

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 21 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00337

研究課題名(和文) スキルミオニクス創成に向けた基盤技術と材料の開拓

研究課題名(英文) Pioneering fundamental technologies and materials towards skyrmionics

研究代表者

望月 維人 (Mochizuki, Masahito)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80450419

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：スキルミオンを活用したエレクトロニクス「スキルミオニクス」の創成を目指し、スキルミオンを発現する材料・物質系の探索、スキルミオンを制御・駆動する方法の設計、新しい物性現象および物質機能の探索に取り組み、それぞれの項目において重要な成果をあげることができた。また、これまでは主に、磁気メモリ素子の情報担体としての応用を目指した研究が世界的に進められていたが、スキルミオンがリザーバー型情報処理素子や熱電素子の素材として高いポテンシャルを秘めていることを世界に先駆けて発見し、スキルミオン研究の新しい展開を切り拓いた。さらに、スキルミオン以外の新しいトポロジカル磁気構造に研究を発展させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度情報社会において、堅牢で省エネなストレージやコンピューティング、センシング素子が求められている。半導体に比べて放射線や熱などの擾乱に強く、堅牢な磁性体を使った磁気デバイスはその有力候補である。さらに、スキルミオンは(1)ナノスケールの極小サイズ、(2)トポロジカルに保護された安定性、(3)小さな外場で駆動可能と言った性質から超高密度・高集積で超省電力のデバイスを実現する素材となり得る。そのようなスキルミオンの素子応用を実現するためには、材料・物質の開発、制御・駆動技術の確立、新現象・新機能の開拓が不可欠であるが、本研究ではこれらの項目すべてにおいて多くの重要な成果を上げることができた。

研究成果の概要(英文)：With the aim of creating "skyrmionics", (electronics utilizing magnetic skyrmions), we have worked on (1) search for materials and systems which host skyrmions, designing methods to control and manipulate skyrmions, and search for new physical phenomena and material functions of skyrmions. We have achieved several important discoveries and results for each of these items. In addition, while research aimed at application of skyrmions as information carriers in magnetic memory devices are conducted, we have discovered that magnetic skyrmions have high potential for applications to reservoir-type information processing devices and thermoelectric devices, opening up a new development in the skyrmion research. In addition, we have developed our research into new topological magnetic textures other than skyrmions (e.g., skyrmion bags, bimerons, hopfions, (anti)hedgehogs).

研究分野：理論物性物理学

キーワード：スキルミオン スキルミオニクス スピントロニクス トポロジカル磁性 トポロジカル磁気テクスチャ 磁気メモリ リザーバーコンピューティング 熱電変換

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 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現代の高度情報社会では、より高い情報密度とより低い消費電力を実現する高性能な記憶素子やストレージ素子を求める強い社会的要請が存在する。特に、磁性体を利用する磁気記憶素子や磁気ストレージ素子は、電荷を利用する半導体素子に比べて、熱揺らぎや放射線、電磁波等の擾乱に強く、堅牢で書き換え可能回数も大きいことから高度情報社会を支えるユビキタス素子としての利用が昔から期待されている。研究開始当時のスピントロニクス分野では、消費電力を低減するために電流やスピン流で磁気情報を操作し、機械可動部を持たない「磁壁電流駆動メモリ(レーストラックメモリ)」や「磁気抵抗メモリ(MRAM)」が研究されていた。しかし、これらのメモリ素子でも、磁化の駆動や反転に大きな電流密度を要するため、ジュール熱損失と温度上昇による磁気情報の不安定化の問題が存在した。

そのような状況の下、2010年にミュンヘン工科大学の中性子散乱実験グループがキラル磁性体 MnSi 中に「スキルミオン」と呼ばれるトポロジカルな磁気渦構造を発見した。その翌年には、理化学研究所の実験グループがローレンツ透過型電子顕微鏡でスキルミオンの実空間像を観察している。本研究課題の研究代表者である望月は、これらの実験報告の直後に、磁気スキルミオンが磁気メモリ素子や磁気ストレージ素子の情報担体として優れた性質を備えていることをいち早く見抜き、その理論研究に着手していた。

