

令和 5 年 10 月 11 日現在

機関番号：53203

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04432

研究課題名（和文）海中ワイヤレス給電のロバスト性向上のための制御技術

研究課題名（英文）Control technology for improving robustness in underwater wireless power transfer

研究代表者

古川 裕人（Furukawa, Hiroto）

富山高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：30238670

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：海中環境下でのワイヤレス給電（WPT）を実現するため、コイルの位置変動に対する高いロバスト性、および海水での低い電力損失を両立させたWPTシステムの構築を行った。低周波帯においてパリティ・時間反転（PT）対称性を保存させることが開発の方針である。

はじめに、PT対称性の臨界結合レートを共振回路の回路定数により表現し、低周波においてPT対称性を保存させるための回路定数の条件を見出した。続いて、電磁界シミュレータにより高いロバスト性をもつコイルの最適な設計を行った。最終的に試作したWPTシステムを用いてコイル位置ずれの許容範囲、海水での電力損失とともに、当初の目標性能を達成したことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海中環境下でのワイヤレス給電は、自律型無人潜水機の自動充電につながる技術であり、海洋資源調査などに貢献することができる。本研究課題を学術的な観点からみると、パリティ・時間反転（PT）対称性を利用したワイヤレス給電システムを低周波領域で実現させる課題であると言える。本研究では結合モード理論解析から低周波領域でPT対称性を保存させるための回路定数の条件を見出した。また、実機を作製し実験からもそれらの条件が正しいことを確認した。本研究成果は、海中に限らず、伝送空間に損失媒体がある場合のワイヤレス給電にとって有用な知見である。

研究成果の概要（英文）：We have developed a wireless power transfer (WPT) system that achieves both high robustness against coil position variations in underwater environments and low power loss in seawater. Our approach for development focuses on preserving parity-time (PT) symmetry in the low-frequency range.

Firstly, we expressed the critical coupling rate of PT symmetry in terms of circuit parameters for the resonant circuit and identified the conditions for preserving PT symmetry at low frequencies. Next, we conducted optimal coil design using electromagnetic field simulators to achieve high robustness. We ultimately succeeded in creating a prototype that satisfied our initial performance goals regarding robustness and power loss in seawater.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：ワイヤレス給電 非エルミート系 PT対称性 海中

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海洋探査に用いられる自律型無人潜水機 (AUV) に効率的かつ自動充電が可能な方法として、海中環境下における磁界共鳴方式のワイヤレス給電 (WPT) 装置に関する研究が注目されている。また、AUV に限らず、導電率の高い海水中での有線による給電は、漏電や感電の危険性もあるため WPT による無線給電が望ましい。海中環境下での WPT を困難にさせている要因として以下の2つの事柄が挙げられる。1つ目には、給電対象の位置の変動が挙げられる。給電対象は自然の流れの中で浮遊している状況であるから、波や潮の影響により、ひとところに留めておくことが難しい。2つ目には、海水の高い導電率による損失が挙げられる。海水の導電率は2~5 S/mと比較的高く、磁界共鳴方式では数百キロヘルツから数メガヘルツの高周波が使われるため、海水で発生する渦電流損失が深刻となる。勿論、低周波帯を用いれば海水での損失は軽減できるが、一方でコイルの品質ファクターQ値が低下してしまう。Q値が低下すると、電力伝送可能な距離は短くなってしまうため、1つ目の課題として挙げた位置変動の問題を解決することが困難になってしまう。この相反する2つの課題を同時に解決する方法が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、海中環境下において高いロバスト性を有する WPT システムの開発である。前述したようにコイルの位置変動 (伝送距離の変化や位置ずれ) に対するロバスト性を解決するために非エルミート系においてパリティ・時間反転 (PT) 対称性が保存した際に発現する新奇現象を利用する。

新奇現象とは、スタンフォード大学の研究グループが明らかにしているように、PT が保存されれば、伝送距離に対して伝送電力と伝送効率が非依存になる[1]。これは、結合モード理論における結合レート ( $\Gamma$ ) に対して伝送電力と伝送効率が非依存なるためである。 $\Gamma$  は、給電側共振器と受電側共振器のエネルギー相互作用の強さを表すパラメータであるから、伝送距離に限らず、コイルの位置ずれに対しても有効に作用すると期待できる。本研究では結合モード理論に基づく理論解析により、コイル位置ずれに対する許容範囲を広げるための条件を見出す。続いて、実機を作製し、実験と理論の両面からその効果を確認する。位置ずれの許容範囲としては、距離、上下、左右方向ともに0~50cmを目標値とした。

