

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05299

研究課題名(和文) 第一原理計算による新規反強磁性スピントロニクス物質開拓

研究課題名(英文) Exploring new antiferromagnetic spintronics materials by first-principles calculation

研究代表者

柳 有起 (Yanagi, Yuki)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：70634343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：磁性体を対象としたスピントロニクス物質開拓の理論基盤構築を目指して、磁気構造・電子構造と電荷・スピン輸送など種々の物性との関係について理論研究を実施した。Co₃In_xSn_{2-x}S₂における異常ホール効果、ネルンスト効果、CuMnAsにおけるスピンホール効果を第一原理計算に基づき定量的に調べた。また、非共線・非共面磁性において反対称スピン分裂やバンドシフトなどの電子構造変化がスピン軌道相互作用によらない機構で発現することを明らかにした。さらに、多極子展開に基づく磁気構造生成法を単位胞間の空間変調を取り込んだ形式へ拡張し、本手法を用いて $\bar{1}\text{-Mn}$ やCoTa₃S₆の磁気構造の候補を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

第一原理計算を用いた輸送特性の定量的解析を通して、電子構造が物性に与える影響に関する理解を深めた。これは、反強磁性スピントロニクス物質などの機能性磁性材料の探索へつながる知見となることが期待される。また、スピン軌道相互作用によらない電子構造変化や交差相関現象に関する研究成果は機能性磁性材料の候補となる物質群が従来よりも拡大する可能性を示した点に学術的意義があると考えている。磁気構造生成法については、磁性体に対するハイスループット第一原理計算への応用可能性が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically studied the relation between magnetic and electronic structures and various physical phenomena such as charge and spin transports. The anomalous Hall and Nernst effects in Co₃In_xSn_{2-x}S₂ and spin Hall effect in CuMnAs have been quantitatively evaluated by using first-principles calculation. We have also clarified that characteristic electronic structure modulations such as antisymmetric spin splitting and band shift can be realized in non-collinear and non-coplanar antiferromagnets, respectively even without spin-orbit coupling. Furthermore, the magnetic structure generation method based on multipole expansion has been developed to properly describe the magnetic structures with inter-unit cell spatial modulation. We have then proposed candidate magnetic structures in $\bar{1}\text{-Mn}$ and CoTa₃S₆ with use of this method.

研究分野：強相関電子系

キーワード：磁性 スピントロニクス 第一原理計算

1. 研究開始当初の背景

電子が持つ電荷とスピンの自由度は、物質が示す電気的性質、磁氣的性質をそれぞれ担っている。通常のエレクトロニクスでは電荷自由度を制御するが、近年では電荷に加えてスピン自由度も制御・操作するスピントロニクスが盛んに研究されている。スピントロニクス研究においてスピン流は重要な位置を占めており、その高効率な生成法・新たな制御法の確立は重要課題の一つである。従来のスピン流生成法としてはスピンホール効果がよく知られていた。大きいスピンホール効果を得るためには、大きいスピン軌道相互作用が必要である一方、スピン軌道相互作用はスピン流を減衰させる効果もあるため、この方法で生成されるスピン流は短距離で減衰してしまうという欠点を抱えていた。

最近の有機反強磁性体を対象とした研究を契機として、一部の共線反強磁性体では電子バンドの対称スピン分裂(波数 k に関して偶関数のスピン分裂)がスピン軌道相互作用によらず実現することが明らかにされるとともに、このようなバンド変形に由来した新規なスピン流生成が可能であることが示された[M. Naka et al., Nat. Commun. **10**, 4305 (2019), S. Hayami et al., J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 123702 (2019)]。このスピン流生成はスピン軌道相互作用によらないため、スピン軌道相互作用が小さい3d電子系の磁性体が新たなスピントロニクス物質の候補となり得ることが分かってきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、反強磁性体を含む広範な磁性体から新規スピントロニクス物質を開拓するための理論基盤構築を行うことである。

1. で述べた背景の下、研究開始当初は対称スピン分裂を伴う反強磁性状態におけるスピン流生成の定量的評価を主軸として研究を進める予定であったが、 $\text{Co}_3\text{In}_x\text{Sn}_{2-x}\text{S}_2$ や CuMnAs における電子構造トポロジーと電荷・スピン伝導特性に関する研究が進展したことから、まずは、これらの物質の研究を通して、スピン伝導を含む種々の応答現象と電子構造の関係についての知見を得ることを目指した。また、1. で述べた単純な共線反強磁性体だけでなく、非共線・非鏡面反強磁性体を含むより一般の磁性体における電子構造変形や交差相関現象について調べることで、磁性と応答現象に関する理解を深化させる。さらに、対称性適合磁気構造基底の自動生成を実現し、磁気構造の系統的特徴づけや磁性体のハイスループット第一原理計算の基盤構築を行う。

