

AUV向け非接触給電装置の基礎検討

木船弘康* 上松嵩幸 佐藤直樹 (東京海洋大学)

Basic study on wireless power supply for AUV

Hiroyasu Kifune*, Takayuki Uematsu, Naoki Satoh (Tokyo Univ. of Marine Science and Technology)

The wireless power transfer system for AUV (autonomous under-water vehicle) requires high redundancy. This paper discusses a specification which the system has to be satisfied. In addition, the matching operation is mentioned for seeking an optimum pair of transferring and receiving coils. Some experimental results which are given by using a test circuit are shown.

キーワード：非接触給電、電磁誘導方式、AUV、海中、複数コイル配置、コイルマッチング
(Wireless power transfer, Electro-magnetic coupling, AUV, Sub-sea, Multiple layout coil, Coil matching)

1. はじめに

海洋開発や海洋環境調査を目的に各種の自律航行ロボット(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)が研究開発されており、中には3,000m以上の大深度海域での自律航行という画期的な性能を持つものが実現されるに至っている⁽¹⁾。こうした大深度広範囲を対象とした海洋調査だけでなく、ある一定の限られた範囲を定期的に巡回潜航調査する用途のAUVも今後必要になる可能性が高い。現在開発されているAUVは一部を除き、内蔵のバッテリーで動作している。近年、半導体メモリの容量は大幅に拡大しているが、バッテリー容量はそれに見合うだけの開発速度で容量増加するに至っていない。その結果、取得・蓄積されたデータは少なくとも数回の潜航調査のたびに人手によりバッテリー交換あるいは充電をする必要性が生じており、真に自動化されているとは言い難い。また、この充電作業は荒れた海表面で数名のダイバーがAUVにクレーンブロックを取り付けるなど、吊り上げ回収作業1つとっても非常に危険な作業である。こうした作業環境の安全性を確保するという点からも、吊り上げずに充電することができれば、作業リスクの大幅な軽減につながる。

そこで、AUVが自己判断の下に海底、海中あるいは海表面で充電する仕組みを作ることができればAUVの稼働率、調査・作業の安全性を飛躍的に高めることが可能となる。そこで筆者らは、AUVへ給電することを念頭に電磁誘導方式の非接触給電技術に関する検討・研究を重ねてきた⁽²⁾。

本報では、AUVを海中で非接触給電するために検討しなければ課題を整理し、今後の展望について述べる。

2. AUVが置かれている環境について

海中でAUVを非接触給電する装置を検討する上で、AUVが置かれている環境について整理する必要がある。

〈2・1〉 **運動性能** 世界中の海洋研究の機関において、多種多様なAUVが利用されており、その開発が進められている。AUVは海中という3次元空間において姿勢制御および運動制御を行うため、4軸以上のスラストを持つ場合が多い。これらのスラストで水流を制御し、その反力により運動能力を得ている。AUVは海水という粘性流体中を移動するため、自動車のタイヤと路面の関係のように回転数と移動距離が単純な関係として得られない。また、海流や潮流、海表面近くでは波浪もAUVの運動性能に強い影響を与える。このため基本的にはAUVが水中で細やかな位置制御や姿勢制御をすることは困難である。

〈2・2〉 **電波の減衰** 海水中では電波が極端に減衰するため、電波による無線通信や計測が著しく困難である⁽³⁾。このため、潜行中はGPSによる測位ができないため、慣性航法装置を用いて自機位置を推定し続けている。

非接触給電をするにあたり、受電側(Master)から送電側(Slave)に指令を出して安全に電力転送を行うことが求められるが、この通信に電波を利用する場合、何らかの配慮が必要になる。

〈2・3〉 **高価な搭載機器と高額な運用コスト** 我が国で独自開発されるAUVは1機数億円をくだらない研究開発/製造費が投じられており、搭載する科学研究用計測機器も非常に高価である。このことから高価で貴重なAUVを「紛

