

海中内小型移動体向けkW級，高効率，位置自由度の高い無線電力伝送技術

Highly Efficient kW Class Wireless Power Transfer Technology with High Positional Freedom for Small Underwater Mobile Units

榎 場 亮 祐
Ryosuke Hasaba

八 木 達 雄
Tatsuo Yagi

山 口 修 一 郎
Shuichiro Yamaguchi

江 口 和 弘
Kazuhiro Eguchi

小 柳 芳 雄
Yoshio Koyanagi

要 旨

海中内小型移動体として，海中を自由に動くことのできる自律型無人潜水ロボット（Autonomous Underwater Vehicle：AUV）があげられる．これらは海洋資源の探査や海洋生物の調査，インフラ施設の監視などに利用されている．今後，海洋産業の発展に伴い，利用範囲がさらに広がると考えられる．海中内小型移動体を効率的に活用するため，海から引き上げることなく，海中で電力供給できるシステムが望まれる．著者らは，海中において磁界結合型の給電位置の自由度が高い無線電力伝送技術の研究を行い，送電電力1 kW，最大電力伝送効率87.5%で位置自由度の高い無線電力伝送を達成できた．

Abstract

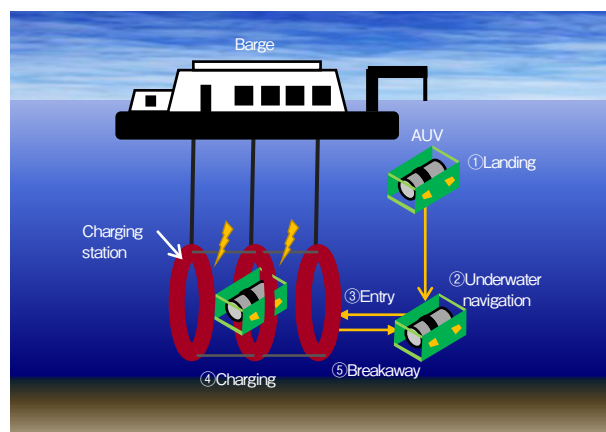
Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) that can move freely under water are used to explore marine resources, investigate marine organisms, and monitor infrastructure facilities. Their range of use is expected to expand further as the marine industry continues to develop. Therefore, a system that can supply power underwater without pulling them up from the sea is desired to utilize AUVs efficiently. We have transferred 1kW of wireless power in the sea with high positional freedom and power transfer efficiency of 87.5%.

1. はじめに

日本近海には豊富なエネルギー・鉱物資源が存在している．海中内小型移動体として，海中を自由に動くことのできる自律型無人潜水ロボット（Autonomous Underwater Vehicle：AUV）は，海洋資源の探査や海洋生物の調査，インフラ施設の監視などに利用されている．今後，海洋産業の発展に伴い，利用範囲がさらに広がると考えられる．しかし，AUVは電池駆動であるため，活動時間に制約がある．さらに充電または電池交換のたびに海上に上げる必要があるため作業効率が悪い．AUVを効率的に活用するため，海から引き上げることなく，海中で無線電力伝送できるシステムが望まれる（第1図）．

水中・海中における無線電力伝送の先行研究には，19.9 MHz を用い，送受アンテナ間距離300 mmで伝送効率60%以上[1]，1 MHzを用いて距離50 mm，効率40%[2]，35.4 kHzを用いて距離5 mm，効率92%[3]のようなものがある．また，送受電アンテナ間に誘電体が存在する場合の無線電力伝送の研究も行われている[4]．いずれも高い伝送効率を確保するために送受電アンテナ間を近接させる必要がある．近接ではなく，伝送距離を拡大させる方式として，送受電アンテナ間に無給電素子を複数使用したドミノ方式がある[5][6]．しかしながら，海中内で海中内小型移動体へ無線電力伝送する場合，海流等の影響で送受電アンテナ相互の位

置合わせが難しいこと，移動体が容量の大きなバッテリーを積載していること，および電力損失を低減することを考えると，送受電アンテナの位置自由度が高く，kW級の高い電力を送る高効率の電力伝送システムが求められている．



