

コの字型トランスを用いた海中非接触給電の検討

古山 和宜* 金子 裕良 (埼玉大学)

Study on Under Seawater Wireless Power Transfer System using U-shaped Core Transformer

Kazuki Furuyama*, Yasuyoshi Kaneko (Saitama University)

Currently, the exploration and development of marine resources is attracting attention, and interest in wireless power transfer system in seawater applicable to AUV. However, many studies using circular core have been made, but studies using U-shaped core have not been made. In this paper, comparison and examination of transformer efficiency in air and seawater in plug type using U-shaped core. Also, transformer characteristics and power transmission efficiency by salinity concentration in plug part were investigated. As a result of power supply experiment, we obtained transformer efficiency 92.2% at 250W in seawater.

キーワード：非接触給電，コの字型トランス，海水中，磁気回路

Keywords：Contactless Power Transfer System, U-shaped Core Transformer, Under Seawater, Magnetic circuit

1. はじめに

近年、海洋資源の探査・開発に注目が集まっている。この背景には、石油資源等の枯渇による資源問題が挙げられる。現在、海洋探査機器として ROV(Remotely Operated Vehicle) が実用化されている。これは、母船とワイヤーで接続し電力供給や情報の送信を行い、遠隔操作によって航行し海洋探査を行う。

AUV(Autonomous Underwater Vehicle)はバッテリーを動力源とし、海中を自立航行する海洋探査機器として実用化が進められている。バッテリー充電を行うためには船舶が必要となり、ワイヤーを用いた給電では接続部の漏電や腐食などが懸念される。そこで、バッテリー充電に非接触給電技術を用いることで保守性の向上が期待できる。

現在、AUV に適用できる海中非接触給電の研究が活発に行われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし、円形トランスを用いた検討は多く行われているが、コの字型トランスを用いた検討はなされていない。また、円形トランスを用いた海中非接触給電において空気中での給電時に比べ効率が低下するという報告がなされている⁽⁴⁾。

本論文では、コの字型トランスを用いた差込式の形状における空気中及び海水を模擬した塩水中のトランス効率の比較・検討を行った。また差込式の場合、ケース内に塩が析出することによって塩分濃度が変化する可能性も考えられる。そこで、塩分濃度によるトランス特性及び電力伝送効率の検討も行った。

2. 海中非接触給電システム

<2・1> 非接触給電システムの構成 一次直列二次並列コンデンサ方式⁽⁵⁾を用いた非接触給電システムの構成を Fig.1 に示す。一次直列二次並列コンデンサ方式では、定電圧源で駆動すれば二次側の電圧も負荷に依らず定電圧にすることが可能となる。これにより、AUV に搭載されているバッテリーの充電状態を考慮する必要なく給電を行うことができる。

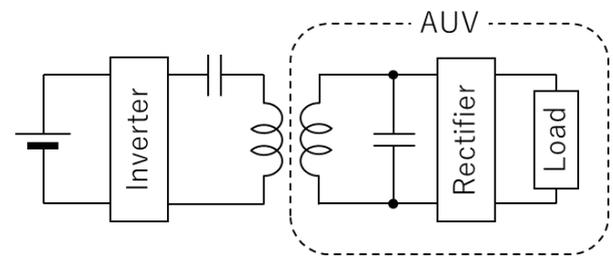


Fig.1 Wireless power transfer system

<2・2> 海中非接触給電における損失 海中非接触給電では、水・海水が誘電体であるために空気中での給電に比べ誘電損失が増加し効率が低下するという報告がなされている⁽⁴⁾。また、特に海中では導電率が増加することにより渦電流損が生じ、コイル電流・駆動周波数の増加に対し非線形的に損失が増加するという報告がなされている⁽³⁾。この要因から、海中非接触給電の効率は駆動周波数 38.9kHz で最大となり、それ以上の周波数では効率が下がるという結果

も得られている⁽³⁾。しかし、空気中の非接触給電において駆動周波数を高くすることで効率が上がる⁽⁶⁾という報告もあるため、海中非接触給電においても高い駆動周波数で海水による損失が少ない方式・形状の検討は必要である。