失」しないよう、1機のAUVを母船1隻が常に追いかけるといった運用がなされている。このため、運用コストも高い。

〈2・4〉 電源の確保 送電側機器（給電ステーション）をどこに設置するかという課題は電源の確保の課題とセットで考えなければならない。AUVで調査をする海域と陸域が十分に近ければ、海底ケーブル網による電源の供給という手法が考えられる。このため、給電ステーションを海底に設置することができる。また、短時間のスポット調査であれば、海底に仮置きする給電ステーションに大容量蓄電池あるいはDC発電機を送電側機器に搭載するなどのシステム構成が考えられる。

一方、水中重量を調整し、ブイにより給電ステーションを海中につり下げられる。自然エネルギーをブイのバラスト電池に蓄え、要求に応じて給電に用いる。

支援母船の船底付近では、電源の確保は容易であるが、海表面近くの波浪の運動量が大きいいため、水中重量の軽いAUVを安全に誘導することが困難となる。

3. 機器デザイン

〈3・1〉 給電ステーション 本研究チームでは、給電ステーションを海底に設置し、電源は海底ケーブルあるいは水中用燃料電池等の搭載により確保する。給電ステーション形状は1~2m²程度のユニットをマトリクス状に複数個レイアウトして展開し、AUVは給電ステーション上に着底して給電サービスを受ける（図1）。

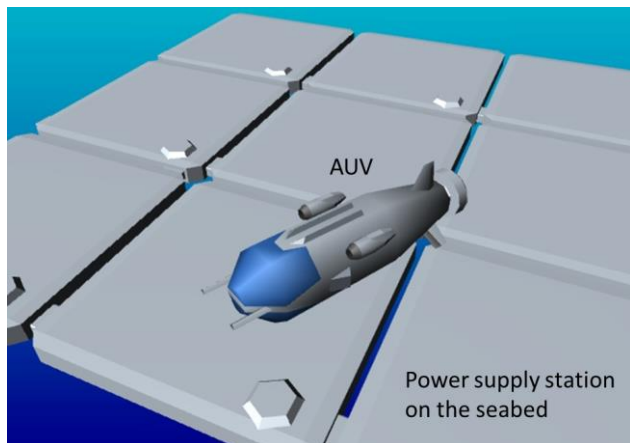


図1 AUVと給電ステーションのイメージ
Fig.1 Sample image of AUV and power supply station

〈3・2〉 給電方式 非接触給電の方式としては、電磁誘導方式を採用することとする。電磁誘導方式は相対するコイル間のズレを許容しないという大きなデメリットがある一方で、フェライト等で対策をすればエネルギーが集中する空間をある程度限定することができ、散逸しないとも考えられる。このため、コイル間のズレの問題を解消すれば、高価な精密機器を複数搭載するAUVへの非接触給電方式

として実現の可能性がある。

〈3・3〉 送電コイル 電磁誘導方式では、送電側コイルと受電側コイルの相対的位置ズレを大きく許容できない。また、先述の通り、AUVのスラスタにより細かな位置調整を行うことは困難である。そこで、送電側コイルと受電側コイルのマッチング機会を向上させるため、送電コイルを複数かつ多層で組み込む（図2）。

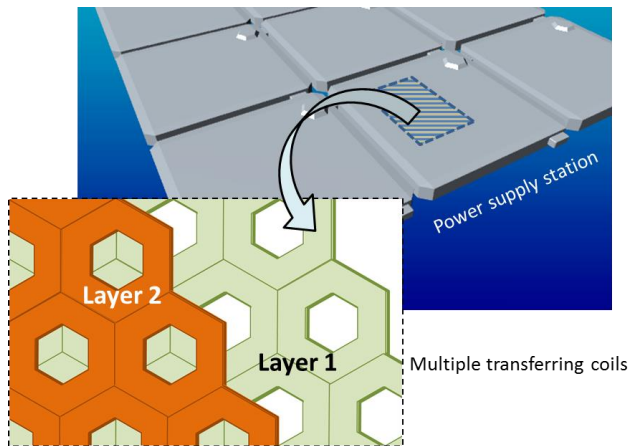


図2 多層式送電コイルのイメージ
Fig.2 Sample image of multiple transferring coils

〈3・4〉 受電コイル AUVの下腹部に配置する受電コイルもマルチ化する（図3）。これにより、送電側コイルと受電側コイルのマッチング機会をさらに高めることができる。これらの送電側コイルと受電側コイルの複数の組み合わせから、最も結合度の高いコイルペアを利用して送電することで、発生するズレ量を小さくし、電磁誘導による送受電を確実にすることができる。