第1図 AUVへの無線電力伝送例

Fig. 1 Example of wireless power transfer to an AUV

筆者らは，海中で磁界結合型の給電位置の自由度が高い無線電力伝送技術の研究を行っている．複数コイルを海中に配置することで給電可能なエリアを拡大し，長距離化を実現している[8]-[10]．海中内小型移動体への高電力の無線

電力伝送を行うため、磁性体を用いて80%を超える高い伝送効率を実現している[11][12]。本稿では、海中内小型移動体への電力供給のための、高効率、高電力、位置自由度の高い無線電力伝送システムについて述べる。

2. 海中電力伝送の課題と目標値

2.1 課題

海中内で無線電力伝送を行う際に、以下の点が課題に挙げられる。

- ① 媒質が海水であり、高い周波数の損失が大きい
- ② 海流により電力伝送の位置ずれが生じる
- ③ 小型移動体の電力レベルと金属影響によるコイル特性劣化

①について、通常の無線電力伝送であれば媒質は空気であるため、ほとんど損失はなく電磁波が伝わっていくが、海中電力伝送は主に伝わる媒質が導電性をもつ海水であるため大きな損失が発生する。媒質が導電率 σ をもつ場合、電磁波の減衰定数 α [Np/m] (注1) は

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right]} \quad \dots (1)$$

となる[13][14]。ここで、角周波数 $\omega = 2\pi f$ 、 f は周波数、 μ は透磁率、 ϵ は誘電率である。海水の電気定数は比透磁率を1、比誘電率を78、導電率を5.0 S/mとして、海水中で基準点からある距離の電磁波の減衰量を計算した。

周波数は1 kHz、100 kHz、10 MHzと設定し、単位メートルあたりの減衰量をみると、それぞれ1.2 dB、12.2 dB、122 dBとなり、周波数が高いと減衰が大きい。海水中では、1 kHzなど低い周波数を用いることが有効であることがわかる。

②について、海中内は海流などの影響で、電力伝送の位置合わせが難しいため、ある程度位置自由度の高い給電システムが求められる。

③について、小型移動体はスラスタ、カメラ、制御機器を有しており、長時間航行するために、容量の大きなバッテリーを積載している。そのためkW級での無線電力伝送が必要とされる。また、制御機器は耐圧容器に入っており、容器の大部分は金属でできているため、その部分にコイルを巻くと渦電流が発生し、コイル特性が大きく劣化するため、伝送効率が著しく低下する。

2.2 目標値

前節の課題を踏まえて、小型移動体向け海中電力伝送の

目標値を下記のように設定した。

- (a) kW級送電：送電コイルの印加電力1 kW以上
- (b) 高効率：コイル間効率80%以上
- (c) 位置自由度が高い：中心位置から30 cm×50 cm以内のエリアで無線電力伝送できること

3. 伝送コイルの設計手法

磁界結合型の無線電力伝送において、伝送コイルの設計は、電力伝送効率を決定づけるため、最も重要な部分である。ここで、設計の見通しを良くするために、はじめにコイル間(送電コイル、受電コイル)の最大効率の導出方法を述べ、その次に入出力の整合を考慮した2段コイルの設計手法について紹介する。

3.1 コイル間の最大効率

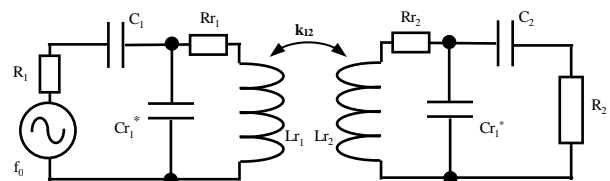
送電コイル、受電コイルが1対1の2段構成かつ入出力で完全に整合が取れている場合、磁界結合型電力伝送効率 η_{max} は、kQ積により以下の式で計算できる[15]。

$$\eta_{max} = 1 - \frac{2}{1 + \sqrt{1 + k_{12} Q_1 Q_2}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 k_{12} は結合係数、送電および受電コイルのインダクタンスと抵抗値をそれぞれ L_1 、 L_2 、 r_1 、 r_2 とした場合、 $Q_1 = \omega L_1 / r_1$ 、 $Q_2 = \omega L_2 / r_2$ である。(2)式から、 k_{12} 、 Q_1 、 Q_2 を大きくすることが効率を上げるために必要であることがわかる。無線電力伝送の位置自由度を高くしようとすると、コイル間距離が離れていくため、 k_{12} は低くなるが、コイルの Q_1 、 Q_2 をより高くすることで、高効率な無線電力伝送が可能となる。

