

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01782

研究課題名（和文）アキラル構造からなる光角運動量ソーターの多空間同時光計測による研究

研究課題名（英文）Optical angular momentum sorter with achiral structure using multi-spatial optical measurement

研究代表者

三宮 工（Sannomiya, Takumi）

東京工業大学・物質理工学院・准教授

研究者番号：60610152

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：光の角運動量選択は次世代通信や暗号化に不可欠な要素である。これまで光の角運動量選択には、対掌性をもつキラル構造が提案されてきたが左右回転パリティへの応答が同等でなく、定量性・堅牢性に欠けていた。本研究では、光の角運動量制御に、アキラルなナノ構造を利用した。また、ナノ構造の光学特性を解析するために、電子線励起による発光であるカソードルミネセンスを用いた手法を改良し、光の回折限界をはるかに超えるスケールで光イメージングを行った。対称な構造をもつ光ナノアンテナや導波路において、両パリティに同等でかつ選択的な円偏光特性が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光の角運動量を制御する研究はここ数年、通信だけでなく超解像顕微鏡法、トラッピング、量子状態の選択など、応用から基礎まで広く注目を集めている。しかし、角運動量選択デバイスとしての研究は、フォトニック結晶におけるトポロジカルな導波路を除いては、キラルな構造あるいはキラルな物質を用いたものしか存在しない。本研究のアキラル構造の積極的な活用は、両方のパリティの角運動量を同等抽出するデバイスを実現するという点で学術的にも技術的にも極めてユニークで先進的な研究である。また、本研究で開発したカソードルミネセンスによる光計測法は、世界最先端な手法であり、他の追随を許さない。

研究成果の概要（英文）：Selection of optical angular momentum is an essential element for next-generation communication and encryption. While chiral structures with a specific handedness have been proposed for optical angular momentum selection, their responses to left or right circular polarization are not equivalent, thus requiring a different structure for each parity. In this study, we utilized achiral nanostructures for controlling optical angular momentum of light. Furthermore, we developed a novel cathodoluminescence measurement method, which allows analyzing optical properties of nanostructures far beyond the diffraction limit of light with various light detection functions. Using this technique, we investigated the chiral optical properties of symmetric nanoantennas and waveguides, and confirmed their equivalent and selective chiral characteristics for both parities.

研究分野：電子顕微鏡

キーワード：カソードルミネセンス ナノフォトニクス

1. 研究開始当初の背景

光の角運動量パリティに情報を持たせる光通信は、ロバストで高速な光通信や量子暗号化への応用が期待されている。角運動量をもつ光としては、円偏光(=光子スピン)が代表的であり、近年では空間的に波面をずらして軌道角運動量を持たせた光渦状態の研究も盛んに行われている。角運動量を利用した光通信をデバイスとして機能させるためには、空間を自由に伝播する光子の情報を、角運動量を保存したままデバイス内の物質の角運動量に変換する(受信)、またその逆の過程(送信)を可能にする必要がある。この角運動量の変換方法としては、プラズモンやポラリトンなど物質内の電磁波の角運動量を利用する、あるいは物質内の電子スピンや軌道角運動量を利用する、という方法が考えられる。ロバストでかつ定量的な通信のためには、特定のパリティ(左右回転どちらか)に対してのみでなく、両方のパリティに同等に応答することが求められるが、そのようなデバイスは実現していない。

通常、角運動量選択光アンテナは、キラルな対称性(対掌性)をもつアンテナ構造が用いられるが、キラル対称性をもたないアキラル構造でも測定点や励起点を対称中心からずらしてシステム全体の対称性を崩すことにより、円偏光や軌道角運動量選択性を得ることができる。これまでに、申請者らは、その極限として、完全な対称性をもつ球体の光ナノアンテナからの円偏光の制御が可能であることを見出している。キラルアンテナは左右どちらかの回転にしか応答しないが、アキラルアンテナは単一アンテナで左右の偏光回転両方に同等に応答することができ、すべての情報を利用するため定量的で堅牢であり、応用上好ましい。アキラル角運動量ソーターでは、波の「行き」と「帰り」で異なる性質を持たせる必要があり、空間反転と時間反転対称性を同時に崩すことが要請される。光の角運動量を利用したナノデバイスの研究分野は始まったばかりであり、このようなやや漠然とした要請を具現化するための具体的な指針が欠けている。3次元構造は無数に存在するため、より具体的な原理、設計指針が求められる。

