

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04444

研究課題名(和文) 共振器内蔵ナノ光ファイバを駆使した高輝度単一光子源の創成

研究課題名(英文) Realization of a bright single photon source using nanofiber Bragg cavity

研究代表者

竹内 繁樹 (Takeuchi, Shigeki)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：80321959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高い確率で同一性の高い光子を発生させる単一光子源の実現をめざし、ダイヤモンド中のシリコン欠陥(SiV)中心などの単一発光体と共振器内蔵ナノ光ファイバのハイブリッド素子の実現に向け研究を進めた。その結果、SiV内包ナノダイヤモンドを効率的に作製する新規方法を発案、またそのサンプルが極低温(4K)において分光器分解能(0.1 nm)以下の細い線幅を有することを確認した。さらに、hBN欠陥中心と共振器内蔵ナノ光ファイバのハイブリッド素子や、線形光学限界を超えた量子相関をもつ多光子多モード状態の実現にも成功した。以上のように、高効率単一光子源の実現に関する様々な研究成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、シリコン欠陥中心内包極微ナノダイヤモンドの効率的な作製方法の確立と極低温での評価、さらに六方晶窒化ホウ素中の欠陥中心と共振器内蔵ナノ光ファイバのハイブリッド素子の実現、さらに線形光学限界を超えた量子相関をもつ多光子多モード状態の実現など、高効率単一光子源の実現とその応用に関する様々な成果が得られた。これらは、量子光学やナノフォトニクス分野における学術的に高い意義が認められ、Science Advancesなどの権威ある学術誌に論文として掲載されている。また、将来的には、光量子情報通信処理や光量子センシングなどの応用の社会実装にとり重要なステップとなる成果である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have investigated the realization of a single photon source that generates identical photons with high probability. In particular, a hybrid device of a single photon emitter such as silicon defect (SiV) centers in diamond and a microcavity-embedded nano-optical fiber. As a result, we have developed a novel method to efficiently fabricate SiV-embedded nanodiamond and confirmed that the sample has a narrow linewidth below the resolution of a spectrometer (0.1 nm) at 4 K. Furthermore, we have succeeded in realizing hybrid devices of hBN defect centers and resonator-embedded nano-optical fibers, as well as multi-photon multi-mode states with quantum correlations beyond the linear optics limit. As described above, we have obtained various research results on the realization of highly efficient single-photon sources.

研究分野：量子光学・量子情報・光量子センシング

キーワード：単一光子 ナノ光ファイバ ダイヤモンド 量子情報

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、「量子もつれ」などの量子力学の本質的な性質を用いる「量子科学・技術」が注目を集めている。量子の中でも「光子」は、長距離伝送が可能であり、またその精密な状態制御が室温で可能であることから、量子通信や量子計測などへの応用が期待されている。量子計測に関して我々のグループは、4光子の経路に関するもつれ状態を用いることで、干渉計の位相測定感度の標準量子限界を超えられることを示し (Science 2007)、その原理を微分干渉顕微鏡に応用した「量子もつれ顕微鏡」を実現した (Nat. Comm. 2013)。また、複数の光子を、半透鏡で構成された光回路に入力する「ボソンサンプリング」は、その量子状態の推定がもはやスーパーコンピュータの能力を超える、いわゆる「量子超越性」を期待されるだけでなく、グラフ問題への応用なども期待されている。また、そのような系から出力される「多光子・多モード」もつれ状態は、量子暗号通信の長距離化 (量子リピータ) への応用も期待されている。

これらの光量子科学においては、いかに多数の光子からなる、複雑な量子もつれ状態を実現しうるかが重要である。例えば、光量子計測では、同じプローブ光量で比較した場合、量子干渉計は、もつれ状態の光子数を N として、 N 倍の感度向上が期待されている。ボソンサンプリングの量子超越性は、20光子程度で実現できると期待されているが、現在まだ光子数は5光子に留まっている。この光子数を増大させることが出来れば、これらの光量子技術のアドバンテージが飛躍的に増すとともに、人類の「量子状態」や「光」に対する新たな理解の可能性を大きく開くことができる。