次に、海水での損失低減については、PT 対称性を低周波で保存させることで実現させる。スタンフォード大学の先行研究では2 MHz 帯の高周波が用いられた。高周波はコイルのQ値を高めることができ、PT 対称性を長距離に渡って保存させることができるが、海水中となれば2 MHz の高周波では損失が深刻となってしまう。仮に、50kHz 以下の周波数を使えば、海水における損失は全体での損失のわずか1%以下になると予測される。よって、50kHz 以下の低周波を用いて PT 対称性を長距離に渡って保存させる方法を見出すことが2つ目の目的である。

### 3. 研究の方法

PT 対称性 WPT は磁界共鳴方式から派生したものであるから、その理論解析には結合モード理論を用いた。図1に結合モード理論に基づく PT 対称性 WPT のモデルを示す。系へのエネルギーの流入と流出をゲインレート  $g_{10}$  とロスレート  $\Gamma_{10}$  により表し、給電側および受電側共振器でのエネルギーの損失を固有ロスレート  $\Gamma_{10}$ 、 $\Gamma_{20}$  により表した。また、共振器間のエネルギーの相互作用は、結合レート  $K$  により表現している。この CMT モデルは波動のエネルギー伝搬を扱っており、電場と磁場、電流と電圧といった区別がない抽象的なモデルである。そこで、本研究では実際の電気回路を CMT モデルにより再表現し、コイルのインダクタンスやコンデンサのキャパシタンスといった回路定数を用いて PT 対称性が保存される条件を見出した。

長い伝送距離、および大きな位置ずれに対して PT 対称性を保存させるためには、コイルの最適な設計が不可欠である。コイル間の磁気結合係数  $k_m$  から  $K$  を計算することができるため、 $k_m$  を高精度で数値計算できれば  $K$  の推定精度も向上する。そこで、自作の電磁界シミュレータを用い  $k_m$  値を数値計算し、コイルの形状と  $k_m$  値の関係を調べることで最適なコイル形状を見出した。

上記の理論的な研究に基づき、実機の作製を行った。コイルサイズと伝送距離は相対的な関係にあることが明らかになっていることから[2]、卓上で実験できる 1/10 縮尺の実機を作製した。PT 対称性が保存できる限界の距離 (臨界距離) の測定を伝送距離および位置ずれに対して実施し、目標性能の達成を確認した。

海水中での動作を想定し、コイルを水槽へ沈め試験液中での実験を行った。試験液は、純水に食塩を溶かし、導電率計により試験液の導電率をモニタしながら、0~14 S/m の範囲で伝送効率の計測を行った。最終的に海水の導電率2~5 S/mにおいて、海水での損失が1%以下であることを確認する。

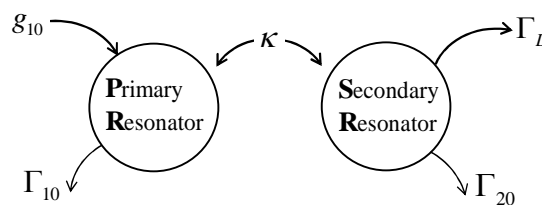


図1 PT 対称性 WPT の結合モード理論モデル

#### 4. 研究成果

磁界共鳴方式の共振回路の構成として典型的な S-S トポロジー (図 2(a)) と S-P トポロジー (図 2(b)) について結合モード理論の適応を行った。ここで、パルス電圧を発生する交流電源は、自励発振式のインバータであり、スイッチングモードアンプと呼ばれる。図中の  $V_{in}$  はパルス電圧の振幅を指す。また、 $r_1$  および  $r_2$  は給電側および受電側共振回路に含まれる抵抗成分を表している。 $r_1$  と  $r_2$  の主な起源は、コイルの交流巻線抵抗とコンデンサの等価直列抵抗の和である。給電側および受電側共振回路の  $Q$  値を、それぞれ  $Q_1$ 、 $Q_2$  と表現したとき、 $Q_1$  は  $\omega_0 L_1 / r_1$ 、 $Q_2$  は  $\omega_0 L_2 / r_2$  と表すことができる。ここで、 $\omega_0$  は給電側および受電側共振回路における固有の共振周波数であり  $\omega_0^2 = 1 / C_1 L_1 = 1 / C_2 L_2$  と表すことができる。

