

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11476

研究課題名(和文) 振動モード間の共鳴を基礎とした結合振動子系にみられる波動解析への新たな展開

研究課題名(英文) New development in analysis of coupled oscillator systems focusing on resonance between oscillation modes

研究代表者

清水 邦康 (Shimizu, Kuniyasu)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：10409451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、発振器結合系の理論解析において、スペクトル分解における退化周波数を考慮した計算過程を摂動法の一つである平均化法を用いる際に適用した。本研究で対象とする双安定性を有する非線形発振器の相互結合系においては多数の共存解が存在する。本研究では導出された近似理論解の安定性を評価してどのような共存解が存在するか調べた。その結果、複数の解が時空間的に振動エネルギーが移動する波動解に相当することを示した。また、理論的に導出された波動解は、回路実験においても観測可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

離散的な振動子が多数結合される系は多自由度となり、自由度の数だけ振動モードが発生し、この振動モードの理解がこのような系の適切な設計に欠かせない。振動の減衰・復元メカニズムなどに非線形性が関与する場合には、振動エネルギーが局在化する現象やその応用に関して注目されているが、このような非線形系では単純な振動モードの重ね合わせとして議論できないことが、その適切な活用や設計を妨げる障壁となっている。本研究で想定した振動モード間の共鳴は、非線形結合振動子系では自然に起こりうると思われる、本研究で用いた解析手法を同様に用いれば、移動型の振動解や発振パターン解析への波及効果が見込める。

研究成果の概要(英文)：In this study, we distinguish between non degenerate and degenerate modes of the frequency components in the analysis of a coupled oscillator system for applying averaging method, which is one of the perturbation methods. This study investigates mutually-coupled bistable oscillators where there are diverse coexisting solutions. By investigating stabilities of the theoretically-obtained solutions, we find the existing solutions in the coupled oscillator system. Some of them correspond to the propagating wave solutions where the quasi-periodic pulse wave travels in the oscillator array. In addition, we also confirm that there are qualitatively the same propagating wave phenomena in the experimental results.

研究分野：非線形力学

キーワード：結合振動子 波動 摂動法 振動モード

1. 研究開始当初の背景

離散的な振動子が多数結合される系は多自由度となり、自由度の数だけ振動モードが発生し、この振動モードの理解がこのような系の適切な設計に欠かせない。線形結合振動子系においては、各振動モードの重ね合わせが想定できる。一方で、振動の減衰・復元メカニズムなどに非線形性が関与する場合に、振動エネルギーが局在化する現象やその応用に関して注目されているが、このような非線形系では単純な振動モードの重ね合わせとして議論できないことが、その適切な活用や設計を妨げる障壁となっている。

2. 研究の目的

本研究では、スペクトル分解の退化モードを考慮した計算過程を摂動法の一つである平均化法を用いる際に適用することで、双安定な特性を有する発振器の相互結合系に現れる波動現象の近似理論解を導出することを目的とする。また、本研究で対象とする結合発振回路の回路実験による実証を行う。

3. 研究の方法

(1) 近似理論解の導出

非線形性を有する結合振動子系に現れる振動モードの解析において、系の非線形性がそれほど強くない場合には、非線形項による影響を線形系に対する弱い摂動と考える摂動法が複数提案されている。本研究では、摂動法の一つである平均化法を用いる。特に、振動モードの周波数を決定する退化周波数を考慮した計算過程を平均化法において考慮することにより、従来では困難であった複雑な位相関係を持つ時空間的に振幅エネルギーが移動するような波動解等の近似理論解導出を行う。

非線形振動子系では多様な共存解があるために、これらの解を把握する必要がある。本研究で採用する平均化法では、解の安定性を対象とする解近傍の線形化によるヤコビ行列の固有値計算から正確に求めることが可能である。また、陽に導かれる振動子間の位相関係式を使って、位相速度及び群速度を求める。