3.2 2段コイルの設計手法

コイルには共振用のキャパシタ、電源回路、負荷抵抗などが接続されるため、単純に接続しただけでは前述の最大効率で電力伝送することができない。そのためコイル前段、後段のインピーダンスを考慮し、最大伝送効率となる周波数において十分な整合を取りながらシステム設計を行う必要がある。第2図に、海中に沈めた2段コイルによる等価回路を示す。



第2図 2段コイルの等価回路

Fig. 2 Two-stage coil circuit equivalent

(注1) Np (ネーパ) は対数スケールの単位であり、自然対数を底としたものである。

ここで R_1, R_2 は入力および出力インピーダンス, C_1, C_2 は整合用コンデンサ, Cr_1^*, Cr_2^* は共振用コンデンサである[16].

入出力のインピーダンス R_1, R_2 と伝送周波数を設定し,

(3) 式～(6) 式から, 整合用, 共振用のコンデンサの定数を決定させる. ここで $i=1, 2$ である.

$$Cr_i = \frac{1}{\omega_0^2 Lr_i} \dots \dots \dots (3)$$

$$Rr_i = \frac{\omega_0 Lr_i}{Qr_i} \dots \dots \dots (4)$$

$$C_i = \frac{1}{\omega_0 R_i \sqrt{\frac{\omega_0 Lr_i}{k_{12} R_i} - 1}} \dots \dots \dots (5)$$

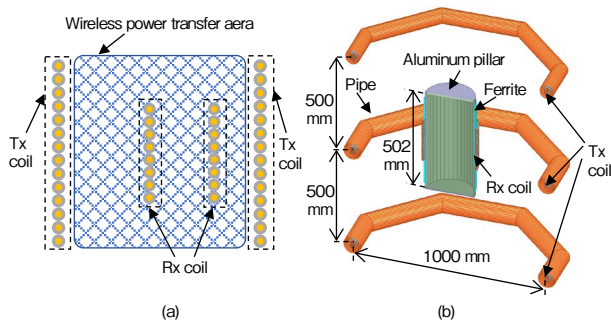
$$Cr_i^* = Cr_i - C_i \left(1 - \frac{kR_i}{\omega_0 Lr_i}\right) \dots \dots (6)$$

伝送効率 η [%]はコイルのインダクタンス L, Q , 結合係数 k , コンデンサの容量 C から, 高周波回路シミュレータよりSパラメータを計算し, (7) 式より求める.

$$\eta = |S_{21}|^2 \times 100 \dots \dots \dots (7)$$

4. 伝送システムと評価方法

ヘリカルコイル内部ではコイル間の結合係数は大きく変化せず一定であるため, (2) 式からコイルのQ値が高ければ, 高効率で位置自由度の高い無線電力伝送が可能である. 第3図 (a) はヘリカル状の送電コイル, 受電コイルの断面図である. ここでは, 筆者らが考案した, 送電コイル内部であればどこでも受電コイルに給電できる無線電力伝送システムと, その評価方法について述べる.



第3図 (a) ヘリカル状の送受電コイルの断面図
(b) 送受電コイル, AUV耐圧容器の断面図

Fig. 3 (a) Cross-sectional view of helical power transfer/receiving coil
(b) Cross-sectional view of coils and AUV pressure resistant container

4.1 3連送電コイルおよびフェライト装荷受電コイル

AUVに対する, 高い給電位置自由度と高効率伝送を実現するため, 送電コイルを3つ配置しコイル内のどの場所でも安定した無線電力伝送ができるシステムを検討する[11].

