

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04115

研究課題名(和文) パリティ・時間対称性に学ぶ新たな高口バスト・ワイヤレス給電システムの創造

研究課題名(英文) Development of highly robust wireless power transfer system using parity-time symmetry

研究代表者

石田 弘樹 (Ishida, Hiroki)

岡山理科大学・理学部・准教授

研究者番号：50413761

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)：本研究課題では、パリティ・時間対称性の原理を利用したワイヤレス給電システムの開発を行った。先行研究(Assaworrharith et al. Nature, 546, 387-390(2017))は、メガヘルツ帯の高周波で実施されたが、本研究では、動作環境の変化に対する堅牢性を更に向上させるために20kHz以下の低周波においてパリティ・時間対称性が保存される実用的なシステムを提案した。試作機を用いた実験により伝送距離の変動にともなう伝送電力および伝送効率の低下が従来方式(磁気共鳴方式)よりも小さく抑えられることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パリティ・時間対称性の原理を利用したワイヤレス給電(PTS-WPT)は、2017年にスタンフォード大学の研究グループが発表した比較的新しい知見である。よって、実用的システムの提案は、ほとんど無かった。本研究では実用化のためにシステムの低周波化を試みた。先行研究で約2MHzであった動作周波数を1/100以下の20kHzを下げた状態においてもパリティ・時間対称性が保存される条件を結合モード理論を用いて見出し、試作したシステムを用いてパリティ・時間対称性が保存され、従来方式(磁気共鳴方式)から堅牢性が改善したことを確認した。本研究成果は、PTS-WPTの実用化に貢献するものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：The present study develops a wireless power transfer system based on parity-time symmetry (PTS-WPT) in the low-frequency below 20 kHz. Previous study (Assaworrharith et al. Nature, 546, 387-390(2017)) indicate that a practical system can be realized using a band of a few megahertz. We chose low frequencies below 20kHz to further improve robustness. For the low frequency PTS-WPT, the transmission power decrease with increasing transmission distance was minimized. This suggests that PT symmetry worked in our system.

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 パリティ・時間対称性 低周波 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

2007年、ソーリヤッチ氏(マサチューセッツ工科大)らが磁気共鳴方式[1]のワイヤレス給電を発表して以来、静的(コイル位置の変動がない)な系での研究は成熟し、研究のフェイズは「走行中の電気自動車への無線電力供給」や「飛行中のドローンへのワイヤレス給電」などに代表されるような動的な系へと移っていった。本研究課題を申請した2017年当時、スタンフォード大学のファン教授らの研究グループが、パリティ・時間(PT)対称性の原理を利用した新規のワイヤレス給電方式を発表した[2]。PT対称性が保存されたシステムは、理論上、給電コイルと受電コイルの間の距離(伝送距離)が変化しても伝送電力や伝送効率は変化しない。また、急激な伝送距離の変動に対しても速い応答性を有している。よって、PT対称性は、動的な給電対象へのワイヤレス給電を可能にする潜在的な能力を持つと期待された。ただし、2017年当時、ファン教授らが行った実験は理論の正しさを証明するものであったが、伝送電力と伝送効率は、わずか数十mW、10%程度であり、実用的なシステムの提案を待たれていた。

2. 研究の目的

本研究ではPT対称性の原理を発展させて、高出力、高効率な実用性の高いワイヤレス給電システムの開発を目指す。特にファン教授らの先行研究では、2.5MHz程度の高周波が使われていたが、本研究では20kHz以下まで低周波化を試みる。20kHz以下においてもPT対称性を保存されることができれば、交流電源回路の電力と効率を大きく改善できる考えられる。また、低周波化することで、コイルの周囲に存在する導電性の物体での電力損失を軽減することができるため、実使用環境における堅牢性の向上も期待できる。

