

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14384

研究課題名（和文）GaAs半導体横型量子ドットを用いた単一電子とテラヘルツ光子の強結合状態の実現

研究課題名（英文）Realization of strong coupling states between a single electron and terahertz photons using GaAs semiconductor lateral quantum dots

研究代表者

黒山 和幸（Kuroyama, Kazuyuki）

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：20861602

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）：量子ドット中に捕捉した電子とオンチップのテラヘルツ(THz)共振器との強結合状態を実現するための研究を行った。二次元電子系を有するGaAs/AlGaAsヘテロ構造基板上に、オンチップTHz光共振器と、その近傍に表面ゲート電極によって形成される量子ドット構造を有する試料を作製した。この試料に対して外部からTHz電磁波を照射し、量子ドットの光電流スペクトルを計測した結果、二次元電子のサイクロトロン共鳴や量子ドットにおける電子励起が、THz光共振器とコヒーレントに相互作用していることを示す反交差信号を観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オンチップのTHz共振器と量子ナノ構造とのコヒーレント結合やそのような結合系の電気伝導を調べる研究はこれまで報告がなく非常にユニークな系である。光と電子が非常に強く結合したときに現れると予測される様々な新奇現象が、電子輸送の物理にどのような影響をもたらすのかを調べる強力なプラットフォームとなることを期待する。また、応用の面では、オンチップのテラヘルツ共振器を介して、THz電磁波の波長程度の距離を隔てた量子ドット間で遠隔のコヒーレント結合を実現したい。それにより、近年目覚ましい発展を遂げている量子ビットの開発において問題となっている、量子ビットの多重化や集積化の問題を解決に貢献する。

研究成果の概要（英文）：To realize coherent coupling between electrons confined in quantum dots and on-chip terahertz (THz) resonators, we fabricated an on-chip THz optical resonator and a nearby quantum dot formed by the surface gate electrodes on a GaAs/AlGaAs heterostructure wafer having a two-dimensional electron system. The sample was externally irradiated with THz electromagnetic waves, and we measured the photocurrent spectrum of the quantum dots. As a result, we observed the cyclotron resonance of the two-dimensional electrons and the electronic excitation in the quantum dots, and both show an anticrossing signal against the resonance mode of the THz optical resonator, indicating a coherent coupling between these electronic excitations and the THz optical resonator.

研究分野：半導体メソスコピック

キーワード：半導体量子ドット テラヘルツ 強結合

1. 研究開始当初の背景

光と物質の相互作用は、原子や電子、励起子などの準粒子によって構成される物質の内部構造を、それらの光応答を調べることによって、古くから研究がなされてきた。その例には、水素原子内部の電子の殻構造の理解[1]から半導体などの光媒質を利用したレーザーの研究[2]など枚挙に暇がない。

さらに近年になって、微細加工技術の著しい進歩によって人工的なナノスケール構造に局在化した光と物質の相互作用の研究が活発である。特に、量子ホール状態のランダウ準位や量子閉じ込め構造で生じるサブバンドが、テラヘルツ(THz)電磁波の光子エネルギーにおおよそ等しいことから、THz 帯域の光子と固体中の電子とのコヒーレントな相互作用(強結合)を実証した研究結果が報告され始めている[3-5,6]。最近では、THz 帯域でさらに強い相互作用を示す超強結合を実現しており[5]、量子相転移や仮想光子を用いた量子制御など、「強く相互作用する結合量子系においてどのような物理現象が発現するのか」という基礎学理的な問いに大きな関心が集まっている。このような強く結合した量子系の微視的な物理機構の解明には、単一の電子と THz 光子との強結合の実現が必須の課題である。特に、単一電子を用いることで、強結合状態におけるスピンのコヒーレンスといった非自明な物理現象を検証することも可能になるが、実験が技術的に困難であったために未だに報告がない。しかし近年、金属ナノギャップに接合した InAs 自己形成量子ドット[9]や単一分子[10]において THz 電磁波と電子の相互作用を観測した実験が報告されており、単一固体量子系と THz 光子との強結合状態を実現することも技術的に可能になりつつある。

2. 研究の目的

この背景の下で、申請者は、GaAs 半導体横型量子ドット中の電子を単一量子系として利用し、これを THz 共振器と結合させる実験技術を確認する。それにより、単一電子レベルで THz 光子と電子の相互作用に関する物理現象を検証する。さらに、電子のスピン自由度による電子伝導の制御技術を導入することで、強結合状態におけるスピンのコヒーレンスについて議論を行う。本研究は、現在喫緊の課題となっているスピン量子ビットを用いた固体量子計算の高温動作の実現にも大変重要である[11]。

