

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04341

研究課題名（和文）量子力学に基づいた低周波数帯における電磁波の可視化技術に関する研究

研究課題名（英文）Study on a visualization method for electromagnetic fields in low-frequency band based on a quantum phenomena

研究代表者

石居 正典（ISHII, MASANORI）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：50356432

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、アンテナや電磁界センサ等をスキャンする事で電磁波の2Dや3D分布をマッピングする手法ではなく、特定の気体原子、レーザー光、可視化の対象となる電磁波の間における相互作用と、近赤外線領域で存在する蛍光作用を利用し、その作用を近赤外線領域で応答するカメラ等で撮影する事で実現する、新しいコンセプトの電磁波可視化技術に関する研究を実施した。

実験システムの構築と安定化の他、提案手法のフィジビリティスタディを実施し、低周波数帯でループアンテナから照射される電磁波をトリガーとして、近赤外領域での蛍光の量の変化を、近赤外光の観測が可能なカメラで観測する事に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

われわれ人間は、いわゆる「電波」と言われる領域の電磁波を、五感を使って直接的に観察する事は出来ない。この事は、音や光と違い「電波」を直接的に理解する事を難しくしている。もしも、電磁波を視覚的に理解するために可視化をして観測する事が可能になれば、数式や計算機シミュレーション等による解析的ではなく、実物を直接的に理解する事も可能になるため、学術的意義も大きい。また、電子機器やアンテナ設計の分野においては、直接視覚的に理解しながら設計が可能になると言う新たな革新をもたらす可能性もあり、将来、社会的意義も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we are researching and developing a new type of electromagnetic field visualization method. In general, electromagnetic field visualization methods use electromagnetic field sensors with antenna elements and receivers, which draws the received electromagnetic field strength distribution on a 2D or a 3D map.

On the other hand, in our method, gaseous cesium-133 atoms, a laser, and electromagnetic fields under observation are used in lieu of general antenna elements and receivers. If a resonant laser and electromagnetic fields irradiate the gaseous atoms simultaneously, fluorescence of the light is stronger in a near infrared region. The difference between the strength values of the fluorescence can be used for electromagnetic field visualization.

We succeeded in demonstrating a feasibility study of our proposing method for an electromagnetic field radiated from a loop antenna in a kHz-band.

研究分野：電磁環境工学、アンテナ、計測

キーワード：電磁波可視化 電磁界測定 磁界センサ セシウム原子

1. 研究開始当初の背景

人間は五感を使って、いわゆる「電波」と言われる領域の電磁波を直接的に観察する事は出来ない。この事は、音や光と違い「電波」を直接的に理解する事を難しくしている。そこで、電磁波を視覚的にも理解するために可視化をして観測するための様々な研究が行われている。しかし、「電波」の領域の電磁波の周波数帯域は、数 kHz から MHz 帯を得て数百 GHz までと非常に広く、波長にすると mm から km のオーダーと幅広いため、電磁波としての性質は周波数帯によって大きく異なる。このため、電磁波の可視化技術は幅広い周波数に対して対応可能である事も求められている。

従来の電磁波の可視化技術と言え、アンテナや電磁界センサをアレイ化するか、または空間中でそれらを掃査する事により受信して得られる電磁界の強度分布のデータを、二次元や三次元にマッピングして表示する方法が一般的である。しかし、アンテナをアレイ化または掃査する手法である場合、リアルタイムな可視化が困難と言う問題点がある。また、システムも大掛かりで複雑になる傾向もあり、さらに処理するデータ量も膨大になる傾向もあるため、経済的な負担も大きいと言える。

一方、本研究で提案及び検討する電磁波の可視化手法は、アンテナや電磁界センサ等は用いず、特定の気体原子、レーザー光、電磁波の3者の間において、近赤外線領域で存在する蛍光作用を利用する新しいコンセプトの次世代型の電磁波可視化技術に関する研究となっている。

