

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01036

研究課題名（和文）対称性の破れた磁性体における角運動量変換を利用した新物質機能開拓

研究課題名（英文）Exploration of novel material functions utilizing angular momentum conversion in symmetry-broken magnets

研究代表者

小野瀬 佳文 (Onose, Yoshinori)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：80436526

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、対称性の破れによって顕在化した各種の角運動量やそれらの相互変換を利用することにより、空間反転対称性が破れた磁性体における新現象・新機能を開拓することを目指して研究を行った。その結果、(1)120度磁気構造を持つPdCrO<sub>2</sub>における非相反伝導の観測、(2)室温らせん磁性体MnAu<sub>2</sub>におけるキラリティの制御と検出、(3)マイクロ波顕微鏡を用いたフォノン結晶におけるトポロジカル端状態の観測、といった三つの成果が主に得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

PdCrO<sub>2</sub>における非相反伝導の研究は、対称性に敏感な非相反伝導を利用して磁気構造を研究する方法論を示したという意味において一定の学術的な意味を有する。MnAu<sub>2</sub>のらせん磁性におけるキラリティの制御と検出に関しては、室温でらせん磁性体のキラリティ制御と検出が可能であることを初めて示しており、将来のスピン트로ニクス応用への可能性を示した。フォノン結晶におけるトポロジカル端状態の観測は、弾性波の導波路への応用研究へ展開することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this work, we have tried to explore novel phenomena and functionalities induced by the emergent angular momenta of electrons and phonons in noncentrosymmetric materials. We obtained mainly three outcomes: (1) nonreciprocal electronic transport in a metallic 120-degree antiferromagnet PdCrO<sub>2</sub>, (2) Room temperature chirality control and detection in a helimagnetic MnAu<sub>2</sub> thin film, and (3) Imaging an acoustic topological edge mode in a topological phononic crystal with microwave impedance microscopy.

研究分野：物性物理学

キーワード：角運動量 スピン 対称性

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

対称性と物理現象は深く結びついていることが知られている。特に空間反転対称性が破れると、自然旋光性や圧電効果などユニークな効果が現れることが知られている。さらには、電子バンドがスピン分裂し、スピン状態が運動量に依存するようになるスピン運動量ロッキングの効果も明らかになってきた。このようなスピン運動量ロッキング状態では、電流によってスピン蓄積が生じるエデルシュタイン効果など新奇な現象が観測されている。同様な角運動量に依存したバンド構造は、実は電子のみならず、フォノンやマグノンにも表れる。例えば、表面弾性波と呼ばれるフォノンの表面モードでは、表面における反転対称性の破れを反映して、楕円偏光を持っており、しかもその方向は波数の方向を反転させると逆になる。このような偏光回転はフォノンの角運動量と考えられ、例えば磁性膜を付けた表面弾性波デバイスにおける非相反応答などが生じる起源となっている(佐々木、小野瀬ら Phys. Rev. B 2017)。最近、小野瀬らはこの他にも、熱流非相反性(廣金、小野瀬ら Science Advances 2020)や金属らせん磁性体におけるキラリティ制御(ジャン、小野瀬ら Nature Communications 2020)など各種の角運動量に関連する新現象を多数開拓してきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、対称性の破れによって顕在化した各種の角運動量やそれらの相互変換を利用することにより、空間反転対称性が破れた磁性体における新現象・新機能を開拓することである。

3. 研究の方法

本研究では、主に(1)120度磁気構造を持つPdCrO<sub>2</sub>における非相反伝導の観測、(2)室温らせん磁性体MnAu<sub>2</sub>におけるキラリティの制御と検出、(3)マイクロ波顕微鏡を用いたフォノン結晶におけるトポロジカル端状態の観測、といった角運動量に関連する現象・機能を実証する研究を行った。それぞれの項目で、目的に沿った微細デバイスを作製し、電気伝導やマイクロ波応答により現象・機能を実証した。より具体的な内容に関しては、次節の各項目で述べる。

4. 研究成果

(1)120度磁気構造を持つPdCrO<sub>2</sub>における非相反伝導の観測(Phys. Rev. B 103, 184428 (2021))

