

令和元年6月20日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18067

研究課題名(和文) 自律型無人潜水機への海中給電のための水中用無線電力伝送システムの研究

研究課題名(英文) Wireless Power Transfer System for Autonomous Underwater Vehicles in Seawater

研究代表者

稲森 真美子 (Inamori, Mamiko)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：70571222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：現在、海水中でAUV(Autonomous Underwater Vehicles)等に無線電力伝送による充電が考えられている。海水中での無線電力伝送として、本研究では海水中に直接コイルを設置する方法で実験を行う。しかし、この方法ではコイルを直接海水中に入れるため、海水の影響を直接受ける。そこでまず海水による無線電力伝送への影響を明らかにした。海水中で電力伝送実験を行い、伝送実験結果より損失解析を行った。またアンテナ間の伝達特性の変化を検討し、水中用無線電力伝送システムにおけるエネルギー伝送の高効率化を実現するシステムの検討および実証を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海底調査に用いられる自律型無人潜水機(AUV)ではできるだけ短時間で電力供給およびデータ取得をすることが求められている。しかし、電気を長期的に供給するにはバッテリーでは限界がある。一方、ケーブルを用いずに無接点または無線で電力を供給する無線電力伝送が注目を集めており、AUV等への充電方式として無線電力伝送を使うことが考えられている。空中での無線電力伝送で使用されている無線電力伝送システムは空気中での使用を前提としたものであり、海水中での使用が考慮されていない。また、海水中では損失が増加する。本研究結果により、海中における電力伝送の影響を明らかにすることでAUVへの高効率な充電が可能になる。

研究成果の概要(英文)：The vehicles for undersea exploration such as autonomous underwater vehicles and remotely operated vehicles have been actively developed. The power for the vehicles is supplied with cables from the surface. With applying wireless power transmission system and charge battery in undersea, the working hours and range expand. However, it is not clear that wireless power transmission system in air can be used in seawater. The power efficiency in saline water is decreased.

In this research, power transmission experiment has been done in saline water, deionized water and air. Experimental results show that transmission efficiency in saline water is approximately 5% lower than that of in air. In saline water, loss that is caused by salinity of water appear on transmission loss. This loss is caused by the complex dielectric constant and the conductivity of saline water. In this research, the efficiency between antennas has been investigated.

研究分野：電力伝送、無線通信、信号処理

キーワード：無線電力伝送 水中 伝送効率 アンテナ インピーダンス

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

海洋探査のための機器の開発が活発に行われている。海洋探査機器は海底探査や人間が容易に立ち入ることのできない環境下での作業をすることができる。代表例として、AUV (Autonomous Underwater Vehicles) や ROV (Remotely Operated Vehicles) 等の海洋探査機器がある。AUV は機器に搭載しているバッテリーにより自立航行を行う。ROV はケーブルにより給電され、海上にいるオペレータにより遠隔操作されている。そのため、現在の給電方法では稼働時間や稼働範囲に限界がある。これらの限界を無くすために、海水中の機器に無線電力伝送により給電することが考えられている。無線電力伝送により給電することで機器の自由度が増し給電を原因とする制約を取り除くことができる。例として、海上に浮上する必要なく海水中で給電できることや、ケーブルレスによる稼働範囲の拡大等がある。

2. 研究の目的

現在、無線電力伝送システムは電気自動車や携帯用機器の給電等に実用化されてきている。しかし、これらの給電で使用されている無線電力伝送システムは空気中での使用を前提としたものである。そのため、これらの無線電力伝送システムは海水中での使用が考慮されていない。そこで、海水による無線電力伝送システムへの影響を明らかにする必要がある。過去の報告より、海水中では空気中よりも電力効率が低下することが報告されている。海水中で伝送する場合、周囲の海水が電磁界の媒体となり、その影響を受けるはずである。現在、海水中での電力伝送の損失増加の原因は解明されていない。