3. 研究の方法

まず、GaAs/AlGaAs のヘテロ接合に二次元電子系を蓄積する半導体基板を成長した。その半導体基板の表面に電子線露光と金属蒸着により図 1 に示すような電極構造を作製した。図中のアルファベットの C の形をした電極が THz 帯域に共鳴周波数を持つスプリットリング共振器(SRR)として機能する[12]。SRR は、共鳴的に外部励起されると、金属のギャップにおいて、非常に強い THz 電場を誘起することができる(図 1(b))。したがって、この近傍に量子ポイントコンタクト(QPC)や量子ドットを形成することで、それらの中の電子励起と共振器とが、強められた THz 電場を介して電気双極子相互作用により強く相互作用するということを想定した試料設計となっている。

4. 研究成果

(1). 量子ポイントコンタクトによる二次元電子とスプリットリング共振器の超強結合の電氣的観測

図 1(a)に示された試料のサイドゲート電極と SRR に負電圧を印加して、SRR とサイドゲート電極との間に量子ドットや QPC を形成する。しかし、スプリットリング共振器の周辺には、QPC を伝導する電

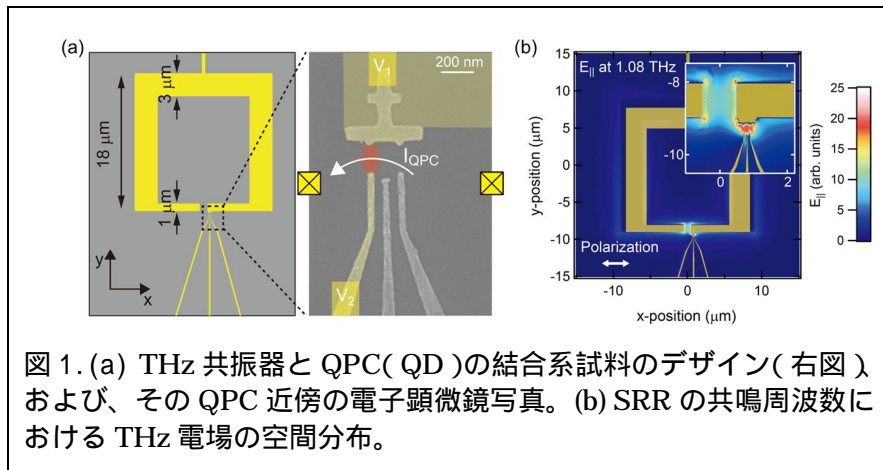


図 1. (a) THz 共振器と QPC (QD) の結合系試料のデザイン (右図) および、その QPC 近傍の電子顕微鏡写真。 (b) SRR の共鳴周波数における THz 電場の空間分布。

子のみでなく、もともと二次元電子が存在しているので、それと共振器との相互作用も無視できない。そこで、まず QPC をセンサーとして用いて、二次元電子と SRR との間で生じる相互作用について実験を行った。THz 光源には 2 つのレーザーの差周波を用いて生成するタイプのものを用いた。一方のレーザーの周波数を掃引することができるので、CW かつ周波数可変な THz 光源として機能する。そこで、QPC の試料に THz 電磁波を照射しその時に現れる QPC における電流変化 (簡単のため、この電流変化を以降は光

電流と呼ぶ) のスペクトルを異なる面直磁場に対して測定した。まず参照データとして、QPC を形成しない状態で、光電流スペクトルの磁場依存性を測定した。その結果、磁場に関して共鳴周波数が線形に増大する信号が現れた。この信号は、二次元電子のサイクロトロン共鳴のエネルギー分散により説明できることが確認できた。次に、QPC を形成した状態で、同様に光電流スペクトルの磁場依存性を測定した。その結果、磁場が 2~3T の領域において、明瞭な反交差信号が得られた。

