

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01364

研究課題名（和文）トポロジカルスピントクスチャの物性とその応用への基盤構築

研究課題名（英文）Physical properties of topological spin textures and fundamentals toward its applications

研究代表者

劉 小晰 (Liu, Xiaoxi)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：10372509

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）：トポロジカルスピントクスチャは室温で安定、電界駆動可能、ナノサイズのため、次世代高密度・低消費電力情報担体として注目されている。研究期間中に、トポロジカルスピントクスチャのメモリ、新規計算デバイスへの応用を目的として研究を展開して来た。電界、磁界、熱、応力によるトポロジカルスピントクスチャ駆動に関して系統的に検討した。研究成果として、トポロジカル保護による磁気スキルミオンのチャンネル内の安定化の実現、トポロジカルスピントクスチャ間のトランスフォーメーションの実現、トポロジカルスピントクスチャを用いたユニバーサル量子ビットの提案をはじめ、インパクトの高い学術誌論文多数掲載された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高速・高密度・大容量・低消費電力の情報デバイスは、Society5.0、ユビキタス・IoT化社会では重要な役割を果たしており、将来もその役割は変わることが無い。本研究のトポロジカルスピントクスチャはサイズが小さいため高密度・大容量の特徴を持つ。電子のスピンに基づくためジュール熱の影響しない、つまり低消費電力の特徴を持つ。本研究の実施により、トポロジカルスピントクスチャの先進機械学習、高速・高セキュリティ量子計算への応用の基礎を構築した。

研究成果の概要（英文）：Topological spin textures have been considered as prominent information carriers due to their nano-size, room temperature stability, ultra-low energy consumption and high density. The object of this research focused on the application of topological spin textures for next-generation memory and non-conventional computing devices. We have systematically investigated the driving properties of topological spin textures by electric field, magnetic field, thermal gradients, and stress. We have successfully developed effective energy barriers to protect topological spin-textures in channels. We have observed the transmission between magnetic skyrmions and bimerons. The phenomenon has potential applications in advanced neuro morphological computing. We have also proposed universal Q-bits based on helicity of topological spin-textures.

研究分野：Spintronics

キーワード：Spintronics Topological textures Memory Computing

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

内閣府が推進する Society5.0 と地球温暖化対策の両立には、情報ストレージ及び演算処理のデバイスの超低消費電力化・超高速化・高集積化の実現が必要不可欠である。しかし近年高集積化によりトランジスタのサイズは基本的な障壁となる原子サイズまで微細化され物理的な限界に近づいており、いわゆるムーアの法則の限界が示唆されている。この様な中、これまでの電子の電荷の自由度を利用したエレクトロニクスであったシリコンベースの CPU・メモリに代わる全く新しい技術として、不揮発性の電子のスピンの自由度を論理演算・メモリに応用し、超低消費電力・超高集積化・不揮発性の機能や性能を持つデバイスを実現しようとする研究が世界中で活発化している。学術的にはスピントロニクスという新しい学術分野が生まれている。スピントロニクスの中で、情報ストレージ・新規計算への応用に、特に期待されるのが磁気スキルミオンとそれらを代表するトポロジカルスピントクスチャである。その特長は、以下の通りである。

特長 : トポロジカルスピントクスチャは伝統的な磁界、電流で制御可能と共に、キラリティー(掌性)的にスピンの方向が変化するため、電界でトポロジカルスピントクスチャを制御できるのが大きな特徴である。電界駆動では電流のジュール熱が発生しないため、より効率的な超低消費電力駆動手法として期待できる。

特長 : 磁気スキルミオン、磁気渦などトポロジカルスピントクスチャのサイズは数 nm 程度で極めて小さくすることができる。しかも、安定状態間に高いエネルギー障壁があるため、同じサイズのスピンの平行配列の単磁区状態より安定し、高密度なメモリ、論理回路への応用が期待できる。

我々はこれまでにトポロジカルスピントクスチャを系統的に研究して来た。楕円状ナノ磁性構造中の磁気渦の安定性、フェリ磁性薄膜中磁気スキルミオンの高速駆動、単一磁気スキルミオンの生成・消滅、フラストレート磁性体中の磁気スキルミオンに関して研究を行った。また、スピン波を用いた磁気スキルミオンの駆動方法を提案し、特に、世界で初めて電界駆動磁気スキルミオンの観察に成功した。