光子数の増大に対して、最大の障害となっているのが、「高い確率で、同一性の高い光子を発生させる単一光子源が実現していない」事であった。研究開始当時、量子ドットとナノキャビティを組み合わせた単一光子源の研究が進展していたが、単一モードファイバへの光子の結合の困難さから、各パルス中で光子が検出される確率は最大16%程度に留まっていた。

2. 研究の目的

本研究では、「同一性の高い光子を高い効率で単一モードファイバに射出する単一光子源の実現」を目的として研究を実施した。具体的には、シリコン欠陥中心 (SiV) を内包したダイヤモンド微粒子 (ナノダイヤモンド) を、微小共振器を内蔵したテーパ光ファイバに結合したハイブリッド素子の実現にむけた研究を推進した。本研究で用いる微小共振器を内蔵したテーパ光ファイバは、申請者が発案した素子である (Sci. Rep. 2015)。また、ダイヤモンド SiV についても、非常に小さな (25 nm 以下) のナノダイヤモンドを利用することを構想した。さらに、多数の光子が多数のモードに存在する複雑な量子もつれ状態 (多光子多モード量子状態) についての研究も目的とした。

3. 研究の方法

シリコン欠陥中心 (SiV) 内包ナノダイヤモンドを微小共振器内蔵テーパ光ファイバに結合した、ハイブリッド素子の実現に向けて、

研究項目 A : SiV 内包ナノダイヤモンド等の単一発光体の特性解明に関する研究

研究項目 B : 共振器内蔵ナノ光ファイバの高度化ならびに単一発光体との結合に関する研究

研究項目 C : 多光子多モード量子状態の理論的理解と実験的検証に関する研究

の3つの項目に関して研究を推進した。

また、研究代表者の竹内が研究統括・解析を行い、同じ研究室に所属する研究協力者の岡本亮准教授、ならびに高島秀聡助教 (2023年4月より千歳科学技術大学准教授) と連携し、博士課程ならびに修士課程の学生と共同で実施した。また、デバイスの作成にあたっては、大阪大学産業科学研究所微細加工プラットフォームおよび QST 高崎量子応用研究所の、また多光子多モード状態の理論に関しては広島大学のホフマン ホルガ教授の協力を得た。

4. 研究成果

本研究において得られた代表的な研究成果を以下に述べる。

(1) 【研究項目 A】直径 6 nm の、SiV 内包極微ナノダイヤモンドの実現

ファイバ結合微小共振器を初めとするナノフォトニクス素子と結合させるためのナノダイヤモンドは、大きさが小さいほど散乱の影響が小さくなる。我々は、ETH チューリッヒ、QST、および京都大学白川研究室との共同研究により、爆縮法で作成した大きさ 6 nm と知る限り最小の SiV 内包ナノダイヤモンドの実現に成功した (Shimazaki et. al., Physica Status Solidi (2021))。また、本成果は、Physica Status Solidi のカバーアートに採用された。

(2) 【研究項目 A】極細線幅の SiV 内包ナノダイヤモンドを高効率で作製する新規手法の発案

従来の SiV 内包ナノダイヤモンドの作製方法は、一般に化学気相成長法 (CVD) で作成されたバルクのダイヤモンドに Si を適当な方法で混入させ、その後破碎する方法であったが、

SiV 内包ナノダイヤモンドの収率が低いことが問題であった。我々は、ナノダイヤモンドに Si をイオン注入した後に適切な加熱（アニーリング）を行うことで高い効率で SiV 内包ナノダイヤモンドを作製する新規手法を提案、さらに室温での蛍光分光測定の結果、ゼロフォノン線の線幅 7nm と、従来の作製方法による良質なサンプルでの観測値に匹敵する小さい値を得た(Takashima et. al., Optical Material Express (2021))。

