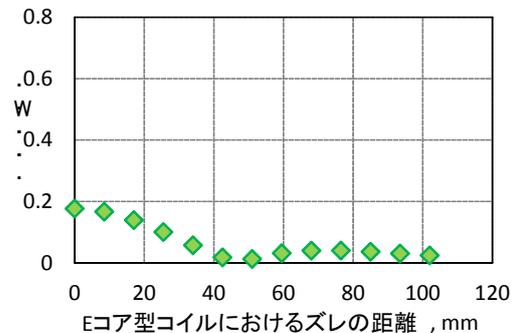
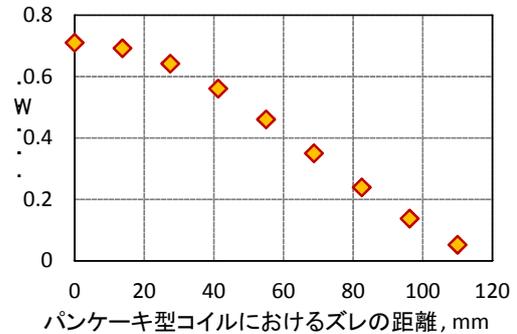


図 5 相対的位置ずれと結合係数の関係

### (3) インバータ制御の高性能化

非接触給電するにあたり、給電側と受電側の電氣的共振周波数を一致させ、これに合わせてインバータを動作させることで、効率良く電力を転送することができる。このため、高周波インバータは共振周波数追従制御が必要になる。当初、この追従制御に研究代表者が開発した CTBL（導通時間均衡化制御）を採用する予定であった。しかし、研究を進めていく中で CTBL の発展系である IZBL という新しい制御手法が開発された。この新手法では、理論的に CTBL の内在的な技術課題をいずれもクリアしており、非接触給電用高周波インバータの制御手法として有望である。

IZBL は高周波交流側に安価な CT を接続し、そこから得られる波形情報を元にインバータの動作周波数を決定する制御である。試作当初は CTB 回路のノウハウを利用してアナログ回路で制作したが、複雑かつ大規模化する問題が発生した (図 6-a)。このため、制御回路規模の大幅な小型化を狙い、FPGA によるデジタル制御を導入することとした (図 6-b)。

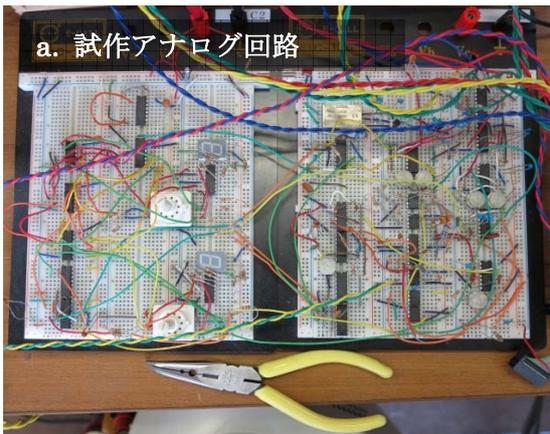


図 6 高周波インバータの制御回路

FPGA を利用することで、使用する半導体 IC の数が 1/10 程度となり、回路規模もコンパクトになった。また回路調整がプログラミングにより実現可能となった。

実際に試作した高周波インバータと制御回路の組み合わせにより性能評価を行った。共振回路の共振周波数を意図的に 40% 近く急激に変化させ、その追従性能を実測した (図 7)。その結果、共振周波数が変化を始めてから、ほぼ 0.1 秒以内に追従できていることが確認された。AUV の非接触給電では、共振周波数が変化するスピードは水深の浅いところでは波の影響により、水深の深いところでは潮流の影響を受けるが、いずれも実験で行ったような短時間での急変は生じないため、実際の利用に際し、十分な性能余裕があることが確認された。

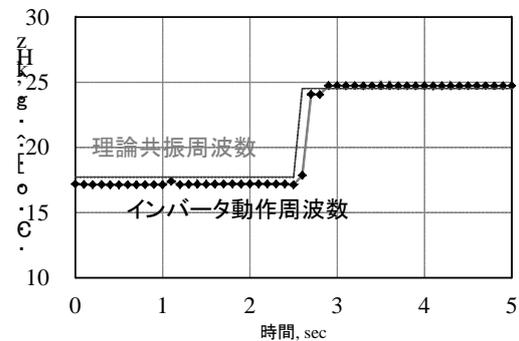


図 7 試作回路による共振周波数追従性能

### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① 星野 正宏、木船 弘康、畑中 義博、“共振周波数制御インバータにおける定格出力の選定方法”、平成 23 年電気学会 産業応用部門大会、Y-19、2011.9.7、琉球大学
- ② 星野 正宏、木船 弘康、畑中 義博、“共振周波数追従制御と電力制御を両立する高周波インバータの性能評価”、電気学会 半導体電力変換研究会、SPC-11-105、2011.9.7、琉球大学
- ③ Hiroyasu Kifune, Yoshihiro Hatanaka, “Circuit Design of Contactless Power Transmission System for AUV”, International Symposium on Marine Engineering 2009.10.19、韓国、釜山

[ホームページ]

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~kifune/japanese/service.html>

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

木船 弘康 (KIFUNE HIROYASU)

研究者番号 : 90323849