

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04036

研究課題名（和文）空間・時間反転対称性により実現する移動対象へのワイヤレス給電

研究課題名（英文）Wireless power transfer to moving objects realized by parity-time symmetry

研究代表者

石田 弘樹 (Ishida, Hiroki)

岡山理科大学・理学部・教授

研究者番号：50413761

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：磁界共鳴方式のワイヤレス給電に空間・時間反転（PT）対称性を与えることで、コイルの位置が変動した場合でも安定した無線給電が成させるシステムの開発を行った。本研究では、給電コイルと受電コイルの間の距離（伝送距離）、コイル間の位置ずれ、更にはコイルの向きの変動に対して、広い範囲でPT対称性を保存することができるシステム構成を理論解析およびコンピューターシミュレーションを用いて探求した。

研究の結果、コイル形状の最適化、PT対称性に適した共振回路トポロジー、DCDCコンバータによる見かけの負荷抵抗の調整により、伝送距離およびコイル間の位置ズレは研究開始前の約2倍に向上させること成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間・時間反転（PT）対称性を応用したワイヤレス給電の研究は、米国や中国で盛んに行われているが、日本国内では研究が行われていない現状があった。本研究課題では、単に動作原理の理解だけに留まらず、この分野の発展に繋がる幾つかの知見を見出すことができた。また、理論解析のみに留まらず、理論解析結果に基づきシステム（実機）の開発も行った。開発したシステムは、理論予測通りの電力伝送性能を有していることを確認した。また、本システムは製造コストや動作安定性からも、実用性が高いことが確認された。現在、民間企業と共同で実用化を目指し開発を進めており、更なる発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：By incorporating Parity-Time (PT) symmetry into magnetic resonance-based wireless power transfer, we developed a system that enables stable wireless power transfer even when the position of the coils varies. In this study, we explored a system configuration that can preserve PT symmetry over a wide range of distances (transmission distance) between the power transmission coil and the power reception coil, misalignment between coils, and changes in the orientation of the coils. This was done using theoretical analysis and computer simulations.

As a result of the research, we succeeded in improving the transmission distance and tolerance to coil misalignment to approximately double that before the start of the research. This was achieved through the optimization of coil shapes, a resonant circuit topology suitable for PT symmetry, and the adjustment of apparent load resistance using a DC-DC converter.

研究分野：ワイヤレス給電

キーワード：ワイヤレス給電 空間・時間反転対称性 ロバスト性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、空間・時間対称性 (PTS) を適用したワイヤレス給電 (WPT) が注目を集めている(1)。PTS が保存されると、系のハミルトニアンエネルギー固有値は実部のみとなる。この場合、共振器間で単位時間あたりに転送されるエネルギーは、共振器間の結合レートに依存しなくなる。その結果、伝送電力と効率、伝送距離が変化しても一定となる。伝送電力を一定に保つことは、実用上の不可欠な性質であり、PTS はこの研究課題を解決できる有望な候補であると考えられる。また、PTS の特徴として応答速度の速さが挙げられる。よって、伝送距離の静的な変化のみならず動的な変化に対しても有効であるため、移動や回転している対象への応用も期待できる。ただし、PTS の応用は、新しい研究であることから、現象そのものを完全に理解するに至っていない状況であった。

### 2. 研究の目的

WPT は電気自動車、ドローン、無人搬送車などへの移動する対象への応用が検討されている。その他にも産業ロボットの関節に WPT を適応し、関節での断線を防ぐ検討も行われている。これらの研究に共通する点は、コイルの位置関係が動的に変化するという点である。磁界共鳴方式では、コイルの位置がずれると共振点が変わるため、伝送電力も大きく変動してしまう。位置ずれに追従して電力を一定に保つ目的で電力制御を行った場合、コイルの移動速度に対して、追従できるだけの応答速度が必要になるため、その制御は容易ではない。本研究では、一般的な電力制御技術よりも格段に速い応答速度をもつ PTS を利用し、伝送電力の安定化を試みる。特に本研究では理論解析のみに留まらず、実用的なシステムの製作も行った。提案する方式の実用性についても検証する。