2. 研究の目的

本提案では、新奇なトポロジカルスピントクスチャの振舞の解明、新材料・ナノ構造による論理演算・メモリ駆動素子の創成のための新規電子材料開発指針の確立を目的とする。

これまで、多くの研究グループが磁気スキルミオンの研究を進めているが、本研究では多種類のトポロジカルスピントクスチャを系統的に研究する点において独自性を有する。申請者らはすでに、単層フラストレート磁性薄膜中の Bimerons の振舞、上述の様に、反強磁性 Bimerons の振舞など新規構造を理論的、実験的に行っている。磁気スキルミオンより低消費電力、高速のトポロジカルスピントクスチャを発見するのが本研究の創造性である。

特に、電界によるトポロジカルスピントクスチャの生成・駆動を利用した論理演算及びメモリ素子への応用を将来的に目指す本研究は、従来、研究されている電流駆動の磁気スキルミオンの利用とは異なる。まず、電流駆動の場合は、電流のジュール熱効果を避けられず、消費電力は高くなるが、電界によるスキルミオン移動の場合は、原理的にジュール熱が発生せず、超低消費電力な駆動手法であり、工学的な優位性がある。また、電界によるスキルミオンの生成・駆動の実証は、物理学的にも極めて価値が高く独創性の高いテーマである。

これまで広く研究されている電流駆動スキルミオン移動の場合、異常ホール効果の原因でナノ磁性細線中の磁気スキルミオンの直線移動が難しく、電流駆動中に磁気スキルミオンが消滅する恐れがあった。

一方、実験で観察された電界駆動スキルミオンの直線移動は、電流駆動磁気スキルミオンより低消費電力だけではなく、磁気スキルミオンが消滅しないことを示しており、この成果は情報ストレージの工学分野では、信頼性が劇的に高まる可能性を秘めている。

本研究では、これまでの研究手法を活かして、更なる安定性の高い低消費電力、高速駆動できるトポロジカルスピントクスチャの発見によって、トポロジカルスピントクスチャのメモリ、演算回路への応用への基盤を構築する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、トポロジカルスピントクスチャに関する理論検討並びに実験検証を行った。理論検討に関して、マイクロマグネティックシミュレーションという計算機シミュレーション手法を用いて、トポロジカルスピントクスチャに電流、電界、熱、応力の印加による振る舞いを系統的に検討した。オープンソースのマイクロマグネティックシミュレーターは主にアメリカ国立標準技術研究所(NIST)が開発した OOMMF と呼ばれる中央演算処理装置(CPU)の計算能力に依存するシミュレーター及びベルギーの Gent 大学が開発した Mumax3 と呼ばれるグラフィックスプロセッシングユニット(GPU)の計算の能力に依存するシミュレーターがある。本研究では、単一トポロジカルスピントクスチャの振る舞いは OOMMF によるシミュレーションした。なお、多数のトポロジカルスピントクスチャの振る舞いに関して、Mumax3 を用いてシミュレーションを行った。

実験でトポロジカルスピントクスチャの振る舞いを検証するため、薄膜堆積、微細加工など必要になる。本研究では、スパッタ装置を用いて多層トポロジカルスピントクスチャ薄膜を堆積し、マスクレスリソグラフィを用いて微細加工を施した。カー顕微鏡、磁気力顕微鏡を用いて試料の磁区構造を観察し、静磁測定、ホール測定、磁気抵抗効果測定、光弾性測定を用いて、薄膜の諸特性を評価した。

4. 研究成果

4.1 磁気スキルミオンを利用したユニバーサル量子ビット

フラストレートした磁石の中の磁気スキルミオンはヘリシティ自由度を持ち、二重に縮退したブロッホ型スキルミオンは磁気双極子間相互作用によってエネルギー的に有利になります。私たちはそれらに基づいて量子ビットを構築しました。スキルミオンは、そのサイズがナノメートルオーダーになると、量子力学的な物体になる。

図1に示すように、閉じ込められた磁気スキルミオンに電界を印加することによって、ブロッホ型スキルミオンのヘリシティを反転できることを計算機シミュレーションで明らかにした。図1の左に示すような磁性二重層系におけるナノスケールのスキルミオンに基づいて、電界でヘリシティ量子ビットの制御が可能であることが示された。