2. 研究の目的

本研究は、電波領域の電磁波の可視化技術の1つとして、古典電磁気学をベースとするアンテナ技術を使用した物ではなく、量子力学をベースとする近赤外線領域での蛍光作用を利用する新たなコンセプトによる電磁波可視化の手法を研究開発して提案する事を目指している。

これまでに我々が実施した先行研究では、ホーンアンテナから放射される GHz 帯の特定の電磁波(MW)に対しては、提案手法が実現可能である事を確認している[1]。しかしながら、対象となる周波数が 9.2 GHz 付近に限定されていた。そこで本研究では、より低い周波数帯の電磁波に対する電磁波可視化の実現を念頭に、ターゲットとなる電磁波の周波数の拡張を目指す。

電磁波には電界と磁界の両成分があるが、ここでは磁界成分を対象とし、また対象とする周波数については kHz から MHz の低周波帯をターゲットにした。新たな実験システムの構築の他、提案する電磁波可視化手法に関するそもそもの可否を判断する目的で、フィージビリティスタディーを実施した。

本研究では、エネルギー間の遷移に利用する MW と被観測対象となる低周波帯の電磁波(RF)の2つの周波数帯の電磁波を利用する。これらの発生には、MW に対してはホーンアンテナ、RF に対してはループアンテナから放射される電磁波を利用し、それらの電磁波を ^{133}Cs の気体原子が封入されたガラス製のセル内の空間領域に照射する。またここで、事前にレーザー光もこのガラス製のセル内の空間領域を通過させておくが、ループアンテナから照射される RF をトリガーとして、近赤外線領域での蛍光の量が変化する事が期待できる。そこで、近赤外光の観測が可能なカメラでその蛍光量の変化を観測する事で RF の可視化観測が可能になると考えられるため、提案手法の可否を左右する事になるこの蛍光量の変化を観測する事を最大の目標とした。

3. 研究の方法

本研究では、セシウム(^{133}Cs)の気体原子、波長 852 nm のレーザー、電磁波(MW と RF)の間での共鳴現象等の相互作用を常温で利用する。この ^{133}Cs では、基底状態における超微細構造は 9.2 GHz の MW と共鳴を起こす事がよく知られているが、この基底状態にはさらに磁気副準位が存在する。この磁気副準位はエネルギー差が小さいため、GHz 帯より低い MHz や kHz 帯の周波数の電磁波と共鳴を起こす事が期待できる。そこで、この基底状態の超微細構造間のエネルギー差と磁気副準位間のエネルギー差に着目し、9.2 GHz の電磁波である MW の他に所望の低周波数帯の電磁波である RF を ^{133}Cs の気体に同時に照射する。

しかしながら、電磁波は ^{133}Cs 原子に作用する光子エネルギーが非常に低いため、そのままでは ^{133}Cs 原子との相互作用から生じる信号は非常に微弱である。そのため、高いエネルギーを持つレーザー光(852 nm の近赤外光)を上記の2つの周波数の電磁波 MW と RF と同時に照射する多重共鳴を利用する。この多重共鳴において、所望の電磁波である RF の方をトリガーとして近赤外光の吸収または蛍光の量が変化する事が期待できるため、この変化量を近赤外線用のカメラ等で観測することで、所望の電磁波の相対的な強度差を観測する。この手法では、近赤外光の観測が可能なカメラで直接撮影する手法になるため、電磁波のリアルタイムな可視化への応用も期待できる。

図1に検証用実験システムの概要図と研究目標、図2にセシウム原子の基底準位の超微細構造間のエネルギー差と磁気副準位間のエネルギー差におけるレーザーと電磁波の遷移の概略図を示す。