本研究では、海水中で非接触給電を行うことを目的とし、海水中での効率低下の要因について検討する。まず、海水のアンテナへの影響をインピーダンス測定により検討する。次に、塩水中での無線電力伝送システムの電力損失を電力伝送実験の結果から解析する。

また海水中のアンテナ間の伝達特性の変化を検討する。歪みに強い広帯域 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 信号を制御用データ通信に用い、水中用無線電力伝送システムにおけるエネルギー伝送の高効率化を実現するシステムの検討および実証を行う。

3. 研究の方法

海水用アンテナを Fig. 1 に示す。海水用アンテナを空芯コイルとするため、PVC 製のボビンを用いた。防水のため、コイル周囲をエポキシ樹脂でモールドした。モールドの厚さは 0.5mm。同様のアンテナを 2 つ作成し、それぞれ送信アンテナ、受信アンテナとして実験に用いた。

海水を模擬するため、実験では塩水を用いた。なお、塩水は純水に塩化ナトリウム (NaCl) を溶解させた溶液である。はじめに、空気中、純水中、塩水中の各媒体中に設置したアンテナのインピーダンス測定を行った。

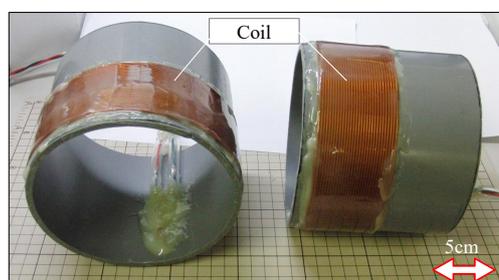


Fig. 1. 海水用アンテナ

電力伝送実験の回路図を Fig. 2 に示す。2 つのアンテナ間の伝送距離は 50mm である。アンテナの外部に接続された共振用キャパシタンスは共振状態を作るためのものである。送信側、受信側の共振用キャパシタンスを含めた送受信アンテナが無線電力伝送システムである。伝送実験は入力電流 I_m を一定の条件で行った。 I_m は無線電力伝送システムへの入力電流の実効値 (RMS) である。パワーアナライザ (WT-1800, Yokogawa) は電流と電力の測定のために使用した。水中実験では、水槽内にアンテナを設置した。

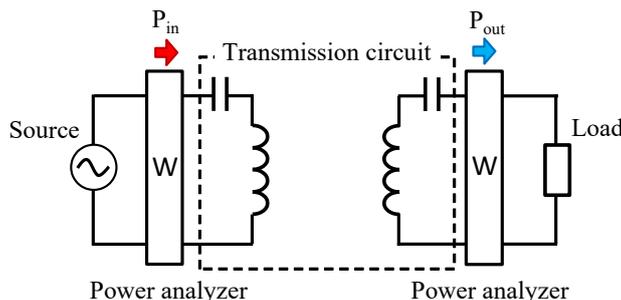


Fig. 2. 電力伝送実験の回路図

アンテナ間の伝送効率に関しては、伝送距離に対する周波数特性および伝送効率の変化

の測定を明らかにするため、まずは空気中において送受信アンテナ間の伝達特性の変化および帯域幅を検討した。送受信アンテナ間距離を 0~30cm の間で細かく変化させ、85kHz を中心に周波数特性を測定した。送信側および受信側それぞれにおける電圧および電流の測定を行い、伝送効率の測定を行なった。送受信アンテナの位置が最適値からずれた場合においても高効率で電力を伝送するシステムの構築を検討した。

4. 研究成果

[1]海水中無線電力伝送の損失解析

アンテナのインピーダンスのベクトル図を Fig. 3 に示す。各媒体中でアンテナのリアクタンス jX はほぼ同じである。すなわち、アンテナのインダクタンスやキャパシタンスには、純水や塩水による影響はほぼないと考える。しかし、塩水中でのアンテナの交流抵抗 R_{AC} が空気中、純水中に比べ 60% 増加する。そのため、海水中では R_{AC} によるアンテナのジュール損失が空気中より大きくなると考える。