ヘリシティは電界制御と共に、電流でも制御ができる。図2に電流でヘリシティの反転のシミュレーションの結果を示す。約 20 ps (10^{-12} s) の極めて短いパルス幅の電流でヘリシティの反転確率が 50% 以上になることが明らかにした。この結果から、トポロジカルスピントクスチャ

に基づく量子ビットの高速性、確率性を示された。つまり、1量子ビットの量子ゲートは、電場とスピントクスを制御することで実現される。2量子ビットゲートはイジング型交換結合を利用して実現できると証明した。外部磁場の不要な点な本提案の大きな特徴となる。

以上の結果は、ナノスケールのトポロジカルスピントクスチャーに基づくユニバーサル量子計算への道を開く。関連する結果は、Physical Review Letters に掲載された。

図3. 二つのナノ磁気ディスクの磁気ミロンによる量子ビットの構成。

一方、図3に示すように、磁気ミロンは、半分のトポロジカル電荷を持つ古典的なトポロジカルソリトンです。さらに、ナノメートルオーダーになると量子力学的な物体になる。このため、磁気ナノディスク内のナノスケールミロンを量子ビットとして使用することも提案しました。コアスピンの上下方向が量子ビット状態 $|0\rangle$ および $|1\rangle$ に割り当てられる。7個もの小さなスピンを含む半径を持つミロンが強磁性ナノディスク内で古典的に安定化できることを数値的に示しました。そして、任意の位相シフトゲート、アダマールゲート、CNOTゲートを明

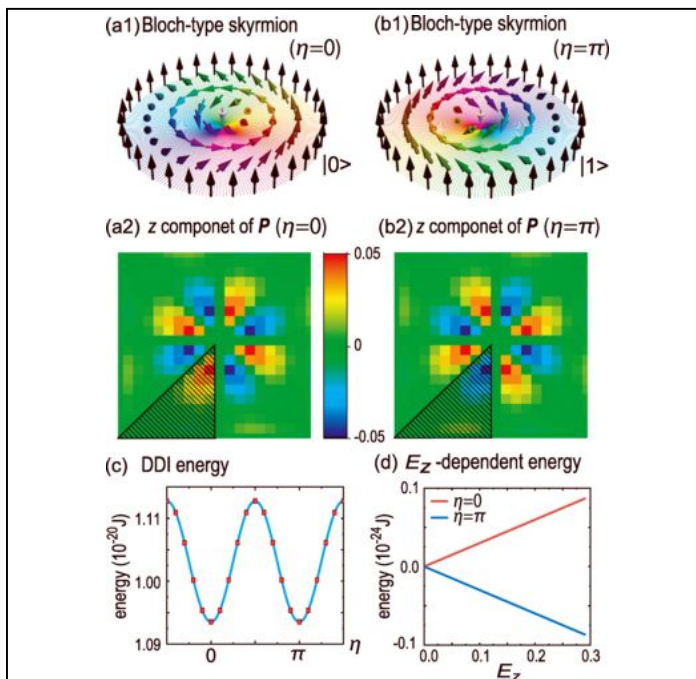


図1. (a1) ヘリシティ $=0$ 及び (b1) $=\pi$ のブロッホ型磁気スキルミオン。(a2) $=0$ の磁気スキルミオンの電気分極及び(b2) $=\pi$ の磁気スキルミオンの電気分極。(c) 静磁エネルギーの磁気スキルミオンのヘリシティの依存性, $=0$, $=\pi$ の時静磁エネルギーは極小値になる。(d) 電界エネルギーのヘリシティの依存性, 電界によるヘリシティの制御は可能と明らかにした。