第3図 (b) は検討した送受電コイル, AUV耐圧容器の断面図である. 送電コイルは直径1mで0.5mの間隔で3つ配置している. コイルはポリエチレンパイプ内に導体径8.4mm, 外形11mmの電線を10巻きしている. 3つの送電コイルへの接続は並列あるいは直列が考えられるが, シミュレーションの検討結果より直列給電の方がQを高くできるため, 本システムでは直列接続を採用した. また, 送電コイルを分割できることにより, 海流の影響低減や実験時の運搬性が良くなっている. 受電コイルはAUV本体を想定した直径250mm, 長さ502mmのアルミ製耐圧容器に5mm厚のフェライト板を貼り付け, 導体径8.4mm, 外形11mmの電線を20巻きしている. アルミ容器とコイル間にフェライトを入れることで磁気シールドを行い, 渦電流損によるコイルのQ, 結合係数 k の低下を防ぎ, 効率を大幅に上げることができる.

4.2 シミュレーション方法

無線電力伝送システムが大型であり, 実験場所も限定されるため, 事前にシミュレーションできることは非常に重要である. シミュレーションでは, 第4図のモデルに対して, 有限要素法を用いて, コイルのインダクタンス, 抵抗, 結合係数 k を0.1kHz~10kHzの範囲で計算した. 解析空間は数メートルの大規模かつ導電率をもつ海水であること, コイルは実際には複雑な構造であること, の2つの理由から計算リソースを大きく消費し, 計算時間も長くなってしまった. そのため, 解析空間は送電コイルの直径の3倍程度とし, コイルは単線でモデリングを行った. 第1表はシミュレーションで用いた材料特性であり, これらの定数を用いて計算した.

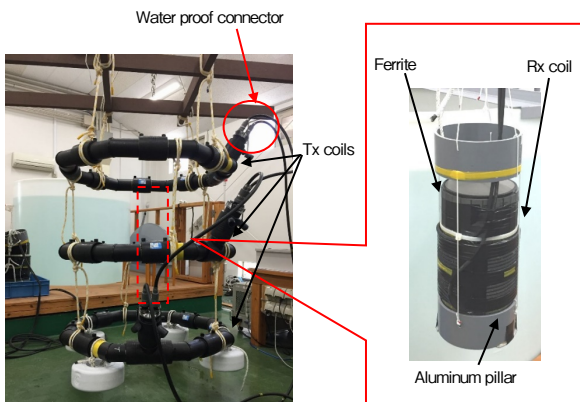
第1表 計算時に使用した材料定数

Table 1 Material property for calculation

	Conductivity [S/m]	Relative permittivity	Relative permeability	Dielectric loss coefficient	Magnetic loss coefficient
Air	-	1.0	1.0	-	-
Copper	5.8×10^7	1.0	1.0	-	-
Aluminum	3.8×10^7	1.0	1.0	-	-
Polyethylene	-	2.25	1.0	0.001	-
Rubber	1.0×10^{15}	3.0	1.0	-	-
Ferrite	0.25	1.0	3400	-	0.015
Seawater	6.39	78	1.0	-	-

4.3 コイルの試作と評価方法

実験ではコイルを塩水に完全に沈めるため、防水構造が重要である。第4図は試作したコイルの外観であり、3つの送電コイルを500 mm間隔で直列に繋いだものである。送電コイルは防水コネクタを介して電線で測定機器に接続している。受電コイルはアルミ製の中空円柱耐圧容器にフェライトシートをはり付け、フェライト上にコイルを20巻きしている。



第4図 実験用コイルと耐圧容器
Fig. 4 Experimental coils and pressure resistant container

[1] コイル特性の測定方法

海中にコイルを沈めた場合のコイルのインダクタンス L 、結合係数 k は、Vector Network Analyzer (VNA) を用いてSパラメータを測定し、Zパラメータに変換して求める。コイルの抵抗は数十 m Ω レベルと非常に小さいため、ゲインフェーズテストポートの付いたVNAによりGain Phase Shunt Thru (GPST)法を用いて測定する[17]。