- (3) 【研究項目 A】新規手法で作製した SiV 内包ナノダイヤモンドの極低温での評価
前述の新規手法で作製した SiV 内包ナノダイヤモンドを、本助成により導入した極低温クライオスタットおよび分光器を利用して評価した。その結果、絶対温度 4K での蛍光分光測定で、分光器の分解能以下(0.1 nm)のゼロフォノン線幅を観測した。これは、この SiV 内包ナノダイヤモンドから放出される光子が、良好なコヒーレンスを有する可能性を示唆する結果である (Shimazaki et. al., 論文投稿中)。
- (4) 【研究項目 A】六方晶窒化ホウ素(hBN)中結晶欠陥のアンチストークス励起法による単一光子発生
層状の低次元半導体である hBN 中の結晶欠陥中心は、室温において、SiV よりもさらに細いゼロフォノン線幅を示すことから、単一発光体として注目されている。我々はシドニー工科大との共同研究により、単一発光体のゼロフォノン線よりも長い波長のレーザ光で励起する「アンチストークス励起」を用いることで、バックグラウンド発光を抑制しつつ、選択的に特定の波長の欠陥を励起できることを見出した。本成果は国際会議(Okashiro et. al., CLEO 2024、米国)で口頭発表に採択された。
- (5) 【研究項目 B】hBN ナノフレーク中の結晶欠陥中心と、共振器内蔵ナノ光ファイバの結合
六方晶窒化ホウ素 (hBN) 中の結晶欠陥中心は、室温においても鋭い線幅をもつため、共振器内蔵ナノ光ファイバとの良好な結合が期待される。そこで我々は、ヘリウムイオン顕微鏡により作製した、共振波長 573 nm の共振器内蔵ナノ光ファイバに、hBN ナノフレークを結合させたハイブリッドデバイスを実現した。さらに、波長 532 nm の励起光を用いた実験により、共振波長である 573 nm において鋭い発光ピークを観測することに成功した (Tashima et. al., Scientific Reports (2022))。
- (6) 【研究項目 B】共振器内蔵ナノ光ファイバの共振波長制御の数値解析
これまでに我々は、共振器内蔵ナノ光ファイバは、固体共振器であるにもかかわらず、その張力を制御することで、可視域で 20 nm にもおよぶ幅広い共振波長制御が可能であることを明らかにしていた(Andreas, Scientific Reports (2015))。しかし、そのような共振波長制御が可能になる物理的なメカニズムは十分明らかになっていなかった。今回我々は、共振器内蔵ナノ光ファイバに張力を加えた際の構造変化と光学的な応答について、有限要素法をベースとした応力による構造変化と電磁界変化の同時解析を実施した。その結果は実験結果を再現するとともに、最大 40 nm の波長制御の可能性も示された(Takashima et. al., Optics Express (2023))。
- (7) 【研究項目 C】線形光学限界を超えた量子相関をもつ、多光子多モード状態の実現
多数の光子が様々な光学経路(モード)に量子相関を持ちつつ存在する「多光子多モード量子状態」は、光量子コンピュータや光量子センシング、また光量子暗号の長距離化のためのリソースとして非常に重要である。それらの応用には、必要となる多光子多モード状態を実現し、またそのような状態が実現していることを効率的に検証することが必要になる。一方、これまでの様々な研究では、半透鏡などの「線形光学素子」に、複数の単一光子を入射して量子状態を生成・制御する方法が用いられてきていたが、このような方法で任意の多光子多モード状態を実現しうるのかなどについてはよく分かっていなかった。
今回我々は、単一光子源と線形光学素子のみで実現できる多光子多モード状態(フォック状態)に対して、単一光子源と線形光学素子のみでは実現が不可能な多光子多モード状態(非フォック状態)の存在を理論的に明らかにした。さらに、非フォック状態に関しても、フォック状態から比較的容易に実現出来る非フォック状態(NF-AFS)と、生成が困難な本質的な非フォック状態(iNFS)に分類されることを示した。さらに、生成が最も困難である iNFS の一種を、2つの光子が3つの経路に存在する場合について、独自に開発したフーリエ変換光量子回路を駆使することにより実現した。また、iNFS は、含まれる光子のいずれかを検出しても、残りの光子が複数の経路の重ね合わせ状態に存在するという、一見不思議な性質(条件付きコヒーレンス)を示すことを見出し、この性質を利用した効率的な検証方法を提案、実現した状態が iNFS であることを実証した(Park et. al., Science Advances (2023))。

以上のように、高い確率で、同一性の高い光子を発生させる単一光子源の実現、ならびにそれを用いた、多数の光子からなる、複雑な量子相関をもった状態の理解に向け、当初の予定を超える成果も含め、多くの成果が得られた。