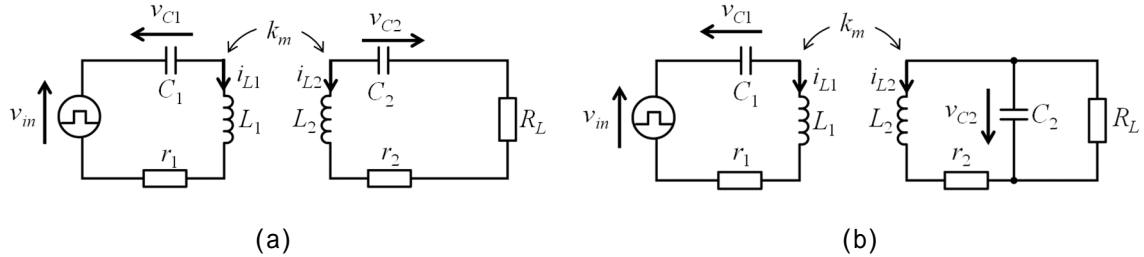


図 2 磁界共鳴方式の共振回路 (a) S-S トポロジー、(b) S-P トポロジー

結合モード理論解析の過程については、文献[3]として公開した通りである。紙面の制約上、本稿で解析結果のみを示す。PT 対称性が保存される限界の結合レートを臨界結合レート ( $\gamma_c$ ) としたとき、 $\gamma_c$  は磁気結合係数の限界値つまり臨界磁気結合係数 ( $k_{mc}$ ) へ変換することができる。さらに、 $k_{mc}$  は回路定数を使って定式化することができ、S-S トポロジーは(1)式、S-P トポロジーは(2)式で表現することができる。

$$k_{mc} = \frac{1}{Q_2} + \frac{R_L}{Z_0} \quad (1)$$

$$k_{mc} = \frac{1}{Q_2} + \frac{Z_0}{R_L} \quad (2)$$

ここで、 $Z_0$  は  $(L_2 / C_2)^{1/2}$  であり、各共振回路の特性インピーダンスと言える。これらの式より、PT 対称性の臨界点は、受電側共振回路の特性と負荷抵抗値 ( $R_L$ ) によって決定され、給電側共振回路の特性は無関係であることがわかった。また、共振回路の  $Q$  値は、低周波においても比較的容易に数百を超える性能を得ることができる。よって、PT 対称性の臨界点を決める支配的な項は第 2 項である。更に、第 2 項は、S-S トポロジーと S-P トポロジーで分子と分母が逆になっており、S-S トポロジーでは小さな  $R_L$  と大きな特性インピーダンス、S-P トポロジーでは大きな  $R_L$  と小さな特性インピーダンスを持つようにシステムを設計すればよいことがわかった。

図 3 に示すような小型のソレノイドコイルを設計した。卓上で実験を行えるように、実際に想定した 1/10 縮尺のコイルを作製した。給電コイル (Tx) および受電コイル (Rx) の諸元値を表 1 に示す。PT 対称性を長距離に渡って保存させるためには、 $k_m$  をできる限り大きな値に保つことが望ましい。そのため、有限差分時間領域法 (FDTD 法) を使った電磁界シミュレータを自作し、FDTD シミュレータにより広い自由空間に広がる磁場を解析し  $k_m$  を高精度で予測することで形状や寸法の最適化を行った。図 4 にコイル周囲の磁場の強度分布を数値計算した一例を示す。最適化の一例を挙げると、コイルの全長 ( $L$ ) と巻線部の長さ ( $x$ ) には、最適な比率 ( $x/L$ ) があつた。その理由は、 $x$  が長くなると磁極間が長くなるため漏れ磁束は抑えられる方向に向かうが、その一方で磁極の面積は小さくなるため、磁気抵抗が増大し、漏れ磁束が増加する方向へも向かう。その結果、 $x/L$  には最適な比が存在すると考えられる。シミュレーションにより最適値が  $x/L = 0.6 \sim 0.7$  であるとわかった。