### 3. 研究の方法

実験モデルとして、コイルサイズが幅 100 mm × 高さ 20 mm × 奥行き 10 mm の送信コイル (Tx) および受信コイル (Rx) を作製した。磁気コアには初期比透磁率が 2300 の  $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  フェライトを使用した。巻線には、直径 0.04 mm の銅線を 660 束にしたリッツ線を Tx コイルに使用し、直径 0.04 mm の銅線を 2,000 束にしたリッツ線を Rx コイルに使用した。コイルの詳細な寸法は、 $kQ$  積を最大化するために、ソフトウェア (JMAG) を使用したシミュレーションによって決定された。Tx および Rx コイルの品質係数 ( $Q$ ) は、85 kHz において、それぞれ 744 と 811 であった。また、伝送距離 (ギャップ) 30 mm における  $kQ$  積は 139 であった。図 1 にコイルの寸法と諸元をまとめた。

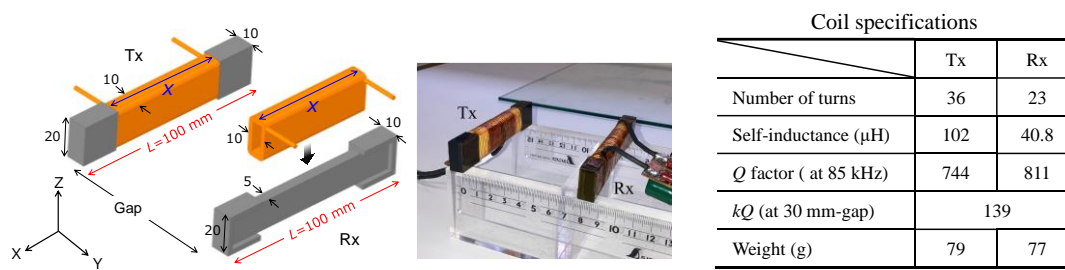


図 1. コイルの寸法と諸元

PTS-WPT システムには、臨界磁気結合係数 ( $k_{mc}$ ) を持つ(2)。コイル間の磁気結合係数 ( $k_m$ ) が、この  $k_{mc}$  を下回ると PTS は破れ、システムは非 PTS 状態に移行することになる。PTS が広い距離範囲で保持されるためには、できる限り  $k_{mc}$  を小さくする必要がある。研究の結果、 $k_{mc}$  の式は、共振回路の構成 (トポロジー) によって異なることがわかったため、本研究では幾つかのトポロジーにおける  $k_{mc}$  を計算し、PTS に適したトポロジーを探索した。

図 2(a) は、広く使用される S-P トポロジーである。ここで、 $r_1$  と  $r_2$  は、それぞれ Tx および Rx 共振器に含まれる抵抗成分を表している。S-P トポロジーの  $k_{mc}$  は (1) 式のように表すことができる。

$$k_{mc} = \frac{1}{Q_2} + \frac{Z_0}{R_L} \tag{1}$$

ここで、 $Q_2$  は Rx 共振器の  $Q$  (周波数選択度) を表し、 $R_L$  は Rx 共振器に接続した負荷抵抗値を表す。また、 $Z_0 = \sqrt{L_2/C_2}$  は Rx 共振器の特性インピーダンスである。図 1 に示したコイルを用いた場合、(1) 式から計算される  $k_{mc}$  の値は 0.12 であった。 $k_{mc} = 0.12$  という値は、PTS が広い距離範囲で保持されるため不十分であり、少なくとも 0.04 以下まで下げる必要があった。本研

究では、広く使われている S-P や S-S トポロジーよりも  $k_{mc}$  の値を小さくすることができるトポロジーを探索した。その結果、図 2(b)に示した S-SP トポロジーを見つけるに至った。