3. コの字型トランス

<3・1> トランス形状による磁界構造 Fig.2(a)にコ字型トランスの磁界構造の概形、Fig.2(b)に円形トランスの磁界構造の概形を示す。コ字型トランスの磁界構造では、磁束線の大部分がコイル部分を通過する。これに対し円形トランスの磁界構造は噴水状に広がる構造となっており、海中であれば磁束の大部分が海水を通過する。海中非接触給電は空気中のものに比べ海水による損失が生じてしまう⁽³⁾⁽⁴⁾が、コ字型トランスであればその磁界構造から円形トランスよりも海水部分を磁束が通らないため海水による影響を軽減できると考えられる。よって、本稿ではコ字型トランスについての検討を進める。

<3・2> 磁気回路 Fig.3(a)に差込式コ字型トランスの断面図、Fig.3(b)に差込式コ字型トランスの上面図、Fig.4に差込式コ字型トランスの磁気回路を示す。Fig.3のケースの材質は樹脂、一次側コイルのフェライトの材質はPC-90、二次側コイルのフェライトの材質はPC-40である。Fig.4の R_A はFig.3のA部分の磁気抵抗、 R_B はB部分の磁気抵抗、 R_C はC部分の磁気抵抗、 R_D はD部分の磁気抵抗、 R_E は黒色の点線部分EのうちD部分以外における磁気抵抗、 R_F はF部分の磁気抵抗である。また、 N は一次側コイルの巻数、 I は一次側コイルの電流である。ここで、磁気抵抗 R は(1)式で表される。

$$R = \frac{l}{\mu S} \tag{1}$$

ただし、 l は磁気回路の長さ、 μ は透磁率、 S は断面積である。また、比透磁率 μ_r は(2)式で表される。

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{2}$$

ただし、 μ_0 は真空の透磁率である。(2)式より、透磁率が高いほど比透磁率が高いということがわかる。また、空気・海水・樹脂の比透磁率は1と同じであるためFig.3、Fig.4の磁気抵抗において同一とみなした。コ字型トランスの二次側コイルに使われているPC-40の比透磁率は2300と空気・海水・樹脂に比べて非常に高いため(1)式よりD部分の磁気抵抗がC・E・F部分より非常に小さい値となることがわかる。これは、Fig.4の磁気抵抗 R_D 部分を磁束が非常に通りやすいということであり、これによって磁束が集中し分散しなくなる。従って、海水部分を通る磁束が少なくなると考えられる。

<3・3> 磁界解析による磁束分布 電磁界解析ソフトウェア JMAG(JSOL社製)を用いて、給電時における差込式コ字型トランスの磁束分布を調べた。一次側コイルに85kHz、1Aの正弦波を流した際のシミュレーション結果