最後に、本研究に対する研究協力者である京都大学 岡本亮准教授、千歳科学技術大学 高島秀聡准教授、ならびに、量子科学技術研究開発機構 大島武様、阿部浩之様、小野田忍様、ETH チューリッヒ Takuya Fabian Segawa 博士、京都大学大学院工学研究科 白川昌宏教授、Frederick So 博士、シドニー工科大学 Igor Aharonovich 教授、Toan Trong Tran 博士、ヨハネスケプラー大学リンツ Andreas Schell 教授、広島大学 Hofmann F. Holger 教授のご協力に心より感謝申し上げます。

また、研究室の田嶋俊之特定研究員、向井佑助教はじめとするスタッフ各位、朴渠培君、嶋崎幸之介君、鈴木和樹君、岡城勇大君をはじめとする学生各位のご協力に感謝します。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Takashima Hideaki、Schell Andreas W.、Takeuchi Shigeki	4. 巻 31
2. 論文標題 Numerical analysis of the ultra-wide tunability of nanofiber Bragg cavities	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 13566 ~ 13575
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.483843	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 該当する
1. 著者名 Park Geobae、Matsumoto Issei、Kiyohara Takayuki、Hofmann Holger F.、Okamoto Ryo、Takeuchi Shigeki	4. 巻 9
2. 論文標題 Realization of photon correlations beyond the linear optics limit	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science Advances	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） 10.1126/sciadv.adj8146	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 Schwaller Nicolas、Park Geobae、Okamoto Ryo、Takeuchi Shigeki	4. 巻 106
2. 論文標題 Optimizing the coupling efficiency of spontaneous parametric down-conversion photon pairs into single-mode fibers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 043719/1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.106.043719	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 該当する
1. 著者名 Kamei Yuki、Bo Cao、Okamoto Ryo、Takeuchi Shigeki	4. 巻 107
2. 論文標題 Spatial separation of collinearly emitted broadband frequency-correlated photon pairs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 L010601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.107.L010601	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 M.Arahata, Y.Mukai, B.Cao, T.Tashima, R.Okamoto and S.Takeuchi	4. 巻 38
2. 論文標題 Wavelength variable generation and detection of photon pairs in visible and mid-infrared regions via spontaneous parametric downconversion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America B	6. 最初と最後の頁 1934-1941
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOSAB.425550	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.Takashima, A.Fukuda, K.Shimazaki, Y.Iwabata, H.Kawaguchi, A. W Schell, T.Tashima, H.Abe, S.Onoda, T.Ohshima and S.Takeuchi	4. 巻 11
2. 論文標題 Creation of silicon vacancy color centers with a narrow emission line in nanodiamonds by ion implantation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 1978-1988
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.424786	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 該当する

1. 著者名 B.Cao, M.Hisamitsu, K.Tokuda, S.Kurimura, R.Okamoto and S.Takeuchi	4. 巻 29
2. 論文標題 Efficient generation of ultra-broadband parametric fluorescence using chirped quasi-phase-matched waveguide devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 21615-21628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.426575	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 K.Shimazaki, H.Kawaguchi, H.Takashima, T F. Segawa, F T.-K. So, D.Terada, S.Onoda, T Ohshima, M Shirakawa and S.Takeuchi	4. 巻 218
2. 論文標題 Fabrication of detonation nanodiamonds containing silicon-vacancy color centers by high temprature annealing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phusica Sratus Solidi A	6. 最初と最後の頁 2100144/1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.202100144	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 該当する

1. 著者名 T.Tashima, H.Takashima, A W. Schell, T T. Tran, I Aharonovich and S.Takeuchi	4. 巻 12
2. 論文標題 Hybrid device of hexagonal boron nitride nanoflakes with defect centres and a nano-fibre Bragg cavity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific reports	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-03703-z	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 該当する