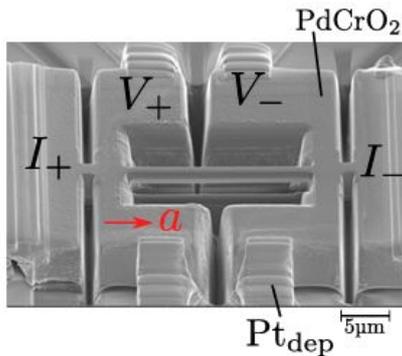


図1:集束イオンビーム法で作製したPdCrO<sub>2</sub>の微細デバイス。

Cr層が磁性を担う。Cr層は120度磁気構造を示している。その巻き方が互い違いで積層していることが明らかになってきたが、各サイトの磁気モーメントの方向など詳細については明らかではなかった。本研究では、PdCrO<sub>2</sub>単結晶を作製し、これを集束イオンビーム法で加工し、高い電流密度が印加可能な微細デバイスを作製した(図1)。これを用いて、非相反応答を表す第二高調波抵抗率の磁場非対称成分を測定した。この磁場依存性を図2に示す。T<sub>N</sub>=37K以下で有限の非相反伝導が発現している。磁場と電流が垂直(H⊥j)の配置では、階段状の構造がゼロ磁場付近に現れる。一方、磁場と電流が平行な配置(H∥j)では、高磁場で非相反伝導が立ち上がる振舞いが観測された。この物質では、過去の中性子散乱に基づいて磁気構造の候補がいくつか挙げられていたが、磁気転移点以下の非相反伝導の存在は、

空間反転対称性が破れてスピン運動量が結合した状態においては、非自明な物理現象が多く観測されているが、時間反転対称性も破れていけば、非相反伝導という現象が発現することが明らかになってきた。これは、電流の向きで抵抗が異なる現象であり、別の言い方をすれば電流の2乗に比例する電圧の成分が発現するものである。非相反伝導の有無やその方向は磁気対称性に敏感なため、磁気構造のプローブとしても活用できる。本研究では、120度磁気構造を示すPdCrO<sub>2</sub>の非相反伝導を測定した。PdCrO<sub>2</sub>は三角格子のCr層とPd層からなる結晶構造を持つが、Pd層が金属的な伝導を担い、

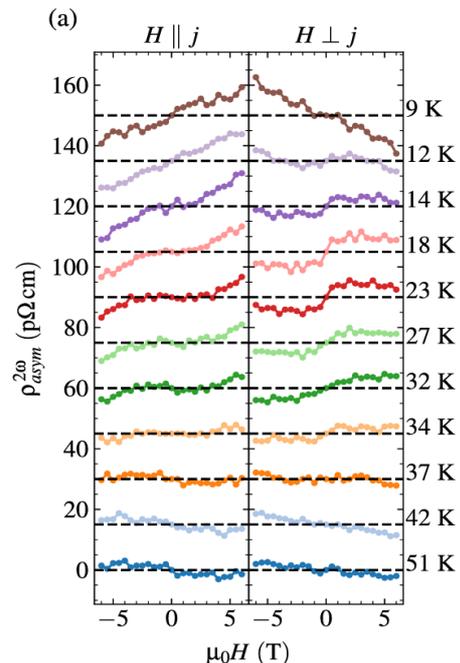


図2: PdCrO<sub>2</sub>における非相反伝導

空間反転対称性の破れた磁気構造を強く示唆するものである。さらに、非相反伝導に基づいてどの候補が妥当か議論した。

(2)室温らせん磁性体 MnAu<sub>2</sub>におけるキラリティの制御と検出(Nat. Commun. 15, 1999 (2024))