その後、望月を含むいくつかの研究グループが牽引する形で、日本はドイツと並んでスキルミオンの研究で世界をリードしていた。ノーベル物理学賞の受賞者である Albert Fert が 2013 年に磁気スキルミオンに関する解説記事を Nature Nanotechnology 誌に発表すると、欧州各国や米国、中国、韓国をはじめとする世界中の研究者がこの分野に参入し(Fert インパクト)、熾烈な研究競争が始まった。その結果、数多くの新しいスキルミオン物質と興味深い現象が発見された。また、望月をはじめ、世界中の様々な研究者がスキルミオンを利用した磁気メモリ素子や磁気ストレージ素子の理論提案を行っていた。望月も、特に有望な素子形態と見なされている「スキルミオンレーストラックメモリ」や「スキルミオン磁気抵抗メモリ」を提案している。それにもかかわらず、研究開始当初は、実現性と将来性のあるスキルミオンメモリ素子の実験実証に誰も成功していなかった。

発見から 10 年を経て、磁気スキルミオンの研究はいよいよ成熟し、「初期研究」のフェーズから、蓄積した知見を「学理」にまで昇華し、発見した現象を「デバイス機能」にまで高める「スキルミオニクス」とも呼ぶべき新たな研究のフェーズに移行しつつあった。その過渡期でもあった研究開始当初、解決すべき数多くの問題が次々と浮かび上がってきていた。それらの問題は、基礎科学としても十分面白いが、何でもありだった初期の研究と比べると、じっくりと腰を据えて取り組まないと解決できない難しい課題が多かった。しかし当時は、どの研究グループも「初期研究」と次の「スキルミオニクス研究」を隔てる大きな谷を越えられないような状況であった。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、スキルミオニクスの実現を阻んでいる要因を真剣に考え、その結果洗い出された二つの決定的な問題に、理論と実験の緊密な連携により取り組み、解決することを目指した。具体的には、解決すべき二つの問題として「材料の問題」と「要素技術の問題」を掲げ、その解決に取り組んだ。

まず、材料の問題であるが、2013年の Fert インパクト以前からスキルミオンの研究に取り組んでいたグループと、Fert インパクト以後に取り組み始めたグループとでは、研究対象としている材料に違いがあったが、どちらもスキルミオニクス研究の対象材料として致命的な欠点を持っていた。また、両者ともスキルミオンの発現に外部から磁場を印加する必要があるが、それが素子応用の大きな障壁となっていた。

次に要素技術の問題であるが、スキルミオンを操作するための「要素技術」にも数々の問題があった。これまでに、スキルミオンを「読む」、「書く」、「消す」、「動かす」ために様々な方法や技術が提案されてきていたが、そのほとんどが非現実的、あるいは非物理的な提案であった。

例えば、書く技術・消す技術については、スピン偏極 STM という大掛かりな装置を使った局所

スピン流注入の方法以外に、「ナノサイズ」のスキルミオンを「狙ったナノ領域」に「意図したタイミング」で「意図した数」だけ書き込む（あるいは消去する）技術の実験実証に成功したグループはなかった。スキルミオンの情報担体としての応用に不可欠な制御された生成・消去技術をどのように実現するかといった理論提案は多かったが、そのほとんどが局所的な磁化反転を起こすために磁場や電場、光、熱といった外場を数十ナノメートルまで絞って印加するという非現実的な条件を仮定していた。このような理論提案は机上の空論であり、少なくとも実験でナノスキルミオン書き込みを実証できた例はなかった。

また、動かす（伝送する）技術については、研究代表者の月がそれまでに、薄膜試料中のスキルミオンがスピン移行トルク機構により、磁壁の10万分の1から100万分の1の極小電流で伝送できることを理論的に示していた。しかし同時に、ナノ磁気細線中では、細線壁からの斥力ポテンシャルにより磁壁と同程度の巨大な電流が必要になってしまうことも分かっていた。その打開策として、ある理論グループは、磁気細線の長手方向の両壁に電極を取り付けて幅方向に電流を流すという奇抜な方法を提案していたが、ナノ細線に沿って長い電極を作り込むことは複雑なプロセスを要し、デバイス設計の自由度を著しく制限してしまうことが問題となっていた。むしろ、磁気細線の両端に電極を付けて長手方向に電流を流すという、自然で簡便な電極構造でスキルミオンを高速に駆動する技術の実現が望まれていた。

さらに、読み出す技術については、スキルミオンの創発磁場に由来するトポロジカルホール効果を利用して、ホール抵抗測定で読み出す技術が有望視され盛んに研究されていた。しかしこの方法では、スキルミオン1個1個の読み出しに高い精度のホール抵抗測定が必要になる。また、読み出し感度を上げるために大きな電流を流すと、スキルミオンが意図せず動いてしまい、破壊読み出しになってしまうという問題があった。