3. 研究の方法

ホールドープシャンドイト $\text{Co}_3\text{In}_x\text{Sn}_{2-x}\text{S}_2$ 、ディラック半金属候補物質 CuMnAs の電子状態と磁氣的性質を密度汎関数法に基づく第一原理計算を用いて調べる。また、最局在ワニエ関数法を適用し、第一原理計算で得られた電子構造を再現する有効強束縛模型を構築する。この模型に基づいて $\text{Co}_3\text{In}_x\text{Sn}_{2-x}\text{S}_2$ の異常ホール伝導度や異常ネルンスト伝導度、 CuMnAs のスピンホール伝導度を久保公式により定量的に評価し、ノーダルラインなどのトポロジカルに非自明な電子構造が輸送特性へ与える影響を議論する。

非共線・非鏡面反強磁性体におけるスピン軌道相互作用によらないバンド構造変化に関する研究では、群論的考察・多極子展開・有効模型を援用したアプローチを用いて反対称スピン分裂やバンドシフトが生じる条件を調べる。

磁気構造生成法については、多極子展開に基づく手法[Suzuki et al., Phys. Rev. B **99**, 174407 (2019)]を単位胞間の空間変調をもつ磁気構造へ適用可能な形式へ拡張する。

4. 研究成果

(1) 磁性ワイル半金属の典型物質であるシャンドイト化合物 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ は、巨大な異常ホール効果や磁気光学カー効果を示すことで注目されている。この物質はハーフメタルとしても知られており、スピン偏極電流を応用したスピントロニクス物質としても興味深い。実験では Sn 原子を In で置換することにより、系にホールを添加できることが知られているが、系統的な理論解析はこれまで行われていなかった。本研究では、仮想結晶近似の範囲で In ドープの効果を取り入れた第一原理計算を実行することにより、ホールドープされたワイル磁性体 $\text{Co}_3\text{In}_x\text{Sn}_{2-x}\text{S}_2$ の電子状態、磁氣的性質、輸送特性を詳細に調べた。その結果、ハーフメタルであるためにほとんどのホールがマジョリティスピンバンドに供給され、自発磁化が In 置換量に対してほぼ線形に減少することが分かった。一方、異常ホール伝導度やネルンスト伝導度は波動関数の詳細に依存するベリー曲率に由来することから、ホールドープに対して非単調に変化することを示した。これらは実験と定性的に整合する結果である。また、トポロジカルに非自明な電子構造の一種であるノーダルラインが異常ネルンスト伝導度を増強していることを示した。さらに、ホールドープによ

ってノーダルラインの再構成が実現することを明らかにした。

(2) CuMnAs は共線の反強磁性体であるが、その磁気対称性は空間反転(P)対称性と時間反転(T)対称性の両方を破るものの、両者を組み合わせた PT 対称性は保持するものとなっている。この PT 対称性のために全てのバンドは最低でも 2 重に縮退するという特徴的な電子構造を有している。先行研究において、スピン軌道相互作用がない場合、 $k_y=0$ 面においてこの縮退バンドがディラックノーダルラインを形成し、スピン軌道相互作用を導入するとノーダルラインにギャップが生じること、ギャップの開き方が磁気構造の対称性に依存することなどが示されていた。しかしながら、各種磁気構造の安定性や秩序下での輸送特性などは理論的に調べられていなかった。

本研究では、対称性で分類された磁気構造基底を導出し、これらの磁気構造の安定性を第一原理計算に基づいて評価した。その結果、実験で確認されている磁気構造は 2 番目に安定な構造として得られた。最安定な構造はこの磁気構造における全てのスピンの向きを一様に回転したもので、磁気異方性の分だけエネルギーが異なる構造となっている。また、非磁性状態、及び各種反強磁性状態におけるスピンホール伝導度テンソルを評価したところ、非磁性状態において近似的に反対称であったテンソルが、反強磁性下では顕著な非対称性を示すことを見出した。これは非磁性-反強磁性転移を通してスピン流を制御できることを示唆しており、応用上の観点からも興味深い。また、ディラックノーダルライン周りの大きなスピンベリリー曲率がスピンホール伝導度に対して支配的な寄与をしていることも明らかにした。