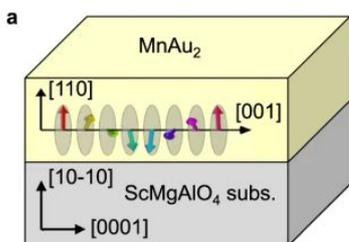


図 3:ScMgAlO<sub>4</sub> 基板上に成長した MnAu<sub>2</sub> 薄膜

らせん磁性体は文字通り磁気モーメントがらせん状に整列した物質であり、らせんの巻き方の自由度(キラリティ)が存在する。このキラリティは絶縁体の場合には、電場誘起のジャロシンスキー守谷相互作用によってコントロールすることが可能であるが、大きな電場を印加することが出来ない金属では最近になるまでコントロールすることは出来なかった。2020年に、小野瀬らのグループでは電流と磁場を同時に印加すると、スピントランスファートルクの効果によりキラリティがそろうことを発見した(ジャン、小野瀬ら Nature Communications 2020)。この成果は、キラリティ自由度を用いたスピントロニクスの可能性を示唆するものであった。本研究では、これを実証するために、室温らせん磁性体 MnAu<sub>2</sub> 薄膜におけるキラリティ制御や関連するスピントロニクス機能の開拓を行った。薄膜専門家の東北大学金属材料研究所の関剛齋教授との共同研究により、ScMgAlO<sub>4</sub> 基板上にらせん磁性体 MnAu<sub>2</sub> 薄膜を成長することに成功し、そのサンプルにおいて電流磁場印加後に第二高調波抵抗率を測定し、キラリティ制御を実証した(図4)。そして、Pt/MnAu<sub>2</sub> 二層デバイスを作製し、このデバイス上に電流を印加するとキラリティ依存のスピントラック蓄積生じ、これが Pt 層に拡散した後にスピントラック電圧が発生すること、すなわち横抵抗にキラリティ依存の成分が存在することを見出した。これを用いるとゼロ磁場でもキラリティの検出が可能である。

らせん磁性体は文字通り磁気モーメントがらせん状に整列した物質であり、らせんの巻き方の自由度(キラリティ)が存在する。このキラリティは絶縁体の場合には、電場誘起のジャロシンスキー守谷相互作用によってコントロールすることが可能であるが、大きな電場を印加することが出来ない金属では最近になるまでコントロールすることは出来なかった。2020年に、小野瀬らのグループでは電流と磁場を同時に印加すると、スピントランスファートルクの効果によりキラリティがそろうことを発見した(ジャン、小野瀬ら Nature Communications 2020)。この成果は、キラリティ自由度を用いたスピントロニクスの可能性を示唆するものであった。本研究では、これを実証するために、室温らせん磁性体 MnAu<sub>2</sub> 薄膜におけるキラリティ制御や関連するスピントロニクス機能の開拓を行った。薄膜専門家の東北大学金属材料研究所の関剛齋教授との共同研究により、ScMgAlO<sub>4</sub> 基板上にらせん磁性体 MnAu<sub>2</sub> 薄膜を成長することに成功し、そのサンプルにおいて電流磁場印加後に第二高調波抵抗率を測定し、キラリティ制御を実証した(図4)。そして、Pt/MnAu<sub>2</sub> 二層デバイスを作製し、このデバイス上に電流を印加するとキラリティ依存のスピントラック蓄積生じ、これが Pt 層に拡散した後にスピントラック電圧が発生すること、すなわち横抵抗にキラリティ依存の成分が存在することを見出した。これを用いるとゼロ磁場でもキラリティの検出が可能である。

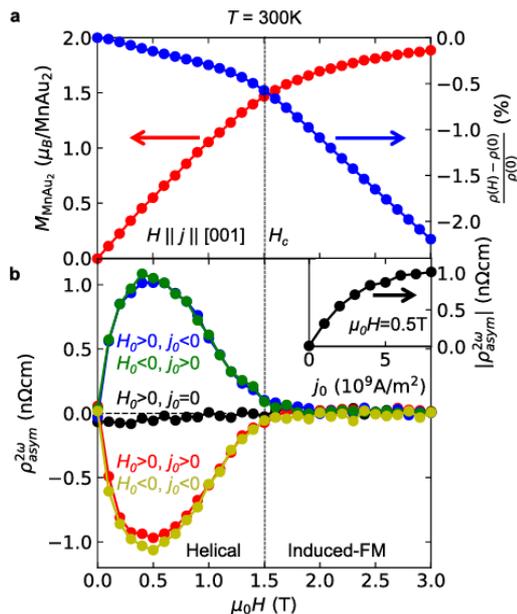


図 4 : らせん磁性体 MnAu<sub>2</sub> 薄膜における磁化曲線、磁気抵抗(上段)と第二高調波抵抗率の磁場反対称成分(下段)。第二高調波抵抗率は磁場 H<sub>0</sub>、電流 j<sub>0</sub> によるキラリティ制御に測定している。

(3)マイクロ波顕微鏡を用いたフォノン結晶におけるトポロジカル端状態の観測 (Phys. Rev. Appl. 19, 014001 (2023))