(2) 回路実験による実証

本研究で対象とする振動子結合系は簡易な回路構成であるため、実験により実際の物理現象としての特性を評価することができる。そこで、導出した近似理論解の実証実験を行う。プリント基板のマスクパターンを設計し、多数の発振回路とそのコイル結合用の基板を作成する。また、多数の発振器のアナログ発振電圧を取得するための測定系を構築する。これより、スペクトル成分を実験的に取得し、波動解を同定する。

4. 研究成果

本研究で採用する平均化法では、 N 個の発振器の電圧 v_j ($j = 1, 2, \dots, N$) [V]を正規化した変数 x_j を、結合行列の固有ベクトルを使ってスペクトル分解し振動モードを導出する。また、結合行列の固有値が振動モードの周波数を決定する。本研究では、環状に隣接結合された振動子結合系を対象とするために結合行列が対称行列となり、退化した固有値が現れる。この場合、平均化法においては退化固有値に由来する周波数を有する振動モードと、非退化の固有値に由来する振動モードを区別して平均化計算を行う必要がある。特に、振動子の数が多くなるにつれて退化固有値の数が増加し、このような区別は重要となる。本研究ではこの点に注目して、対象とする発振器結合系の近似理論解の導出を行なった。

近似理論解は振動モードの振動と初期位相を決定する平均化方程式の安定平衡点に相当する。本研究では、平衡点近傍の線形化により得られるヤコビ行列の固有値からこれらの解の安定性を求めた。図1は、 $N = 5$ の場合の電力増幅の程度に関係する定常振幅の大きさを制御するパラメータ β が安定解の個数に与える影響を示す図である。本研究で対象とする発振器結合系には他に2つのパラメータを有するが、これらはそれぞれ結合強度および非線形性の強さを決定するパラメータであり、共存解の個数に影響しない。よって、ある一定のパラメータ領域において、多くの共存解が存在することを示すことに成功したと言える。

$N = 5$ の場合には、退化固有値を考慮すると、振動モードの周波数成分が3個存在する。そのため、平均化法による振動モードの加算表現として得られる波は、1つの成分から構成される解であれば調和振動、2つの成分の加算であれば2重モード振動、3つの成分の加算解であれば、

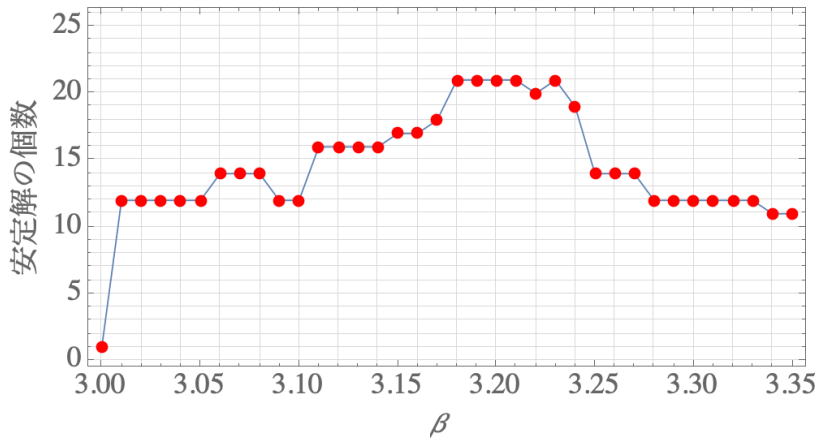


図1 共存する安定解の個数

概周期振動に相当することになる。単一の周波数成分を有する調和振動解は、時空間的には移動しない定在波に相当する。一方で、2重モード振動のいくつか、および3つの成分が加算された概周期振動は時空間的に振幅エネルギーが移動するような波動解に相当することが分かった。平均化法により求められる振動モードの初期位相の位相関係に関して、図2のように示すことができる。このような位相構造を本研究で対象とする発振器結合系において存在することは文献に示されているようにすでに知られていたが、これらは振動エネルギーが環状の結合発振器間を移動しない解であり、図2(a), (b)のような位相構造を有する振動モードの2個以上