[2] 電力測定方法

VNAでは伝送電力がmWレベルで小さい。kWレベルの高い電力が送れることを確認するため、ファンクション・ジェネレータ (FG)、パワーアンプ (AMP)、整合回路、整流回路、電子負荷を接続し、各接点にパワーアナライザを用いて測定した。

これらの検討、測定方法をとおして、2章の目標であるkW級の電力伝送、高効率、位置自由度の高い無線電力伝送の評価を行う。

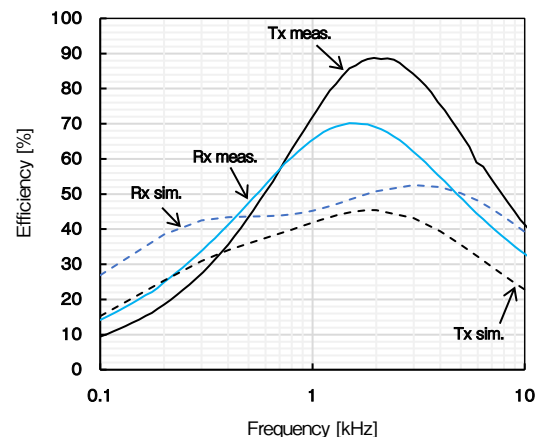
5. 無線電力伝送特性

5.1 コイル特性

海中でのコイルの特性を評価するため、直径1.6 m、高さ1.8 mの水槽に塩水を入れて、送受電コイルを完全に沈めて測定した。一般的な海水の塩分濃度は約3.5%だが、導電率

は水温により必ずしも一定ではない[18]。実環境より厳しい条件とし、塩分濃度を4.7%、導電率6.39 S/mとして実験を行った。実験値は、0.1 kHz~10 kHzの範囲で送電コイルのインダクタンス L_1 は約900 μ H、受電コイル L_2 は、約400 μ Hあるが、 L_1 の計算値は実験値に対し約12%低くなった。実験用に作製したコイル電線がパイプ内で密巻になり、シミュレーションモデルとの差が生じているためと考えられる。受電コイルは実験値に比べ、計算値が5%低い値であった。

第5図はコイルのQ値の実験値と計算値の周波数特性である。2 kHzにおける送電コイルのQ値は、実験値に対し、計算値は約半分となり、受電コイルも計算値は実験値よりも35%低い値となった。電線間の近接効果で実験値のコイル抵抗値が低くなったためと考えられる。実験値と計算値で傾向は大体合っているが、今後、モデル詳細化やモデル化が不可能部分については近似モデルなどを導入しさらなる検討が必要である。なお、受電コイルが送電コイル中央にあるときのコイル間の結合係数 k_{12} は、測定周波数範囲ではほぼ一定となり、約0.24、計算値では約0.22となった。



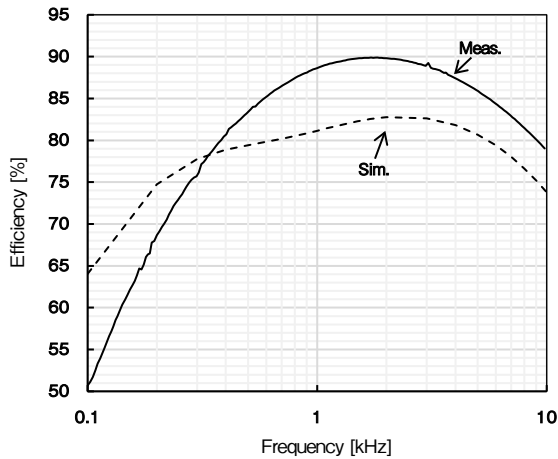
第5図 送受電コイルQ値の実験値、計算値の比較
Fig. 5 Comparison of experimental and calculated power transfer / receiving coil Q values

5.2 電力伝送効率

第6図はコイル間の最大伝送効率である。最大伝送効率 η_{\max} を(1)式より計算する。結合係数は実験値では0.24、計算値では0.22を用いる。2 kHzのときに効率は最大となり、 η_{\max} は実験値において89.8%、シミュレーションでは82.8%となった。