3. 研究の方法

本研究期間において下記の研究事項(1)~(5)を実施し上記の研究目的の達成を目指す。はじめに(1)PT対称性ワイヤレス給電を結合モード(CMT)理論により解析し、低周波においてもPT対称性を保存できる条件(コイルの自己インダクタンスや磁気結合係数の値)を探る。続いて、(2)理論解析により明らかとなった条件を満足するようなコイルの設計および作製を行う。低周波化によりコイルは、先行研究で用いられた空芯タイプのものから、磁性体のコアに巻くタイプのものに変更することができると考えられる。磁性コアによってコイルの電力密度が向上するためコイルのサイズを小さくできる効果も期待できる。更に、申請者らのこれまでの研究成果から磁性コアの形状が電力伝送性能に影響を与えるため、電磁界シミュレーションによってコンピュータ上で磁性コア形状の最適化を行う。続いて、(3)電力供給を担う交流電源の作製を行う。交流電源には、負性抵抗発振回路が必要となるが、ファン教授らは、この回路を高周波の小信号用オペアンプを用いて行っていた。しかし、小信号用オペアンプを用いると伝送電力は数十mWと小さく、電力効率も10%と低く制限されてしまう。本研究では、低周波化により、高電圧駆動のパワーオペアンプの使用を可能し、10W程度の伝送電力と50%を超える伝送効率を実現する。(4)以上の(1)から(3)のプロセスにより完成させた新規のワイヤレス給電システムの基礎的な伝送性能(特に伝送電力と電力効率の伝送距離に対する依存性)を測定し、CMT理論の理論値と比較することで、本システムがPT対称性を有していることを確認する。また、伝送距離の急激な変化にシステムが追従できることを実験的に確認する。(5)最後にオペアンプを用いたアナログ回路から電界効果トランジスタを用いたスイッチング回路を根幹とするデジタル回路への発展を検討し、更なる実用性の向上へとつながる知見を得る。

4. 研究成果

4-1. 理論解析

図1にCMT理論に基づいたPT対称性ワイヤレス給電の回路モデルを示す。給電および受電回路をそれぞれ共振器と見なしたとき、 a_1 および a_2 は共振器内の波動方程式を表しており、 $|a_1|^2$ 、 $|a_2|^2$ はそれぞれの共振器に蓄えられているエネルギーを表す。図1中の ω_1 、 ω_2 はそれぞれの共振器での固有共振角周波数を表す。CMT理論においては、給電側共振器でのエネルギー損失をロスレート γ_{10} で表し、受電側共振器でのエネルギー損失をロスレート γ_{20} で表す。また、電力を供給する電源はPT対称性を保存させるために負性抵抗 R_n として振る舞う必要がある。この負性抵抗からのエネルギー供給を表すパラメータがゲインレート g_{10} であり、受電側に接続された負荷抵抗 R_L でのエネルギー消費を表すパラメータがロスレート γ_L である。そして、給電および受電回路間での相互作用の強さを表すパラメータが結合レート κ である。これらのレートと回路パラメータ(コイルの自己インダクタンス L_1 、 L_2 、巻線抵抗 r_1 、 r_2 、コイル間の磁気結合係数 k_m)との関係は、次のように表すことができる。

$$g_{10} = -\frac{L_1 \omega_1^2}{2 R_n} \quad (1-1)$$

$$\gamma_{10} = \frac{r_1}{2 L_1} \quad (1-2)$$

$$\gamma_{20} = \frac{r_2}{2L_2} \quad (1-3)$$

$$\gamma_L = \frac{L_2 \omega_2^2}{2R_L} \quad (1-4)$$

$$\kappa = \frac{\omega}{2} k_m \quad (1-5)$$

これらの関係式を用いて、図1の回路モデルの状態方程式を解くと、本システムの数式モデルを次式のように導くことができる。

$$\frac{d a_1}{d t} = (i \omega_1 + g_1) a_1 - i \kappa a_2 \quad (2-1)$$

$$\frac{d a_2}{d t} = (i \omega_2 - \gamma_2) a_2 - i \kappa a_1 \quad (2-2)$$

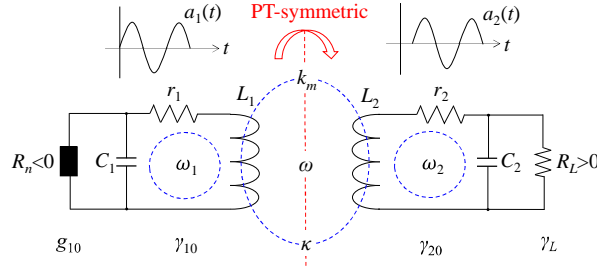


図 1. CMT 理論に基づいた PT 対称性ワイヤレス給電の回路モデル

(2-1)式と(2-2)式の特徴方程式から、2つの発振角周波数 (ω_L および ω_H) が存在することがわかる。

$$\omega_L = \omega_0 - \sqrt{\kappa^2 - \gamma_2^2} \quad (\kappa \geq \gamma_2) \quad (3-1)$$

$$\omega_H = \omega_0 + \sqrt{\kappa^2 - \gamma_2^2} \quad (\kappa \geq \gamma_2) \quad (3-2)$$