そこで本研究課題では、これら数々の問題を解決し、「基盤技術の開拓」と「新材料の開発」、「基礎学理の構築」により、今までのスキルミオン研究を一段上のフェーズに押し上げ「スキルミオニクス」と呼ぶべき新しい研究領域・分野を創出することをその目的として掲げた。

### 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、次のような研究の方法とアプローチを立案し、遂行した。

まず、材料の問題については、スキルミオンを生成・消去・駆動させる磁気細線材料として、新しい概念の磁気ヘテロ構造を設計・作成を目指した。具体的には、強磁性体を「スピン軌道相互作用（SOI）が強い二種類の金属」で上下から挟む三層ヘテロ構造を強磁性体の上に積層させることで、強磁性体からの磁場により外部磁場なしでスキルミオンを発現する材料の実現を目指した。

また、書く技術・消す技術の問題については、切欠き（ノッチ）や孔などのナノ構造を導入した薄片試料に、「電流」や「磁場」を印加することで、大域的に外場を印加しても、狙ったナノ領域に意図した数のスキルミオンを書き込むという技術をマイクロマグネティックシミュレーションと素子作製の連携により実現・実証することを目指した。また、電気磁気結合特性を利用した局所電場印加によるスキルミオン書き込みや、その他の外部パラメータ（光、マイクロ波、スピン波、熱、圧力など）によるスキルミオン生成・消去技術の可能性を設計・実証することを目指した。

さらに、伝送する技術の問題については、磁気ヘテロ構造の面内方向に電流を流し、スピンホール効果を利用して面直にスピン流を注入することで、「スピン軌道トルク（SOT）」によりスキルミオンを駆動・伝送する技術を理論設計することで、ネール型スキルミオンを通常の電流駆動の方法より5桁程度小さい電流密度で、2桁以上高速に伝送できる上に、電極を磁気細線の両端に付ければよいため作製プロセスが簡便になる技術の開発・実証を目指した。

そして、読み出す技術の問題については、磁気共鳴を利用した読み出し技術やトンネル磁気抵抗による読み出し技術を、マイクロマグネティックシミュレーションを主体とした理論研究と、微細加工や高周波測定実験を連携することで実証・確率を目指した。

以上のように「高性能なスキルミオン材料の開発」と「革新的な基盤技術の開発」、「根幹となる基礎学理の構築」を柱に、磁気スキルミオンを、次世代の高性能磁気メモリ素子としてのみならず、「極小磁場センシング素子」、「マイクロ波検出・発振素子」、「マグノニックメタマテリアル」、「脳型コンピューティング素子」といった様々な汎用エレクトロニクス素子への応用研究へと

展開することで、新しい研究分野である「スキルミオニクス」を創出を目指した。

#### 4. 研究成果

1 磁気ヘテロ接合系におけるスキルミオンの電流による駆動・制御の実現及び最適化を目指し、電流駆動の主要なメカニズムの一つであるスピン軌道トルクや、スキルミオンの大きさを決定する DM 相互作用や垂直磁気異方性といったマテリアルパラメータを、実験的に評価する方法の確立を目指した。また、このような磁気パラメータを変調したり、デザインしたりすることが可能な材料の探索を行った。その結果、Al/Co の界面でスピン軌道トルクや磁気異方性の変調や制御が可能なことを見出した。Co/Gd/Pt の磁気多層膜系において、DM 相互作用やスピン軌道トルクの大きさを実験的に評価することに成功した。さらに、スキルミオンの電流駆動型メモリ素子の有望な材料候補であるフェリ磁性 Tb/CoFeB/MgO の磁気多層ナノ細線において、磁壁の磁場誘起クリープ運動を実現・観測することに成功した。さらに、フェリ磁性の磁化を温度変調によって正から負にまで大きく変化させることを目指している。これにより、温度を制御することで、スキルミオンの電流駆動で見られるスキルミオンホール効果を制御することが可能になる。その準備として、フェリ磁性体磁気多層膜系の GdFe 系において、フェリ磁性の補償温度前後の磁化角運動量の状態を磁気コンプトン散乱実験で精密に評価することに成功した。また、材料・物質探索でも、強いスピン軌道相互作用や、スピン-運動量ロッキングが期待されるトポロジカル絶縁体材料 BiSbTe<sub>2</sub>Se、3次元ディラック電子系物質 Bi<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>、ビスマスハライドのファンデルワールス積層材料などの合成や物性評価を進めた