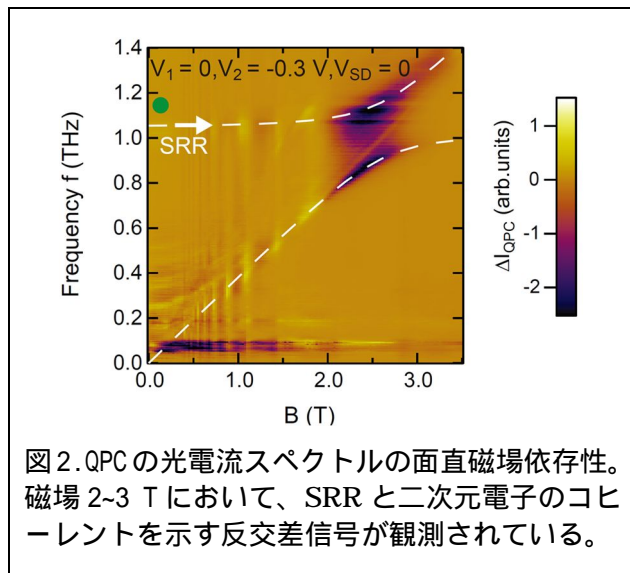


図 2. QPC の光電流スペクトルの面直磁場依存性。磁場 2~3 T において、SRR と二次元電子のコヒーレントを示す反交差信号が観測されている。

SRR の共鳴信号が 1THz 近傍に観測されているため、反交差信号は、SRR と二次元電子のサイクロトロン共鳴との間のコヒーレント結合に伴うものであることが分かった。さらに、Hop-field モデルにより導出された結合モードのエネルギー分散で反交差信号をフィッティングすると (図 2 の白点線) 両者の結合強度は 130GHz 程度と評価され、いわゆる超強結合状態と呼ばれる、回転波近似が適用できない非常に強い結合状態を実現していることが分かった。

これまでも SRR を用いた類似の研究は行われてきたが、通常、SRR の大きな二次元配列を形成し、その透過率などを光学測定するものがほとんどであった[12]。単一の SRR の結合状態を観測することは未だ技術的に難しく、反交差信号があまり明瞭ではなかったり、特殊な光学系を用いたりするものしか報告されてこなかった[13]。本研究では、単純で一般的な QPC 構造によって、単一 SRR の結合状態を非常に明瞭に観測する手法を発見したと結論付けることができる。本研究成果は、現在論文を執筆しており、近々学術論文として成果発表を行う予定である。

(2). 量子ポイントコンタクトや量子ドット中の電子励起と共振器とのコヒーレント結合の観測

上記の実験では、QPC の電氣的な閉じ込めが弱い条件で実験を行ったため、QPC において形成されるサブバンド間の電子励起は、光電流スペクトルにあまり反映されていない。一方で、ゲート電圧をより負にかけていくと、QPC におけるサブバンドのエネルギー間隔が開き、電子の伝導特性がサブバンド構造を強く反映したものになるはずである。そこで、ゲート電極をより負にかけた条件下で、光電流スペクトルの磁場依存性を測定した。その結果、サイクロトロン共鳴の信号よりも高い周波数で共鳴になる信号が現れた。これは、QPC のサブバンドの励起エネルギー

が、QPC の静電的な閉じ込めエネルギーとサイクロトロンエネルギーとの和で現されることから説明される。また、QPC の共鳴励起は、反交差信号の高周波側のモードをさらに高周波側に押し上げるような振る舞いが観測された。これは、二次元電子だけではなく、QPC に局在した電子の共鳴励起も同時に SRR に結合していることを示している。

このような反交差信号の変化は、SRR の近傍に量子ドットを形成して光電流スペクトルを測定しても同様に観測された (図 3)。そこで、量子ドット-スプリットリング共振器-二次元電子という三体の結合状態を考えて、そのエネルギー分散の計算値と実験で得られた光電流スペクトルと比較した。その結果、量子ドットと SRR の結合を考慮することで、反交差信号の高周波側のモードの振る舞いをよく説明できることが分かった。結合強度を評価すると、二次元電子と SRR の間では約 100GHz の結合強度となっており、やはり超強結合状態となっていることが分かった。さらに、量子ドットと SRR の結合強度は約 50 GHz と評価された。二次元電子の結合については、数 100 から数千もの電子が SRR に同時に結合することによって得られる集団的な結合強度である。一方で、量子ドットはその内部に電子を 3,4 個程度しか捕捉していないにもかかわらず、二次元電子の結合強度の半分もの結合強度実現していることが明らかになった。これは、量子ドットを形成するサイドゲート電極がアンテナとして機能することで、サイドゲート電極と SRR との間に SRR のギャップよりもさらに強い THz 電場を生成することができるためということの説明されることが分かった。この実験結果は発表論文リストのプレプリント論文で既に報告している。