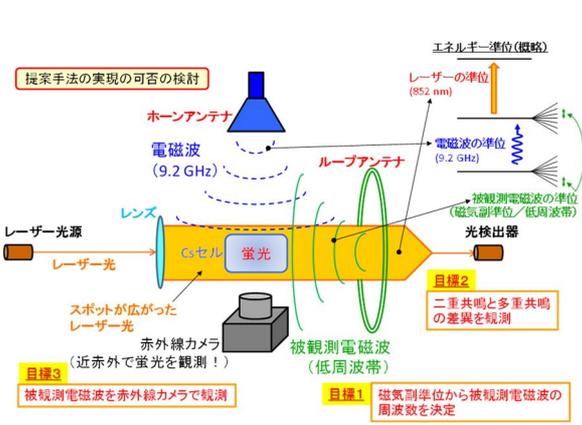


図 1. 測定システムの概要と研究目標

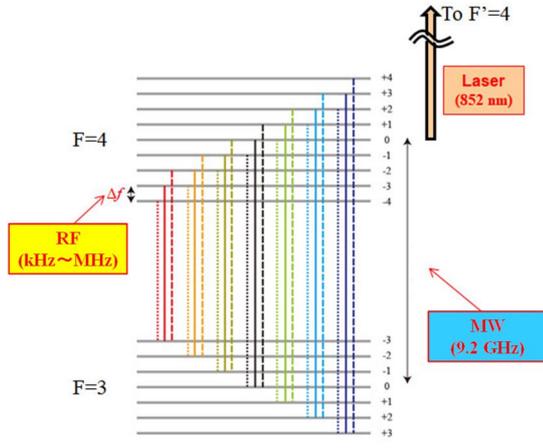


図 2. セシウム原子の基底準位の超微細構造間のエネルギー差と磁気副準位間のエネルギー差におけるレーザーと電磁波の遷移の概略図[3]

図 1 に示す様に、まず第 1 段階として実験システムの構築を行い、さらに構築したその実験システムにおいて、磁気副準位間のエネルギー差に関する情報から、可視化のターゲットとなる低周波数帯の RF の周波数を検討して決定する事とする。さらに第 2 段階として、 ^{133}Cs の気体原子が封入されたガラスセルに、852 nm のレーザー光と 9.2 GHz の MW、そして観測対象となる低周波帯の RF を同時に、または、個別に照射する。この時、原子と電磁波の相互作用として、照射された電磁波の磁界成分による ^{133}Cs の気体原子における二重共鳴と多重共鳴の吸収スペクトルをそれぞれ観測し、両者の間の差異を観測する。その上で第 3 段階として、近赤外光が観測可能なカメラ等を用いて、観測対象となる低周波数帯の電磁波の有無による差異を近赤外光における蛍光量の差異として観測する。以上の 3 つの段階の各目標のクリアを目指し、提案手法の実現の可否に関する研究を行った。

4. 研究成果

まず、磁気副準位間のエネルギー差に関する情報から、可視化のターゲットとなる低周波数帯の電磁波である RF の周波数を検討して決定する必要がある。この磁気副準位間のエネルギー差は、ゼーマン分裂を使用して、セシウム原子に外部から直流磁界を印加する事で変更する事が可能である。このため、この磁気副準位間のエネルギー差を広げたり、狭めたりする事で、磁界センサの測定対象となる周波数を連続的に変更して選択する事が可能である[2][3]。図 3 はこの原理を模式的に示した物である。

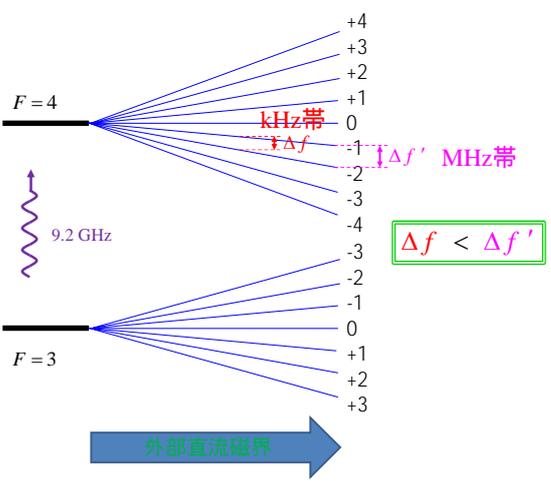


図 3. セシウム原子の基底準位の超微細構造間のエネルギー差(9.2 GHz)と磁気副準位間のエネルギー差(Δf と $\Delta f'$)における電磁波による遷移の概略図[3]

