

令和 2 年 4 月 21 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02924

研究課題名(和文)トポロジカル磁気テクスチャの非平衡ダイナミクスと量子輸送現象の理論研究

研究課題名(英文)Theoretical study on the nonequilibrium dynamics and the quantum transport phenomena of topological magnetic textures

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) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル磁気テクスチャである「磁気スキルミオン」が示す非平衡現象や量子輸送現象を理論的に多数明らかにした。特に、「マイクロ波によるスキルミオンの並進運動駆動」や「スキルミオンを使ったマイクロ波-直流電圧変換」、「駆動された強磁性磁壁中に発現する動的スキルミオン状磁気構造」など、物性物理やスピントロニクス分野における基礎物理と技術応用の両方の観点から重要な発見である。また、磁場や電場、円偏光マイクロ波などによりナノスケールのスキルミオンを素子中に意図した数、意図した場所に書き込む技術の理論設計・提案は、次世代の高性能磁気メモリ素子への応用に向けた重要な基盤技術となると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁石の中に発現する磁気構造は、ハードディスクやセンサー、メモリ、マイクロ波素子等に応用されて、私たちの生活を豊かにしています。このような磁気素子のさらなる高性能化と省エネ化を目指して、新しい磁気構造である「トポロジカル磁気テクスチャ」を探索し、それらが示す未知の物性現象やデバイス機能を、量子統計力学などの手法を駆使した理論計算によって研究しました。特に、このような磁気構造の代表格である「スキルミオン」に注目して研究を進め、「マイクロ波によってスキルミオンが伝送される現象」や「スキルミオンによるマイクロ波-直流電流変換」など、興味深い物理現象と有用なデバイス機能を数多く発見・解明しました。

研究成果の概要(英文)：In this project, we theoretical discovered and revealed a lot of novel nonequilibrium dynamical phenomena and quantum transport phenomena of nanometric topological magnetic textures, especially, those of magnetic skyrmions. The phenomena include "microwave-driven translational motion of skyrmions", "microwave-DC voltage conversion using skyrmions", and "emergence of skyrmion-like spin textures in driven magnetic domain walls", which are of importance in the fields of condensed-matter physics and spintronics from the viewpoints of both fundamental science and technology. In addition, we theoretically proposed several controlled techniques to write or generate skyrmions, which are recognized as fundamental techniques for possible applications of skyrmions or topological magnetic textures to future high-performance magnetic memory devices.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スキルミオン スピントロニクス トポロジカル磁気テクスチャ 非平衡ダイナミクス マイクロ波応答 磁気メモリ

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2010年にB20型金属化合物(MnSi, FeGe, Fe_{1-x}CoxSi)やCu₂OSeO₃などのキラル磁性体において、スキルミオンと呼ばれるナノスケールの渦状磁気テクスチャが発見された。このスキルミオンは位相幾何学的な性質を備える珍しい磁気テクスチャとして注目を集め、その発見の直後に明らかになった(1). ナノスケールの極小サイズ(3~100 nm)、(2). トポロジカルに保護された安定性、(3). 高い転移温度、(4). 通常の磁気構造の100万分の1の極小電流で駆動可といった性質から、高密度・省電力の磁気メモリ素子への応用が期待され、世界的に精力的な研究が行われていた。

本研究課題の研究代表者である望月は、スキルミオンの理論研究に初期の段階から取り組み、次のような成果を上げてきた。

- ・マイクロ波周波数帯にある特異なスピン波モードの発見
- ・電流駆動ダイナミクスと極小閾値電流のメカニズムの解明
- ・電流によるスキルミオンの生成・消去方法の提案
- ・スキルミオン相におけるマイクロ波の巨大非相反方向二色性の発見
- ・スキルミオン由来のトポロジカルマグノンホール効果とラチェット回転現象の発見
- ・非キラル極性磁性体における世界初のネール型スキルミオンの発見
- ・針状電極を用いた局所電場印加によるスキルミオン生成法の提案