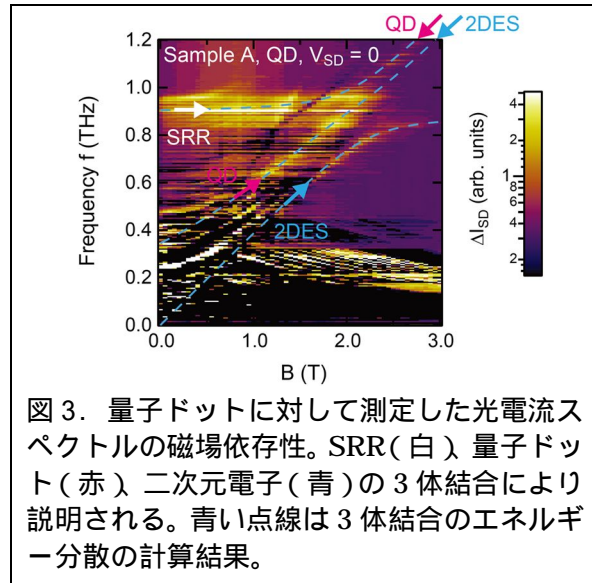


図 3. 量子ドットに対して測定した光電流スペクトルの磁場依存性。SRR (白)、量子ドット (赤)、二次元電子 (青) の 3 体結合により説明される。青い点線は 3 体結合のエネルギー分散の計算結果。

(3). 量子ポイントコンタクトや量子ドットによる二次元磁気プラズモンと高次サイクロトロン共鳴の観測

以上の実験の副産物的な結果として、QPC や量子ドットの光電流スペクトルを測定することで、SRR の構造に起因してその近傍の二次元電子系に励起される二次元磁気プラズモンも電氣的に観測できることが分かった。今回の研究で作製した試料においては、QPC や量子ドットを形成する場合には、SRR にも負電圧を印加しており、その直下の二次元電子は空乏化している。それによって、SRR の内側やギャップにおいては、有限幅の二次元電子が残存した状態になっている。このような有限幅の二次元電子系に電磁波が入射すると電荷疎密波であるプラズモンが二次元電子上に励起される。具体的な検出のメカニズムは明らかになっていないが、このようなプラズモンの形成する電磁場環境の時間的な変調が QPC や量子ドットの伝導度変化として観測できることが分かった。

また、同じ実験で高次のサイクロトロン共鳴信号が観測された。本来、二次元電子系の電磁場環境が空間的に一様な場合には、サイクロトロン遷移における軌道の選択測によって、高次のサイクロトロン励起は通常禁制となる。しかし、プラズモン励起があると電場の空間的な一様性が崩れるので、それによって高次のサイクロトロン励起が許容されるようになるという研究結果が報告されている [14]。

以上に説明した SRR のギャップにおいて励起されるプラズモン励起と二次のサイクロトロン共鳴信号との間に明瞭な反交差信号が観測された (図 4 の $B = 1.5$ T 近傍)。これはプラズモン励起と二次のサイクロトロン共鳴との間でエネルギーのコヒーレントなやり取りがあることを示している。さらに面白いことに、SRR やサイドゲート電極に印加した負電圧を大きくしていくと、三次のサイクロトロン共鳴信号が現れ、磁気プラズモンとの間に新たな反交差を形成することが明らかになった。これは、表面電極によって二次電子中の静電環境の空間的な非均一性が増大して、軌道励起に伴う選択測が破れ、より高次のサイクロトロン励起が許容されるようになったと直感的な説明ができる。二次元電子中にプラズモンを励起することによって、プラズモンと二次のサイクロトロン共鳴との反交差信号を観測したという報告はあったが、表面電極によってそのような結合状態を制御したという研究例はこれまでにない。現在、理論家との議論を重ねており、本結果も独立した学術論文として報告する段取りを進めている。

参考文献: [1] N. Bohr *Pil. Mag. Series 26*, 1 (1913). [2] T. H. Maiman, *Nature* 187, 493 (1960). [3] G. Paravicini-Bagliani et al., *Nature Phys.* **15** 186 (2019). [4] G. Günter, et al., *Nature* 458, 178 (2009). [5] A. Bayer et al., *Nano Lett.* **17** 6340 (2017). [6] M. Geiser, et al., *PRL* 108, 106402 (2012). [7] K. Hepp, and E. H. Lieb *Ann. Phys.* 76, 360 (1973). [8] S. D. Liberato, *PRL* 112, 016401 (2014). [9] Y. Zhang et al., *Nano Lett.* **15** 1166 (2015). [10] S. Du et al., *Nature Photo.* **12**, 608 (2012). [11] K. Ono et al., *Scientific Reports* 9, 469 (2019). [12] G. Scaleri et al., *Science* 335, 1323 (2012) [13] S. Rajabali et al., *Nature Communications* 3, 2528 (2022). [14] S. Holland et al., *Physical Review Letters* 93, 186804 (2004).