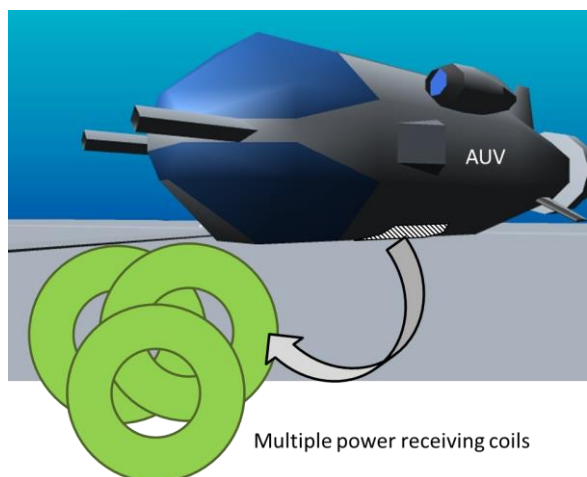


図3 AUVに搭載される受電コイルのイメージ
Fig. 3 Sample image of multiple receiving coils

〈3・5〉 装置収納ケース 電力変換器、制御機器、二次電池等は所要水圧環境下で耐えられる鋼製またはチタン製の耐圧容器内に封入する。一方、送電コイルや受電コイル

については、絶縁油で満たした均圧容器内に封入し、耐水圧コネクタとケーブルで電力変換器箱と接続する。

4. プロトコルデザイン

海中で活動する AUV にとって、電源はまさに生命線である。よって電源喪失や電力不足によって AUV の運動制御能力が失われ、沈降、漂流、紛失という最悪の事態を招かないように電源が管理されなければならない。このため、給電システムにはあらゆる面で冗長性が求められる。すなわち 1 つの機器障害により、給電が不可能になることのないよう、システム全体としての多重化が必須となる。また、あらゆる条件や事象の発生タイミングを考慮して給電ステーションと AUV 双方が Fail safe な運用となるよう設計する必要がある。

〈4.1〉 通信プロトコル 給電ステーションと AUV 間で電力の転送をするためには、お互いを認識するための通信とそのプロトコルが必要となる。例えば、AUV が給電ステーションに着底したことを双方が認識する必要がある。また送受電時には、相互の通信が途絶えた場合どのように Fail safe を担保するかも重要である。

〈4.2〉 フィードバック通信とその冗長性 給電ステーション側から AUV 内の二次電池を充電する上で、制御上、フィードバック信号が不可欠である。しかしながら前述の通り、海中では、電波が減衰するため高周波の電波を利用した通信が困難である。この解決策の 1 つとして、誘電体通信技術⁽⁴⁾が提案されている。海中装置を構成する機器間に誘電体を一種の導波管のように設けることで電波通信を可能にする技術であり、既に海中シャトルビークルの機器間通信の手法として採用されている⁽⁵⁾。給電ステーションと AUV 間の通信は基本的にこの誘電体通信を第一優先で利用することが想定される。具体的には、給電ステーションの筐体表面と AUV の筐体表面あるいは着底接触部分の双方を誘電体により構成することで電波の通り道を形成する。これにより相互に wi-fi による通信が可能となる。

一方、深海ではマリンスノーの沈降や、砂その他の堆積物等により、給電ステーション側と AUV 側の誘電体が相互に接触できない可能性もある。このときに誘電体を通じた wi-fi 通信の代替手段として、音響通信⁽⁶⁾が利用されることとなる。海中音響通信は AUV と母船との通信にも利用され、中長距離通信に実績があり、信頼性の高い技術である。