また、ナノスケールで、内部の光電場に実験的にアクセスする方法が限られているため、これまでの研究例では、光の電場分布が実験的に明らかになっておらず、構造のロバスト性や、欠陥の影響、カップリング効率が不明である。ナノスケールでの角運動量やパリティ計測自体が現状困難な状況である。

2. 研究の目的

本研究では、角運動量選択可能なアキラルな光アンテナと光導波路を結合させ、電子線励起光計測であるカソードルミネセンス(CL)法を用いて、光場をナノスケールで可視化し、角運動量ソーターを実証する。これまでの申請者らのアキラル光ナノアンテナ・導波路開発の知見をもとに、角運動量選択の基本原則を明らかにし、アキラル光回路システムに最適なアンテナ・導波路を新たに開発する。この測定のために、現状のCL法を改良し、フーリエ空間での発光位置分解可能な新たに完全偏波CL法を開発し、角運動量・局所電場の情報を多空間でナノスケールで計測する。

3. 研究の方法

<サンプル作製>

これまでの研究で、単一誘電体球が角運動量を保存・選択しつつ、全方位型のナノアンテナとして機能することが明らかになっている。一方で複数の球体からなるアンテナにおける円偏光特性は知見がなく、本研究で明らかにする。また、アンテナとして、金属中の孔も利用する。金属表面に発生する表面プラズモンポラリトン(SPP)を利用すると、最小限の要素構成で光渦が生成できることが期待される。SPPを利用した光渦アンテナを新規開発する。導波路にはリソグラフィおよび自己組織化を組み合わせ、導波路を作製する。これらのサンプル構造は電磁場計算を利用して設計する。

<カソードルミネセンス(CL)によるナノスケール計測>

サンプルの解析には、走査型透過電子顕微鏡をベースにした角度分解・波長分解・円偏光情報を同時に取得する電子線によるナノスケール光マッピングである完全偏波4次元CL(4D-CL)法を利用する。この手法では、あらゆる放射角・エネルギーで相対位相を含む全偏光情報を分解することができる。また、CL法では、励起位置は1nmスケールで分解できる一方、発光位置が特定できない。光の光渦を定量的に評価するためには、発光位置を空間分解しながら位相計測を実施する必要がある。そのために、上記3Aの4D-CL法で既に実施可能な角度分解に加え、発光位置分解計測を新たに導入する。

4. 研究成果

<トポロジカルに保護されたプラズモニック導波路>

バレー・プラズモニック結晶をベースとした、トポロジカルに保護されたプラズモニック導波路を設計・作製し、開発した4次元カソードルミネセンス装置を用いてその導波を可視化するこ

とで、その機能を実証した。理論計算と実験結果をあわせることで、この導波がバレー結晶

を張り合わせたエッジで、トポロジカルに保護されていることを確認した。

<非対称ジグザグ導波路>

新たな光スピン選択導波構造として、誘電体の鎖構造を提案した。大きさの異なる誘電体球をジグザグに配置することで誘電体球内部で電場が回転する光スピン伝搬モードが方向性をもって伝搬する構造を見出し、数値計算により動作することが確認できている。この構造は、2次元結晶系と異なり、滑らかなカーブをもった導波路など幾何学的な自由度が高い。(図1)