2 空間反転対称性を持つ金属磁性体を記述する近藤格子模型において、マイクロ波電磁場を照射した時の局在磁化の時間発展を数値的にシミュレーションする計算コードを開発し、円偏光マイクロ波照射による磁気トポロジーのスイッチングができることを理論的に実証した。2009年に中性子小角散乱実験によってキラル磁性体である B20 化合物中で発見されて以来、スキルミオンをはじめとするトポロジカル磁性は、DM 相互作用が活性になるキラル磁性体や極性磁性体といった空間反転対称性の破れた磁性体での発現するものだと、素朴に信じられてきた。しかし近年、空間反転対称な結晶構造を持つ様々な金属磁性体において、スキルミオンやそれに類似したトポロジカル磁性が発現していることが発見されている。このような系の長所は、キラル磁性体や極性磁性体では凍結してしまっている vorticity (渦度) や helicity と呼ぶ、磁気構造の持つ自由度が凍結せずに生き残っている点にある。このような自由度を、光やマイクロ波、その他の外場や外部刺激によって操作・制御できれば、新しい物質機能として利用できる。本研究により、実際に円偏光マイクロ波の照射により、磁気トポロジーを高速にスイッチできることや、マイクロ波のパラメータ(強度や周波数)を調節することでトポロジカル数が「2」、「1」、「0」の間をある程度自在に飛び移れること、動的相転移であることを反映して「決定論的」、「確率的」、「時間揺らぎ的」といった様々な相転移の様相が現れることを明らかにした。これは、空間反転対称性を持つ金属磁性体のスキルミオンの技術応用に向けた重要な成果に位置づけられる。

3 空間反転対称性のある近藤格子模型中のスキルミオン結晶が示す特異なスピン-電荷励起の性質を理論的に解明した。具体的には、時間反転対称性や結晶並進対象性に由来する複数の南部ゴールドストーンモードの存在や、低エネルギー励起におけるスピン-電荷分離現象を発見した。この成果は、新しいスキルミオン物質のマイクロ波・光素子機能研究の基礎となる重要な成果である。また、3次元近藤格子磁性体で発現する磁気ヘッジホッグ格子の集団励起モードを明らかにした。具体的には MnSi<sub>1-x</sub>Gex や SrFeO<sub>3</sub> で発見・観測されている 4重波数磁気ヘッジホッグ格子について、サブテラヘルツ周波数帯に 3つの固有モードが存在することを理論計算により発見した。さらに、この3つのモードのうち2つは、結晶学的に異なる2種類のディラック弦(磁気ヘッジホッグと磁気アンチヘッジホッグを繋ぐ渦糸型磁気構造)に局在していることや、磁場印加による磁気ヘッジホッグと磁気アンチヘッジホッグが対消滅を起こしてディラック弦が消えると、対応する振動モードも消失することを発見した。この成果は磁性体中で創発(アンチ)モノポールとして振る舞う磁気ヘッジホッグの動的挙動に関する基礎研究や応用研究の礎となる重要な成果である。

4 スキルミオンが秘めるまだ知られていない素子機能の設計・探索を行った。具体的には以下の成果を上げた。

4-1: スキルミオン結晶格子中を伝播しランダムに反射・干渉するスピン波の「短期記憶性」と「非線形変換性」を活用したリザーバ情報処理素子を理論的に設計し、「短期記憶タスク」や

「偶奇チェックタスク」など標準的な性能指数評価を行い、その高い情報処理機能を実証し、論文を発表した。この成果は、スキルミオンを活用することで高度な微細加工を必要としない高性能なスピントロニクスリザバー情報処理素子を実現できる可能性を実証した画期的な成果である。

4 - 2 : スキルミオン結晶が秘める熱電変換素子機能を理論的に発見した。円形ディスクに閉じ込めマイクロサイズのスキルミオン結晶に光や電子線を照射して放射状の温度勾配を導入すると、スキルミオンの作る創発磁場による熱拡散マグノン流のトポロジカルマグノンホール効果が起こり、その反作用としてスキルミオンマイクロ結晶の回転運動が起こる。このスキルミオンの回転運動に起因するスピン起電力発生により直流電圧が生成できることを数値シミュレーションにより発見した。この発見は、スキルミオンなどのトポロジカル磁気構造が、熱電変換素子の素材としても高いポテンシャルを秘めていることを初めて明らかにした画期的な成果である。

5 . スキルミオニクスの創成を目指し、スキルミオンやその他のトポロジカル磁気構造が示す新しい物性現象を探索・解明した。具体的には以下の成果を上げた。

5 - 1 磁気細線に電流を流して無数のスキルミオンを電流駆動した時に期待されるスキルミオンの流体的な振る舞いについて研究を進め、乱流や層流、スキルミオン結晶の動的構造相転移などを発見した。スキルミオンは通常の粒子と異なりポテンシャル勾配に対して垂直に運動する性質があり、これが無数に集まった時に発現する流体的性質は古典流体とはまったく異なることが期待される。本研究はスキルミオンの流体挙動の研究に先鞭をつける重要な成果である。