本論文では、さらなる冗長性と送電コイルと受電コイルのマッチングを目的とした電磁誘導による電力通信の機能を付加することを提案する。

〈4.3〉 送受電コイルのマッチング 複数の送電コイルと受電コイルの中から最も結合度の高いコイルペアを発見する必要がある。そこで、給電ステーションと AUV の相互発見と通信状態が確認された後に、マッチング確認作業を行う。確認作業は概略次の手順となる。

i) AUV の着底位置の概略把握 光学センサその他の手段により、AUV が給電ステーションのどの位置に着底したかを概略把握する。

ii) 送電コイルからのパルス送信 AUV の概略位置把握の後、AUV が着底していると推定される場所の送電コイル群の 1 つ 1 つに順番にインバータによりパルス状の電圧を印加する。AUV 側の受電コイルに誘導される起電力の大きさを評価し、最終的に最も結合度の高いコイルペアを選定する。

iii) 充電中の定期確認 水中重量の小さい AUV はわずかな海流の動きにより、給電ステーション上を横滑りする可能性がある。これにより、送受電に最適なコイルペアが変わるおそれがある。そこで、送受電中に定期的にコイルペアのマッチング作業をし、常に最適なコイルペアで送受電を行う。

iv) 電力通信機能 本来はコイルペアのマッチング作業に用いる手法を、給電ステーションと AUV 間の通信機能の 1 つとして追加するものである。これにより、海底という未知の領域で運動予測が困難なデバイスが備えるべき高い冗長性を実現することができる。何らかの事由により、wi-fi および音響通信にエラーが発生した場合であっても、給電ステーションと AUV の双方の電力変換回路の機能と電池が生きていれば相互に低速で電力通信をすることができる。これによりフィードバック系を確立し、送受電を可能にすることができる。送電と通信に同じ電力変換回路を利用するため、通信期間と送電期間を交互に機能させる時分割方式となる。

5. 主回路構成

上述の機能を実現するため、非接触給電に用いる回路構成を図 4 のように構成する。

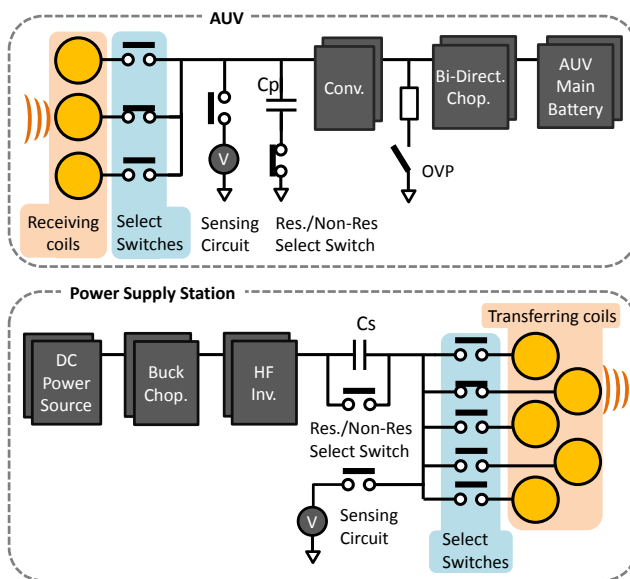


図 4 提案主回路構成

Fig.4 Proposed main circuit configuration

〈5・1〉 送受電時 給電ステーションから AUV に向けて送電している状況では、直列コンデンサ C_s 、並列コンデンサ C_p および送受電コイルのインダクタンスによる共振を積極的に利用する。このときインバータを共振周波数で動作させることで効率よく大きな電力を転送できる。本研究では、給電ステーション側の高周波インバータは共振周波数追従制御の機能を与えて動作させる。これにより、送受電コイル間のギャップやズレの状態に合わせて周波数を最適に制御することができる。このため環境条件の違いによって動作周波数 (=送電電力周波数) は異なる。

〈5・2〉 マッチング動作および電力通信時 給電ステーションと AUV の間でコイルペアのマッチング動作および電力通信を行う場合、インバータやコンバータの動作により共振が起きないように、 C_s および C_p を主回路から切り離して、非共振状態とする。非共振で動作することで、これに要する電力を極力抑制する。動作周波数は一定。

〈5・3〉 送受電コイル 送電側コイルおよび受電側コイルの巻き線の巻き方向はすべて同一とする。これにより、マッチング動作および電力通信時の符号を明確にでき、信号変調を加えることなく、正/ゼロ/負の 3 値で通信することもできる。