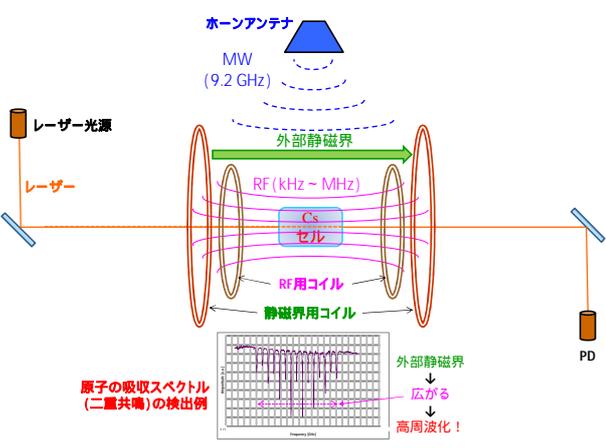


図 4. ゼーマン効果を利用した測定対象となる電磁波 RF の周波数の変更と選択のための検証システムの概略図[2]

一方、この原理の検証実験のための実験システムの概略図を示した物が図4である。この実験では、まずガラス製セルに封入した ^{133}Cs 気体原子に対し、波長が852 nmのレーザーを透過させ、そのレーザー強度をフォトディテクタ(PD)で観測できるようにしておく。またこの時、MWを9.2 GHz付近で1 kHzステップで掃引し、二重共鳴を観測できるようにしておく。ここでさらに、ゼーマン効果を利用するために、ガラス製セルに封入した ^{133}Cs 気体原子に対して外部から外部直流磁界を印加し、さらにその強度を調整する毎に二重共鳴を測定した。

それぞれの外部直流磁界の印加強度毎に観測された二重共鳴のスペクトルの周波数間隔が測定対象となるRFの周波数に該当する。本実験結果では、図5に示す様に10 kHz帯から1 MHz程度までの帯域での周波数の可変を確認する事ができた[3]。この結果を元に、低周波帯での可視化を試みる。

ガラスセルに封入した ^{133}Cs の気体原子に対して、852 nmの波長のレーザー光を照射すると、原子はそのレーザー光を吸収すると同時に、蛍光発光としての放出も行う。さらにここに、約9.2 GHzの周波数のMWを照射すると、蛍光発光として放出される光の強度が増加する。我々の先行研究では、この時のMWの有無や強度の変化を赤外線領域での蛍光発光の強度差として観測することで可視化を実現していたが[1]、一方で対象となる周波数が9.2 GHz付近に限定されていた。

本研究では、対象周波数を低周波帯へ変更するため、基底状態の ^{133}Cs に存在する磁気副準位間のエネルギー差にも同時に着目し、ここでの電磁波RFの吸収により赤外線の蛍光に与える増幅分を観測することで低周波帯における可視化を実現する事を確認する。なお図6には、提案する手法の原理の概要に関するイメージ図を示す。

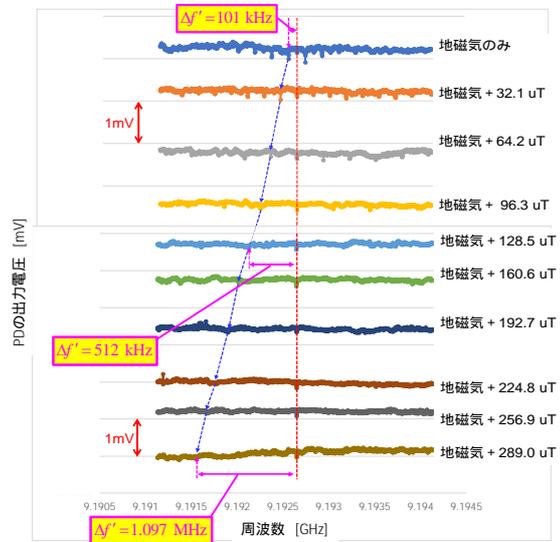


図5. 外部直流磁界強度の変更毎の二重共鳴の観測結果の比較[3]