ここで、ロスレート γ_2 は、 $\gamma_2 = \gamma_{20} + \gamma_L$ を表す。この2つの発振角周波数を(2-1)式と(2-2)式に戻し、 a_1 と a_2 の特別解を求めると、 ω_L もしくは ω_H において a_1 と a_2 の振幅が等しくなるという重要な関係を導き出すことができる。この関係を用いて系の電力効率 η を次のように導くことができる。

$$\eta = \frac{2 \gamma_L |a_2|^2}{2 \gamma_{10} |a_1|^2 + 2 \gamma_2 |a_2|^2} = \frac{\gamma_L}{\gamma_2} \frac{1}{1 + \frac{\gamma_{10}}{\gamma_2}} \quad (\kappa \geq \gamma_2) \quad (4)$$

また、伝送電力 P_{out} は次のように導くことができる。

$$P_{out} = 2 \eta g_{10, \text{sat}} |a_1|^2 \quad (\kappa \geq \gamma_2) \quad (5)$$

注目すべきことに、これらの式の中に伝送距離に関わるパラメータ (すなわち κ) が含まれていない、よって電力効率と伝送電力は理論上、伝送距離に依存しなくなる。ただし、(4)式および(5)式中の条件 $\kappa \geq \gamma_2$ が PT 対称性を保存するために必要条件となるから、低周波においてもこの条件を満足するようなシステム設計が必要であることがわかった。

4-1. コイルの製作

前述した $\kappa \geq \gamma_2$ の要件を低周波において満足させるためには、低周波において高い品質ファクタ (Q 値) を有するコイルが必要である。本研究では図2に示す小型ソレノイドコイルを製作した。磁性コアには、Mn-Zn フェライト (初期透磁率 $2,300 \times \mu_0$, 飽和磁束密度 0.39 T) を使い、巻線には直径 0.6 mm の銅のホルマール線を用いた。図3(a)は、このコイルの実効抵抗 R_{eff} と Q 値の周波数依存性である (実線は実験値、破線は計算値)。数値計算による計算値と実験値は良く一致しており、20 kHz において Q 値が 100 を超えるコイルを作製できることを確認した。図3(b)は伝送距離と磁気結合係数 k_m の関係である (破線はシミュレーション結果)。 k_m についても実験とシミュレーション結果は良く一致しており、設計通りの k_m 値を得ることができた。PT 対称性が保存される条件 $\kappa \geq \gamma_2$ より PT 対称性が保存される伝送距離の限界値 (臨界伝送距離) を計算することができる。本コイルの場合の臨界伝送距離は約 16mm であり、臨界伝送距離であれば、理論上は伝送距離に対して伝送電力と効率が依存しないことになる。