しかし、キラル磁性体のスキルミオンを実際に磁気メモリ素子の情報担体として応用するには数多くの困難があることが分かっていた。そのような困難には、

1. 「キラル磁性体の単結晶薄膜の作成は難しいこと」や「試料が多結晶であったりキラリティの異なるグレインがあったりすると駆動したスキルミオンが境界で止まって伝送できないこと」、「スキルミオン磁気渦のキラリティや渦度が物質固有のパラメータで一意に決まっており、外部パラメータによってスイッチすることができないこと」など、「スキルミオン」という磁気構造そのもの、あるいはスキルミオンを発現する「キラル磁性体」という物質材料そのものが持つ問題点

2. ナノスケールの極小サイズで、トポロジカルに保護された安定な(逆に安定過ぎる)「スキルミオン」という磁気構造を、書いたり(生成)、消したり(消去)、動かしたり(伝送)、読み出したり(検出)するデバイス応用のための要素技術が確立していないという問題点

があった。本課題の研究が開始された当初は、このような数々の問題点を克服・解決するために、世界中の研究者たちが競って研究・開発に取り組んでいた。

2. 研究の目的

上術のような背景から我々は、磁性体中で実現し得るスキルミオン以外の「新しいトポロジカル磁気テクスチャ」や、それらの磁気テクスチャを発現する「新しいトポロジカル磁性材料」を理論的に設計・探索し、そのデバイス機能に直結する創発物性現象を理論的に探索・解明することを目指した。特に、新しいトポロジカル磁気テクスチャが示す「電流駆動ダイナミクス」や「光・マイクロ波応答」、「外部パラメータによるスイッチング現象」などの非平衡・相転移ダイナミクスを明らかにすることや、それらのトポロジカル磁気テクスチャと伝導電子のカップリングがもたらすトポロジカルホール効果などの特異な量子輸送現象を明らかにすることを、本研究課題の目的とした。

3. 研究の方法

トポロジカル磁気テクスチャが示す特異な「非平衡ダイナミクス」や「外場応答ダイナミクス」を探索・解明するために、磁気テクスチャを構成する磁化の集団励起・や共鳴励起のモードに注目する。特に、その時空間ダイナミクスを、磁化の時間発展方程式(LLG方程式)を数値的に解析することで調べ、明らかにする。数値シミュレーションと解析的理論を相補的かつ効率的に組み合わせることで、現象を定量的かつ詳細に調べ、その物理機構や基礎原理の解明を目指す。また、発見した新しい物理現象をさらに増強・増幅するために、磁化の励起モードを他の外部パラメータで、より強く、より省エネルギーで励起できないかを探索する。そして、これらの現象や、それらに由来するデバイス機能の高効率化や、まったく新しい現象を引き起こすことを目指す。特に、磁性と誘電性の相互のカップリング(電気磁気結合)を利用した「動的電気磁気効果」に着目し、研究を遂行する。具体的には、非共線な磁化配列を持つトポロジカル磁気テクスチャは、誘電分極などの電荷自由度と結合することで、電場と磁場の両方に活性化したな磁化・分極ダイナミクス(エレクトロマグノン励起)を示すが、この複合自由度の励起が必然的に持つ二種類の励起チャネル、つまり電磁波(光やマイクロ波)の交流磁場および電場成分による励起チャネルの干渉効果を考慮して、光やマイクロ波領域における新しい非相反方向二色性や磁気円二色性、磁気旋光性などの光・マイクロ波機能を探索する。

4. 研究成果

次のような成果を上げた。

(1)「磁気スキルミオン」をメモリ素子の情報担体として応用するための基盤技術として、磁場印加による生成手法を理論的に設計した。原理的に印加スポットをナノ領域に絞ることが困難な磁場を使って、ナノ磁気構造であるスキルミオンを「狙った領域」に「意図した数」だけ書き込むことは一見不可能に思われる。また、トポロジカル磁気構造であるスキルミオンの生成には、通常、局所磁化反転が必須であり、消費電力が大きくなってしまふという応用上の困難があった。このような困難が、系にナノスケールの切り欠きや孔を導入することで解消され、大域的な磁場印加でも、切り欠きや孔部に、磁場照射時間に比例した数のスキルミオンを、極小の磁場で書き込めることを見出した。また、この理想的な現象がなぜ可能なのか、背後にある物理機構と生成過程における非平衡ダイナミクスを理論的に明らかにした。