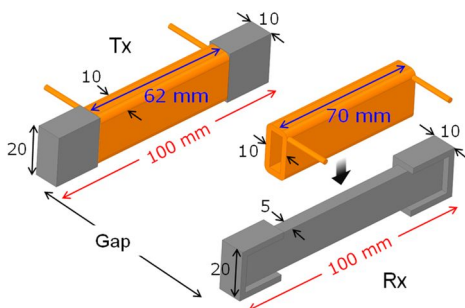


図 3 試作したソレノイドコイル

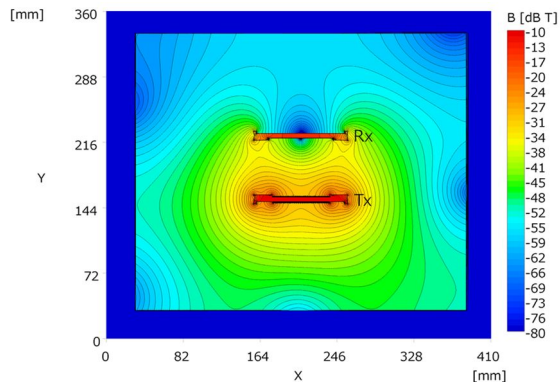


図 4 磁場の強度分布のシミュレーション結果

図5に製作したWPTシステムの構成を示す。交流電源としてのスイッチングモードアンプにはD級インバータを用い、Txコイルに流れる正弦波電流のゼロクロスを検出し、正帰還フィードバックすることでスイッチングモードアンプを自励発振させた。共振回路にはS-Pのトポロジーを用いた。受電回路側では、共振器の後段に整流回路を接続し、続いて出力電圧を直流13~14Vに固定するためDC-DCコンバータを接続した。負荷としては、AUVへの応用を想定して、二次電池を経由し、スクリューを回転させるためのDCブラシレスモーター（三相、13V、20W）とした。ただし、二次電池を介してモーターへ電力供給させた場合、二次電池によって出力電力が安定化され、瞬時の出力電力を正しく評価することが出来なかったため、二次電池を外した状態での実験を行った。また、実験では負荷と等価な抵抗値に設定した電子負荷をモーターのダミーとして用いたが、同時に実際のモーターでも同等な電力伝送特性が得られること確認しながら実験を進めた。

製作したWPTシステムの自励発振の周波数帯は設計値47~55kHzであり、 $k_m$ は設計値で0.04であった。このことから、50kHz帯においても、共振器間の結合がわずか4%においてもPT対称性が保存できるシステム設計が可能であることがわかった。また、 $k_m=0.04$ を臨界距離に変換すると75mm（縮尺1/10で作製したため、実寸では75cm）に相当することが電磁界シミュレーションから予測された。また、位置ずれに関しても上下、左右方向ともに±50cmを超える予測になった。以上のように、研究当初の目標性能を超えるシステムの設計に成功した。スタンフォード大学の先行研究では、直径58cm、軸方向長さ約10cmのヘリカルコイルが使われ、65cmの臨界距離が報告されており、本システムの臨界距離も（相対距離として）遜色ない結果となった。

表1. 作製したソレノイドコイルの諸元

	Tx	Rx
巻数	36	23
自己インダクタンス(μH)	114.1	46.2
コイルQ値 at 50kHz	659	634
長さ×高さ×厚み (mm)	100×20×10	100×20×10
重量(g)	79	77