5 - 2 熱揺らぎによるスキルミオンの特異なブラウン運動に関する現象について研究を進め、ポテンシャル勾配に垂直に運動するという性質のために、キラルな構造体に閉じ込めたスキルミオンが、スキルミオンのトポロジカル数と構造体のキラリティに応じて、脱出できたりできなかったりする現象を発見した。この現象はアクティブマター分野で良く知られているカイラルスイマーと呼ばれる現象であり、非生物由来のオブジェクトでは初めての発見である。この現象は磁気トポロジーの選別（トポロジーソーティング技術）に応用できる。

6 . スキルミオン以外の様々なトポロジカル磁気構造について、その生成方法や物性現象、物質機能の探索・解明を進めた。具体的には以下の成果を上げた。

6 - 1 スキルミオンの中に少数の小さなスキルミオンが内包されたスキルミオンバッグと呼ばれるトポロジカル磁気構造について、局所電流注入と磁場印加をハイブリッドさせた方法により、スキルミオンの数を自在に制御して生成する技術の理論提案を行った。

6 - 2 スキルミオンバッグにマイクロ波を照射すると、過渡的な回転運動を起こすことを理論的に発見し、その物理的なメカニズムを解明した。

6 - 3 スキルミオニウムと呼ばれるトポロジカル磁気構造の熱揺らぎによる消失過程や、電流による異なるトポ磁性への変換・スイッチング現象について研究を進め成果を上げた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計34件（うち査読付論文 34件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 R. Eto, M. Mochizuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Dynamical switching of magnetic topology in microwave-driven itinerant magnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104425/1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.104425	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. Miyajima, Y. Murata, Y. Tanaka, M. Mochizuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Machine learning detection of Berezinskii-Kosterlitz-Thoulesstransitions in q-state clock models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075114/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.075114	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. Shiota, R. Hisatomi, T. Moriyama, A. S. Samardak, T. Ono	4. 巻 119
2. 論文標題 Inhomogeneous magnetic properties characterized by simultaneous electrical and optical detection of spin-torque ferromagnetic resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192409/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0070012	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 N. Soya, H. Hayashi, T. Harumoto, T. Gao, S. Haku, K. Ando	4. 巻 103
2. 論文標題 Crossover of the intrinsic spin Hall effect in the presence of lattice expansion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174427/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.174427	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. Yano, A. Kudriashov, H.T. Hirose, T. Tsuda, H. Kashiwaya, T. Sasagawa, A.A. Golubov, V.S. Stolyarov, and S. Kashiwaya	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetic Gap of Fe-Doped BiSbTe <sub>2</sub> Se Bulk Single Crystals Detected by Tunneling Spectroscopy and Gate-Controlled Transports	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 4180-4186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.1c00869	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 K. Takeyama, R. Moriya, S. Okazaki, Y. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, and T. Machida	4. 巻 21
2. 論文標題 Resonant Tunneling Due to van der Waals Quantum-Well States of Few-Layer WSe <sub>2</sub> in WSe <sub>2</sub> /h-BN/p+-MoS <sub>2</sub> Junction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3929-3934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c00555	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 B.K. Pokharel, Y. Wang, J. Jaroszynski, T. Sasagawa, and D. Popovic	4. 巻 118
2. 論文標題 Charge Order Dynamics in Underdoped La <sub>1.6-x</sub> Nd <sub>0.4</sub> SrxCuO <sub>4</sub> Revealed by Electric Pulses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 244104/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0055413	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 Z. Shi, P.G. Baity, J. Terzic, B.K. Pokharel, T. Sasagawa, and D. Popovic	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetic Field Reveals Vanishing Hall Response in the Normal State of Stripe-ordered Cuprates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3724/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-24000-3	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 J. Okamoto, A. Chainani, Z.Y. Chen, H.Y. Huang, A. Singh, T. Sasagawa, D.I. Khomskii, A. Fujimori, C.T. Chen, and D.J. Huang	4. 巻 104
2. 論文標題 Evolution of Valence- and Spin-specific Local Distortions in La <sub>2</sub> -xSrxCoO <sub>4</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054417/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.054417	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 Z. Wang, J. Olivares, H. Namiki, V. Pareek, K. Dani, T. Sasagawa, V. Madhavan, and Y. Okada	4. 巻 104
2. 論文標題 Visualizing Superconductivity in an Inversion-symmetry-broken Doped Weyl Semimetal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115102/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.115102	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 Y. Zhang, R. Taniguchi, S. Masubuchi, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, and T. Machida	4. 巻 120
2. 論文標題 Switchable Out-of-plane Shift Current in Ferroelectric Two-dimensional Material CuInP <sub>2</sub> S <sub>6</sub>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 013103/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0074371	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 H. Tanaka, S. Okazaki, K. Kuroda, R. Noguchi, Y. Arai, S. Minami, S. Ideta, K. Tanaka, D. Lu, M. Hashimoto, V. Kandyba, M. Cattelan, A. Barinov, T. Muro, T. Sasagawa, and T. Kondo	4. 巻 105
2. 論文標題 Large Anomalous Hall Effect Induced by Weak Ferromagnetism in the Noncentrosymmetric Antiferromagnet CoNb <sub>3</sub> S <sub>6</sub>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L121102/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.L121102	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 Y. M. Itahashi, T. Ideue, S. Hoshino, C. Goto, H. Namiki, T. Sasagawa, and Y. Iwasa	4. 巻 13
2. 論文標題 Giant Second Harmonic Transport under Time-reversal Symmetry in a Trigonal Superconductor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1659/1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-29314-4	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 -