量子ホール状態やトポロジカル絶縁体などのトポロジカル状態においては内部では絶縁体となっているが、端や表面で金属的な伝導が可能となっている。このようなトポロジカル状態は、電子だけでなく固体中のあらゆる量子で発現する可能性がある。我々は、圧電体基板上に大小二つの金属ピラーからなる単位格子をもつ八ニカム格子のフォノン結晶を作製した。これは、量子バレーホール状態と呼ばれるトポロジカル状態になっている。単位格子の大小の関係を逆転させるとトポロジカル数が異なる状態となるので、二つのトポロジカル状態 A, B の間にはフォノンの端状態の形成が期待される。我々は、実際にこのトポロジカル状態 A, B を作製し(図5上) その間の端状態をマイクロ波顕微鏡により観察した。図5下に 2.38GHz におけるマイクロ波顕微鏡像を示す。A, B の境界に弾性波が伝搬する様子が観測されており、確かにトポロジカル端状態が形成されていることが確かめられた。

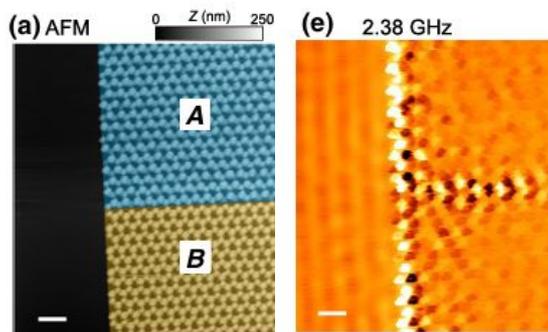


図 5 上: 単位格子に大小二つのピラーよりなる八ニカム格子の AFM 像。A, B では単位格子の二つのピラーの大小関係が互いに逆である。下: 2.38GHz におけるマイクロ波顕微鏡像。A, B の境界にトポロジカル端状態が観測されている。