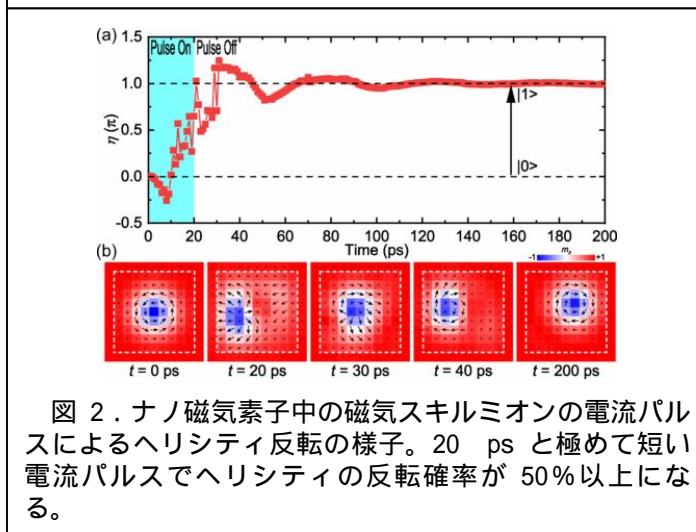


図2. ナノ磁気素子中の磁気スキルミオンの電流パルスによるヘリシティ反転の様子。20 ps と極めて短い電流パルスでヘリシティの反転確率が 50% 以上になる。

示的に構築することにより、磁気ミロンに基づくユニバーサル量子計算が可能であることを理論的に示しました。関連する結果は、Communications Materials に記事として掲載された。

4.2 マイクロ磁性素子中のトポロジカルスピネクスタの形成、駆動、トランスフォーメーション及びその確率計算への応用

ニューラルネットワークは、人間の脳の働きを模した深層学習の先進手法である。マイクロ磁性素子の中の応力テンセル、熱などのトポロジカルスピネクスタの非線形的な刺激は超低消費電力ニューラルネットワークの物理担体を探るため、図4(b)に示すトポロジカル磁性薄膜を用いたマイクロ円盤状磁性素子を形成した。円盤の外側に電極を微細加工している。電極に電流を流すことによって、図4(d)に示すようなカー磁化曲線並びに(e)に示すようなテキスチャーを観察された。環状電流の効果は磁界を発生するとともに、ジュール熱の効果で、円状素子に応力、熱と同時に加えることは可能になる。これらの複雑計の効果は非線形であるため、複雑な磁区構造を観察された。特に、電流が大きいとき、電流の上昇或いは下降によって、図5に示すような磁気スキルミオン或いは磁気ビーミロンを観察された。これは、複雑系の中、磁気スキルミオンと磁気ビーミロンのトランスフォーメーションが可能と明らかにした。トポロジカルスピネクスタ間のトランスフォーメーションはニューラルネットワークの物理担体になりうる。トポロジカルスピネクスタ間のトランスフォーメーションを用いたニューラルネットワークの形成、磁区構造からデータの読み出す、書き込み方法に関して、現在具体出来に取り組んでいる。さらに、実験結果から、トポロジカルスピネクスタの多様性（電流が重複してもテキスチャーは微妙に違う）ことから、機械学習の進化の物理シミュレーションになりうることを明らかにした。

以上の結果は学術論文誌 Nano Letters に掲載された。

4.3 トポロジカルスピネクスタの保護バリアの創出

磁気スキルミオンなどトポロジカルスピネクスタはナノサイズであるため、魅力な高集中度の情報担体への応用が注目されている。しかしながら、ナノ磁性細線など実用なデバイスの中に、磁気スキルミオンが細線のふちに当たると消滅してしまっ、情報をなくすことが発生の可能性がある。従って、トポロジカルスピネクスタを素子中心に縛るエネルギーバリアが必要になる。研究期間中に、図6に示すような磁気スキルミオンを磁性細線の中心部に縛るエネルギーバリアの開発は成功した。図6に示す構造は磁性細