1. 著者名 Y. Tanaka, T. Inoue, M. Mochizuki	4. 巻 22
2. 論文標題 Theory of the Inverse Faraday Effect due to the Rashba Spin-Orbit Interactions: Roles of Band Dispersions and Fermi Surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/aba5be	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 T. Katsufuji, M. Miyake, M. Naka, M. Mochizuki, S. Kogo, T. Kajita, Y. Shimizu, M. Itoh, T. Hasegawa, S. Shimose, S. Noguchi, T. Saiki, T. Sato, F. Kagawa	4. 巻 3
2. 論文標題 Orbital and magnetic ordering and domain-wall conduction in ferrimagnet La5Mo4O16	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013105/1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.013105	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 Akira Musha, Nozomi Soya, Tenghua Gao, Takashi Harumoto, and Kazuya Ando	4. 巻 118
2. 論文標題 Tunable spin_orbit torques and perpendicular magnetic anisotropy at oxidized Al/Co interfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 052410/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0038931	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. Yano, A. Kudriashov, H. T. Hirose, T. Tsuda, H. Kashiwaya, T. Sasagawa, A.A. Golubov, V.S. Stolyarov, and S. Kashiwaya	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetic Gap of Fe-Doped BiSbTe <sub>2</sub> Se Bulk Single Crystals Detected by Tunneling Spectroscopy and Gate-Controlled Transports	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 4180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.1c00869	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 T. Yokoyama, S. Ohuchi, T. Matsui, Y. Kaneko, T. Sasagawa	4. 巻 125
2. 論文標題 Low-cost Computing of the Thermophysical Properties of Organic-inorganic Halide Perovskites by Density Functional Theory Combined with the Three-dimensional Reference Interaction Site Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. C	6. 最初と最後の頁 6601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c01171	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. Watanabe, M. Kumazaki, H. Ezure, T. Sasagawa, R. J. Cava, M. Itoh, and Y. Shimizu	4. 巻 90
2. 論文標題 Local Observations of Orbital Diamagnetism and Excitation in Three-Dimensional Dirac Fermion Systems Bi <sub>1-x</sub> Sb <sub>x</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn	6. 最初と最後の頁 53701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.053701	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 P.-J. Huang, K. Taniguchi, M. Shigefuji, T. Kobayashi, M. Matsubara, T. Sasagawa, H. Sato, and H. Miyasaka	4. 巻 33
2. 論文標題 Chirality-dependent Circular Photogalvanic Effect in Enantiomorphic Two-dimensional Organic-inorganic Hybrid Perovskites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Adv. Mater.	6. 最初と最後の頁 2008611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202008611	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 T. Yokoyama, S. Ohuchi, E. Igaki, T. Matsui, Y. Kaneko, T. Sasagawa	4. 巻 12
2. 論文標題 An Efficient ab-initio Scheme for Discovering Organic-inorganic Hybrid Materials by using Genetic Algorithms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. Lett.	6. 最初と最後の頁 2023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.1c00087	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 T. Misawa, S. Nakamura, Y. Okazaki, Y. Fukuyama, N. Nasaka, H. Ezure, C. Urano, N.-H. Kaneko, and T. Sasagawa	4. 巻 118
2. 論文標題 Single-surface Conduction in a Highly Bulk-resistive Topological Insulator Sn <sub>0.02</sub> Bi <sub>1.08</sub> Sb <sub>0.9</sub> Te <sub>2</sub> S using the Corbino Geometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 33102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0026730	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 Z. Shi, P.G. Baity, J. Terzic, T. Sasagawa, and D. Popovi	4. 巻 11
2. 論文標題 Pair Density Wave at High Magnetic Fields in Cuprates with Charge and Spin Orders	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Commun.	6. 最初と最後の頁 3323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-17138-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 該当する