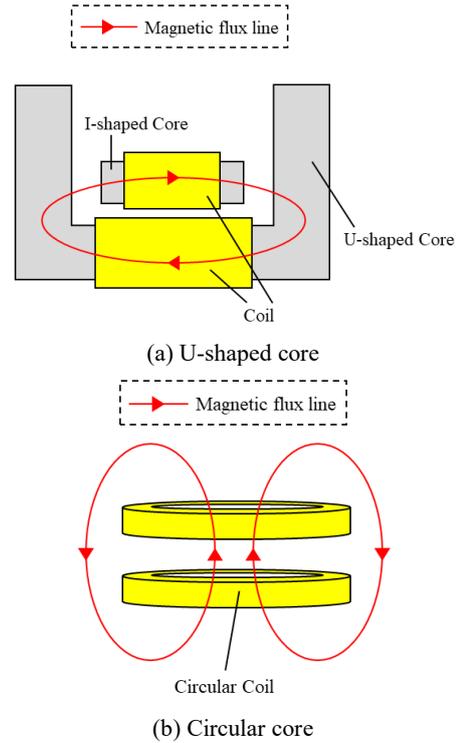


Fig.2 Magnetic field structure

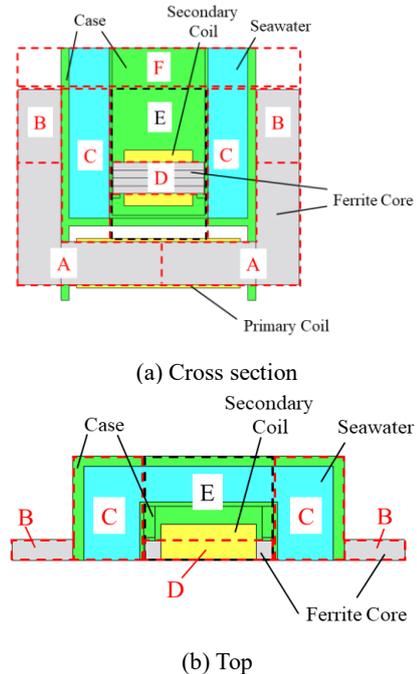


Fig.3 Plugin U-shaped core

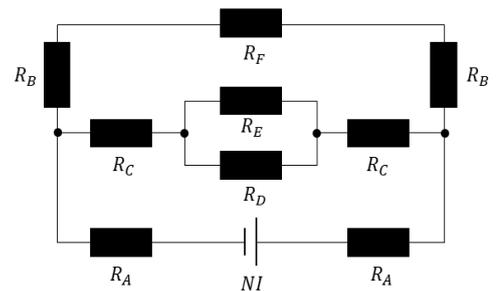


Fig.4 Magnetic circuit

を Fig.5 に示す。

Fig.5 を見ると、フェライトコア部分に磁束が集中していることが確認できた。また、ケース内の海水部分の磁束密度はフェライト部分に比べ非常に低く、フェライト間部分以外の海水部分には磁束があまり通っていないことを確認した。

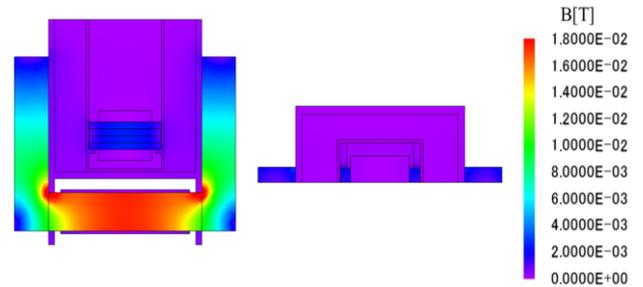


Fig.5 Magnetic flux distribution of transformer

4. 給電実験

<4・1> 実験条件 一次側にコの字型トランス、二次側にI型トランスを用いて 250W 給電実験を行った。媒体を、空気・水(水道水)・海水(塩水)とし、実験時の回路は Fig.6 のように組み、コの字型トランスとI型トランス間のギャップは 30mm、電源電圧は 100V とした。Table.1 に実験条件および用いたトランスの定数・コンデンサ・最適負荷の値を示す。トランス定数は一次・二次コイル間ギャップ 30mm で測定した。

<4・2> 実験結果 ケース内の媒体を空気・水道水・塩水(塩分濃度 3.5%)とし、それぞれにおいて 250W 給電実験を三回ずつ行った。各媒体におけるトランス効率の平均値を Table.2 に示す。空気・水道水・塩水のトランス効率は最大で 0.2% 差となった。

従って、空気・水道水・塩水においてトランス効率に変動がないことを確認した。また、塩水中においてトランス効率 92.2% を得ることができた。

<4・3> 塩分濃度によるトランス特性 二次側コイルの差込深さを Fig.8 に示すように 5, 10cm とし、それぞれについて塩水の塩分濃度を 0~8% の 2% 刻みで変化させたときの各種トランス特性の測定結果を Fig.7 に示す。また、測定時に用いたトランスの写真を Fig.8 に示す。測定時の塩水の量は水深が 10cm になるようにした。Fig.7(a) に示すように、一次・二次コイルの巻線抵抗は塩分濃度の増加に対して線形的に増加している。これは、塩分濃度の増加にともなって塩水の導電率が増加したことにより渦電流が増加しそれによる損失が巻線抵抗として計測されたことが原因だと考えられる。

