

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01794

研究課題名（和文）スキルミオンのダイナミクスとそのニューロモルフィックデバイスへの応用

研究課題名（英文）Dynamics of skyrmions and their applications to neuromorphic devices

研究代表者

横内 智行（Yokouchi, Tomoyuki）

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・ユニットリーダー

研究者番号：20823389

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：近年、人工ニューラルネットワーク(ANN)を用いた機械学習の重要性が急速に増している。一方その実行に用いられる従来型素子には消費電力が大きいといった課題がある。そこで、ANNの実行に特化した素子（人工知能素子）の研究が進められており、その有望な候補の一つとして、スキルミオンがある。そこで本研究では、スキルミオンを用いた人工知能素子の作成と性能評価を行い、その高性能化を目指した。具体的には、スキルミオンを用いた物理リザーバー素子の性能評価を行い、手書き数字識別で高い認識率を達成した。また、反強磁性体やワイル半金属における非線形応答の観測も行い、人工知能素子への応用可能性を探った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の社会的意義は、エネルギー効率の高い高性能人工知能の実現につながる可能性がある点である。従来のCPUやGPUは消費電力が大きく、メモリ機能がないため効率が低下する。スキルミオンを用いた人工知能素子は低消費電力で操作可能であり、メモリ効果を持つため計算効率を大幅に向上させる可能性を秘めている。また、スキルミオンの粒子性によりナノスケールで多数のノード形成が容易で、高密度集積回路が実現可能という利点もある。また、本研究で観測した反強磁性体やワイル半金属における非線形応答は、人工知能素子の新たな動作原理として発展していく可能性を秘めている。

研究成果の概要（英文）：In recent years, the importance of machine learning using artificial neural networks (ANN) has rapidly increased. However, conventional devices used to run ANNs face challenges such as high power consumption. Therefore, research on devices specialized for running ANNs (artificial intelligence devices) has been advancing. Skyrmions, in particular, have garnered attention as a promising candidate. This research focused on the creation and performance evaluation of artificial intelligence devices using skyrmions, aiming to enhance their performance. Specifically, we evaluated the performance of physical reservoir devices using skyrmions and achieved high recognition rates in handwritten digit recognition. Additionally, we observed nonlinear responses in antiferromagnetic materials and Weyl semimetals, exploring their potential applications in neuromorphic devices.

研究分野：物性物理

キーワード：スキルミオン ニューロモルフィックデバイス 非相反伝導現象

### 1. 研究開始当初の背景

人工ニューラルネットワークを用いた機械学習が、画像認識や音声認識などで、非常に高い性能を示すことが明らかになり、近年その重要性が急速に高まっている。その実行には、CPU や GPU といった汎用の演算装置を用いることが一般的である。しかし、これらの装置には消費電力が大きいという問題がある。さらに、CPU や GPU にはメモリ機能がないため、実際の人間の脳のように過去の情報を留めるには、外部のメモリが必要であり、それが計算時間の増大につながる。そこで、従来の CPU や GPU に代わり、人工ニューラルネットワークの実行に特化した専用ハードウェア(ニューロモルフィックデバイス)の実現が望まれており、それに向けた研究が行われている。ここで重要となる物理的な性質が「非線形性」と「メモリ効果」である。そして、磁性体・スピントロニクス素子が示す物理現象の多くが非線形性とメモリ効果を合わせ持つことから、これらを用いたデバイスがニューロモルフィックデバイス実現への有力な候補となっている。

その中の一つに、スキルミオンと呼ばれるナノスケールの粒子状のトポロジカルな磁気構造を利用したニューロモルフィックデバイスがある。スキルミオンはその非自明なトポロジカルな構造に由来し、粒子性や高い安定性、低消費電力で操作可能といった性質をもつ。また近年の研究により、スキルミオンやそれに関連した磁気構造においてもニューロモルフィックデバイスに不可欠な非線形応答が生じることが明らかになってきている。さらに、スキルミオンの形成・消失は一次転移のためメモリ効果をもつ。したがって、これらの特性を詳細に解明し、適切なデバイスを設計することで、ニューロモルフィック計算の実行が可能となるはずである。実際、一つのスキルミオンを一つのノードに見立てたニューロモルフィックデバイスが理論的に提案されている。

