

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02808

研究課題名（和文）Li内包C60薄膜を利用した超原子分子軌道(SAMO)の精密研究

研究課題名（英文）Detailed characterization of SAMO utilizing Li@C60 films

研究代表者

山田 洋一（Yamada, Yoichi）

筑波大学・数理工学系・准教授

研究者番号：20435598

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、独自に作成した高純度Li内包フラーレン薄膜を利用し、その超原子分子軌道(SAMO)を精密に計測する課題である。SAMOは空間的に広がった非占有分子軌道であり、これを電子輸送に利用することで有機エレクトロニクスにおいて課題となっている電子輸送を大きく改良できる可能性がある。本研究を通じて、Li内包C60やC70の高純度薄膜において、SAMOが薄膜中に非局在化した状態を準備することに成功し、その分子レベル計測に成功した。特に、量子化学計算をにより、SAMOとLi原子位置の関係を解析できたことで、未だ未解明である「薄膜のSAMO」の制御方法について提案することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状の有機エレクトロニクスの大きな課題の一つが低い電子移動度の改善にある。空間的に大きく広がった非占有軌道である超原子分子軌道（SAMO）は高効率の電子輸送に適した軌道であるが、十分研究されていない。本研究では、よく規定され、かつ制御可能なSAMOを有する内包フラーレンの薄膜を独自に作製し、そのSAMOを詳細に研究した。この結果、薄膜中でのSAMOの分布や、そのエネルギーを明らかにすることができた。さらに、理論計算と実験結果を比較することで、内包元素によるSAMOの制御方法を提案することができた。本結果は、未だ理解が不十分なSAMOの基礎研究を拓くものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the SAMO (Super-Atom Molecular Orbital) which is a spatially extended non-occupied molecular orbital, of a high-purity endohedral lithium fullerene film. This research has revealed the possibility of using SAMOs for electron transport, which has been an issue in organic electronics. Through this study, we have succeeded in preparing a delocalized state of SAMOs in high purity thin films of Li endohedral C60 and C70, and have measured the SAMOs at the molecular level. In particular, we were able to analyze the relationship between SAMO and Li atomic positions by quantum chemical calculations, and were able to propose a method for controlling "SAMO in film films," which is still unresolved.

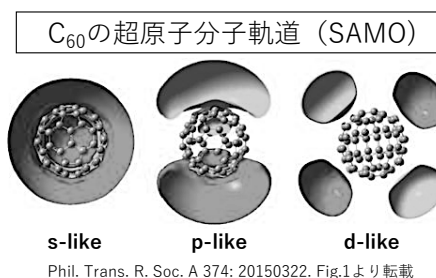
研究分野：表面科学

キーワード：超原子分子軌道 内包フラーレン

1. 研究開始当初の背景

超原子分子軌道 (Superatom Molecular Orbital, SAMO) は、Rydberg 軌道の一つであり、分子外側に大きく広がった非占有軌道である。C₆₀ 等の対称性の良い分子においては、分子を原子核に見立てた時の水素原子軌道に類似する(下図) ことから、特に注目されてきた。

このような軌道は、隣接分子との重なりが大きいと、分子間の電荷移動を利用する有機エレクトロニクス全般に極めて有用である。実際に、C₆₀ 薄膜において SAMO が自由電子的なバンドを形成するとの報告[1]を皮切りに、コラヌレン分子膜における SAMO の電子伝導の可能性[2]や、異種分子間での SAMO を介した電子移動の可能性[3]などが相次ぎ報告された。しかし、多くの分子の SAMO のエネルギーは真空準位に近く、不安定であるため、その利用はおろか、計測そのものが極めて困難であった。これに対し、Li を内包した C₆₀ (Li@C₆₀)では、SAMO のエネルギーが大幅に安定化できることが指摘され、その利用に特に期待が集まっている。しかし Li@C₆₀ は従来合成と単離が非常に困難であり、材料や試薬として使用できる状況ではなかった。これに対し、2010 年、笠間ら (協力研究者) が Li@C₆₀ の大量合成と塩((Li@C₆₀)PF₆ 等)としての単離に成功し、市販に至ったことで、Li@C₆₀ の研究の活路が開かれてきている。申請者らは、笠間らとの共同研究により、これまでにこの塩から Li@C₆₀ を分離して基板に蒸着する技術を確立した。これを利用し、金属単結晶基板に蒸着した Li@C₆₀ の直接観察による電子状態解析を実現してきた。この手法は現在、海外の競合グループにも利用され始めている。



