

「研究テーマ名」強力超音波を利用した水中ワイヤレス電力伝送システムの基礎検討
神戸大学大学院海事科学研究科 三島 智和

1 研究の背景と目的

海洋底資源の探索に欠かせない自律潜航探査機 (AUV) は動力源としてバッテリーを内蔵しており、その充電 (給電) 装置には高効率で利便性が高く、メンテナンスフリーであることが求められる。海底に設置された給電ステーションから電線を介して給電する従来の手法は、接続プラグの脱着やケーブル腐食対策が必要であるばかりか、海水による電力損失を引き起こし、電力効率の悪化が懸念されている。さらには、複雑な海底地形に相対する AUV の自由航行を阻害する利便性上の問題もある。その対策として、本研究では、強力超音波振動を応用したワイヤレス (非接触) 給電システム (Wireless Power Transfer, WPT) を目指す。本申請課題では、強力超音波発生装置としてボルト締めランジュバン振動子を利用した水中 WPT の実現を目指し、その原理を実証すべく実機試作器による基礎検証を目的とする。

2 研究方法・研究内容

【概要】1年間の研究計画とする(2017年4月から2018年3月)。超音波振動子には、洗浄装置として応用されるボルト締めランジュバン振動子 (BLT) を採用し、電力定格1kWの試作装置を新たに構築して、実験解析により提案WPTシステムの有効性を評価する。図1に本研究課題の概要を表し、図2に提案WPTのシステム構成を示す。

【実施内容の詳細】

ステップ 1: 回路動作の理論的検証(2017年4月～5月)

- 専用回路シミュレータ等を用いて、提案する水中WPTシステムの基本動作を検証。

ステップ 2: 制御システム(コントローラ)の構築(2017年6月～7月)

- 出力最大化のため、送受電部である強力超音波振動子 (BLT) の機械的共振周波数に電力変換器の共振周波数を常時追従させる高周波インバータ動作周波数制御システムを考案。送受電間のギャップが長大する場合でも、バッテリーへの高効率給電を維持できる高周波整流器の電力制御手法を考案。

ステップ3: 実験装置の製作(2017年8月～9月)

- 送受電BLTを設計し、高周波インバータおよび高周波整流器の回路パラメータ等を決定した上で、定格1kWの試作器を製作。

ステップ 4: 実験評価(2017年10月～2月)

- 実験室内の水槽を利用し、試作装置の各種動作特性を検証。評価項目として、1)電力変換器動作(直流-高周波-直流変換)、2)高周波スイッチング動作、3)電力変換効率、送受電BLTエネルギー伝達効率の測、4)水圧および気泡とBLT機械的エネルギーとの関連性など

ステップ 5: 研究総括(2018年3月)

- 水槽実験により得られた結果をふまえ、送受電BLT間の指向性とエネルギー伝送効率の関係性や、実システムで想定される技術課題などについて、今後の課題を整理
- フィールド試験への発展性(本学付属の練習船係留池を利用し、実際の海水中における評価試験への手段など)を検証。
- 1年間の研究成果を総括し、および最終研究報告書の作成

本助成制度で規定された研究報告会(学会)を含め、適宜研究成果を公表する。関連する国内外の学会誌へ論文投稿する。研究期間終了後、本学の産学連携組織の支援を得ながら、メーカーとの共同開発を目指す。