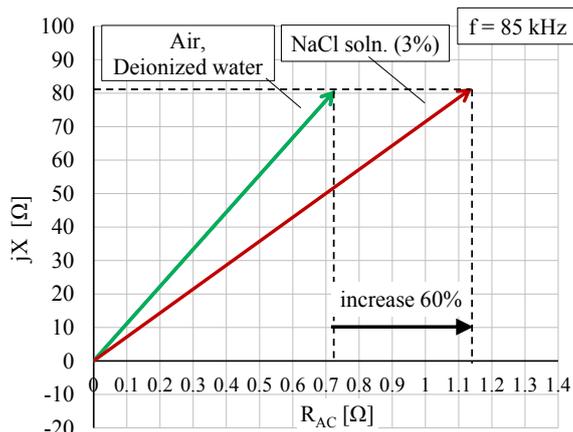


Fig. 3. アンテナのインピーダンスのベクトル図

電力伝送効率の変化を Fig. 4 に示す。電力伝送率は受信電力としての出力電力 P_{out} と送信電力としての入力電力 P_{in} の比率である。純水中での効率も空気中とほぼ同じである。しかし、塩水中での効率は空気中より 5% 低下する

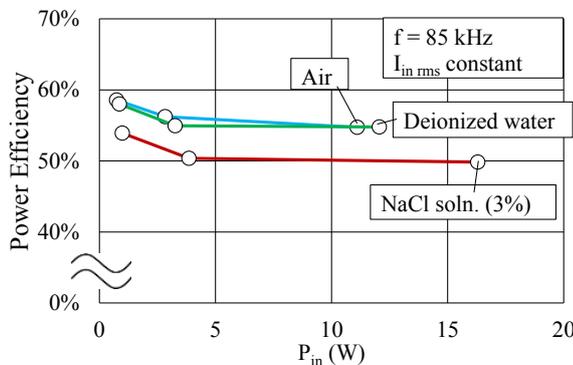


Fig. 4. 電力伝送効率の変化

損失電力は各媒体中での入力電力 P_{in} と、出力電力 P_{out} の差として定義した。損失解析では次の記号を用いた。

- (i) P_{in} : 実測した無線電力伝送実験の入力電力
 - (ii) P_{out} : 実測した無線電力伝送実験の出力電力
 - (iii) P_C : 実測した共振用キャパシタンスの入力電力
 - (iv) P_{DC} : コイルの直流抵抗と電流の実行値から計算したジュール損失
 - (v) P'_{AC} : 表皮効果や近接効果などの交流抵抗の交流成分によるジュール損失
- ここで、 P'_{AC} は (1) 式から計算した。

$$P'_{AC} = P_{in} - P_{out} - P_C - P_{DC} \dots (1)$$

無線電力伝送実験の伝送損失の解析結果を Fig. 5 に示す。各媒体中の P_{DC} と P_C はほぼ同じであり、全電力損失に対して小さい。しかし、純水中、塩水中での P_{in} と P_{out} は空気中より大きい。空気中での P'_{AC} は P_{in} の 35% に相当する。純水中での P'_{AC} と P_{in} の比率は空気中と同じであった。一方で、塩水中での P'_{AC} と P_{in} の比率は 40% であった。よって、塩水中での損失を考えなければならない。

ここで、交流損失を解析するために各媒体中での P'_{AC} を $P_{AC\ air}$, $P_{AC\ water}$, $P_{AC\ salt}$ に分けた。交流損失の解析では次の記号を用いた。