2. 研究の目的

この発見に基づき、申請者は Li@C₆₀ 薄膜を利用した「有機薄膜の SAMO」の研究展開を着想した。従来 SAMO は主に気相分子の分光により研究されてきた。しかし SAMO を有機エレクトロニクスに応用するためには、薄膜状態の分子の SAMO の理解と制御が必須である。この「有機薄膜の SAMO」の学理究明のため、本研究では、Li@C₆₀ 薄膜を独自作製し、その SAMO の直接精密計測により、SAMO のエネルギー、空間分布、寿命、薄膜の電子伝導への影響をそれぞれ明らかにする。同時に Li@C₆₀ の化学修飾を含めた Li の状態制御による薄膜の SAMO の制御を行う。また、薄膜の SAMO の理論計算により実験を検証する。

3. 研究の方法

本研究は、山田を中心に、上野（東北大学）、福本（KEK）を研究分担者、A. Kuklin(KTH, Sweden)、笠間（アイデア）を研究協力者とする Li@C₆₀ の専門家集団により遂行する。研究は [1:モデル薄膜作製（山田）]、[2:薄膜 SAMO の精密計測(山田、福本、Kuklin)]、[3: 試料合成（上野、笠間）]、の三フェイズをそれぞれ相互にフィードバックしながら進行する。

4. 研究成果

本研究計画中に記載した研究内容は以下の(1)-(3)である。以下にそれぞれの計画の研究成果を述べる。

[1: モデル薄膜作製] ～Li@C₆₀ 薄膜の作製と Li@C₆₀ 含有率の制御～

この項目においては、本研究遂行のために必要となるモデル薄膜を作製することを目指した。特に、Li 内包率を高めるための成膜法の確立を目指した。

Li@C₆₀ は、Li@C₆₀ とカウンターアニオンとの塩の形で安定化されている。今回、上野らにより、Li@C₆₀ と相互作用の比較的弱い Bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (TFSI) をもちいた Li@C₆₀-[TFSI]塩を合成し、その真空蒸着を試みたところ、既存の Li@C₆₀-[PF₆]塩よりも低温での Li@C₆₀ の蒸着が可能となった。これは TFSI 部がより低温で効率的に除去できるためである。この結果、非常に高純度の Li@C₆₀ 薄膜を真空蒸着により作製することができた。解析の結果、この薄膜の Li@C₆₀ の内包率は 80 パーセント以上であることが確認され、これまでの数%から大幅に向上することができた。この結果を論文発表した[1]。この成果は日刊工業新聞等でも取り上げられた。

[2: 薄膜 SAMO の精密計測] ～STM による分子計測と、TR-PEEM による時空間計測～

上述のとおり Li@C₆₀ の高純度薄膜が達成できたため、その電子状態の分子レベルの観察が可能となった。これにより、本研究計画の最も重要な部分である STM を用いた SAMO の分布観察が達成できた。この結果 Li@C₆₀ の「薄膜の SAMO」が膜中に非局在化している様子が明らかに示された[1]。ただし、解析の結果、薄膜に非局在化した SAMO のエネルギーは当初の理論計算で予言されているほど十分に低減されていないことが明らかになった。これには薄膜にしたことで内包 Li の位置が通常の Li@C₆₀ から変化していることが主な原因であることを理論計算により示した[2]。これらの結果により、薄膜中の Li の位置制御による SAMO の制御法の指針を得ることができた。