特に、スキルミオンを用いたニューロモルフィックデバイスにはいくつかの利点がある。一つは、ノードの数を容易に増やせる点である。スキルミオンの粒子性により、微細加工をすることなくナノスケールの多数のノードを作成できる。たとえば、微小なスキルミオンの直径は数ナノメートル程度であり、粒子的な安定性を持つことから、複雑な微細加工をせずに、100 ナノメートル四方の薄膜に 1000 個以上のスキルミオンを形成でき、容易にノード数を増やせる。二つ目は、スキルミオンが低電流密度で駆動できる点である。これまでの研究により、スキルミオンは強磁性磁壁と比較して最大で 4 桁小さい電流密度で駆動できることが明らかになっている。したがって、スキルミオンを用いたニューロモルフィックデバイスは、高い省エネルギー性を持つことも期待される。

### 2. 研究の目的

このような背景のもと、本研究では、スキルミオンの非線形応答現象の物理的性質とその起源を明らかにするとともに、それを用いたニューロモルフィックデバイスの作成・性能評価を目的とした。さらにその性能と非線形応答特性との関係性の解明を行い、ニューロモルフィックデバイスの高性能化および実用化へむけた新たな指針を得ることも目的とした。

### 3. 研究の方法

・積層薄膜におけるスキルミオンの状態と、ニューロモルフィックデバイスの性能の関係性を詳しく調べるためには、積層薄膜のスキルミオンを実空間で観察する必要がある。そのため、高空間分解能で磁気構造を観察できる、磁気カー効果顕微鏡を立ち上げた。

・非線形応答の観測には、大きな電流密度が必要である。大きな電流密度の印加には、試料の大きさをマイクロメートル以下の大きさにする必要がある。そこで、専用のマイクロプローバーを導入し、マイクロメートルスケールの試料を作成する技術を確立した。

#### 4. 研究成果

##### (1) スキルミオン物理リザバー素子

まず、スキルミオンを用いた、ニューロモルフィック素子の一種である物理リザバー素子に着目した。具体的には、磁場誘起のスキルミオンダイナミクスに基づく物理リザバー素子を作成し、その性能を詳細に調べることで、スキルミオンの物理リザバー素子への応用可能性を明らかにした。下記に具体的に記す。

本研究で対象としたスキルミオン物質は、Pt/Co/Ir 積層薄膜である。この積層薄膜では、数マイクロメートル程度のスキルミオンが室温で形成することが先行研究で既に明らかになっている。まず、この薄膜において振幅が数ミリテスラ程度の交流磁場をかけると、スキルミオンの大きさが変化したり、生成・消失したりして変形するというダイナミクスが生じることを確認した。次に、この磁場誘起スキルミオンダイナミクスが、物理リザバーに要求される非線形とメモリ効果を持つことを明らかにした。

その後、実際にこの薄膜を用いてスキルミオン物理リザバー素子を作成した[図1]。そして、物理リザバー素子の性能評価手法の一つである波形認識問題を実行し、性能を評価した。特に、Pt/Co/Ir 積層薄膜のCoの厚さを変化させることで、形成するスキルミオンの数が異なる複数の物理リザバー素子を作製し、スキルミオン数に対する波形認識問題の認識率の依存性を系統的に調べた。その結果、スキルミオンの数が増えるにつれ波形認識の認識率が高くなる傾向があることを発見した。このことは、スキルミオンを用いることで物理リザバー素子の高性能化につながる可能性を示している。

次に、同様のスキルミオン物理リザバー素子を用いて、波形識別よりもより複雑かつ実用的な識別問題である、手書き数字識別問題を実行できるかを確認した。まず、0から9までのさまざまな人が書いた手書き数字を、スキルミオン物理リザバー素子に入力できるように前処理を施した。そして、作成した物理リザバー素子に入力し、物理リザバー計算を実行することで、95%近い認識率を得ることができた。この認識率は、これまで報告された人工知能素子における手書き数字識別の認識率に匹敵するものであり、スキルミオンを物理リザバー素子に利用できることを示している。以上の結果は査読付き論文として発表した[T. Yokouchi et al., Science Advances 8, abq5652 (2022)]。