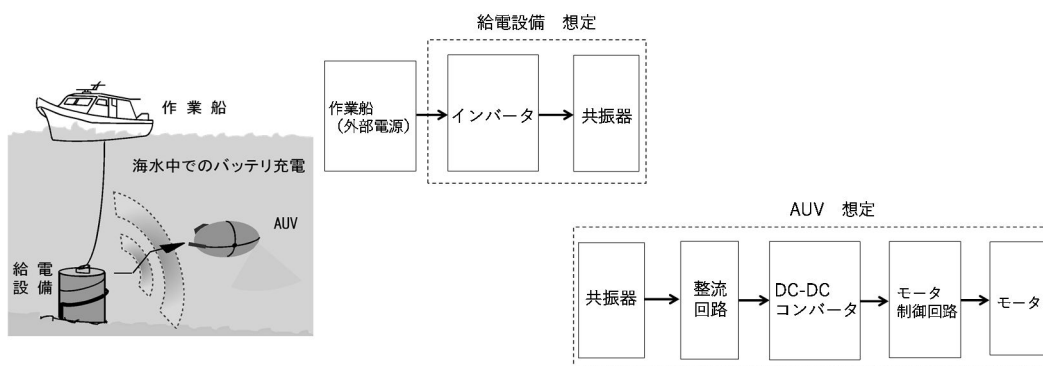


図5 作製したPT対称性をもつWPTシステム

図6に伝送距離と伝送電力の関係（実験結果）を示す。なお、PT対称性の効果を比較するため、同システムのPT対称性を非保存の状態にした場合の測定も行った。非保存は、スイッチングモードアンプのフィードバック線路を切断し、オープンループとし、スイッチング周波数を51kHzに固定することで作り出した。図中の赤丸はPT対称性保存の場合、青丸は非保存の場合の結果である。PT対称性が保存されると、伝送距離に対する伝送電力の変動は小さく、10~77mmの範囲において $18.5 \pm 1W$ で安定させることができた。また、実験結果から臨界距離が77mmであることが明確に確認することができた。この結果は、設計値75mmと良く一致しており、臨界距離を設計可能であることが確認できた。一方、非保存の場合では、ある特定の距離において共振器間が共鳴し、大きな電力が伝送されてしまうため、鋭いピークをもつ特性となった。両者の比較からPT対称性の効果を確認した。

PT対称性のもう一つの利点としては、伝送距離に電力伝送効率が依存しないことが挙げられる。このことは長距離の電力伝送の際に大きなメリットとなる。図7に伝送距離と電力伝送効率の関係（実験結果）を示す。臨界距離77mmまで80~83%の範囲で安定していること確認した。設計値としての電力伝送効率は84%であったことから、ほぼ設計通りの効率が得られることを確認した。

他の要素での電力変換効率については、スイッチングモードアンプが95%、整流回路およびDC-DCコンバータが88%であった。よって、電力の総合効率は67~69%であった（ただし、この効率には制御用の電子回路基板での電力消費、約1Wが含まれていない）。伝送効率は、コイルのサイズに対して正の相関があるため、実寸のコイルでは更に効率が向上すると予測される。

図8にコイルの上方向の位置ずれに対する伝送電力の変化（実験結果）を示す。実験では、伝送距離を30mmに固定し、Rxコイルを鉛直方向に移動させながら、伝送電力の測定を行った。72mmまで伝送電力は、ほぼ一定（ $18.5 \pm 1W$ ）を保持することを確認した。計算値としての上下

方向の臨界距離は 72mm であり、実験結果との一致を確認した。その他の方向の位置ずれについても、上方向の位置ずれと同様に高いロバスト性を有していることを計算と実験の両面から確認した（紙面の制約上、本稿では結果の掲載を省略するが、結果については学术论文として投稿中である）。

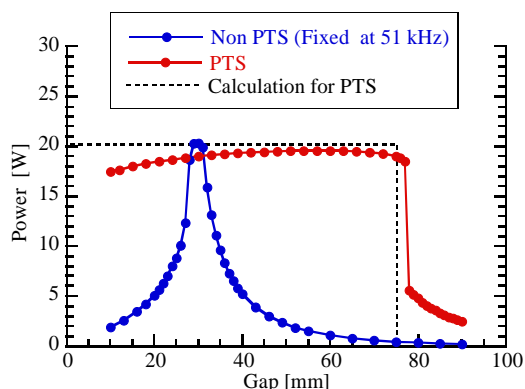


図 6 伝送距離と伝送電力の関係

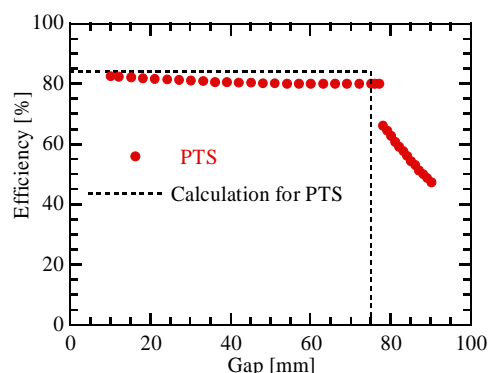


図 7 伝送距離と電力伝送効率の関係

海中での使用を想定して、Tx、Rx コイル共にプラスチックケースに収め、シーリング材で防水し、試験液を入れた水槽中に沈めた。このとき伝送距離は 50mm に固定した(図 9 参照)。

図 10 に試験液の導電率と伝送効率の関係を示す。2~5 S/m が海水の導電率に相当する。導電率の増加に対して伝送効率は線形に減少することがわかった。電力効率の低下は 5 S/m においても 0.6% であった。この結果より低周波化により海中においても高効率での WPT が可能であることがわかった。