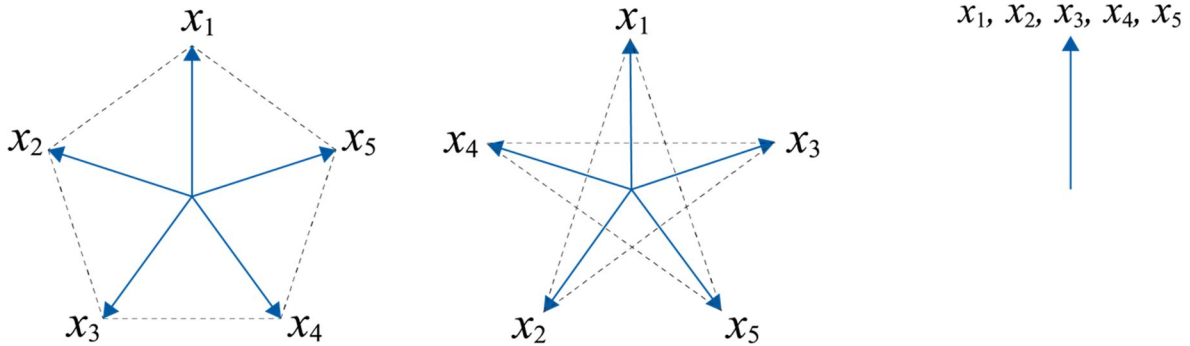


図2 5個の発振器結合系における振動モードの位相関係

の加算の結果として得られる解が、振幅エネルギーが移動する波動解に対応することを新たに確認した。特に、図3に示すような概周期振動が波動解に相当することを理論的に示すことに成功したことは、本研究における主な成果の一つである。また、これらの近似理論解から波動解の位相速度や群速度といった情報を得ることができた。さらに、近似理論解により、対象とする解の初期条件が決定できる。これにより図4の数値計算結果に示されるように、多数の共存解の中から目的の解を導出するための条件を得ることができるようになる。また、多数の共存解が存在するこのような波動解は最大でも3つの周波数成分でしか構成されていないため時空間的に局在したような波動には相当しない。しかしながら、得られた近似解から得られた初期条件が、非線形性が強くなる場合に現れる局在化した波動解(図5)を観測するために有意義である可能性を数値計算的に示すことに成功した。

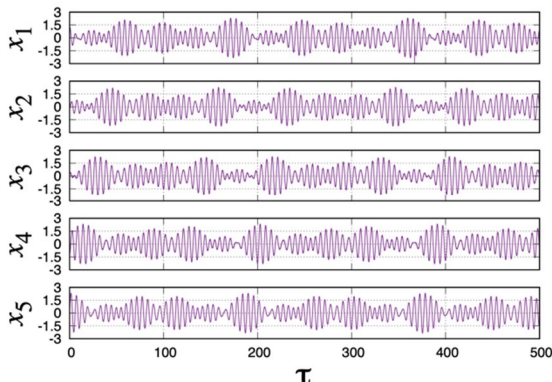


図3 近似理論解

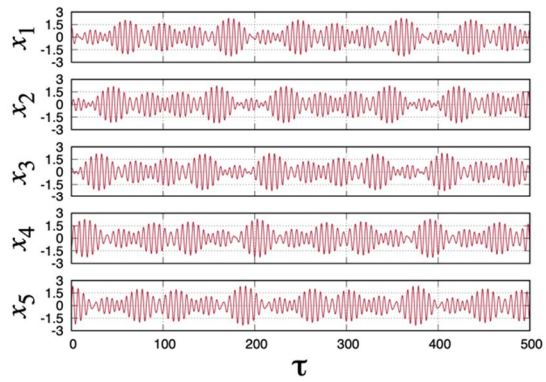


図4 図3の解に対応する数値計算結果

本研究では回路実験による波動解の実証も試みた。回路素子値の誤差や熱雑音等は実際の実験においては不可避なため、上記で得られた近似理論解の頑強性を示すことにつながる。図6(a)