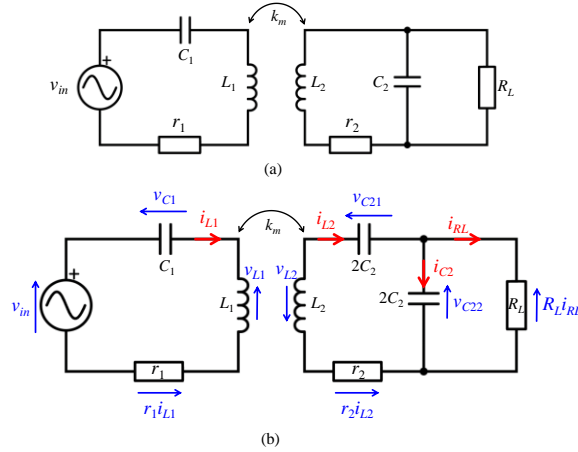


図 2. 共振回路のトポロジー、(a) S-P トポロジー、(b) S-SP トポロジー

#### 4. 研究成果

研究成果として以降に S-SP トポロジーの  $k_{mc}$  の導出方法と実験による検証結果を示す。S-SP トポロジーの状態方程式を (2) 式に示す。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \\ i_{L2} \\ v_{C21} \\ v_{C22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_2 r_1 & -L_2 & M r_2 & M & M \\ \varsigma & \varsigma & \varsigma & \varsigma & \varsigma \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M r_1 & M & -L_1 r_2 & -L_1 & -L_1 \\ \varsigma & \varsigma & \varsigma & \varsigma & \varsigma \\ 0 & 0 & \frac{1}{2C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2C_2} & 0 & -\frac{1}{2C_2 R_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ v_{C1} \\ i_{L2} \\ v_{C21} \\ v_{C22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L_2}{\varsigma} \\ 0 \\ -M \\ \varsigma \\ 0 \end{bmatrix} v_{in} \quad (2)$$

ここで、 $M$  は相互インダクタンス、 $\varsigma = L_1 L_2 - M^2$  と置いた。(2) 式の状態方程式とは別の表現として、システムを図 3 に示す結合モード理論 (CMT) モデルとして表すこともできる。ここで、ゲインレート  $g_{10}$  と損失レート  $\Gamma_L$  は、それぞれ電源と負荷抵抗により決定されるパラメータである。 $\Gamma_{10}$  と  $\Gamma_{20}$  は、それぞれ Tx 共振器と Rx 共振器の固有損失レートを表す。 $\kappa$  はコイル間の結合レートを表す。

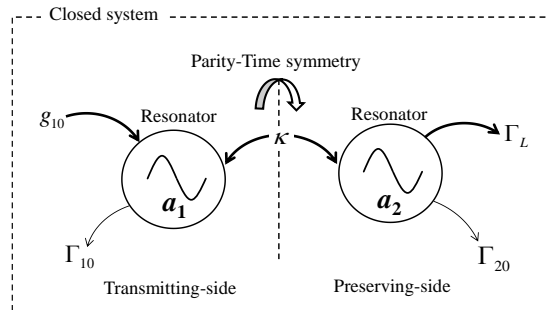


図 3. PTS-WPT の CMT モデル

各共振器の波動関数を  $\mathbf{a}_n$  として定義する。ここで、 $n = 1$  と  $2$  は、それぞれ Tx と Rx を指す。 $|\mathbf{a}_n|^2$  は共振器に蓄えられたエネルギーに相当する。また、 $\theta_1 - \theta_2$  は 2 つの共振器で発生している波動の位相差に相当する。 $\mathbf{a}_n$  の導関数は次のように表すことができる。

$$\frac{d\mathbf{a}_n}{dt} = \frac{dA_n}{dt} e^{j(\omega t + \theta_n)} + jA_n \left( \omega + \frac{d\theta_n}{dt} \right) e^{j(\omega t + \theta_n)} \quad (3)$$

ここで、 $\omega$  は 2 つの共振器が結合されたときの共振周波数を表す。振幅  $A_n$  は時間を変数に持つ関数である。 $dA_n/dt$  と  $A_n(\omega+d\theta_n/dt)$  は次のように表すことができる。

$$\frac{dA_1}{dt} = -\frac{1}{1-k_m^2}\Gamma_{10}A_1 + \frac{k_m}{1-k_m^2}(\Gamma_{20}+\Gamma_L)A_2 \cos\phi - \frac{1}{2}\frac{k_m}{1-k_m^2}\omega_0A_2 \sin\phi + \frac{1}{1-k_m^2}G_0 \quad (4-1)$$

$$A_1\left(\omega + \frac{d\theta_1}{dt}\right) = \frac{1}{2}\frac{1}{1-k_m^2}\omega_0A_1 + \frac{1}{2}\omega_0A_1 - \frac{k_m}{1-k_m^2}(\Gamma_{20}+\Gamma_L)A_2 \sin\phi - \frac{1}{2}\frac{k_m}{1-k_m^2}\omega_0A_2 \cos\phi \quad (4-2)$$

$$\frac{dA_2}{dt} = \frac{k_m}{1-k_m^2}\Gamma_{10}A_1 \cos\phi + \frac{1}{2}\frac{k_m}{1-k_m^2}\omega_0A_1 \sin\phi - \frac{1}{1-k_m^2}(\Gamma_{20}+\Gamma_L)A_2 - \frac{k_m}{1-k_m^2}G_0 \cos\phi \quad (4-3)$$

$$A_2\left(\omega + \frac{d\theta_2}{dt}\right) = \frac{1}{2}\omega_0A_2 + \frac{k_m}{1-k_m^2}\Gamma_{10}A_1 \sin\phi - \frac{1}{2}\frac{k_m}{1-k_m^2}\omega_0A_1 \cos\phi + \frac{1}{2}\frac{1}{1-k_m^2}\omega_0A_2 - \frac{k_m}{1-k_m^2}G_0 \sin\phi \quad (4-4)$$