6. 試作回路実験結果

図 4 に示す提案回路の一部を試作し、基礎的なデータ収集のため実験を行った。

〈6・1〉 送受電実験 図 5 に送受電コイル間での効率を示す。送電コイルと受電コイルの距離(Gap)が大きくなるほど、効率が低下する傾向にある。また、同様の実験を空气中、水道水中、海水を模擬した塩水中の 3 条件で行った。ギャップの違いにより、送電コイルや受電コイルの漏れインダクタンス等が変化するため、共振回路の共振周波数もその都度異なる。本実験での送電電力周波数はおおよそ 14kHz~21kHz の範囲内であり、送電電力は 200~500W 程度で実施した。その結果、いずれの環境条件にあっても、

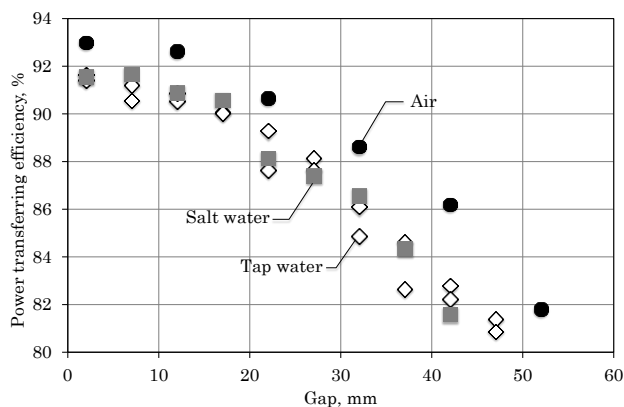


図 5 コイル間ギャップと送受電効率

Fig.5 Power transferring efficiency to coil gap

Gap の増大とともに効率低下が生じる傾向は同じであった。また水道水や塩水の環境では、空气中に比べて効率が低下しやすいことも明らかである。

〈6・2〉 電力通信模擬実験 コイルペアのマッチング動作時の電力通信を模擬した実験を行った。このときの実測波形を図 6 に示す。コイル間ギャップが 2mm、ズレ 45mm、スイッチング周波数 83.3kHz、インバータ入力直流電圧 10V の条件での実測波形で、送信信号電圧が v_1 、受信信号電圧が v_2 である。

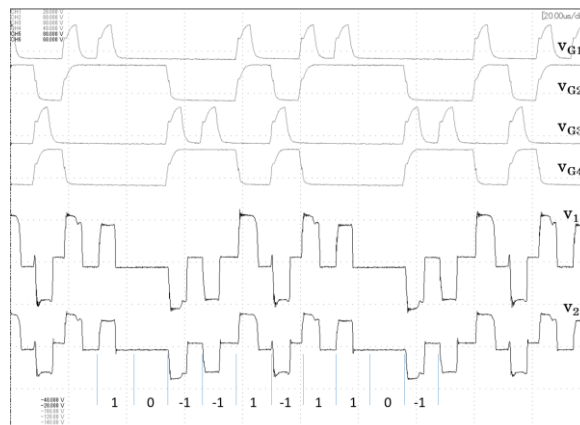


図 6 送信信号と受信信号の電圧波形

Fig.6 Waveforms of transmitting and receiving voltage

7. おわりに

AUV の非接触給電技術には高い冗長性が求められる。本報ではその満たすべき仕様について一部を紹介した。送受電コイルの最適ペアを発見するためのマッチング動作について概説し、試作回路によるいくつかの実験結果を示した。

文 献

- (1) 百留忠洋, “深海巡航探査機「うらしま」の開発動向”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol.43, No.4, pp.85-88, 2008
- (2) H.Kifune, Y.Hatanaka, “Circuit Design of Contactless Power Transmission System for AUV”, Proc. of International Symposium on Marine Engineering, #133, 2009
- (3) 海洋音響の基礎と応用, 海洋音響学会編, 成山堂, 2004
- (4) 清水悦郎・他, “水中通信システム”, 特願 2013-161529
- (5) 江戸つ子 1 号プロジェクト公式ウェブサイト, <http://edokko1.jp>
- (6) 水中音響通信の高度化による海洋産業の発展と新事業創出等効果に関する調査研究報告書, (社)日本機械工業連合会/(社)海洋産業研究会, 2005
- (7) H.Kifune, Y.Hatanaka. "Optimal frequency tracking method for phase - shift PWM inverter." IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 7.S1 (2012): S167-S172