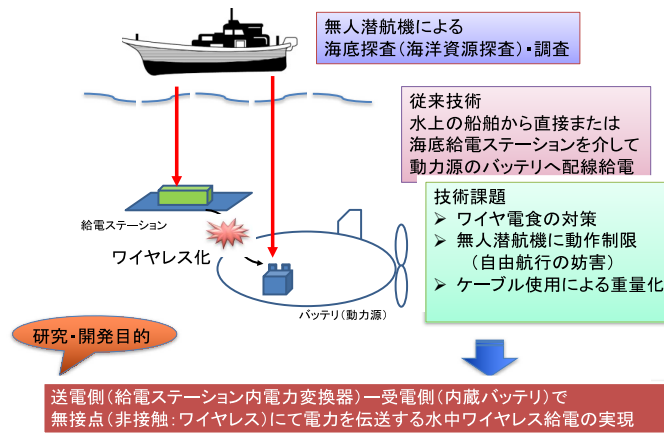


図1. 研究課題(水中WPT)の全体イメージ

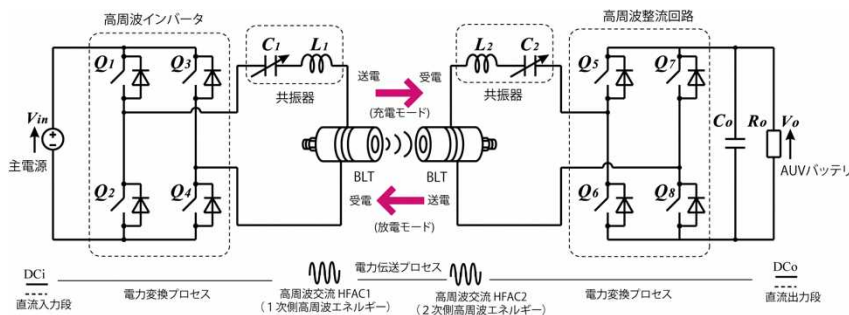


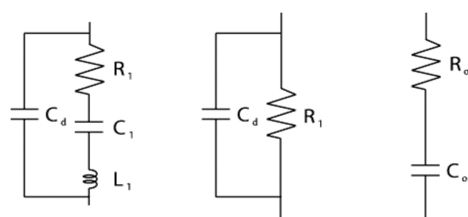
図2. 提案する水中WPTシステムの構成

3 研究成果

今年度は、BLT への共振回路と送電側インバータの実機製作およびその検証を中心に実施した。

まず、使用した BLT の等価回路として、抵抗 R_1 —寄生インダクタンス L_1 —寄生キャパシタ L_2 —並列キャパシタンス C_d による電氣的等価回路モデルをもとに、抵抗 R_o —容量性リアクタンス C_o による直列回路として変換する。図 1 に変換プロセスを示す。図 1(c)の R-C 直列回路に対する周波数特性を図 2 に表す。BLT の共振周波数(40kHz)において、高周波インバータの入力インピーダンス Z_{in} は最小となり、BLT の機械的出力が最大となることわかる。

次に、BLT 共振周波数に合わせ共振電流を供給するように設計し、試作した高周波インバータ回路を図 3 に示す。直流電圧源から 4 つのパワー半導体スイッチを駆動し、高周波を発生させ、BLT に電流を供給する。パワー半導体スイッチ Q_1 - Q_4 には、シリコンパワー MOSFET を適用し、BLT の電力指令に応じて Q_1 & Q_2 と Q_3 & Q_4 レッグの位相差を与



(a)複共振回路 (b)RC 並列 (c)RC 直列
図 1.電氣的等回路

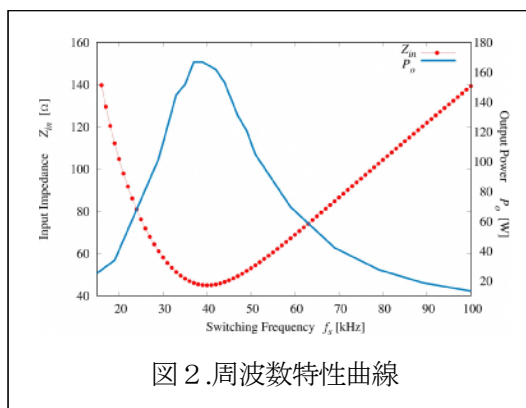


図 2.周波数特性曲線

える「位相シフト PWM」を適用する。このため、高周波インバータそのものに電力制御機能を持たせることができる。試作器では、そのスイッチ駆動ゲートパルスはデジタル制御として DPS ボードから生成し、デジタルアナログ変換回路を通して Q1-Q4 へそれぞれ印加する。図 4 に試作装置の外観を示す。BLT のもつ低インピーダンスとインバー