ここで、 $G_0$  は  $V_m/(\pi\sqrt{2L_1})$ 、 $\phi$  は  $\theta_1-\theta_2$  である。また、 $\omega_0$  は Tx 共振器と Rx 共振器に共通する固有共振周波数を表す ( $\omega_0^2=1/L_1C_1=1/L_2C_2$ )。表 1 に S-SP トポロジーにおけるエネルギーレートと回路パラメータの対応関係をまとめた。

表 1 S-SP トポロジーにおけるエネルギーレートと回路パラメータの関係

エネルギーレート	回路パラメータ
$g_{10}$	$\frac{G_0}{ a_1 }$ , $G_0 \equiv \frac{V_m}{\pi\sqrt{2L_1}}$
$\Gamma_{10}$	$\frac{r_1}{2L_1}$
$\Gamma_{20}$	$\frac{r_2}{2L_2}$
$\Gamma_L$	$\frac{1}{8\omega^2C_2^2L_2R_L}$
$\kappa$	$\frac{k_m\omega_0}{2}$

$a_n$  の導関数は (4-1) ~ (4-4) 式を (3) 式に代入すると次のように表すことができる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega_0 + \left(\frac{G_0}{|a_1|} - \Gamma_{10}\right) & -j\kappa \\ -j\kappa & j\omega_0 - (\Gamma_{20} + \Gamma_L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5) 式で表されるシステムのエネルギー固有値の虚数部がゼロになる唯一の条件は次の通りである。

$$\frac{G_0}{|a_1|} - \Gamma_{10} = \Gamma_{20} + \Gamma_L \quad (6)$$

さらに、(6) 式が常に成立する条件は (つまり、電力供給と電力消費が平衡する条件)、次の 2 つの式で与えられる。

$$\omega = \omega_0 \pm \sqrt{\kappa^2 - (\Gamma_{20} + \Gamma_L)^2} \quad (7)$$

$$\kappa \geq \Gamma_{20} + \Gamma_L \quad (8)$$

したがって、(7) と (8) 式が共に満たされる場合、システムの総エネルギーは保存される。また、(8) 式から導かれる S-SP トポロジーの  $k_{mc}$  の式は次の通りである。

$$k_{mc} = \frac{1}{Q_2} + \frac{Z_0}{4\omega^2L_2C_2R_L} \quad (9)$$

ここで、(7) 式から、PTS の臨界点においては、 $\omega$  が  $\omega_0$  に達するため  $\omega = \omega_0$  であるから (9) 式は、更に (10) 式として単純な形で表現できる。

$$k_{mc} = \frac{1}{Q_2} + \frac{Z_0}{4R_L} \quad (10)$$

なお、実際のシステムでは、第1項よりも第2項が十分に大きな値になるため、 $k_{mc}$ の値は第2項に支配されることになる。(1)と(10)式の比較から、S-SPトポロジーの $k_{mc}$ はS-Pトポロジーの $k_{mc}$ に比べて1/3以下に減少させられることがわかった。よって、S-SPトポロジーはPTSを広い距離範囲で保存させるために有効なトポロジーであると言える。この発見が研究期間に得られた最も有益な知見であった。

実際に図1に示したコイルをS-PトポロジーやS-Sトポロジーにより駆動した場合の $k_{mc}$ は0.012であり計算結果と一致した。一方、S-SPトポロジーにおいては0.040となり、期待通り1/3に低減させることに成功した。最終的にS-SPトポロジーをもつ実機を作製した(図4)。