図 5 下に 2.38GHz におけるマイクロ波顕微鏡像を示す。A, B の境界に弾性波が伝搬する様子が観測されており、確かにトポロジカル端状態が形成されていることが確かめられた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Nii, Y. Onose	4. 巻 19
2. 論文標題 Imaging an Acoustic Topological Edge Mode on a Patterned Substrate with Microwave Impedance Microscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 014001/1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.19.014001	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 Hirose Sakyo, Iguchi Yusuke, Nii Yoichi, Kimura Tsuyoshi, Onose Yoshinori	4. 巻 121
2. 論文標題 Nonreciprocal microwave response at room temperature in multiferroic Y-type hexaferrite BaSrCo <sub>2</sub> Fe <sub>11</sub> AlO <sub>22</sub>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 222401/1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0124283	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 M. Akaike, Y. Nii, H. Masuda, and Y. Onose	4. 巻 103
2. 論文標題 Nonreciprocal electronic transport in PdCrO <sub>2</sub> : Implication of spatial inversion symmetry breaking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184428/1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.103.184428	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 Y. Nii, Y. Hirokane, S. Nakamura, N. Kabeya, S. Kimura, Y. Tomioka, T. Nojima, and Y. Onose	4. 巻 105
2. 論文標題 Elastic study of electric quadrupolar correlation in the paramagnetic state of the frustrated quantum magnet Tb <sub>2</sub> + Ti <sub>2</sub> -O <sub>7</sub>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094414/1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.094414	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 R. Sasaki, Y. Nii, Y. Onose	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetization control by angular momentum transfer from surface acoustic wave to ferromagnetic spin moments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2599/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-22728-6	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 Y. Nii, Y. Hirokane, T. Koretsune, D. Ishikawa, A. Q. R. Baron, and Y. Onose	4. 巻 104
2. 論文標題 Effect of symmetry breaking on short-wavelength acoustic phonons in the chiral magnet MnSi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 081101/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.L081101	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 Masuda Hidetoshi, Seki Takeshi, Ohe Jun-ichiro, Nii Yoichi, Masuda Hiroto, Takanashi Koki, Onose Yoshinori	4. 巻 15
2. 論文標題 Room temperature chirality switching and detection in a helimagnetic MnAu <sub>2</sub> thin film	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1999/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-024-46326-4	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20件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yoshinori Onose
2. 発表標題 Magnetic domain control by the inverse of nonreciprocal responses
3. 学会等名 Symposium on Quantum materials synthesis 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinori Onose
2. 発表標題 Helimagnetic Spintronics
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Condensed Matter Physics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新居陽一、小野瀬佳文
2. 発表標題 走査型マイクロ波顕微鏡を用いたトポロジカル表面弾性波の観測
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 Hidetoshi Masuda, Takeshi Seki, Yoichi Nii, Hiroto Masuda, Koki Takanashi, Yoshinori Onose
2. 発表標題 Room-temperature chirality switching in a helimagnetic thin film
3. 学会等名 American Physical Society March Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hidetoshi Masuda, Takeshi Seki, Jun-ichiro Ohe, Yoichi Nii, Hiroto Masuda, Koki Takanashi, Yoshinori Onose
2. 発表標題 Helimagnet-based spintronics: control and detection of magnetic chirality
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 増田英俊, 関剛斎, 大江純一郎, 新居陽一, 高梨弘毅, 小野瀬佳文
2. 発表標題 らせん磁性金属 MnAu <sub>2</sub> における電流誘起スピン偏極の観測によるキラリティー検出
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 木元悠太, 増田英俊, 関剛斎, 新居陽一, 高梨弘毅, 小野瀬佳文
2. 発表標題 らせん磁性金属 MnAu <sub>2</sub> におけるキラリティドメインに依存した非線形電気伝導
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 増田英俊, 関剛斎, 新居陽一, 高梨弘毅, 小野瀬佳文
2. 発表標題 らせん磁性体MnAu <sub>2</sub> 薄膜における室温付近でのヘリシティーの電流制御
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 Y. Nii
2. 発表標題 Nonreciprocal Transport and Its Inverse Effect in Noncentrosymmetric Magnets
3. 学会等名 Summit of Materials Science 2022 and GIMRT User Meeting 202 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南部雄亮, X. Pang, 川又雅広, 村川寛, M. Avdeev, 増田英俊, 花咲徳亮, 小野瀬佳文
2. 発表標題 規約表現論と磁気空間群で決めるSr <sub>2</sub> MnSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の磁気構造
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川又雅広, X. Pang, 村川寛, 河村聖子, 中島健次, 増田英俊, 花咲徳亮, 藤田全基, 小野瀬佳文, 南部雄亮
2. 発表標題 正方格子反強磁性体Sr <sub>2</sub> MnSi <sub>2</sub> O <sub>7</sub> の磁気励起
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石井祐太, 山崎裕一, 小塚裕介, Lustikova Jana, 新居陽一, 小野瀬佳文, 中尾裕則, 若林裕助
2. 発表標題 時分解XMCDを用いた強磁性共鳴における磁化歳差運動の直接観測
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinori Onose
2. 発表標題 Magnetic domain control by the inverse of nonreciprocal responses
3. 学会等名 Conference of Condensed Matter Physics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshinori Onose
2. 発表標題 Chirality control and detection in metallic helimagnets
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 メイヨーアレックス浩, 増田英俊, 新居陽一, Darius-Alexandru Deaconu, Mohammad Saeed Bahramy, 高橋英史, 石渡晋太郎, 小野瀬佳文
2. 発表標題 らせん磁性半金属 -EuP3における非相反電気伝導
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 石井祐太, 山崎裕一, 小塚裕介, Jana Lustikova, 新居陽一, 小野瀬佳文, 横山優一, 水牧仁一郎, 足立純一, 中尾裕則, 有馬孝尚, 若林裕助
2. 発表標題 FMRに誘起されたスピン・軌道モーメントの磁化歳差運動に対する時分割XMCD測定
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新居陽一, 山本慧, 菅野将誠, 前川禎通, 小野瀬佳文
2. 発表標題 フォノン-マグノン結合による表面弾性波の非相反回折の観測
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田島史門, 増田英俊, 新居陽一, 木村尚次郎, 小野瀬佳文
2. 発表標題 高温マルチフェロイックTb <sub>2</sub> (MoO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuta Kimoto, Hidetoshi Masuda, Takeshi Seki, Yoichi Nii, Yoshinori Onose
2. 発表標題 Current-induced sliding motion in a helimagnet MnAu <sub>2</sub>
3. 学会等名 American Physical Society March meeting (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Alex H Mayo, Hidetoshi Masuda, Yoichi Nii, Darius-Alexandru Deaconu, Mohammad Saeed Bahramy, Hidefumi Takahashi, Shintaro Ishiwata, Yoshinori Onose
2. 発表標題 Nonreciprocal electronic transport in a helimagnetic semimetal -EuP <sub>3</sub>
3. 学会等名 American Physical Society March meeting (国際学会)
4. 発表年 2024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	増田 英俊  (Masuda Hidetoshi)  (20849278)	東北大学・金属材料研究所・助教    (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	新居 陽一  (Yoichi Nii)  (80708488)	東北大学・金属材料研究所・准教授    (11301)	

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