Table.1 Transformer parameters

Gap [mm]	30
Frequency [kHz]	85
Primary winding	40T
Secondary winding	20T
r_1 [mΩ]	330
r_2 [mΩ]	49.5
L_1 [μH]	513
L_2 [μH]	36.4
k	0.187
C_s [nF]	7.33
C_p [nF]	95.6
R_L [Ω]	78.1

Table.2 Transformer efficiency

Media	Efficiency [%]
Air	92.1
Water	92.3
Seawater	92.2

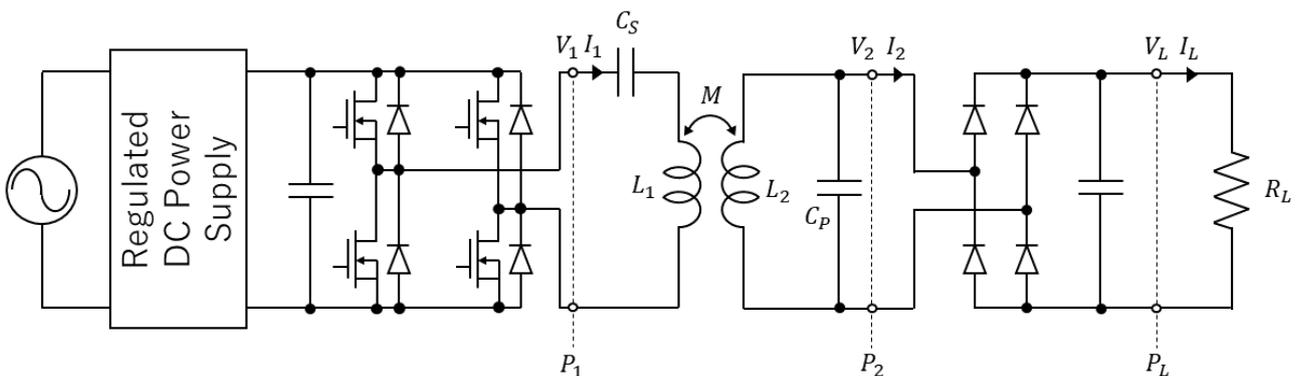
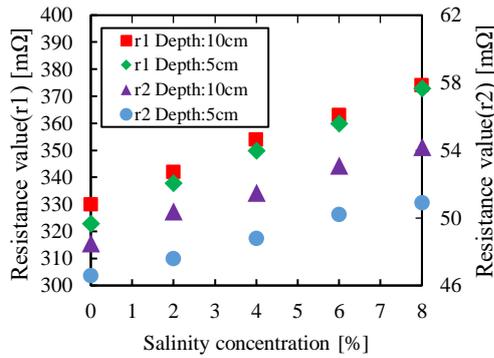
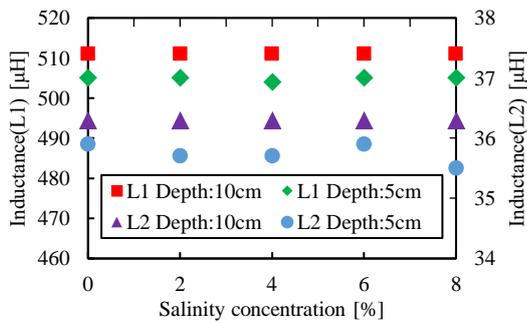


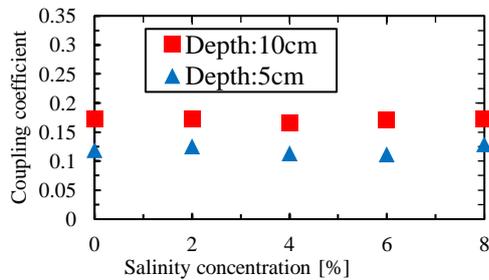
Fig.6 Circuit of experiment



(a) Primary & Secondary winding resistance



(b) Primary & Secondary inductance



(c) Coupling coefficient

Fig.7 Transformer characteristic

Fig.7(b),(c)に示すように、差込深さが深いほど一次・二次コイルのインダクタンス値および結合係数は高くなった。各差込深さにおいて塩分濃度によるインダクタンス値および結合係수에線形的な傾向は確認できなかった。