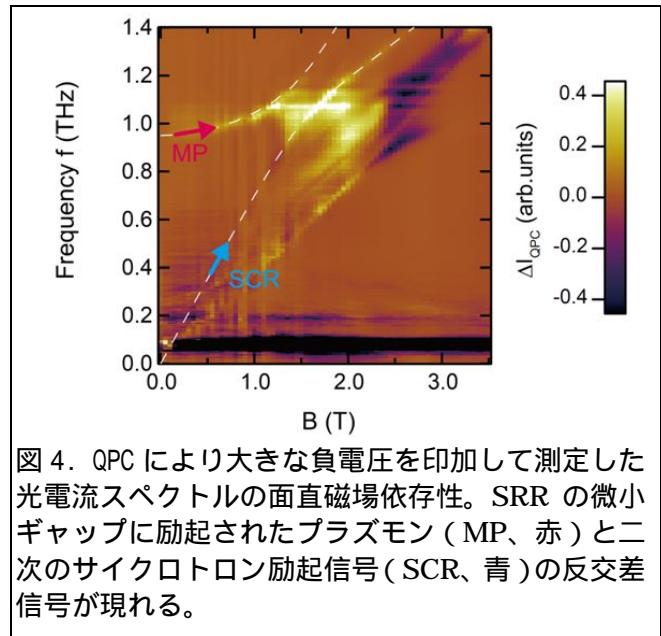


図 4. QPC により大きな負電圧を印加して測定した光電流スペクトルの面直磁場依存性。SRR の微小ギャップに励起されたプラズモン (MP、赤) と二次のサイクロトロン励起信号 (SCR、青) の反交差信号が現れる。

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 0件）

1. 著者名 Kazuyuki Kuroyama, Sadashige Matsuo, Seigo Tarucha, Yasuhiro Tokura	4. 巻 2303.057
2. 論文標題 Phonon-mediated spin dynamics in a two-electron double quantum dot under a phonon temperature gradient	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1,13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2303.05700	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 K. Kuroyama, J. Kwoen, Y. Arakawa, and K. Hiarakawa	4. 巻 2204.10522
2. 論文標題 Coherent interaction of a-few-electron quantum dot with a terahertz optical resonator in the ultrastrong coupling regime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1,17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/ARXIV.2204.10522	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 Kuroyama Kazuyuki, Matsuo Sadashige, Muramoto Jo, Yabunaka Shunsuke, Valentin Sascha R., Ludwig Arne, Wieck Andreas D., Tokura Yasuhiro, Tarucha Seigo	4. 巻 129
2. 論文標題 Real-Time Observation of Charge-Spin Cooperative Dynamics Driven by a Nonequilibrium Phonon Environment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 95901
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.129.095901	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 Matsuo Sadashige, Kuroyama Kazuyuki, Yabunaka Shunsuke, Valentin Sascha R., Ludwig Arne, Wieck Andreas D., Tarucha Seigo	4. 巻 2
2. 論文標題 Full counting statistics of spin-flip and spin-conserving charge transitions in Pauli-spin blockade	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.033120	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7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 黒山和幸
2. 発表標題 電荷・スピン・光子のテラヘルツ量子インターフェース
3. 学会等名 応用物理学会 第70回春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuyuki Kuroyama, Jinkwan Kwoen, Yasuhiko Arakawa, Kazuhiko Hirakawa
2. 発表標題 Coherent Interaction Between A Gate-Defined Quantum Dot And A Terahertz Split-Ring Resonator In The Ultrastrong Coupling Regime
3. 学会等名 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Kuroyama, Jinkwan Kwoen, Yasuhiko Arakawa, Kazuhiko Hirakawa
2. 発表標題 Ultra-strong coupling in a hybrid quantum system of a quantum dot and a terahertz split-ring resonator observed by magnetoterahertz photocurrent spectroscopy
3. 学会等名 24th International Conference in Electric properties of Two-Dimensional Systems/ 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒山和幸, 權晋寛, 荒川泰彦, 平川一彦
2. 発表標題 GaAs横型量子ドット・テラヘルツ共振器結合系の磁気分光
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒山和幸、権晋寛、荒川泰彦、平川一彦
2. 発表標題 GaAs2次元電子系に形成した量子ポイントコンタクトにおけるサブバンド間共鳴励起現象の観測
3. 学会等名 応用物理学会2021年度春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒山和幸、権晋寛、荒川泰彦、平川一彦
2. 発表標題 テラヘルツ共振器によるGaAs2次元電子系量子ホール磁気伝導への反作用の観測
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuyuki Kuroyama, Sadashige Matsuo, Sascha R. Valentin, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Yasuhiro Tokura, Seigo Tarucha
2. 発表標題 GaAs横型半導体量子ドットを用いた非平衡フォノン環境下における単一電子スピンの実時間測定
3. 学会等名 Spintronics-RNJ Online Workshop 2020
4. 発表年 2020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
---------	---------