1. 著者名 S.A. Ekahana, Y.W. Li, Y. Sun, H. Namiki, H.F. Yang, J. Jiang, L.X. Yang, W.J. Shi, C.F. Zhang, D. Pei, C. Chen, T. Sasagawa, C. Felser, B.H. Yan, Z.K. Liu, and Y.L. Chen,	4. 巻 102
2. 論文標題 Topological Lifshitz Transition of the Intersurface Fermi-arc Loop in NbIrTe <sub>4</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 85126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.085126	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 Y. Okamoto, K. Saigusa, T. Wada, Y. Yamakawa, A. Yamakage, T. Sasagawa, N. Katayama, H. Takatsu, H. Kageyama, and K. Takenaka	4. 巻 102
2. 論文標題 High-mobility Carriers Induced by Chemical Doping in the Candidate Nodal-line Semimetal CaAgP	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 115101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.115101	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 T. Ideue, S. Koshikawa, H. Namiki, T. Sasagawa, and Y. Iwasa	4. 巻 2
2. 論文標題 Giant Nonreciprocal Magnetotransport in Bulk Trigonal Superconductor PbTaSe2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 42046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.00.002000	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 Z. Shi, P.G. Baity, T. Sasagawa, and D. Popovi?	4. 巻 6
2. 論文標題 Vortex Phase Diagram and the Normal State of Cuprates with Charge and Spin Orders	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaay8946
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aay8946	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 M. Sakano, M. Hirayama, T. Takahashi, S. Akebi, M. Nakayama, K. Kuroda, K. Taguchi, T. Yoshikawa, K. Miyamoto, T. Okuda, K. Ono, H. Kumigashira, T. Ideue, Y. Iwasa, N. Mitsuishi, K. Ishizaka, S. Shin, T. Miyake, S. Murakami, T. Sasagawa, and T. Kondo	4. 巻 124
2. 論文標題 Radial Spin Texture in Elemental Tellurium with Chiral Crystal Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 136404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.136404	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. Murase and T. Sasagawa	4. 巻 89
2. 論文標題 Large Magnetoresistance and Dirac Line Node in LaAgBi <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc, Jpn	6. 最初と最後の頁 55003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.055003	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 T. Misawa, S. Nakamura, Y. Okazaki, Y. Fukuyama, N. Nasaka, H. Ezure, C. Urano, N.-H. Kaneko, and T. Sasagawa	4. 巻 32
2. 論文標題 Dual-gate Control of the Surface Carriers of the Highly-bulk-resistive Topological Insulator Sn <sub>0.02</sub> Bi <sub>1.08</sub> Sb <sub>0.9</sub> Te <sub>2</sub> S	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys.: Condens. Matter	6. 最初と最後の頁 405704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab997e	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. Yano, M. Koyanagi, H. Kashiwaya, K. Tsumura, H. T Hirose, Y. Asano, T. Sasagawa, and S. Kashiwaya	4. 巻 89
2. 論文標題 Unusual Superconducting Proximity Effect in Magnetically Doped Topological Josephson Junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn	6. 最初と最後の頁 34702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.034702	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 Tomoe Nishimura, Dae-Yun Kim, Duck-Ho Kim, Yune-Seok Nam, Yong-Keun Park, Nam-Hui Kim, Yoichi Shiota, Chun-Yeol You, Byoung-Chul Min, Sug-Bong Choe, Teruo Ono	4. 巻 103
2. 論文標題 Interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction and dampinglike spin-orbit torque in [Co/Gd/Pt] <sub>N</sub> magnetic multilayers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104409/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.104409	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 Yuushou Hirata, Kaoru Noda, Yoichi Shiota, Takahiro Moriyama and Teruo Ono	4. 巻 60
2. 論文標題 Field-driven domain wall creep motion in ferrimagnetic Tb/CoFeB/MgO microwires	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 020902/1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abd67d	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 T. Ikebuchi, Y. Hirata, S. Funada, A. Tsukamoto, H. Ito, K. Suzuki, K. Hoshi, N. Tsuji, H. Sakurai, Y. Shiota, T. Moriyama, T. Ono	4. 巻 45