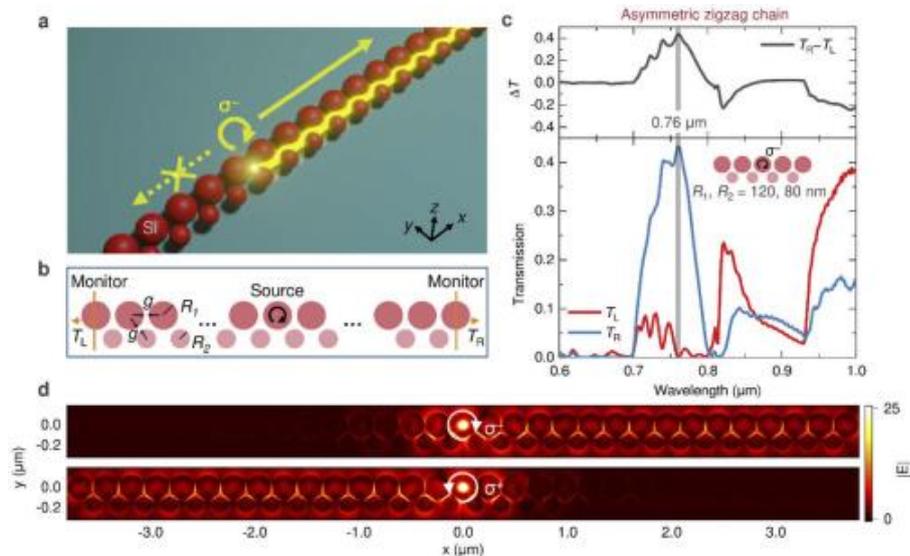


図1 誘電体球からなる非対称ジグザグ導波路[1]

<単一誘電体球ナノアンテナ>

単一球アンテナについて、ウイスパリングギャラリーモードがアンテナ利用できることが明らかにし、周期的に表れる高次のモードまでモード選択して可視化することに成功した。

<ナノホールアンテナ>

金属膜中に孔構造を作製することでアンテナとして機能する。特に、電子線照射による円偏光生成について確認したところ、図2に示すような干渉による円偏光生成が確認された。さらに、複数の孔からは表面波の光渦を生成することがわかった。

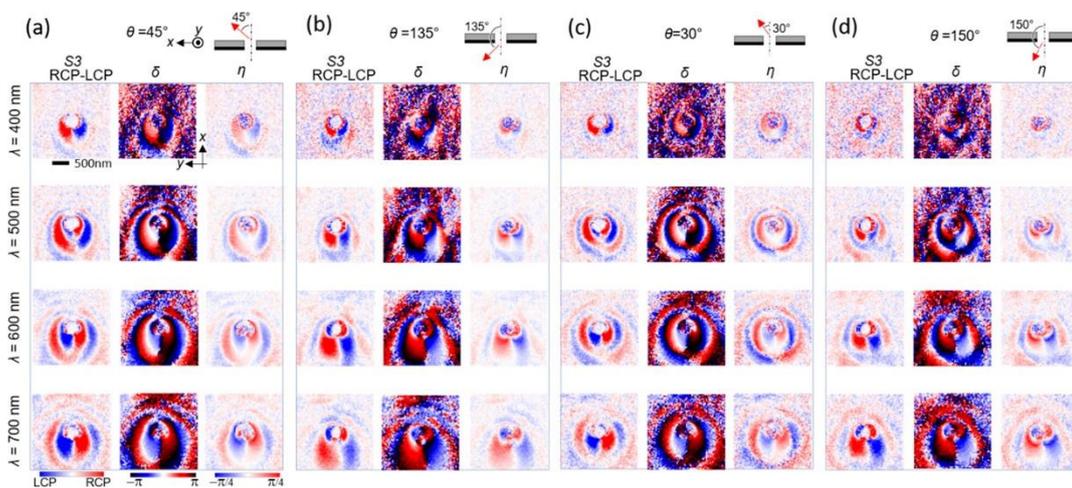


図2 金属膜中のナノホールからなるアンテナからの円偏光生成[2]

<合金ナノアンテナ>

相分離した合金ナノ粒子も異方性ナノアンテナとして利用できることから、その生成過程をその場観察した。

・文献

[1]Optics Express 29(22), 34951-34961, 2021.