[学会発表] 計14件(うち招待講演 7件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 嶋崎幸之介、川口洋生、高島秀聡、T.Segawa, F. T.So, 寺田大紀、小野田忍、大島武、白川昌宏、竹内繁樹
2. 発表標題 極微ナノダイヤモンド中へのSiVセンターの作製
3. 学会等名 第44回量子情報技術研究会(QIT44)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内 繁樹
2. 発表標題 光子を用いた量子情報技術の現状と展望
3. 学会等名 2021年度第2回非ノイマン型情報処理へ向けたデバイス技術分科会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上真奈人、野原紗季、岡本亮、藤原彰夫、竹内繁樹
2. 発表標題 混合状態に対する 1 パラメータ連続適応量子状態推定
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内 繁樹
2. 発表標題 光量子センシングの現状と展望
3. 学会等名 「光の日」シンポジウム「光エレクトロニクスによる量子技術イノベーション」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Shimazaki, H.Kawaguchi, H.Takashima, T.F.Segawa, F.T.-K.So, D.Terada, S.Onoda, T.Ohshima, M.Shirakawa and S.Takeuchi
2. 発表標題 Creation of Silicon Vacancy Center in Detonation Nanodiamonds by High Temperature Annealing
3. 学会等名 International Symposia on Creation of Advanced Photonic and Electronic Devices 2022 and Advanced Quantum Technology for Future 2022 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木和樹、嶋崎幸之介、高島秀聡、阿部浩之、大島武、竹内繁樹
2. 発表標題 イオン注入法を用いた極微ナノダイヤモンドへの単一SiVセンターの作製
3. 学会等名 第46回量子情報技術研究会 (QIT46)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K.Shimazaki, H.Kawaguchi, H.Takashima, T.Segawa, F.So, D.Terada, S.Onoda, T.Ohshima, M.Shirakawa and S.Takeuchi
2. 発表標題 Creation of Silicon Vacancy Center in Detonation Nanodiamonds by High Temperature Annealing
3. 学会等名 CLEO-PR2022/ISOM'22/ODF'22 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高島秀聡、田嶋俊之、S. Andreas, T T. Toan, A. Igor, 竹内繁樹
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素欠陥中心の単一光子源応用
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋崎幸之介、鈴木和樹、岡城勇大、高島秀聡、阿部浩之、大島武、竹内繁樹
2. 発表標題 ナノダイヤモンド中へのイオン注入により作製したシリコン空孔中心の極低温評価
3. 学会等名 第48回量子情報技術研究会（QIT48）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡城勇大、嶋崎幸之介、鈴木和樹、高島秀聡、A. Igor、竹内繁樹
2. 発表標題 アンチストークス励起による六方晶窒化ホウ素欠陥中心からの単一光子発生
3. 学会等名 第48回量子情報技術研究会（QIT48）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S.Takeuchi
2. 発表標題 Generation and manipulation of broadband frequency entangled photons
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S.Takeuchi
2. 発表標題 Photonic quantum science and technology
3. 学会等名 Okinawa School in Physics 2023 : Coherent Quantum Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹内 繁樹
2. 発表標題 「量子もつれ」が拓く、新しい光センシングの世界
3. 学会等名 第40回浜松コンファレンス (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹内 繁樹
2. 発表標題 光子のふしぎと、光量子技術の拓く世界
3. 学会等名 日本物理学会大阪支部2023年度公開シンポジウム 物理と情報の融合：量子コンピュータって何だろう？ (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 高島 秀聡、竹内 繁樹	4. 発行年 2021年
2. 出版社 ニューダイヤモンド	5. 総ページ数 4
3. 書名 NEW DIAMOND	

1. 著者名 竹内 繁樹	4. 発行年 2022年
2. 出版社 一般社団法人レーザー学会	5. 総ページ数 4
3. 書名 レーザー研究	

1. 著者名 竹内 繁樹	4. 発行年 2023年
2. 出版社 精密工学会	5. 総ページ数 5
3. 書名 精密工学会誌	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>【研究室ホームページ】 京都大学工学研究科電子工学専攻竹内研究室 http://qip.kuee.kyoto-u.ac.jp/</p> <p>【アウトリーチ活動】 京都大学アカデミックディ2022、地域活性化活動「のきさきあるこ」ワークショップ「光の不思議を見つけよう!」、第40回浜松コンファレンス(2023)、日本物理学会大阪支部2023年度公開シンポジウム(2023)などで、一般市民向けの講演や実験実演等をおこなった。</p>

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
研究協力者	岡本 亮 (Okamoto Ryo)		

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
研究協力者	高島 秀聡 (Takashima Hideaki)		

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