(2)スキルミオンの技術応用に向けては、その欠陥制御も重要な基礎技術になる。ローレンツ透過型電子顕微鏡による磁化構造観察を得意とする阪府大の実験グループと共同して、磁場印加によるスキルミオン結晶の生成プロセスと欠陥構造について調べた。その結果、(1)スキルミオン生成は試料端や粒界面から起こること、(2)生成されたスキルミオン結晶の方位は試料端や結晶粒界に支配されること、(3)その結果、スキルミオン結晶ドメイン間には五員環構造や七員環構造と呼ばれる欠陥構造が発現することを明らかにした。

(3)磁性体と金属の接合界面で実現する二次元ラッシュバ電子系に円偏光電磁波を照射すると、その振動電場成分がラッシュバ型スピン軌道相互作用を通じて誘起する有効的な円偏光磁場により、通常の場合と比較して数万倍の効率でスピン偏極を誘起できることを発見した。この現象は、円偏光による効率的な磁化制御、特にトポロジカル磁気テクスチャの省エネルギーな書き込み技術として利用できる。

(4)スキルミオンのマイクロ波による制御・駆動の道を拓く、様々な「スキルミオンのマイクロ波応答現象」を理論的に発見・予言した。強磁性磁気二層細線にマイクロ波交流ゲート電圧を印加することで、DM相互作用を動的に変調し、孤立スキルミオンのブリージング振動を励起できることと、それによりホール効果を伴わない並進運動が駆動できることを発見した。この現象は、スキルミオンのメモリ応用における大きなブレイクスルーとなり得る。

(5)傾斜定常磁場下のキラル磁性体の薄膜・薄片試料にマイクロ波を照射することで、スキルミオン結晶の並進運動を駆動できることを理論的に発見し、その挙動や性質について調べた。照射するマイクロ波の周波数がスピン波モードの共鳴周波数に一致する時に運動速度が極大を示すことや、並進運動の方向や速さが、励起するモードの種類やマイクロ波偏光に依存することを見出した。

(6)典型的なスパイラル磁性強誘電体 TbMnO₃ において、圧力下で現れる新規な磁気強誘電相がテラヘルツ帯で巨大なエレクトロマグノン励起を示すことをパリ大学の実験グループと共同で明らかにし、その励起メカニズムを解明した。この成果はテラヘルツ波デバイス応用へ繋がるのが期待される。また、この非常に強いマグノンの励起を利用することで、マグノンの非線形強励起を使った、強誘電性や磁性の高速スイッチング現象などへの道が開ける。

(7)Y型ヘキサフェライト強磁性体中に「ミスフィット型プロットライン」と呼ばれる新しい磁壁構造が発現することを国内の実験グループと共同で明らかにした。ヘキサフェライト方結晶構造に由来する6回対称の磁気異方性と磁気双極子相互作用を考慮した微視的なスピンモデルを解析することで、これらの競合により、これまでに知られていなかった新しい磁壁構造の発現を明らかにし、その発現機構を解明することに成功した。

(8)1958年の発見以来謎となっていた「5g型反強磁性秩序に由来する逆ペロフスカイト型マンガン窒化物の巨大な負熱膨張現象」の機構を理論的に解明した。さらに、その機構が高い普遍性を持つことに気が付き、同じ機構によって負熱膨張が起こり得る結晶構造を予言・提案した。

(9)キャビティ共振器内に配置した絶縁性キラル磁性体に発現する磁気スキルミオンとマイクロ波のキャビティモードとの結合の強度や性質を理論計算により明らかにし、実験結果を再現・説明することに成功した。

(10)強磁性磁気細線中の強磁性磁壁を外部磁場の印加により駆動した時に、駆動された強磁性磁壁中にダイナミカルにスキルミオン様の渦状トポロジカル磁気構造が発現することを発見した。また、そのスキルミオン様の磁化構造が伝導電子に作用する創発磁場を生成することにより、トポロジカルホール抵抗の測定で検出可能であることを理論的に予言した。磁壁の外部パラメータによる駆動を基礎原理とするメモリ素子(磁壁駆動型メモリ、レーストラックメモリ)は国内外で精力的に研究されているが、情報担体である磁壁の読み出し技術の実現が大きな鍵となっている。本成果は、磁壁をホール抵抗によって精緻に読み出す技術に直結し、磁壁駆動型メモリの実現を後押しする重要な成果となっている。