[2]Nano Letters 24(3), 929-934, 2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Sannomiya Takumi, Matsukata Taeko, Yamamoto Naoki	4. 巻 24
2. 論文標題 Controllable Chiral Light Generation and Vortex Field Investigation Using Plasmonic Holes Revealed by Cathodoluminescence	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 929 ~ 934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.3c04262	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 Vu Dung Thi, Matthaikakakis Nikolaos, Sannomiya Takumi	4. 巻 11
2. 論文標題 Plasmonic Nanopyramid Array Enhancing Luminescence of MoS2 Investigated by Cathodoluminescence	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 202300598
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202300598	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 Adachi Yoshikazu, Yamamoto Naoki, Sannomiya Takumi	4. 巻 251
2. 論文標題 Focused light introduction into transmission electron microscope via parabolic mirror	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Ultramicroscopy	6. 最初と最後の頁 113759 ~ 113759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultramic.2023.113759	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 Machfuudzoh Izzah, Hinamoto Tatsuki, Garcia de Abajo F. Javier, Sugimoto Hiroshi, Fujii Minoru, Sannomiya Takumi	4. 巻 online
2. 論文標題 Visualizing the Nanoscopic Field Distribution of Whispering-Gallery Modes in a Dielectric Sphere by Cathodoluminescence	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.3c00041	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 Matsukata Taeko, Ogura Shintaro, Garcia de Abajo F. Javier, Sannomiya Takumi	4. 巻 16
2. 論文標題 Simultaneous Nanoscale Excitation and Emission Mapping by Cathodoluminescence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 21462 ~ 21470
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.2c09973	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 Yasuhara Akira, Honma Masahiro, Sannomiya Takumi	4. 巻 14
2. 論文標題 In Situ Observation of Structural and Optical Changes of Phase-Separated Ag-Cu Nanoparticles during a Dewetting Process via Transmission Electron Microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 35020 ~ 35026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acсами.2c08588	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 D. Thi Vu, N. Matthaikakakis, H. Saito, T. Sannomiya	4. 巻 TBD
2. 論文標題 Exciton-Dielectric Mode Coupling in MoS2 Nanoflakes Visualized by Cathodoluminescence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 TBD
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2021-0643	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 A. Yasuhara, T. Sannomiya	4. 巻 126
2. 論文標題 Atomically Localized Ordered Phase and Segregation at Grain Boundaries in Au-Ag-Cu Ternary Alloy Nanoparticles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 1160-1167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c07816	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 H. Saito, D. Yoshimoto, Y. Moritake, T. Matsukata, N. Yamamoto, T. Sannomiya	4. 巻 21
2. 論文標題 Valley-Polarized Plasmonic Edge Mode Visualized in the Near-Infrared Spectral Range	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 6556-6562
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c01841	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 T. Hinamoto, M. Fujii, T. Sannomiya	4. 巻 29
2. 論文標題 Optical Spin Sorting Chain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 34951-34961
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.437725	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 -