<4・4> 給電シミュレーション 各塩分濃度および差込深さにおいて Fig.7 に示した測定結果の平均値、および塩分濃度 4%時の最適負荷を用いてシミュレーションを行った。

Fig.6 の回路に関して巻き線抵抗を考慮した上で電源電圧を 100V、周波数 85kHz として回路シミュレータ PSIM による電力伝送効率のシミュレーション結果を Fig.9 に示す。Fig.9 に示すように差込深さ 5cm, 10cm でそれぞれ効率が 89%, 92%という高い値が得られた。この結果から、最深部分よりも 5cm 程度であれば離れてしまっても高い効率で給電できることを確認した。また、差込深さ 5cm, 10cm における空気中・塩水中の電力伝送効率をそれぞれ比較すると、ほとんど変わらないことを確認した。

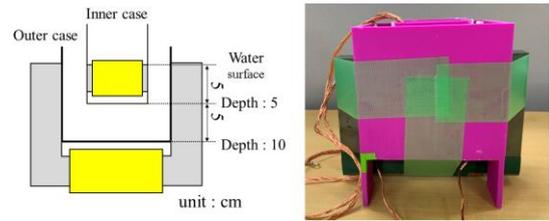


Fig.8 Insertion depth & Photograph of plugin U-shaped core

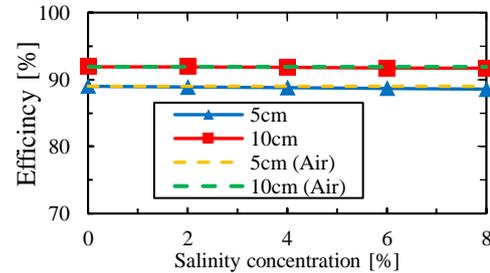


Fig.9 Efficiency by each insertion depth

5. まとめ

本論文では、コの字型トランスを用いた空気中・海中非接触給電の比較・検討および、塩分濃度によるトランス特性の検討を行った。

従来の海中非接触給電で検討されていた円形トランスによる給電では空気中に比べ海中では給電効率が低下すると報告されていた(4)。しかし、コの字型トランスを用いた 250W 給電実験を行ったところ、空気中・塩水中によるトランス効率に変動がなく、塩水中においてトランス効率 92.2%と高い値を得た。また、塩分濃度による各種トランス特性の測定を行ったところ、一次・二次コイルの巻線抵抗が塩分濃度の増加に対して線形的に増加していることを確認した。各差込深さによる測定結果を元にシミュレーションを行ったところ、差込深さ 5cm, 10cm では効率が 89%, 92%という高い値が得られることを確認した。

今後は、コの字型トランスを完全に水没させた状態での検討および、円形トランスを用いて本論文と同様の条件で実験を行い、比較・検討する予定である。

文 献

- (1) 権田貴紀, 元谷 卓, 道木加絵, 鳥井昭宏, 「海中非接触給電における給電・受電コイルを格納した防水ケース内の空気層の厚みの効果」, 電学論 C, Vol.138 No.12 pp.1478-1484(2018)
- (2) 佐藤直樹, 井上鴻志, 木船弘康, 「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」, 半導体電力変換モータドライブ合同研究会, SPC-17-4, MD-17-4(2017)
- (3) Zhiyuan Cheng, Yang Lei, Kai Song, Chunbo Zhu, "Design and Loss Analysis of Loosely Coupled Transformer for an Underwater High-Power Inductive Power Transfer System", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL.51, NO.7(2015)
- (4) 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」, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, I-29(2017)
- (5) 藤田敏博, 金子裕良, 阿部 茂, 「直列および並列共振コンデンサを用いた非接触給電システム」, 電学論 D, Vol.127 No.2 pp.174-180 (2007)
- (6) 遠井敬大, 金子裕良, 阿部 茂, 「非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現」, 電学論 D, Vol.132 No.1 pp.123-124(2011)