積層薄膜におけるスキルミオンが物理リザバー素子に利用できることが明らかになった後、さらなる性能向上を目指して研究を推進した。具体的には、まず一つ目として、上記のデバイスでは、異常ホール効果によりスキルミオンの状態を検出するため、高集積化に難点がある。そこで、より局所的な磁化を読み取る物理リザバー素子を設計し、同等の性能があることを明らかにした。二つ目として、スキルミオンの次元性と物理リザバー性能の関係の解明である。物理リザバーでは、入力信号を複雑に変換する必要がある。特に、バルク物質で形成される3次元的なスキルミオンは薄膜における2次元的なスキルミオンに比べより複雑なダイナミクスを示すと予想される。そこで、バルク物質に形成する3次元スキルミオンにおいて、物理リザバーに適應可能な応答が生じるかを探索した(共に論文準備中)。

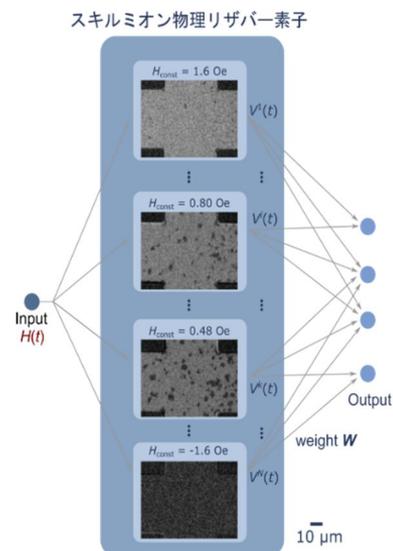


図1 スキルミオン物理リザバー素子の概念図

##### (2) 反強磁性体における新規非線形伝導現象の観測

(1)の研究では、磁場を入力として、磁場誘起のスキルミオンダイナミクスによりニューロモルフィック計算を実現している。一方で、応用の観点からは、入力として電流を用いることが望ましい。そこで、スキルミオン物質を含めた様々な物質をマイクロスケールに微細加工し、大きな電流密度を印加した際に生じる非線形応答を探索した。

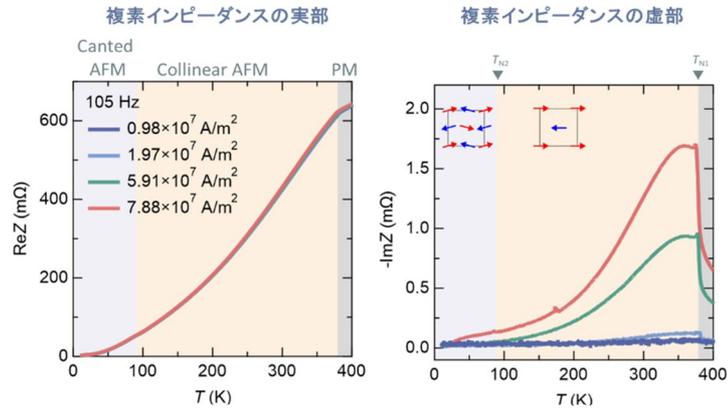


図 2 反強磁性体 FeSn<sub>2</sub> における非線形応答

まず予想外の結果として、反強磁性体 FeSn<sub>2</sub> において巨大な非線形応答を観測した [T. Yokouchi et al, arXiv:2312.01553 (2023)]. 反強磁性体 FeSn<sub>2</sub> は室温以上で共線的な反強磁性秩序を示す物質である。電流密度を変えて複素インピーダンスを測定したところ、電流密度が大きい場合に、転移点直下で複素インピーダンスの虚部が増大することを発見した [図 2]。理論家との共同研究により、観測された複素インピーダンスの虚部の非線形な増大が、反強磁性磁壁の電流駆動に関連して生じている可能性を議論した。