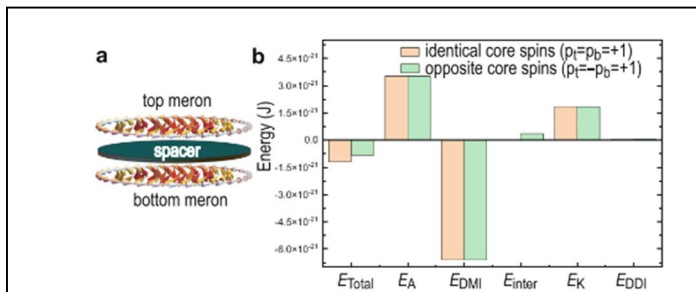


図 3. 二つのナノ磁気ディスクの磁気ミロンによる量子ビットの構成。

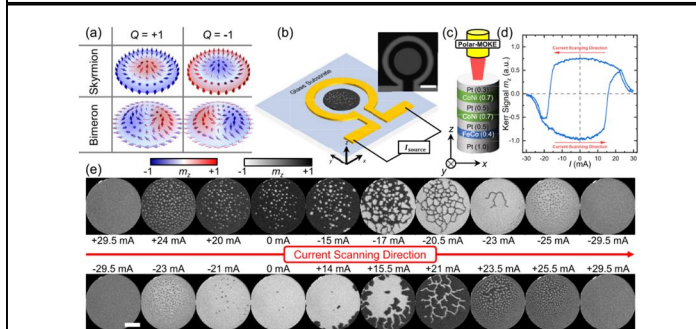


図 4. マイクロ円盤状素子の構造、電流による磁化曲線、磁区構造。

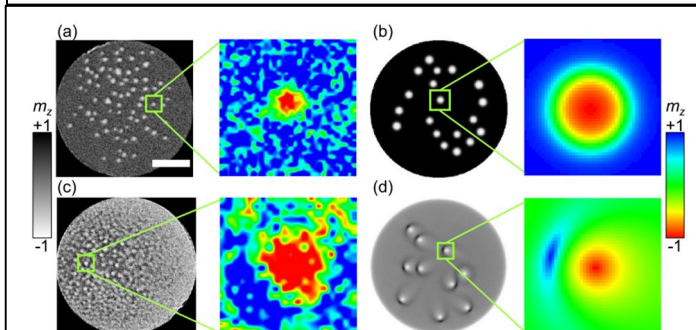


図 5. 磁気スキルミオンと磁気ビーミロンの微細構造。

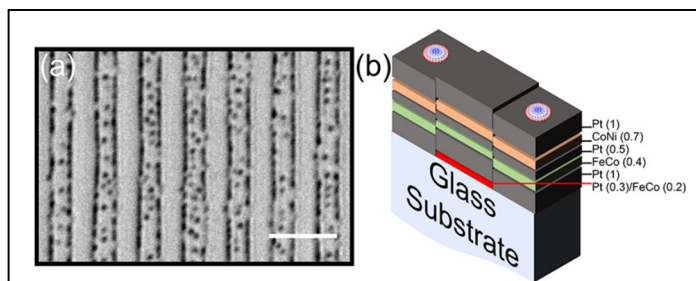


図 6. トポロジカル保護による磁気スキルミオンの安定性の増強。

線の縁部の自己減磁界、DMI 効果を有効に利用ことによって、極めて簡単に細線状の磁壁を形成する。さらに、これらの細線状の磁壁の中心のスピンの向きと磁気スキルミオン中心のスピン同じ向きのため、磁気スキルミオンをチャンネルの中心部に安定されることが可能にした。従って、有効かつ簡単な構造で磁気スキルミオンの情報担体を実現し、レーストラック・メモリ、磁気スキルミオントラジスタなど次世代低消費電力情報デバイスの基盤を構築した。