および(b)は回路実験により得られた概周期振動およびその周波数スペクトルの図である。これより、図3と同等な解が回路実験においても観測できること、およびこれらの周波数成分が主要な3つの振動成分から構成されることを示すことができた。

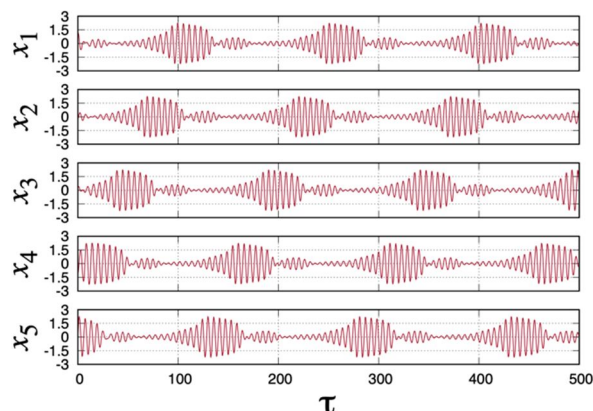
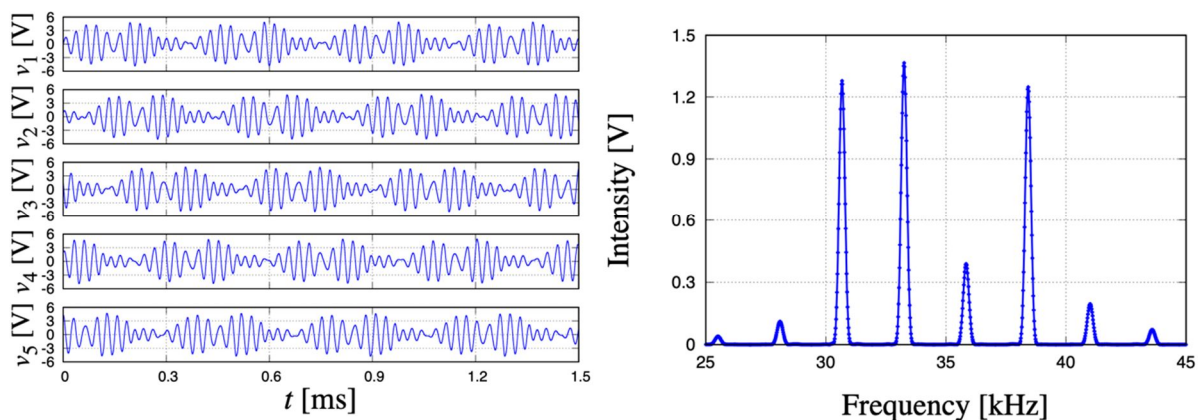