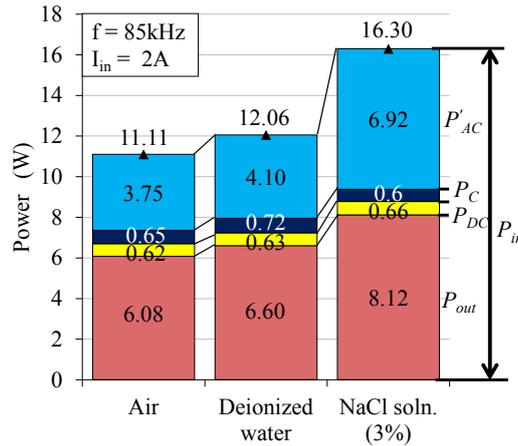


Fig. 5. 伝送損失の解析結果

- (vi) $P_{AC\ air}$: 交流抵抗による空気中のジュール損失
- (vii) $P_{AC\ water}$: 交流抵抗による純水中でのジュール損失
- (viii) $P_{AC\ salt}$: 交流抵抗による塩水中でのジュール損失
- (ix) P_{water} : 水の汚染によるジュール損失
- (x) P_{ion} : 電解質によるジュール損失

実験では同一の海水用アンテナを使用した。そのため、空気中での交流損失 P'_{AC} は純水中、塩水中での交流損失にも存在すると考えた。よって、交流抵抗による空気中でのジュール損失 $P_{AC\ air}$ を (2) 式のように定義する。

$$|P_{AC\ air} = P'_{AC}| \cdots (2)$$

交流抵抗による純水中でのジュール損失を (3) 式に表す。純水中では水の汚染による損失 P_{water} が空気中での交流損失に加わると考えた。

$$|P_{AC\ water} = P_{AC\ air} + P_{water}| \cdots (3)$$

交流抵抗による塩水中でのジュール損失を (4) 式に表す。塩水中では電解質による損失 P_{ion} が純水中での交流損失に加わると考えた。

$$|P_{AC\ salt} = P_{AC\ water} + P_{ion}| \cdots (4)$$

交流損失の解析結果を Fig. 6 に示す。純水中での $P_{AC\ water}$ は $P_{AC\ air}$ よりも大きい。入力電力 P_{in} が各媒体中で増加するからである。純水中での P_{water} は $P_{AC\ water}$ の 1% 未満である。よって、純水中での P_{water} は無視できるほど小さい。また、塩水中での P_{water} も $P_{AC\ salt}$ に比べ、無視できるほど小さい。しかし、塩水中での P_{ion} は $P_{AC\ salt}$ の 20% であった。 P_{ion} が塩水中での効率低下の要因である。

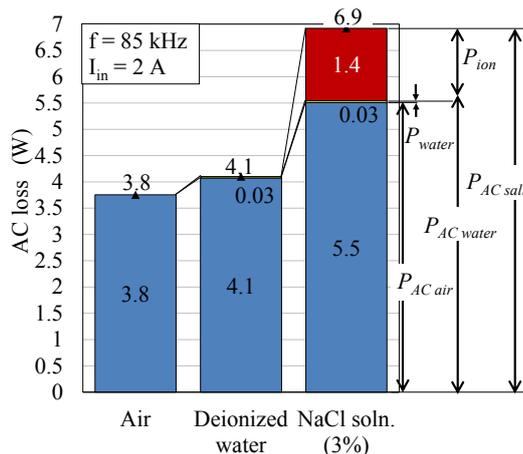


Fig. 6. 交流損失の解析結果

ここで、導電率を含む誘電体での損失電力 P_L は (5) 式で表される。

$$|P_L = 2\pi f E^2 \epsilon'' - \sigma E^2| \cdots (5)$$

(5) 式の E , f , ϵ'' , σ はそれぞれ電界、周波数、誘電損、導電率である。(5) 式は誘電率と導電率の項を持つ。誘電率の項で、誘電損は周波数によって変化する。一方で、導電率の項では周波数成分を持たない。そのため、導電率による損失は直流抵抗として扱わなければならない。

本研究では海水中での効率低下の要因について検討した。塩水中でのアンテナの交流抵抗は空気中よりも増加した。よって、海水中でのアンテナの損失は増加すると考える。また損失解