一方、予定していた TRPEEM での分光計測については、異なる装置への試料搬送時の問題があり、十分実験ができなかった。

[3. 試料合成] ～Li@C₆₀ の荷電状態制御、塩の制御～

本研究成果は、上野らによる Li@C₆₀-[TFSI]塩の大量合成の実現により遂行が可能となったものである。また、上野らは Li@C₆₀ 以外にも、Li@C₇₀-[TFSI]塩の合成にも

成功しており、本研究の計画範囲を超えるが、一部実験を行い、Li@C70 薄膜も安定的に得られるようになってきている。この成果は学会発表し[3]、原著論文を現在執筆中である[4]。

本研究では、当初計画通り薄膜の SAMO に関する非常に重要で基礎的な成果が得られたため、ここから多くの研究を展開することが可能となった。得られた成果を主題として、更なる発展的課題として、科研費挑戦的研究（開拓）に新たな研究提案「超原子分子軌道 (SAMO) 工学の開拓」が採択された[5]。さらに、本研究で得られた知見に基づき、あらたな SAMO のイメージング法を見出した。これに関しても原著論文を報告した[6]。

[1] **Direct Visualization of Nearly Free Electron States Formed by Superatom Molecular Orbitals in a Li@C60 Monolayer**

Naoya Sumi, Artem V. Kuklin, Hiroshi Ueno, Hiroshi Okada, Tomoyuki Ogawa, Kazuhiko Kawachi, Yasuhiko Kasama, Masahiro Sasaki, Pavel V. Avramov, Hans Agren, Yoichi Yamada

J. Phys. Chem. Lett. 2021, 12, 7812-7817

[2] **Superatom Molecular Orbitals of Li@C60: Effects of Li Position and Substrate**

Kuklin, Artem; Suresh, Rahul; Shimizu, Konoha; Yamada, Yoichi; Agren, Hans

J. Phys. Chem. C 2022, 126, 37, 15891-15898

[3] [22p-C106-6] **Li@C70 の超原子分子軌道 (SAMO) 計測 — 基板依存性**

○[山田 洋一](#)¹、北島 大樹²、延山 知弘¹、大橋 左和¹、清水 好葉¹、佐々木 正洋¹、河地 和彦³、笠間 泰彦³、美齊津 文典²、上野 裕²

[4] **Superatom Molecular Orbitals of endohedral C82**

Rahul Suresh^{1,*}, Artem V. Kuklin^{2,*}, Yoichi Yamada³, Sergey P. Polyutov¹, and Hans Ågren² (Submitted)