次に2段コイルの無線電力伝送システムの最適化を行う。伝送効率が最大となる2 kHzにおける各コイルの測定値は、 $L_{r1}=954 \mu$ H、 $Q_{r1}=83$ 、 $L_{r2}=414 \mu$ H、 $Q_{r2}=71$ 、 $k_{12}=0.24$ である。この値から、入出力インピーダンス $R_1=R_2=10 \Omega$ として(3)式~(6)式を用いて計算した。その結果、 $C_1=4.0 \mu$ F、 $C_{r1}^*=3.5 \mu$ F、 $C_2=7.4 \mu$ F、 $C_{r2}^*=11.3 \mu$ F、 $R_{r1}=144 m\Omega$ 、

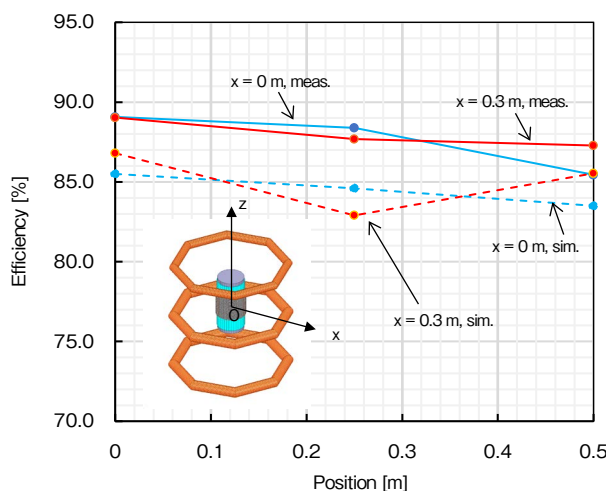
$R_{12} = 73 \text{ m}\Omega$ となる。これらの値から S_{21} を求め、(7)式で伝送効率を求めると、89.2%であり、kQ積から求めた伝送効率89.8%とよく一致した。



第6図 電力伝送効率の比較
Fig. 6 Comparison of power transfer efficiency

5.3 kW 級電力伝送と位置自由度の評価

kW級かつ位置自由度の高い無線電力伝送が行えることを確認するため、受電コイルを送電コイル内部で動かし伝送効率の測定を行った。1 kWの電力を送電コイルに印加する。第7図は受電コイル位置を変更させたときの伝送効率である。送電周波数は2 kHzとした。送電コイルの中央を原点 $(x, z) = (0, 0)$ とし、受電コイルを移動させた。x, zの取り得る範囲は $-0.3 \text{ m} \leq x \leq 0.3 \text{ m}$, $-0.5 \text{ m} \leq z \leq 0.5 \text{ m}$ となる。 $(x, z) = (0.3 \text{ m}, 0 \text{ m})$ のときに最大効率87.5%, $(x, z) = (0 \text{ m}, 0.5 \text{ m})$ のときに最小効率85.9%であった。



第7図 受電コイル位置変更時の効率
Fig. 7 Efficiency when changing the position of the power receiving coil

受電コイルの位置を送電コイル内で変更しても、伝送効率が大きくかわらないところから、本システムは位置自由度の高い無線電力伝送方式であるといえる。

6. まとめ

本稿では、海中において、海中内小型移動体への磁界結合型の無線電力伝送技術を紹介した。海中では海水の導電性、海流、水中移動体の金属影響で無線電力伝送は困難であったが、本提案システムを用いることで、1 kWの送電、中心位置から30 cm以内の無線電力伝送かつ最大電力伝送効率87.5%の無線電力伝送を可能とし、それぞれ目標値を達成できた。

送電コイルの直径が1 mであったが、海中移動体が大きくなるとコイルもそれに伴い大型化される。無線電力伝送システムの大型化、さらなる高効率化、大電力化や充電時の制御方法が今後の課題であり、継続した技術開発が必要である。

本研究の一部は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 (JPJ004596) の支援を受けたものである。