図5 強非線形系に現れる局在化した波動解を図3の近似理論解の初期条件を用いて求めた数値計算結果



(a)時間波形

(b)周波数スペクトル

図6 回路実験により得られた波動解

< 引用文献 >

遠藤 哲郎, 非線形回路, コロナ社, 2004

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 11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 Kuniyasu Shimizu	4. 巻 E13-N
2. 論文標題 Analysis of averaging method for propagating and standing waves in five mutually-coupled bistable oscillators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 NOLTA, IEICE	6. 最初と最後の頁 -
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 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 Kuniyasu Shimizu	4. 巻 1
2. 論文標題 Analytical study on localized waves in mutually-coupled five bistable oscillators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 International Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 226-229
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 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 Akira Sewaki, Kuniyasu Shimizu	4. 巻 23
2. 論文標題 Amplitude Decaying Characteristic in a One-Dimensional Continuous Microcantilever Probe Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 137-140
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2299/jsp.23.137	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 Yuma Sato, Kuniyasu Shimizu	4. 巻 23
2. 論文標題 Influence of a Heterogeneous Sample Surface on a Driven Microcantilever Probe Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 141-144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2299/jsp.23.141	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 Kuniyasu Shimizu, Tetsuro Endo	4. 巻 1
2. 論文標題 Pattern formation originating from multimode oscillations in five-coupled bistable oscillators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems 2019	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISCAS.2019.8702467	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 Kuniyasu Shimizu, Tetsuro Endo	4. 巻 1
2. 論文標題 Phase relationship of propagating waves in coupled bistable oscillators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 International Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 1-4
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 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 Akira Sewaki, Nobuo Satoh, Kuniyasu Shimizu	4. 巻 1
2. 論文標題 Side-band frequency components in a driven micro-cantilever probe continuous model of amplitude-modulation atomic force microscope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 International Symp. on Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 1-4
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 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 Tsumumi Aikawa, Kuniyasu Shimizu	4. 巻 1
2. 論文標題 Analytical study on a micro-cantilever probe model with one degree of freedom for atomic force microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 343-346
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 Seiya Takano, Kuniyasu Shimizu	4. 巻 1
2. 論文標題 Numerical study on injection locked and unlocked states in two-coupled multi-phase ring oscillators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 2020 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 339-342
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 Kuniyasu Shimizu, Naohiko Inaba	4. 巻 28
2. 論文標題 Experimental and Numerical Observation of Successive Mixed-Mode Oscillation-Incrementing Bifurcations in an Extended Bonhoeffer-van der Pol Oscillator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Bifurcation and Chaos	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218127418300471	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 Naohiko Inaba, Hidetaka Ito, Kuniyasu Shimizu, Hiromi Hikawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Complete mixed-mode oscillation synchronization in weakly coupled non autonomous Bonhoeffer-van der Pol oscillators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Expo. Phys.	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty065	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 Kuniyasu Shimizu, Tetsuro Endo	4. 巻 1
2. 論文標題 Velocity of propagating waves in weakly five-coupled bistable oscillators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 575-578
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 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 Katsuhiko Ogawa, Naohiko Inaba, Tetsuro Endo, Kuniyasu Shimizu	4. 巻 1
2. 論文標題 Demonstration of various synchronized and synchronized mixed-mode oscillations from a two-coupled driven Bonhoeffer-van der Pol Oscillator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 227-230
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 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9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Kuniyasu Shimizu
2. 発表標題 Oscillation mode analysis of a propagating wave in mutually-coupled bistable oscillators
3. 学会等名 LCM2021(Localisation in condensed matter) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坪久田崇史, 清水邦康
2. 発表標題 ケルビンプローブフォース顕微鏡 1 自由度連続体カンチレバーモデルにおける 2 次振動モードの周波数特性に関する研究
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ / NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬脇 顕, 清水 邦康
2. 発表標題 1次元カンチレバーモデルでの1次及び2次振動モードの定常振幅値と探針試料間距離の関係
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seiya Takano, Kuniyasu Shimizu
2. 発表標題 Influence of number of inverters in a two-coupled ring oscillators
3. 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬脇顕, 清水邦康
2. 発表標題 1次元連続体カンチレバースプローブモデルにおける原子間力が高次モード成分に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ / NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣田吉将, 佐藤悠真, 清水邦康
2. 発表標題 マイクロカンチレバースプローブモデルにおける探針試料間が位相特性に及ぼす影響
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Sawaki, Kuniyasu Shimizu
2. 発表標題 Amplitude variational characteristics of a driven micro-cantilever continuous probe model
3. 学会等名 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daiki Uchida, Akira Sawaki, Kuniyasu Shimizu
2. 発表標題 Numerical study of mechanical oscillating behavior of Kelvin probe force microscope model
3. 学会等名 2019 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaru Takahashi, Kuniyasu Shimizu
2. 発表標題 Experimental study of propagating wave phenomena in five-coupled bistable oscillators
3. 学会等名 2019 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2019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