この結果は、当初想定していなかったものであるが、観測された非線形応答は物理リザーブ素子への応用可能性を持つ。そこで、この非線形応答を用いた物理リザーブ計算を実行するために、実時間で非線形応答を高精度で観測する手法も確立した。

### (3) ワイル半金属における非相反伝導現象の観測

加えて、非線形応答の探索において当初予想していなかった二つ目の結果として、ワイル半金属 WTe<sub>2</sub> において巨大非相反伝導効果を観測した [T. Yokouchi et al., Phys. Rev. Lett. 130, 136301 (2023). (Editors' suggestion)]. 非相反伝導現象とは、電流を印加する方向によって抵抗の値が変わる非線形応答であり、一種のダイオード効果である。フェルミ準位を制御しながら、ワイル半金属 WTe<sub>2</sub> において非相反伝導現象を測定したところ、フェルミ準位がワイル点近傍にある際に、非相反伝導現象が増大することが明らかになった (図 3)。理論家との共同研究により、ワイル点近傍で増大するベリー曲率により、非相反伝導現象が増大している可能性を明らかにした。

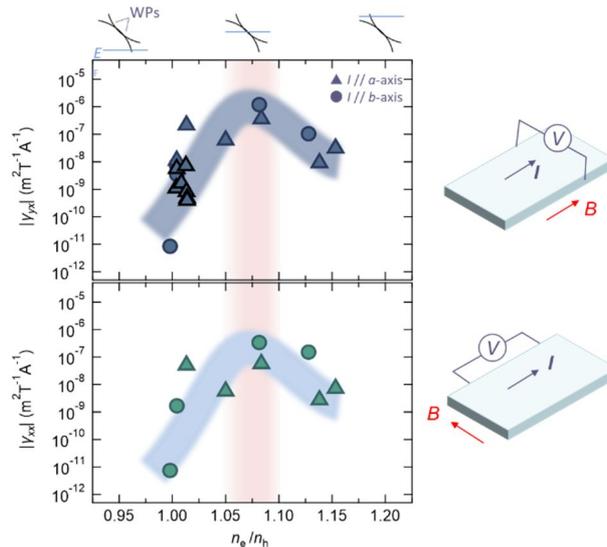


図 3 WTe<sub>2</sub> における非相反伝導現象のフェルミ準位依存性

## 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 5件）

1. 著者名 Matsuki Junnosuke, Yokouchi Tomoyuki, Shiomi Yuki	4. 巻 16
2. 論文標題 Modulation of spin Hall magnetoresistance in $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Pt}$ by uniaxial tensile strain	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 123001 ~ 123001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ad0db7	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 Zhang Siyue, Harii Kazuya, Yokouchi Tomoyuki, Okayasu Satoru, Shiomi Yuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Amorphous Ferromagnetic Metal in van der Waals Materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2300609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/aelm.202300609	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 Nakagawa K., Kimata M., Yokouchi T., Shiomi Y.	4. 巻 107
2. 論文標題 Surface anisotropic magnetoresistance in the antiferromagnetic semiconductor $\text{Sb}_2\text{Te}_3$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L180405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.107.1180405	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 Yokouchi Tomoyuki, Ikeda Yuya, Morimoto Takahiro, Shiomi Yuki	4. 巻 130
2. 論文標題 Giant Magnetochiral Anisotropy in Weyl Semimetal $\text{WTe}_2$ Induced by Diverging Berry Curvature	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 136301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.136301	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 Miyazaki Yu, Yokouchi Tomoyuki, Shiomi Yuki	4. 巻 13
2. 論文標題 Trapping and manipulating skyrmions in two-dimensional films by surface acoustic waves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1922
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-29022-z	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 Zhang Siyue, Miyazaki Yu, Yokouchi Tomoyuki, Shiomi Yuki	4. 巻 121
2. 論文標題 Phase-change control of anomalous Hall effect in ferromagnetic MnBi thin films	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 262402 ~ 262402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0121284	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 Yokouchi Tomoyuki, Sugimoto Satoshi, Rana Bivas, Seki Shinichiro, Ogawa Naoki, Shiomi Yuki, Kasai Shinya, Otani Yoshichika	4. 巻 8
2. 論文標題 Pattern recognition with neuromorphic computing using magnetic field-induced dynamics of skyrmions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabq5652
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abq5652	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 Miyazaki Yu, Yokouchi Tomoyuki, Shibata Kiyou, Chen Yao, Arisawa Hiroki, Mizoguchi Teruyasu, Saitoh Eiji, Shiomi Yuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Quantum oscillations from Fermi arc surface states in Cd <sub>3</sub> As <sub>2</sub> submicron wires	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L022002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.L022002	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 Miyazaki Yu, Yokouchi Tomoyuki, Shibata Kiyou, Chen Yao, Arisawa Hiroki, Mizoguchi Teruyasu, Saitoh Eiji, Shiomi Yuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Quantum oscillations from Fermi arc surface states in $\text{Cd}_{\text{3}}\text{As}_{\text{2}}$ submicron wires	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 L022002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.L022002	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 Yokouchi T., Shiomi Y.	4. 巻 16