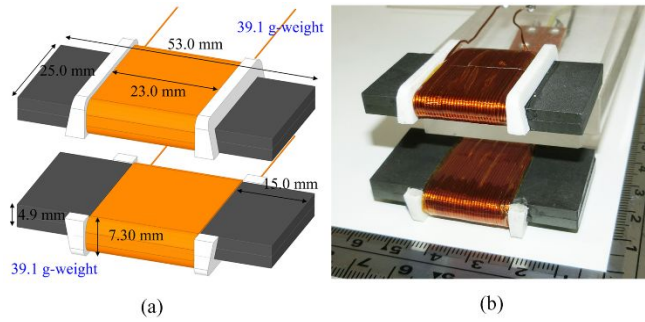


図2 コイル (a) 設計図面, (b) 試作したコイルの写真

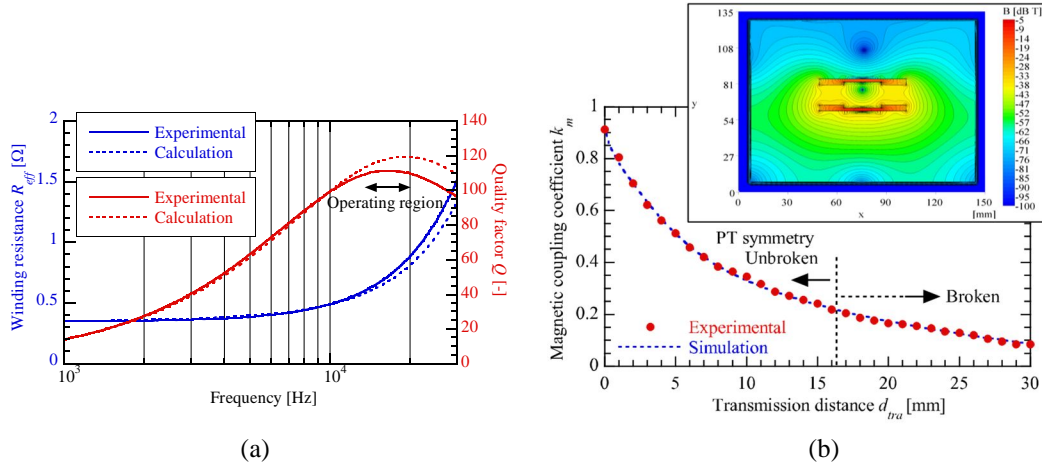


図2 コイルの諸特性

(a) R_{eff} と Q 値の周波数依存性, (b) 伝送距離と k_m の関係

4-2. PT 対称性ワイヤレス給電システム

図3に本システムの回路の概略を示す。オペアンプ回路の入力電圧 V_{in} と入力電流 I_{in} より、(6)式のような負性抵抗 R_n を定義することができる。

$$\frac{V_{in}}{I_{in}} = -\frac{R_1}{R_2} R_f = R_n \quad (6)$$

R_n の大きさが、給電コイル両端から見た実効的な抵抗成分 R_e よりも大きいとき

$$|R_n| > R_e \approx k_m^2 R_L \quad (7)$$

つまり、 R_n が $k_m^2 R_L$ よりも大きいとき、回路は負性抵抗発振し、オペアンプから給電コイルへ交流電流が供給される。この発振周波数は、(3-1)式もしくは(3-2)式に従うため、伝送距離が変化すると発振周波数も変化し、 $\kappa > \gamma_2$ を満たす範囲内では PT 対称性が常に保存されることになる。

文献[2]では、発振周波数が 2.5 MHz と高いことから、負性抵抗回路には小信号用オペアンプが使用された。しかし、小信号用オペアンプを用いると、伝送電力は極めて低く制限されるため実用的な利用には適さない。そこで、本研究ではフルパワーバンド幅は 20 kHz の高電圧駆動型のパワーオペアンプ(Apex PA92)を使用することで大電力と高効率化を図った。図4(a)は伝送距離と伝送効率の関係である。ここで、伝送効率は給電コイルに入力された電力と負荷抵抗で消費された電力の比から求めた。図中の () が PT 対称性を保存した場合の実験結果である。比較のため、() として発振周波数を 12.4kHz に固定した場合 (PT 対称性が保存されていない場合) の実験結果を示す。PT 対称性が保存されていない場合では、伝送距離の増加とともに伝送効率が大きく低下しているが、PT 対称性を保存された場合は ($\kappa > \gamma_2$ の範囲内において) 伝送効率が高い値 92~95% で保持されることが確認された。また、実験結果は CMT 理論による計算結果と良く一致していた。図4(b)は伝送距離と伝送電力の関係である。PT 対称性が保存されていない場合 () では、伝送距離の増加とともに伝送電力が急激に減少してしまうのに対して、PT 対称性を保存した場合 () では ($\kappa > \gamma_2$ の範囲内において) 伝送電力の低下は少ない、およそ 4 W を保持した。これらの結果より、本システムが PT 対称性を低周波帯で保持し、伝送距離の変化に対して高い堅牢性を有することを確認することができた。

図5の はオペアンプの電源電圧と伝送電力の関係である。伝送電力は電源電圧の2乗に比例して増加することがわかった。電源電圧100Vにおいて7.8Wの伝送電力を得た。先行研究[2]での数十 mW から大きく向上することができた。同図にオペアンプの電源電圧と総合電力効率の関係を示す。ここで総合電力効率とは、オペアンプ回路で発生した電力損失も含めた電力効率である。伝送効率はオープンアップ回路内の参照抵抗 R_f を小さくすることで向上する傾向にあった。 R_f を50 に設定した場合、50%を超える総合電力効率を実現し、先行研究[2]での10%からの大きな改善を確認した。今後、オペアンプ回路での電力損失をさせるため、FETなどのスイッチングデバイスを用いた負性抵抗発振回路を実現させれば、より高い総合電力効率を実現できると期待できる。