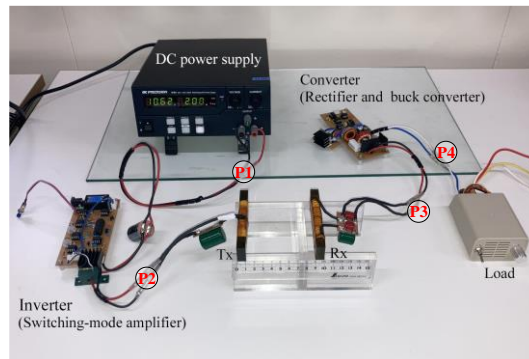


図4. 作製したPTS-WPTシステム

図5は、本システムを用いて2つのトポロジーの臨界伝送距離を比較した結果である。ここで、臨界伝送距離とはPTSが保存できる限界の距離であり、理論上、臨界伝送距離以下であればコイルを自由に移動させても伝送電力は変化しない。よって、臨界伝送距離が伸びて研究目的の達成を判断できる。図5のグラフにおいて伝送電力( $P_3$ )が急激に低下する伝送距離(ギャップ)の位置が臨界伝送距離に相当する。S-Pトポロジーにおいて、それは40mmであったのに対してS-SPトポロジーでは75mmまで伸ばすことに成功した。

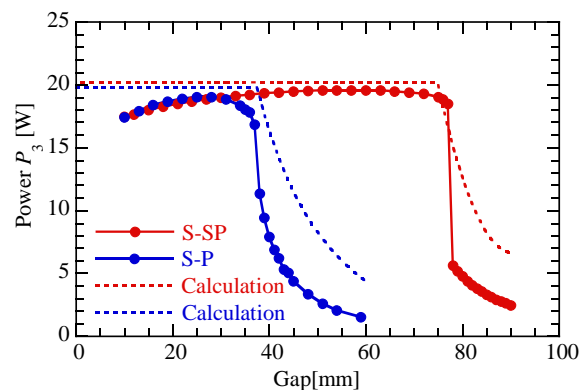


図5. 伝送距離(ギャップ)と伝送電力( $P_3$ )の関係: 青色はS-Pトポロジー、赤色はS-SPトポロジー、破線は計算結果

## 5. 結論

本研究ではPTSによりコイルを自由に動かすことのできるWPTシステムを構築した。特にPTSが有効な伝送距離の範囲をS-SPトポロジーにより、従来の1.9倍にすることに成功した。

## 参考文献

- (1) S. Assaworarith, X. Yu, and S. Fan "Robust wireless power transfer using a nonlinear parity-time symmetric circuit" *Nature*, 546, 387–390 (2017)
- (2) H. Ishida, T. Kyoden, and H. Furukawa "Method for applying parity-time symmetry to low frequency wireless power transfer System" *IEEJ Journal of Industry Applications*, 11(1), 59–68 (2022)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2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 Ishida Hiroki, Akatsu Yasuhito, Kyoden Tomoaki, Furukawa Hiroto	4. 巻 13
2. 論文標題 Improving the Critical Transmission Distance of Inductively Coupled Wireless Power Transfer Having Parity-Time Symmetry	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 188 ~ 197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.23003692	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 石田弘樹	4. 巻 73
2. 論文標題 空間・時間反転対称性により実現した高性能ワイヤレス給電システム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊 化学工業	6. 最初と最後の頁 537-542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 石田弘樹	4. 巻 6
2. 論文標題 空間・時間反転対称性をもつワイヤレス給電システム	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊 機能材料	6. 最初と最後の頁 44-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Hiroki Ishida, Tomoaki Kyoden, Hiroto Furukawa	4. 巻 11
2. 論文標題 H. Ishida, T. Kyoden, and H. Furukawa	5. 発行年 2022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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石田弘樹、赤津康仁、西田智哉
2. 発表標題 低周波PT対称性ワイヤレス給電システム
3. 学会等名 電気学会全国大会4-067, pp.109-110, 2022年3月23日
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤津康仁、石田弘樹、古川裕人、経田僚昭
2. 発表標題 空間・時間反転対称性方式による伝送距離の改善
3. 学会等名 電気学会全国大会 4-087, p.152, 2023年3月15日
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤津康仁、石田弘樹、古川裕人、経田僚昭
2. 発表標題 PT対称性ワイヤレス給電による位置ずれの改善
3. 学会等名 応用物理・物理系 中国四国支部 合同学術講演会, Fp-6, p.89, 2023年7月29日
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤津康仁、石田弘樹、古川裕人、経田僚昭
2. 発表標題 PT対称性ワイヤレス給電における共振回路トポロジーと伝送距離の関係
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 四国支部連合大会 5-1, p.88, 2023年9月23日
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤津康仁、石田弘樹、経田僚昭、古川裕人
2. 発表標題 回転運動する対象へのソレノイドコイルを用いたワイヤレス給電
3. 学会等名 電気学会全国大会 4-089, pp.146-147, 2024年3月16日
4. 発表年 2024年

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------