2. 論文標題 Estimation of Angular Momentum Compensation Temperature in GdFe Film by Magnetic Compton Scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3379/msjmag.2101L002	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19件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 望月維人
2. 発表標題 Dynamical manipulations of topological magnetism with light and microwave electromagnetic fields
3. 学会等名 International Conference on Frustration, Topology, and Spin Textures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 望月維人
2. 発表標題 Reservoir computing with spin waves in magnetic skyrmion crystal
3. 学会等名 理化学研究所セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 望月維人
2. 発表標題 Theory of Magnetism-Induced Negative Thermal Expansion in Inverse Perovskite Antiferromagnets
3. 学会等名 International Conference on Condensed Matter Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 望月維人
2. 発表標題 Theory of Photoinduced Spin Polarization in Spin-Orbit-Coupled Systems
3. 学会等名 The 11th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 衛藤倫太郎, 望月維人
2. 発表標題 3次元近藤格子模型における四重波数磁気ヘッジホッグ格子
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上隆, 望月維人
2. 発表標題 三角格子上の近藤格子モデルにおける光誘起120度スピン秩序の理論的研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮島悠輔, 望月維人
2. 発表標題 機械学習によるXXZ模型のBKT転移および2次相転移の検出
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 衛藤倫太郎, Rico Pohle, 望月維人
2. 発表標題 遍歴ヘリカル磁性体中における磁気構造のダイナミクスの理論研究
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 上保友人, 望月維人
2. 発表標題 八ニカム格子遷移金属化合物における負熱膨張現象の理論的探索
3. 学会等名 日本物理学会2023年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮島悠輔, 村田優介, 田中康寛, 望月維人
2. 発表標題 機械学習によるKosterlitz-Thouless転移の検出
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 Takashi Inoue, Masahito Mochizuki
2. 発表標題 Photoinduced 120-degree spin order and Z2 vortices in the Kondo-lattice model on a triangular lattice
3. 学会等名 International Conference on Frustration, Topology, and Spin Textures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Miyajima, Masahito Mochizuki
2. 発表標題 Machine learning detection of multiple phase transitions including BKT transition in the q-state clock models
3. 学会等名 International Conference on Frustration, Topology, and Spin Textures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto Uwabo, Masahito Mochizuki
2. 発表標題 Theoretical Exploration of Magnetism-Induced Negative Thermal Expansion in Honeycomb-Lattice Antiferromagnets
3. 学会等名 International Conference on Frustration, Topology, and Spin Textures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rintaro Eto, Masahito Mochizuki
2. 発表標題 Spin and Charge Excitations of Skyrmion Crystals in Itinerant Magnet
3. 学会等名 International Conference on Frustration, Topology, and Spin Textures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 衛藤倫太郎, 望月維人
2. 発表標題 近藤格子系における磁気スキルミオンの円偏光マイクロ波磁場誘起トポロジカル相転移の理論研究
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 井上隆, 田中康寛, 望月維人
2. 発表標題 円偏光レーザー誘起スピン偏極のフロケ理論: 振動磁場と振動電場の効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中康平, 朝日透, 望月維人
2. 発表標題 張力ひずみ由来の異方性ジャロシンスキー守谷相互作用による磁気スキルミオンの安定化・不安定化の理論
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kouhei Tanaka, T. Asahi, M. Mochizuki
2. 発表標題 Theoretical study on the enhanced stability of magnetic skyrmions under a uniaxial strain
3. 学会等名 Molcecular Chirality Asia 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮島悠輔, 村田優介, 田中康寛, 望月維人
2. 発表標題 機械学習を用いたクロック模型のKT転移を含む多段磁気転移の検出
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 M. Mochizuki, 他多数	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer, Berlin	5. 総ページ数 575
3. 書名 Chirality, Magnetism and Magnetoelectricity	

1. 著者名 M. Mochizuki and many others	4. 発行年 2021年
2. 出版社 De Gruyter, Berlin,	5. 総ページ数 300
3. 書名 Multiferroics: Fundamentals and Applications	

〔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	笹川 崇男  (Sasagawa Takao)  (30332597)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授   (12608)	

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	安藤 和也  (Ando Kazuya)  (30579610)	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授    (32612)	
研究分担者	小野 輝男  (Ono Teruo)  (90296749)	京都大学・化学研究所・教授    (14301)	

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