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 安達 良和, 三宮 工
2. 発表標題 放物面鏡を利用して電子顕微鏡に導入した収束光の評価
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第78回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安原 聡, 本間 雅大, 三宮 工
2. 発表標題 加熱ホルダによるAg-Cu二元系ナノ粒子形成過程のその場観察
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第78回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sannomiya, T. Matsukata
2. 発表標題 Chiral light emission from circular plasmonic hole controlled by electron beam
3. 学会等名 The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 隆之介, 三宮 工
2. 発表標題 相分離したプラズモニクナノ粒子の六角配列構造
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小倉 慎太郎, 根来 英利, 杉本 泰, 藤井 稔, 三宮 工
2. 発表標題 Siナノ球鎖からの円偏光放射
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村 克徳, 三宮 工
2. 発表標題 キラルな特性をもつプラズモニクナノホール
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Yoshikazu, N. Yamaomoto, T. Sannomiya
2. 発表標題 Evaluation focused light introduced into an electron microscope through a parabolic mirror
3. 学会等名 2022 Sino-Japan Young Scholar Forum on Advanced Materials and Related Techonologies (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宮 工
2. 発表標題 透過電子顕微鏡カソードルミネセンスによるナノスケール光解析
3. 学会等名 表面真空学会九州支部セミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宮工
2. 発表標題 電子線を用いたナノスケール光計測
3. 学会等名 ナノプローブテクノロジー第167委員会105回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宮 工
2. 発表標題 カソードルミネセンスによるミラー共鳴モードの可視化
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安達 良和、Izzah Machfuudzoh、杉本 泰、藤井 稔、三宮 工
2. 発表標題 誘電体球を用いた電子顕微鏡内レーザー照射による温度上昇の計測
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sannomiya
2. 発表標題 Cathodoluminescence with Interference
3. 学会等名 EBSN (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宮 工、Konecna Andrea、松方 妙子、岡本 隆之、Garcia de Abajo F. Javier、山本 直紀
2. 発表標題 干渉を用いたカソードルミネセンスによる光位 相抽出
3. 学会等名 日本顕微鏡学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安原 聡、久保 匡平、柳本 宗達、三宮 工
2. 発表標題 Au-Ag-Cu三元系プラズモニクナノ粒子の局 所構造解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松方 妙子, Garcia de Abajo F. Javier, 三宮 工
2. 発表標題 4次元カソードルミネセンス法による球体からの円偏光放射の検出
3. 学会等名 日本顕微鏡学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三石 和貴, 三宮 工
2. 発表標題 タイコグラフィーによる位相回復への中間レンズの焦点はずれの影響と補正
3. 学会等名 日本顕微鏡学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Sannomiya, A. Konecna, T. Matsukata, Z. Thollar, T. Okamoto, F. J. Garcia de Abajo, N. Yamamoto
2. 発表標題 Phase Mapping of the SPP-Coupled Nanoparticles by Angle-Resolved Cathodoluminescence
3. 学会等名 META2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間 雅大, 三宮 工
2. 発表標題 金属相変態によるナノ温度計の開発
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 安原 聡、本間 雅大、三宮 工
2. 発表標題 TEM 内加熱ホルダを用いたその場観察によるAg-Cu二元系粒子の構造変化
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第64回シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宮 工
2. 発表標題 電子顕微鏡で光を見る
3. 学会等名 Tokyo Tech OPen innovation & venture/research festival (TTOP)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Sannomiya
2. 発表標題 Visualization of Optical Field by Electron Microscopy
3. 学会等名 2021 Sino-Japan Young Scholar Forum on Advanced Materials and Related Technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Homma, T. Sannomiya
2. 発表標題 Producing nano scale thermometer
3. 学会等名 2021 Sino-Japan Young Scholar Forum on Advanced Materials and Related Technologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Sannomiya
2. 発表標題 Nanoscopic Characterization of the Local Light Field for Sensing
3. 学会等名 Pacifichem 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間 雅大, 三宮 工
2. 発表標題 Au-Cu合金微粒子共鳴特性の温度依存観察
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松方 妙子, 三宮 工
2. 発表標題 電子線を用いた円形金属孔からの円偏光生成
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 I. Machfuudzoh, T. Hinamoto, H. Sugimoto, M. Fujii, T. Sannomiya
2. 発表標題 Visualizing nanoscopic field distribution of whispering gallery modes in a dielectric sphere by cathodoluminescence
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. Thi Vu, T Sannomiya
2. 発表標題 Emission enhancement in MoS2 flakes through coupling with plasmonic resonance visualized by cathodoluminescence
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022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
研究分担者	藤井 稔 (Fujii Minoru) (00273798)	神戸大学・工学研究科・教授 (14501)	
研究分担者	斉藤 光 (Saito Hikaru) (50735587)	九州大学・先端物質化学研究所・准教授 (17102)	
研究分担者	秋葉 圭一郎 (Akiba Keiichirou) (80712538)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用 研究所 先端機能材料研究部・主任研究員 (82502)	

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
---------	---------