[5] 「超原子分子軌道 (SAMO) 工学の開拓」 (山田、代表) 22K18268

[6] **Field Emission Angular Distribution From Single Molecules**

Yoichi Yamada¹, Ryohei Tsuruta¹, Yuho Yamamoto¹, Yutaro Ono¹, Tomohiro Nobeyama¹, Masato Iwasawa¹, Masahiro Sasaki¹, Rahul Suresh², Artem Kuklin³, Hans Ågren³ Carbon (in press)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sumi Naoya, Kuklin Artem V., Ueno Hiroshi, Okada Hiroshi, Ogawa Tomoyuki, Kawachi Kazuhiko, Kasama Yasuhiko, Sasaki Masahiro, Avramov Pavel V., ?gren Hans, Yamada Yoichi	4. 巻 12
2. 論文標題 Direct Visualization of Nearly Free Electron States Formed by Superatom Molecular Orbitals in a Li@C60 Monolayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 7812 ~ 7817
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.1c02246	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 該当する
1. 著者名 Iwasawa Masato, Tsuruta Ryohei, Nakayama Yasuo, Sasaki Masahiro, Hosokai Takuya, Lee Sunghee, Fukumoto Keiki, Yamada Yoichi	4. 巻 124
2. 論文標題 Exciton Dissociation and Electron Transfer at a Well-Defined Organic Interface of an Epitaxial C60 Layer on a Pentacene Single Crystal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 13572 ~ 13579
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c02796	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 該当する
1. 著者名 Panigrahi Debdatta, Hayakawa Ryoma, Fuchii Kota, Yamada Yoichi, Wakayama Yutaka	4. 巻 7
2. 論文標題 Optically Controlled Ternary Logic Circuits Based on Organic Antiambipolar Transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2000940 ~ 2000940
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aelm.202000940	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 該当する
1. 著者名 Igari Tomoya, Nagao Masayoshi, Mitsuishi Kazutaka, Sasaki Masahiro, Yamada Yoichi, Murakami Katsuhisa	4. 巻 15
2. 論文標題 Origin of Monochromatic Electron Emission From Planar-Type Graphene/h-BN/n-Si Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 14044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.15.014044	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 Akaike Kouki, Hosokai Takuya, Ono Yutaro, Tsuruta Ryohei, Yamada Yoichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Increasing Electrode Work Function Using a Natural Molecule	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2201800 ~ 2201800
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.202201800	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 Hayakawa Ryoma, Takeiri Soichiro, Yamada Yoichi, Wakayama Yutaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Surface Potential Visualization in Organic Antiambipolar Transistors Using Operando Kelvin Probe Force Microscopy for Understanding the Comprehensive Carrier Transport Mechanism	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2201857 ~ 2201857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.202201857	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 Kuklin Artem V., Suresh Rahul, Shimizu Konoha, Yamada Yoichi, ?gren Hans	4. 巻 126
2. 論文標題 Superatom Molecular Orbitals of Li@C ₆₀ : Effects of the Li Position and the Substrate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 15891 ~ 15898
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.2c02098	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 該当する

1. 著者名 Hayakawa Ryoma, Takeiri Soichiro, Yamada Yoichi, Wakayama Yutaka, Fukumoto Keiki	4. 巻 34
2. 論文標題 Carrier Transport Mechanism in Organic Antiambipolar Transistors Unveiled by Operando Photoemission Electron Microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2201277 ~ 2201277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202201277	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 Iwasawa Masato, Kobayashi Shinnosuke, Sasaki Masahiro, Hasegawa Yuri, Ishii Hiroyuki, Matsui Fumihiko, Kera Satoshi, Yamada Yoichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Photoemission Tomography of a One-Dimensional Row Structure of a Flat-Lying Picene Multilayer on Ag(110)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 1512 ~ 1518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.1c03821	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 Yutaro Ono, Ryohei Tsuruta, Tomohiro Nobeyama, Kazuki Matsui, Masahiro Sasaki, Makoto Tadokoro, Yasuo Nakayama, Yoichi Yamada	4. 巻 -
2. 論文標題 Partial Hydrogenation of N-heteropentacene: Impact on molecular packing and electronic structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	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) 10.48550/arXiv.2305.12791	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 Yamada Yoichi, Tsuruta Ryohei, Yamamoto Yuhu, Ono Yutaro, Nobeyama Tomohiro, Iwasawa Masato, Sasaki Masahiro, Suresh Rahul, Kuklin Artem, ?gren Hans	4. 巻 -
2. 論文標題 Field emission angular distribution from single molecules	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 118215 ~ 118215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2023.118215	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 該当する