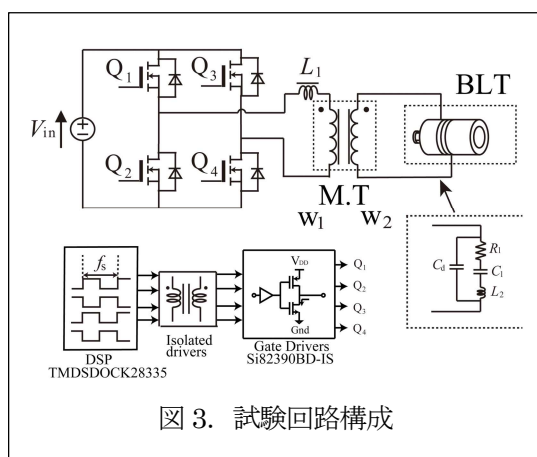


図 3. 試験回路構成

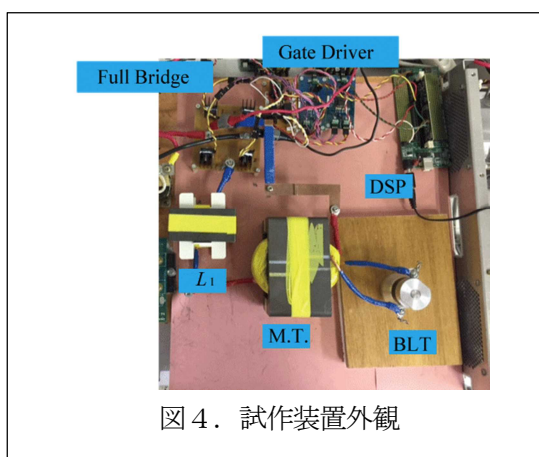


図 4. 試作装置外観

タの入力インピーダンスを整合するために、高周波トランス (マッチングトランス, M.T, 巻数比 $w_1:w_2=1:7$) を設置する。これにより、共振インダクタ L_1 を小型化し、高周波電流を効果的に生成可能となる。

本試作器により得られた動作波形を図 4 に示す。パワー半導体スイッチのハードスイッチング現象により、インバータブリッジ間電圧 V_{ab} は電圧サージが見られるが、設計した方形波電圧が得られている。その結果、インバータ電流 i_o として、40kHz の高周波電流が生成されている。ハードスイッチングの影響により、現状電源電圧 V_{in} は 30V 程度が限度となり、そのため定格 70W の BLT に対し 15W の出力生成にとどまっている。パワー半導体スイッチの電圧サージを抑制したソフトスイッチングを導入し、電圧ストレスを抑えることにより電源電圧を高められれば、より高出力が得られる。今後、パワー MOSFET の寄生容量を考慮したゼロ電圧ソフトスイッチングを導入し、スイッチング特性の改善と高出力化を実現し、送電 BLT 整流回路の検証へと進める。

連携企業として想定している県内の船用機器メーカーと本結果について議論を行い、音波の反射やインピーダンス整合の手法に改良点があることが明らかとなった。これらの改善を行い、水槽実験へと移行する予定である。

なお、現段階での実験結果は、平成 30 年度電気学会産業応用部門大会 (30 年 8 月末、横浜市) にて発表する予定である。

4 生活や産業への貢献および波及効果

現在の進捗状況から判断し、実応用化には多くの検証課題が残っている。しかしながら、海洋資源の開発への機運の高まりを受けて、水中ワイヤレス給電のニーズは確実に高まっており、提案 UPWT は注目されつつある。県内の海洋機器メーカーとも技術交流を継続しており、実用開発への土台は整いつつある。平成32年度中に水中ワイヤレス電源装置として、実用化を想定している。