(3) 1. で述べた通り、これまでの研究で一部の共線の反強磁性体において電子バンド構造に波数に依存した対称スピン分裂が生じること示していたが、この自然な拡張として、本研究課題開始前から非共線反強磁性体における電子構造変形の研究を推進していた。微視的な有効モデルをクラスター多極子、バンド多極子、 k 多極子などの構成要素へ分解することで、非共線反強磁性体において、スピン軌道相互作用によらない反対称スピン分裂(波数 k に関して奇関数のスピン分裂)が生じ得ることを明らかにした。当該成果をまとめた論文を 2019 年度に投稿し、2020 年 6 月に論文が出版された。

さらに、非共面磁性を含めた広範な磁性体に理論を拡張し、対称スピン分裂・反対称スピン分裂・バンドシフトがスピン軌道相互作用によらず発現するための微視的条件を包括的に明らかにし、多くの候補物質を提案した。このようなバンド構造変形は、スピン流生成を含む種々の応答現象の源となるため、本研究成果により、スピントロニクス物質をはじめとする機能性磁性材料の候補となる物質群が拡大することが期待される。

(4) 磁性体で発現する物性は、磁気構造の詳細に依存することから、その系統的特徴づけは重要課題となっている。近年提案された多極子展開に基づく磁気構造生成法は、反強磁性体 Mn_3Sn の示す大きな異常ホール効果の記述に成功するとともに [Suzuki et al., Phys. Rev. B **99**, 174407 (2017), Phys. Rev. B **99**, 174407 (2019)], ハイスループット第一原理計算による(準)安定磁気構造評価へも応用され、その有用性が示されている [Huebsch et al., Phys. Rev. X **11**, 011031 (2021)]。しかしながら、これまで本手法は単位胞間に空間変調がない($k=0$)磁気構造にしか適用されていなかった。

本研究では、上述の多極子展開に基づく磁気構造生成法を単位胞間に空間変調がある磁気構造へ適用可能な形式へ拡張した。本手法を用いることで、空間群の部分群である k 群の既約表現で分類された対称性適合磁気基底が自動的に得られるようになった。比較的単純な場合については、複数の空間変調構造を持つ磁気構造である多重 k 磁気秩序も記述できるようになった。この手法を大きな異常ホール効果が観測されている反強磁性体 -Mn と CoTa_3S_6 へ適用し、磁気構造の候補を提案した。また、ランダウ理論に基づき、反強磁性下で生じ得る物性現象を明らかにした。

上述の主要な研究成果に加え、以下に示すような予備的研究成果を得ている。

(5) 文献[M. Naka et al., Nat. Commun. **10**, 4305 (2019), S. Hayami et al., J. Phys. Soc. Jpn. **88**, 123702 (2019)]で提案された対称スピン分裂、及びスピン流生成法に関する研究として、候補物質である NiF_2 などに対して第一原理計算を行い、電子構造に対称スピン分裂が生じることを確認した。また、最局在ワニエ関数法を用いて有効モデルを構築し、得られた有効モデルに基づき、スピン伝導度のテスト計算を行った。