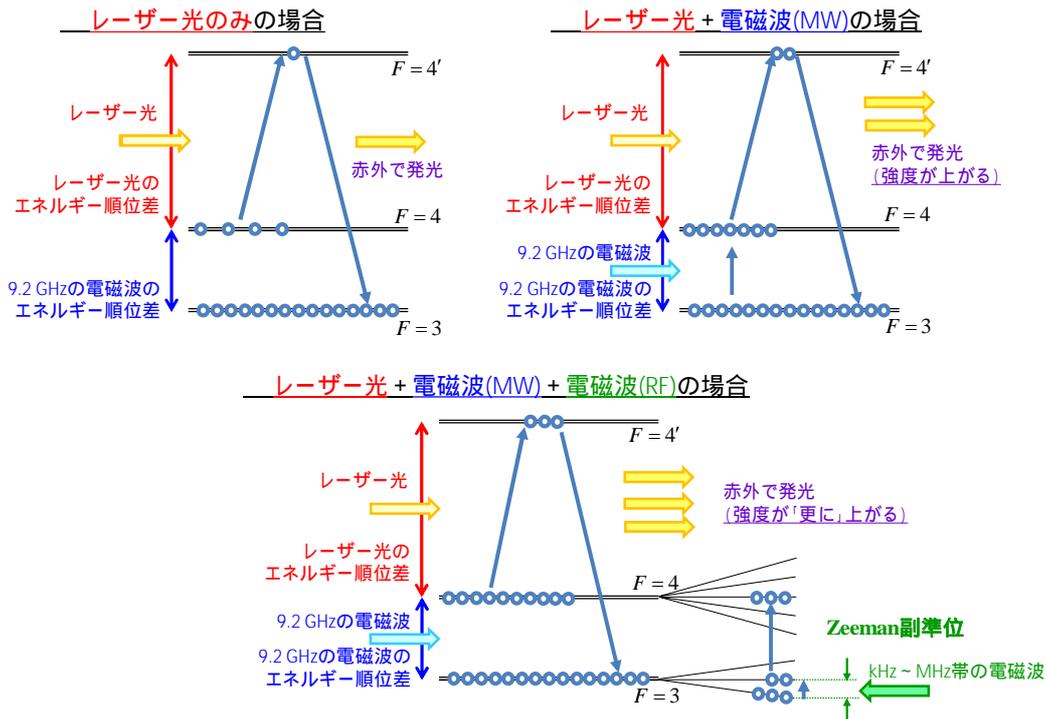


図6. 低周波帯における可視化技術の原理の概要[4]

(レーザー光のみの場合、 更に9.2 GHz電磁波(MW)を加えた場合、 更に低周波帯の電磁波(RF)を加えた場合)

検証実験のため、ループアンテナから放射されるkHz帯のRF(具体的には磁界成分)の観測実験を行った。Xバンド帯の標準ホーンアンテナの開口部とループアンテナの近傍に、 ^{133}Cs の気体を封入した11 cm×11 cm×2 cmの大型のガラス製セルを配置し、その中にレーザー光を透過

させる。このレーザー光を赤外線観測ができるカメラで観測すると、ループアンテナから照射される電磁波 RF の ON/OFF により、レーザー光線上で蛍光発光が観測できる事が図 7 に示す様に確認できた。なおここでは、磁気副準位の間隔を 100 kHz に調整し、100 kHz の RF の磁界成分の可視化に成功した[4]。