以上のように、本研究期間中に、トポロジカルスピントクスチャのあらゆる物理刺激を実験検証し、トポロジカルスピントクスチャの計算、メモリへの応用基盤を構築した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件/うち国際共著 21件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Shen Laichuan, Xia Jing, Chen Zehan, Li Xiaoguang, Zhang Xichao, Tretiakov Oleg A., Shao Qiming, Zhao Guoping, Liu Xiaoxi, Ezawa Motohiko, Zhou Yan	4. 巻 105
2. 論文標題 Nonreciprocal dynamics of ferrimagnetic bimerons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	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） 10.1103/PhysRevB.105.014422	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 Hou Zhipeng, Wang Yadong, Lan Xiaoming, Li Sai, Wan Xuejin, Meng Fei, Hu Yangfan, Fan Zhen, Feng Chun, Qin Minghui, Zeng Min, Zhang Xichao, Liu Xiaoxi, Fu Xuwen, Yu Guanghua, Zhou Guofu, Zhou Yan, Zhao Weisheng, Gao Xingsen, Liu Jun ming	4. 巻 34
2. 論文標題 Controlled Switching of the Number of Skyrmions in a Magnetic Nanodot by Electric Fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2107908 ~ 2107908
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adma.202107908	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 Zhang Xichao, Xia Jing, Liu Xiaoxi	4. 巻 105
2. 論文標題 Structural transition of skyrmion quasiparticles under compression	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	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） 10.1103/PhysRevB.105.184402	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 Kumar Durgesh, Jin Tianli, Sbiaa Rachid, Kl?ui Mathias, Bedanta Subhankar, Fukami Shunsuke, Ravelosona Dafine, Yang See-Hun, Liu Xiaoxi, Piramanayagam S.N.	4. 巻 958
2. 論文標題 Domain wall memory: Physics, materials, and devices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Reports	6. 最初と最後の頁 1 ~ 35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physrep.2022.02.001	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 Xia Jing, Zhang Xichao, Tretiakov Oleg A., Diep Hung T., Yang Jinbo, Zhao Guoping, Ezawa Motohiko, Zhou Yan, Liu Xiaoxi	4. 巻 105
2. 論文標題 Bifurcation of a topological skyrmion string	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	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) 10.1103/PhysRevB.105.214402	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 Ye Chu, Li Lin-Lin, Shu Yun, Li Qian-Rui, Xia Jing, Hou Zhi-Peng, Zhou Yan, Liu Xiao-Xi, Yang Yun-You, Zhao Guo-Ping	4. 巻 41
2. 論文標題 Generation and manipulation of skyrmions and other topological spin structures with rare metals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Rare Metals	6. 最初と最後の頁 2200 ~ 2216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12598-021-01908-9	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 Mak Kai Yu, Xia Jing, Zhang Xi-Chao, Li Li, Fattouhi Mouad, Ezawa Motohiko, Liu Xiao-Xi, Zhou Yan	4. 巻 41
2. 論文標題 Single-bit full adder and logic gate based on synthetic antiferromagnetic bilayer skyrmions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Rare Metals	6. 最初と最後の頁 2249 ~ 2258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12598-022-01981-8	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 Shu Yun, Li Qianrui, Xia Jing, Lai Ping, Hou Zhipeng, Zhao Yonghong, Zhang Degang, Zhou Yan, Liu Xiaoxi, Zhao Guoping	4. 巻 121
2. 論文標題 Realization of the skyrmionic logic gates and diodes in the same racetrack with enhanced and modified edges	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 042402 ~ 042402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0097152	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 Xia Jing, Zhang Xichao, Liu Xiaoxi, Zhou Yan, Ezawa Motohiko	4. 巻 106
2. 論文標題 Nonlinear dynamics of the topological helicity wave in a frustrated skyrmion string	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	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) 10.1103/PhysRevB.106.054414	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 Zhang Xichao, Xia Jing, Liu Xiaoxi	4. 巻 106
2. 論文標題 Particle-like skyrmions interacting with a funnel obstacle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	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) 10.1103/PhysRevB.106.094418	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 Ohara Kentaro, Zhang Xichao, Chen Yinling, Kato Satoshi, Xia Jing, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Hou Zhipeng, Zhou Yan, Zhao Guoping, Yang Jinbo, Liu Xiaoxi	4. 巻 22
2. 論文標題 Reversible Transformation between Isolated Skyrmions and Bimerons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 8559 ~ 8566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.2c03106	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 Xia Jing, Zhang Xichao, Liu Xiaoxi, Zhou Yan, Ezawa Motohiko	4. 巻 3
2. 論文標題 Qubits based on merons in magnetic nanodisks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Materials	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) 10.1038/s43246-022-00311-w	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 Xia Jing, Zhang Xichao, Mak Kai-Yu, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Zhou Yan, Zhao Guoping, Liu Xiaoxi	4. 巻 103
2. 論文標題 Current-induced dynamics of skyrmion tubes in synthetic antiferromagnetic multilayers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.174408	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 Ohara Kentaro, Zhang Xichao, Chen Yinling, Wei Zonhan, Ma Yungui, Xia Jing, Zhou Yan, Liu Xiaoxi	4. 巻 21
2. 論文標題 Confinement and Protection of Skyrmions by Patterns of Modified Magnetic Properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4320 ~ 4326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c00865	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 Shen Laichuan, Xia Jing, Chen Zehan, Li Xiaoguang, Zhang Xichao, Tretiakov Oleg A., Shao Qiming, Zhao Guoping, Liu Xiaoxi, Ezawa Motohiko, Zhou Yan	4. 巻 105
2. 論文標題 Nonreciprocal dynamics of ferrimagnetic bimerons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 14422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.014422	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 Fattouhi Mouad, Mak Kai Yu, Zhou Yan, Zhang Xichao, Liu Xiaoxi, El Hafidi Mohamed	4. 巻 16
2. 論文標題 Logic Gates Based on Synthetic Antiferromagnetic Bilayer Skyrmions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 14040
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.16.014040	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 Mak Kai Yu, Xia Jing, Zhang Xichao, Ezawa Motohiko, Liu Xiaoxi, Zhou Yan	4. 巻 33
2. 論文標題 Transcription and logic operations of magnetic skyrmions in bilayer cross structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 404001 ~ 404001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ac117e	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 Liang Xue, Xia Jing, Zhang Xichao, Ezawa Motohiko, Tretiakov Oleg A., Liu Xiaoxi, Qiu Lei, Zhao Guoping, Zhou Yan	4. 巻 119
2. 論文標題 Antiferromagnetic skyrmion-based logic gates controlled by electric currents and fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 062403 ~ 062403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0056259	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 Liang Xue, Zhang Xichao, Shen Laichuan, Xia Jing, Ezawa Motohiko, Liu Xiaoxi, Zhou Yan	4. 巻 104
2. 論文標題 Dynamics of ferrimagnetic skyrmionium driven by spin-orbit torque	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 62403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.174421	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 Zhang Xichao, Xia Jing, Shirai Keiichiro, Fujiwara Hiroshi, Tretiakov Oleg A., Ezawa Motohiko, Zhou Yan, Liu Xiaoxi	4. 巻 4
2. 論文標題 Configurable pixelated skyrmions on nanoscale magnetic grids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-021-00761-7	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 Zhang Xichao, Xia Jing, Tretiakov Oleg A., Diep Hung T., Zhao Guoping, Yang Jinbo, Zhou Yan, Ezawa Motohiko, Liu Xiaoxi	4. 巻 104
2. 論文標題 Dynamic transformation between a skyrmion string and a bimeron string in a layered frustrated system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L220406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.L220406	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