(6) PT 対称性を保つ反強磁性体である LaMnSi の電子構造を第一原理計算によって求め、反強磁性下でバンドシフトが生じることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Yanagi Yuki, Kusunose Hiroaki, Nomoto Takuya, Arita Ryotaro, Suzuki Michi-To | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 Generation of modulated magnetic structures based on cluster multipole expansion: Application to -Mn and CoM3S6 | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 014407/1-15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.014407 | 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 速水 賢, 大岩 陸人, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明 | 4. 巻 58 |
| 2. 論文標題 ミクロな多極子による電子物性の表現論 (その9) | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 固体物理 | 6. 最初と最後の頁 11-30 |
| 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 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 Yanagi Yuki, Ikeda Junya, Fujiwara Kohei, Nomura Kentaro, Tsukazaki Atsushi, Suzuki Michi-To | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 First-principles investigation of magnetic and transport properties in hole-doped shandite compounds $\text{Co}_3\text{InxSn}_2 - \text{xS}_2$ | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 205112/1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.205112 | 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 Huyen Vu Thi Ngoc, Yanagi Yuki, Suzuki Michi-To | 4. 巻 104 |
| 2. 論文標題 Spin and anomalous Hall effects emerging from topological degeneracy in the Dirac fermion system CuMnAs | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 035110/1-12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.035110 | 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 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明 | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 ミクロな多極子による電子物性の表現論 (その5) | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 固体物理 | 6. 最初と最後の頁 171-188 |
| 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 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 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明 | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 ミクロな多極子による電子物性の表現論 (その6) | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 固体物理 | 6. 最初と最後の頁 333-353 |
| 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 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 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明 | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 ミクロな多極子による電子物性の表現論 (その7) | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 固体物理 | 6. 最初と最後の頁 507-531 |
| 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 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 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明 | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 ミクロな多極子による電子物性の表現論 (その8) | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 固体物理 | 6. 最初と最後の頁 181-201 |
| 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 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 Hayami Satoru, Yanagi Yuki, Kusunose Hiroaki | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 Spontaneous antisymmetric spin splitting in noncollinear antiferromagnets without spin-orbit coupling | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 220403/1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.220403 | 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 Naka Makoto, Hayami Satoru, Kusunose Hiroaki, Yanagi Yuki, Motome Yukitoshi, Seo Hitoshi | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Anomalous Hall effect in -type organic antiferromagnets | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 075112/1-11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.075112 | 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 Hayami Satoru, Yanagi Yuki, Kusunose Hiroaki | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Bottom-up design of spin-split and reshaped electronic band structures in antiferromagnets without spin-orbit coupling: Procedure on the basis of augmented multipoles | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 144441/1-24 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.144441 | 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 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明 | 4. 巻 55 |
| 2. 論文標題 ミクロな多極子による電子物性の表現論(その3) | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 固体物理 | 6. 最初と最後の頁 379-396 |
| 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 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 鈴木 通人, 柳 有起, 有田 亮太郎 | 4. 巻 55 |
| 2. 論文標題 クラスター多極子法と電子状態計算による反強磁性体の物性解析 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 固体物理 | 6. 最初と最後の頁 561-572 |
| 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 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 速水 賢, 八城 愛美, 柳 有起, 楠瀬 博明 | 4. 巻 56 |
| 2. 論文標題 ミクロな多極子による電子物性の表現論(その4) | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 固体物理 | 6. 最初と最後の頁 1-19 |
| 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 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10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Michi-To Suzuki, Eiaki V. Morooka, Yuki Yanagi, Takuya Nomoto, Hiroaki Kusunose |
| 2. 発表標題 Partial spectrum descriptors of local magnetic environments |
| 3. 学会等名 10th International Conference on Aperiodic Crystals (Aperiodic 2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田武見, 柳有起, 三本啓輔 |
| 2. 発表標題 RTSi (R=Ce, La, T=Co, Mn) に対する第一原理計算とWannier模型による電子状態の解析II |
| 3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 谷田博司, 松岡紘人, 川村幸裕, 比嘉野乃花, 松村武, 三本啓輔, 柳有起, 山田武見, 室裕司, 福原忠, 並木孝洋, 桑井智彦 |
| 2. 発表標題 時空間反転対称な反強磁性体CeMnSiの重い電子状態と磁気相図 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山田武見, 柳有起, 三本啓輔 |
| 2. 発表標題 RTSi (R=Ce,La, T=Co,Mn)に対する第一原理計算とWannier模型による電子状態の解析 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 谷田博司, 浦瑠希, 川村幸裕, 柳有起, 山田武見, 三本啓輔, 室裕司, 福原忠, 並木孝洋, 桑井智彦 |
| 2. 発表標題 RMnSiにおける希土類とマンガンの磁性 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Vu Thi Ngoc Huyen, Yuki Yanagi, Michi-To Suzuki |
| 2. 発表標題 Spin and anomalous Hall effects emerging from topological degeneracy in Dirac fermion system CuMnAs |
| 3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2020 (SCES 2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Makoto Naka, Satoru Hayami, Hiroaki Kusunose, Yuki Yanagi, Yukitoshi Motome, Hitoshi Seo |
| 2. 発表標題 Spin current generation in collinear antiferromagnets |
| 3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (QLC2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 須藤健太, 柳有起, 高橋武士, 小林夏野, 鈴木通人, 木俣基 |
| 2. 発表標題 カイラル半導体における非相反磁気抵抗の強磁場効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高木寛貴, 高木里奈, 中島多郎, 齋藤開, 野本拓也, 見波将, 鈴木通人, 柳有起, 平山元昭, カーン・ドゥイ・ヌイエン, 軽部皓介, 橋爪大輔, 十倉好紀, 有田亮太郎, 関真一郎 |
| 2. 発表標題 キラルな反強磁性体CoTa ₃ S ₆ における巨大な異常ホール効果 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 柳有起, 池田絢哉, 藤原宏平, 野村健太郎, 塚崎敦, 鈴木通人 |
| 2. 発表標題 Co ₃ In _x Sn _{2-x} S ₂ における輸送現象の第一原理計算に基づく解析 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 |
| 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 |
|---------|---------|
|---------|---------|