析によって、塩水中での交流損失が空气中よりも増加することを示した。電解質による損失が塩水中での交流損失の増加の原因と考える。しかし、塩水中での損失増加は誘電率による誘電損だけでは説明できない。塩水は導電率をもつ。よって、塩水中での伝送は水の導電率を考慮しなければならない。そのため、今後は導電率による損失を考慮していく。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 15 件)

[1]井上菊大, A. Binti Ariffin, 稲森真美子, "無線電力伝送のアンテナパラメータ測定法における損失解析," 電子情報通信学会総合大会, 2019 年 3 月.

[2]A. Mori, A. Binti Ariffin, H. Chung and M. Inamori, "Interference Elimination Scheme of Wireless Power Transmission for IEEE 802.11ah," in Proc. ICSPCS 2018, Dec. 2018.

[3]A. Binti Ariffin and M. Inamori, "Influence of Mutual Inductance Measurement for High Efficiency Wireless Power Transmission," in Proc. ICRERA 2018, Oct. 2018.

[4]Y. Shimazaki, H. Kameyoshi, M. Inamori, and M. Morimoto, "Effect of Seawater for Contactless Power Transmission," in Proc. ICEMS 2018, Oct. 2018.

[5]H. Kameyoshi, Y. Shimazaki, M. Inamori, and M. Morimoto, "Efficiency of contactless power transmission in a long distance," in Proc. ICEMS 2018, Oct. 2018.

[6]森厚伸, A. Binti Ariffin, Hwan Chung, 稲森真美子, "ワイヤレス電力伝送におけるデータ通信のための干渉波除去法, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2018 年 9 月.

[7]亀好秀憲, 稲森真美子, 森本雅之, "遠距離での共振型非接触電力伝送," 電気学会産業応用部門大会, 2018 年 8 月.

[8]A. Binti Ariffin and M. Inamori, "Analyzation of Antenna Measurement Method for Wireless Power Transmission," 電子情報通信学会技術報告, EE2018-7, 2018 年 5 月.

[9]篠原俊也, 稲森真美子, 森本雅之, "海水中非接触電力伝送の交流損失の考察," 電気学会全国大会, 2018 年 3 月.

[10]A. Binti Ariffin, A. Mori, and M. Inamori, "Analyzation of Antenna Measurement Method for Wireless Power Transmission," in Proc. IEEE TENCON 2017, Nov. 2017.

[11]T. Shinohara, M. Inamori and M. Morimoto, "Loss Analysis of Contactless Power Transmission in Seawater," in Proc. 2nd IEEE International Conference on Power and Renewable Energy, Chengdu, Sept. 2017.

[12]M. Inamori, and M. Morimoto, "Contactless Power Transfer in Seawater," in Proc. of EPE 2017, Warsaw, Sept. 2017.

[13]篠原俊也, 稲森真美子, 森本雅之, "海水中での非接触電力伝送の損失解析," 電気学会産業応用部門大会, 2017 年 8 月.

[14]島崎好広, 篠原俊也, 稲森真美子, 森本雅之, "海水中で使用する非接触電力伝送用アンテナ," 電気学会産業応用部門大会 YPC, 2017 年 8 月.

[15]亀好秀憲, 篠原俊也, 稲森真美子, 森本雅之, "非接触電力伝送の電力効率の解析," 電気学会産業応用部門大会 YPC, 2017 年 8 月.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ei.u-tokai.ac.jp/inamorilab/contents01.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：Assyfa Binti Ariffin

ローマ字氏名：Assyfa Binti Ariffin

研究協力者氏名：亀好 秀憲

ローマ字氏名：Hidenori Kameyoshi

研究協力者氏名：島崎 好広

ローマ字氏名：Yoshihiro Shimazaki

研究協力者氏名：篠原俊也

ローマ字氏名：Toshiya Shinohara

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。