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 X. Liu, K. Ohara, X. Zhang, Y. Chen, Z. Wei, Y. Ma, J. Xia, Y. Zhou
2. 発表標題 Confinement and Protection of Magnetic Skyrmions
3. 学会等名 The 2022 Joint MMM-INTERMAG Conference, Online Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 X. Zhang, J. Xia, K. Shirai, H. Fujiwara, O. Tretiakov, M. Ezawa, Y. Zhou, X. Liu,
2. 発表標題 Configurable Pixelated Skyrmions on Nanoscale Grids
3. 学会等名 The 2022 Joint MMM-INTERMAG Conference, Online Meeting, (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Chen, K. Ohara, X. Zhang, J. Xia, Z. Wei, Y. Zhou, X. Liu
2. 発表標題 Creation and Annihilation of Skyrmion Bubbles by Profile-Programmed Alternating Magnetic Field Pulses
3. 学会等名 The 2022 Joint MMM-INTERMAG Conference, Online Meeting, (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Kato, K. Ohara, X. Zhang, J. Xia, X. Liu
2. 発表標題 Control of a Magnetic Skyrmionium on a TbFeCo Thin Film
3. 学会等名 The 2022 Joint MMM-INTERMAG Conference, Online Meeting, (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤 勲, 大原 健太郎, 張 溪超, 夏 静, 劉 小晰,
2. 発表標題 TbFeCo膜上の磁気スキルミオニウムの制御
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会, Online Meeting,
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大原 健太郎, 張 溪超, 陳 銀玲, 夏 静, 周 艶, 劉 小晰,
2. 発表標題 磁気スキルミオンの閉じ込め・保護の効果
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会, Online Meeting,
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 X. Zhang, J. Xia, K. Shirai, H. Fujiwara, O. A. Tretiakov, M. Ezawa, Y. Zhou, X. Liu,
2. 発表標題 Configurable Pixelated Skyrmions on Nanoscale Grids
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会, Online Meeting,
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 X. Zhang, J. Xia, M. Ezawa, O. Tretiakov, H.T. Diep, Z. Hou, W. Wang, G. Zhao, Y. Zhou, X. Liu
2. 発表標題 Static Structures and Dynamics of Frustrated Topological Spin Textures
3. 学会等名 The 2021 IEEE International Magnetism Conference, Online Meeting
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 X. Zhang
2. 発表標題 Frustrated Magnetic Skyrmions and Bimerons
3. 学会等名 SKYMAG 2021, Online Meeting (招待講演)
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