2. 論文標題 Enhancement of Current-Induced Out-of-Plane Spin Polarization by Heavy-Metal-Impurity Doping in $\text{Fe}/\text{Thin Films}$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 54001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.16.054001	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 Nakagawa Kurea, Yokouchi Tomoyuki, Shiomi Yuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Reconfigurable single-material Peltier effect using magnetic-phase junctions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 24216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-03754-2	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 Hashizume Minoru, Yokouchi Tomoyuki, Nakagawa Kurea, Shiomi Yuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Anisotropic magneto-Seebeck effect in the antiferromagnetic semimetal $\text{Fe}_2\text{Te}$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.115109	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 Kitaori A., Kanazawa N., Ishizuka H., Yokouchi T., Nagaosa N., Tokura Y.	4. 巻 103
2. 論文標題 Enhanced electrical magnetochiral effect by spin-hedgehog lattice structural transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L220410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L220410	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 Kitaori Aki, Kanazawa Naoya, Yokouchi Tomoyuki, Kagawa Fumitaka, Nagaosa Naoto, Tokura Yoshinori	4. 巻 118
2. 論文標題 Emergent electromagnetic induction beyond room temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2105422118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2105422118	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8件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 T. Yokouchi
2. 発表標題 Pattern recognition with reservoir computing using magnetic-field induced dynamics of skyrmions
3. 学会等名 20th RIEC International Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Yokouchi
2. 発表標題 Giant Magnetochiral Anisotropy in Weyl-semimetal WTe <sub>2</sub> Induced by Diverging Berry Curvature
3. 学会等名 The 7th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics and the 6th Symposium on International Joint Graduate Program in Materials Science and Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Yokouchi
2. 発表標題 Thermal and quantum dynamics of magnetic skyrmions for novel computing
3. 学会等名 German-Japanese workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Yokouchi, Y. Yamane, Y. Araki, J. Ieda, Y. Shiomi
2. 発表標題 Emergent electric field induced by current-driven domain wall motion in a room-temperature antiferromagnet FeSn <sub>2</sub>
3. 学会等名 CEMS symposium on emergent quantum materials (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Yokouchi, S. Sugimoto, B. Rana, S. Seki, N. Ogawa, Y. Shiomi, S. Kasai, and Y. Otani
2. 発表標題 Pattern recognition with neuromorphic computing using magnetic-field induced dynamics of skyrmions
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 横内智行, 杉本聡志, ラナビヴァス, 関真一郎, 小川直毅, 塩見雄毅, 葛西伸哉, 大谷義近
2. 発表標題 スキルミオンの磁場誘起ダイナミクスを用いた脳型計算
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 T. Yokouchi
2. 発表標題 Emergent electromagnetic induction in a helical-spin magnet
3. 学会等名 The 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横内智行 塩見雄毅
2. 発表標題 Fe薄膜における重金属不純物ドーピングによる電流誘起面直スピン偏極の増大
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
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

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