今後の展開としては、現在の縮尺 1/10 のシステムを実寸で製作し、波や潮の流れのある海洋でのフィールド実験を行う計画である。近年、水中ドローンが民生品としても販売されるようになり、海中での WPT は利便性と安全性の両面から、その意義が高まっている。今後も本研究を継続して進めることで、当該分野の発展に貢献していきたい。

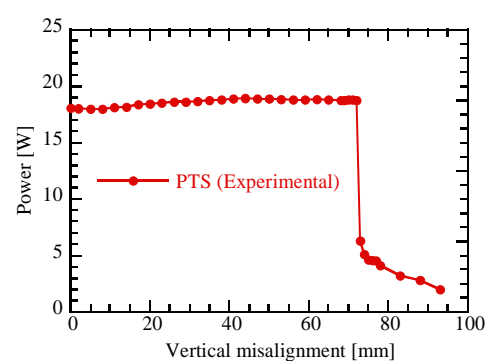


図 8 位置ずれに対する伝送電力の変化

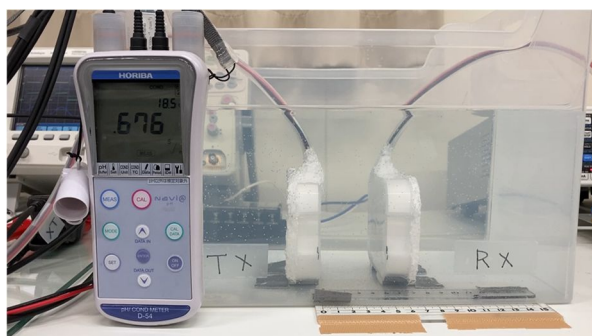


図 9 水槽中に設置したコイル

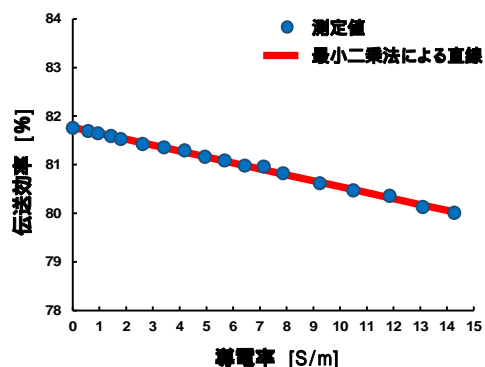


図 10 試験液の導電率と伝送効率の関係

[参考文献]

- [1] S. Assaworrarit, X. Yu, and S. Fan, “Robust wireless power transfer using a nonlinear parity-time symmetric circuit,” *Nature*, vol. 546, no. 7658, pp. 387–390, (2017).
- [2] C. Nagai, K. Inukai, M. Kobayashi, T. Tanaka, K. Abumi, T. Imura, and Y. Hori “Scaling law of coupling coefficient and coil size in wireless power transfer design via magnetic coupling” *IEEJ Trans. Ind. Appl.*, vol. 137, no. 4, pp. 326–333, (2017). In Japanese
- [3] H. Ishida, T. Kyoden, and H. Furukawa, “Application of parity-time symmetry to low-frequency wireless power transfer system” *IEEJ J. Ind. Appl.*, vol. 11, no. 1, pp. 59–68, (2022).



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hiroki Ishida, Tomoaki Kyoden, Hiroto Furukawa	4. 巻 Vol.11 No.1
2. 論文標題 Application of Parity-Time Symmetry to Low-Frequency Wireless Power Transfer System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 59-68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.21002583	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki Ishida, Hiroto Furukawa, Tomoaki Kyoden	4. 巻 103 number1
2. 論文標題 Scheme for providing parity-time symmetry for low-frequency wireless power transfer below 20 kHz.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Springer Electrical Engineering	6. 最初と最後の頁 35-42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00202-020-01041-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoaki Kyoden, Hiroki Ishida, Hiroto Furukawa	4. 巻 Vol.10 No.2
2. 論文標題 Self-excited Circuit with Negative Resistance for Parity-time-Symmetric Wireless Power Transfer and Enhanced Thermal Noise as Seed for Oscillation.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejjia.20006504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石田 弘樹  (Ishida Hiroki)  (50413761)	岡山理科大学・理学部・准教授    (35302)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	経田 僚昭  (Kyoden Tomoaki)  (50579729)	富山高等専門学校・その他部局等・准教授     (53203)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関