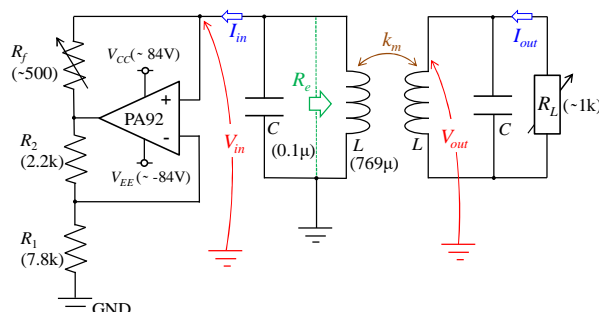


図3 PT 対称性ワイヤレス給電回路の概略

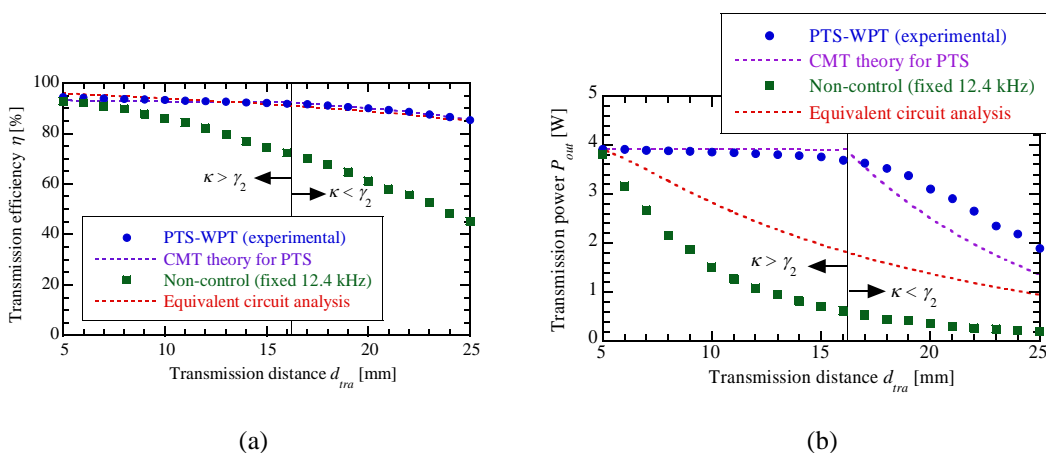


図4 電力伝送の基礎特性

(a) 伝送距離と伝送効率の関係、(b) 伝送距離と伝送電力の関係

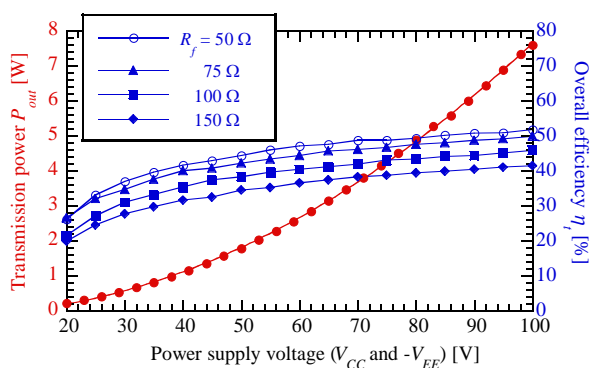


図5 オペアンプの電源電圧と伝送電力および総合電力効率の関係

[1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, (2007).
 [2] S. Assaworarith, 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).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kyoden Tomoaki, Ishida Hiroki, Furukawa Hiroto	4. 巻 10
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 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 254 ~ 261
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 -
1. 著者名 Ishida Hiroki, Furukawa Hiroto, Kyoden Tomoaki	4. 巻 103
2. 論文標題 Scheme for providing parity-time symmetry for low-frequency wireless power transfer below 20kHz	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 H. Furukawa, H. Ishida, and T. Kyoden	4. 巻 1
2. 論文標題 Locating embedded iron bars for wireless power transmission through reinforced-concrete wall	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SN Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 966, 11pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42452-019-1018-y	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 H. Ishida, T. Kyoden, and H. Furukawa	4. 巻 8
2. 論文標題 Effectiveness of convolutional perfectly matched layer in time-domain numerical analysis of low frequency wireless power transfer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 131-139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejjia.8.131	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 -

〔学会発表〕 計2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、古川裕人、経田僚昭
2. 発表標題 負性抵抗発振回路を用いた非接触給電装置の周波数追従性
3. 学会等名 電気学会全国大会 4-095, pp.151-152
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石田弘樹、古川裕人、経田僚昭
2. 発表標題 低周波非接触給電における磁気結合係数の推定
3. 学会等名 電気学会全国大会4-157, pp.259-260
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 磁気共鳴型ワイヤレス給電装置	発明者 石田弘樹	権利者 岡山理科大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-018613	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

研究室紹介 http://www.dap.ous.ac.jp/~ishida/
--

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	古川 裕人 (Furukawa Hiroto) (30238670)	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