1. 著者名 赤池幸紀、細貝拓也、小野裕太郎、鶴田諒平、山田洋一	4. 巻 43
2. 論文標題 極性植物分子を用いた仕事関数制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 機能材料	6. 最初と最後の頁 32-36
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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清水好葉
2. 発表標題 Li@C70の超原子分子軌道(SAMO)の直接計測(2)
3. 学会等名 2022年第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 赤池 幸紀、細貝 拓也、小野 裕太郎、鶴田 諒平、山田 洋一
2. 発表標題 極性植物分子の自発配向
3. 学会等名 2023年第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 清水 好葉、竹入 聡一郎、早川 竜馬、山田 洋一、若山 裕、福本 恵紀
2. 発表標題 オペランド光電子顕微鏡観測による有機アンチ・アンバイポーラトランジスタのキャリア伝導評価
3. 学会等名 2023年第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 小野 裕太郎 ¹ 、鶴田 諒平、延山 知弘、佐々木 正洋、田所 誠、中山 泰生、山田 洋一
2. 発表標題 窒素含有ペンタセンの高純度薄膜作製および構造評価
3. 学会等名 2023年第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 齋田 友梨、小西 智暉、佐藤 竜馬、中池 由美、矢嶋 渉、四方 諒、山田 洋一、原 光生、齋藤 尚平、羽田 真毅
2. 発表標題 光剥離する有機分子材料の構造ダイナミクスの相依存性
3. 学会等名 2023年第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 竹入 聡一郎、早川 竜馬、山田 洋一、若山 裕
2. 発表標題 オペランドKFM計測による有機アンチ・アンパイポーラトランジスタのキャリア伝導機構評価
3. 学会等名 2022年第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 小野 裕太郎、鶴田 諒平、佐々木 正洋、田所 誠、中山 泰生、山田 洋一
2. 発表標題 純粋なBTANC薄膜の作製
3. 学会等名 2022年第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 山田 洋一、北畠 大樹、延山 知弘、大橋 左和、清水 好葉、佐々木 正洋、河地 和彦、笠間 泰彦、美齊津 文典、上野 裕
2. 発表標題 Li@C70の超原子分子軌道 (SAMO) 計測 - 基板依存
3. 学会等名 2022年第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 山本 勇帆、鶴田 諒平、佐々木 正洋、山田 洋一
2. 発表標題 電界放射顕微鏡 (FEM) における分子パターンの起源に関する研究
3. 学会等名 2022年第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 鶴田 諒平、佐々木 正洋、山田 洋一
2. 発表標題 CeB6単結晶表面の電子状態評価
3. 学会等名 2022年第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 村上 勝久、猪狩 朋也、長尾 昌善、佐々木 正洋、山田 洋一
2. 発表標題 Graphene/h-BN/n-Si積層構造からの単色電子放出機構
3. 学会等名 2022年第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 山田 洋一、岩澤 柁人、星野 亜門、佐々木 正洋、細貝 拓也
2. 発表標題 熱活性化遅延蛍光(TADF)分子4CzIPN単分子層と酸素との反応
3. 学会等名 2022年第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 岩澤 柁人、長谷川 友里、石井 宏幸、佐々木 正洋、松井 文彦、解良 聡、山田 洋一
2. 発表標題 Ag(110)上単一配向Picene多層膜の光電子トモグラフィ
3. 学会等名 2022年第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 染谷 大地、佐藤 駿、郡上 祐輝、遠藤 豪太、笠松 昂平、伊藤 航世、山田 洋一、鶴田 諒平、小金澤 智之、中山 泰生
2. 発表標題 テトラシアノキノジメタン単結晶上に積層したジベンゾテトラチアフルバレンの界面構造評価
3. 学会等名 2021年第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 鶴田 諒平、北野 智大、岩澤 柁人、小金澤 智之、細貝 拓也、山田 洋一、中山 泰生
2. 発表標題 有機単結晶上におけるC70フラーレン結晶構造変化
3. 学会等名 2021年第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 Debdatta Panigrahi、Ryoma Hayakawa、Kota Fuchii、Yoichi Yamada、Yutaka Wakayama
2. 発表標題 Development of anti-ambipolar transistors Part V: Application to optically controllable ternary logic circuits
3. 学会等名 2021年第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 山田 洋一、清水 好葉、鶴田 諒平、佐々木 正洋、北畠 大樹、河地 和彦、笠間 泰彦、美齊津 文典、上野 裕
2. 発表標題 Li@C70の超原子分子軌道(SAMO)の直接計測
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
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
研究 分担者	上野 裕 (Ueno Hioroshi) (00775752)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教 (11301)	
研究 分担者	福本 恵紀 (Fukumoto Keiki) (20443559)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特任准教授 (82118)	

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