参考文献

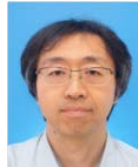
- [1] 堀田昌志 他, “共鳴型無線給電システムへの水や誘電体への影響,” 産業応用工学会論文誌, vol. 2, no. 2, pp. 23-31, Sep. 2014.
- [2] S. Yoshida et al., “A compact 35-watt high-efficiency wireless power transmission system under seawater environment,” European Microwave Conference, pp. 904-907, 2013.
- [3] J. Zhou et al., “Design considerations for a self-latching coupling structure of inductive power transfer for autonomous underwater vehicle,” in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 1, pp. 580-587, Jan.-Feb. 2021.
- [4] 粟井郁雄 他, “水中のワイヤレス給電に関わる幾つかの新しい現象,” 電子情報通信学会論文誌B, vol. J96-B, no. 11, pp. 1284-1293, Nov. 2013.
- [5] W. X. Zhong et al., “Wireless power domino-resonator systems with noncoaxial axes and circular structures,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4750-4762, Nov. 2012.
- [6] C. K. Lee et al., “Effects of magnetic coupling of nonadjacent resonators on wireless power domino-resonator systems,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 4, pp. 1905-1916, Apr. 2012.
- [7] R. Hasaba et al., “Experimental study on over 10 meters magnetic resonance wireless power transfer under sea with coils,” Proc. IEEE Wireless Power Transf. Conf. (WPTC2018), pp. 1-4, Jun. 2018.
- [8] 江口和弘 他, “磁界結合によるポジションフリー海中ワイヤレス電力伝送システムの実験検討,” 電子情報通信学会論文誌B, vol. J101-B, no. 11, pp. 958-967, Nov. 2018.

- [9] R. Hasaba, et al., "Magnetic resonance wireless power transfer over 10 m with multiple coils immersed in seawater," IEEE Trans. on MTT, vol. 67, no. 11, pp. 4505-4513, Nov. 2019.
- [10] 柳場亮祐 他, "小型AUV向け位置自由度と伝送効率の高い海水内無線電力伝送と海中内損失の一検討," 日本AEM学会誌, vol. 28, no. 4, Dec. 2020.
- [11] R. Hasaba, et al., "A highly efficient and high degree of freedom of position kW-class wireless power transfer system in seawater for small AUVs," 2021 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC2021), Jun. 2021.
- [12] 藤井直道 他, "海中無線通信用アンテナと伝搬モデルに関する研究," 信学技報, pp. 23-28, AP2018-5, Apr. 2018.
- [13] 虫明康人 他, "基礎電波工学," 共立出版, 1970.
- [14] 安達三郎, "電磁波工学," 電子情報通信学会 (編), コロナ社, 1983.
- [15] T. Ohira, "Angular expression of maximum power transfer efficiency in reciprocal two-port systems," IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC2014), pp. 228-230, May. 2014.
- [16] G. Matthaei et al., "Microwave filters impedance-matching networks and coupling structures," Norwood, MA, USA Artech house, 1980.
- [17] "E5061B network analyzer PDF help," <https://www.keysight.com/jp/ja/lib/resources/help-files/help-file--user-manual-for-e5061b-network-analyzer-operation-and-programming-1814709.html>, 参照 May 10, 2022.
- [18] 朝海敏明, "電気伝導率標準液に関する研究," 産総研計量標準報告, vol. 9, no. 1, pp. 135-153, Mar. 2014.

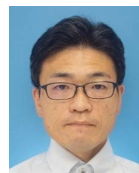
執筆者紹介



柳場 亮祐 Ryosuke Hasaba
パナソニック インダストリー (株)
技術本部
Engineering Div., Panasonic Industry Co., Ltd.



八木 達雄 Tatsuo Yagi
(株) パナソニック システムネットワークス開
発研究所
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.



山口 修一郎 Shuichiro Yamaguchi
(株) パナソニック システムネットワークス開
発研究所
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.



江口 和弘 Kazuhiro Eguchi
パナソニック コネクト (株)
技術研究開発本部
R&D Div., Panasonic Connect Co., Ltd.
博士 (工学)



小柳 芳雄 Yoshio Koyanagi
(株) パナソニック システムネットワークス開
発研究所
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd.
博士 (工学)