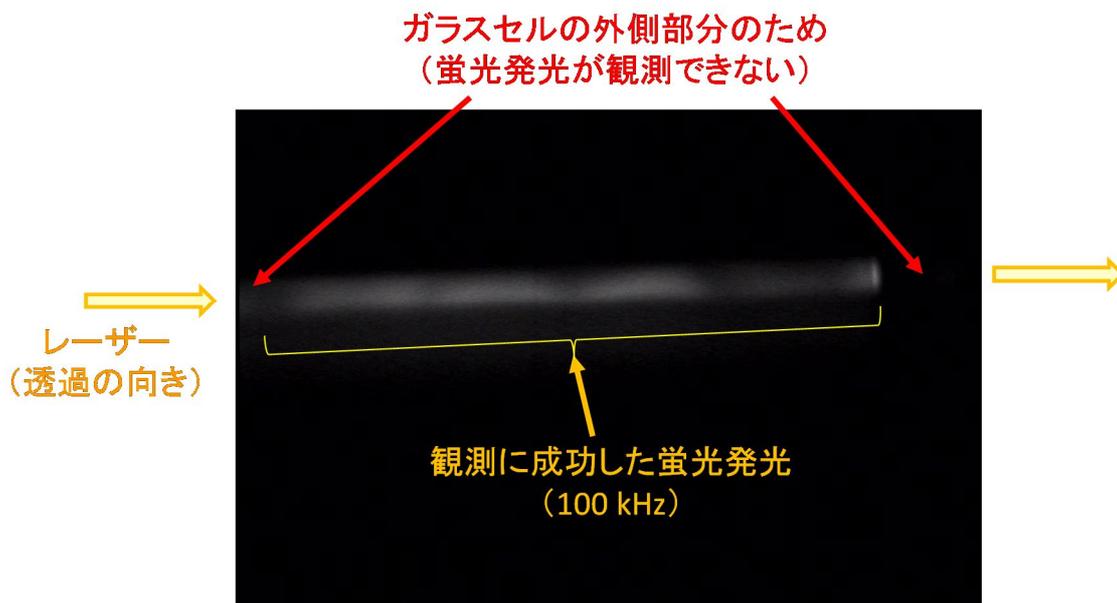


図 7. 100 kHz の RF の磁界成分の観測結果[4]

<参考文献>

- [1] 石居正典, 木下基, “量子現象に基づく電磁波可視化技術の初期検討,” 信学ソ大, B-4-45, pp.248, 9月(2017).
- [2] 石居正典, “セシウム原子の多重共鳴を利用した交流磁界センサの高周波化の検討,” 信学ソ大, B-4-42, pp.239, 9月(2019).
- [3] 石居正典, “磁界標準のための Cs 原子を用いた交流磁界センサの研究開発の初期検討,” 信学総大, BI-13-6, pp.SS103-104, 3月(2021).
- [4] 石居正典, “セシウム原子の磁気副準位間のエネルギー差を利用した kHz 帯における電磁波可視化技術の実験的検証,” 信学ソ大, B-4-15, pp.188, 9月(2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 Kinoshita Moto, Ishii Masanori	4. 巻 58
2. 論文標題 Visualization of radio-frequency waves via double resonance spectroscopy of cesium atoms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 052004 ~ 052004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab10aa	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 Ishii Masanori, Kinoshita Moto	4. 巻 63
2. 論文標題 A feasibility study of a real time visualization method for electromagnetic fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microwave and Optical Technology Letters	6. 最初と最後の頁 399 ~ 403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mop.32608	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 3件）

1. 発表者名 Masanori Ishii
2. 発表標題 A feasibility study of AC magnetic field sensor in low-frequency using radio-optical multiple resonance in 133Cs
3. 学会等名 EMC Sapporo & APEMC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石居正典
2. 発表標題 セシウム原子の多重共鳴を利用した交流磁界センサの高周波化の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 2019年ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masanori Ishii
2. 発表標題 A study of frequency extension of AC magnetic field sensor using radio-optical multiple resonance in 133Cs
3. 学会等名 EMC Europe 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石居 正典
2. 発表標題 磁界標準の構築のためのCs原子を用いた交流磁界センサの研究開発の初期検討
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石居正典
2. 発表標題 セシウム原子のゼーマン副準位間のエネルギー差を利用した電磁波可視化技術の初期検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 2021年ソサイエティ大会
4. 発表年 2021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
---------	---------