(11) 強磁性多層膜において交流電場によりラシュバ型スピン軌道相互作用に由来する界面DM相互作用を誘起できることや、それによりスキルミオンのスピン波励起モード励起できることを非平衡グリーン関数に基づく場の量子論に基づく理論計算により明らかにした。本研究により、磁性多層膜のように人工的に空間反転対称性を破った系で生じるラシュバ型スピン軌道相互作用の電場変調により、定常的なDM相互作用と、時間変化するDM相互作用の両方の成分が生じることや、実際の系でこれらの相互作用がどの程度の強度を持つか見積もることができた。定常的なDM相互作用は、磁性多層膜においてスキルミオンや他のトポロジカル磁気テクスチャを発現させる。一方、時間変化するDM相互作用は、この磁気テクスチャを励起・駆動するチャネルとして利用できる。論文では、定常的なDM相互作用により「ネール型」と呼ばれるスキルミオンが生じることと、時間変化するDM相互作用によって、「ブリージングモード」と呼ばれるスピン波モードを引き起こせることを明らかにした。

(12) スキルミオンが発現しているキラル磁性体の薄膜試料や磁性多層膜に面直方向から傾いた外部磁場を印加し、そこにマイクロ波を照射することで、スキルミオンのスピン波励起により直流起電力成分を発生させることができることを理論的に明らかにした。また、発生する直流起電力の符号や大きさが、マイクロ波の強度や周波数に依存して変化することを明らかにした。特に、ここで見出された「マイクロ波周波数に対する依存性」は、スキルミオンが持ついくつかの異なるスピン波モードを選択的に励起することによって、発生する直流起電力を制御・変調できることを意味している。このスキルミオンを利用した「マイクロ波-直流電圧変換」は将来のスキルミオンを利用したスピントロニクス素子への電力供給に利用できる可能性を秘めている。

(13) スキルミオンを発現するキラル磁性体に一軸張力を加えることで、スキルミオン相が劇的に安定化あるいは不安定化することを、微視的なスピンをモデルモンテカルロ法で解析することで明らかにした。具体的には、一軸張力の効果をDM相互作用の異方的な変調として考慮したモデルにおいて、外部磁場の印加方向と一軸張力の方向の相対関係を様々に変えて調べることによって、一軸張力と外部磁場が平行の場合にはスキルミオン相が著しく不安定化し、逆に直交する場合にはスキルミオン相が著しく安定化することを見出した。従来、キラル磁性体のバルク試料におけるスキルミオン相は、温度-磁場相図上の有限温度・有限磁場の極めて限られた領域でしか存在し得ず、その不安定性は素子応用の大きな障害となっていた。本研究により、試料やデバイスに一軸応力を加えるだけで、広い温度-磁場範囲でスキルミオンを安定化できることが分かり、素子応用への道が大きく拓けた。

(14) 円偏光マイクロ波照射によるスキルミオン生成の技術について理論的に設計・予言し、その背後にある基礎物理を解明した。強磁性体の薄膜状あるいは薄片状の擬二次元材料に円偏光マイクロ波を照射すると、円偏光面に垂直に有効的な定常磁場成分が生じるとことを利用して、磁化反転を引き起こすことができる。ただし、一様な強磁性体試料に円偏光マイクロ波を照射しても、一様に磁化の反転が起こるだけで、スキルミオンの生成に必要な「局所的な磁化反転」を引き起こすことはできない。そこで、切り欠きやナノホール等の構造を作り込んだ強磁性体試料を使うことで、円偏光マイクロ波により励起されたスピン波を反射・干渉させ、スピン波励起強度の局所的な増強を引き起こせることを示した。さらに、この現象を利用して局所的な磁化反転を引き起こし、スキルミオンを生成できることを理論的に提案・予言した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Miyake, and M. Mochizuki	4. 巻 101
2. 論文標題 Creation of nanometric magnetic skyrmions by global application of circularly polarized microwave magnetic field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094419(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.094419	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 K. Tanaka, R. Sugawara, and M. Mochizuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Theoretical study on stabilization and destabilization of magnetic skyrmions by uniaxial-strain-induced anisotropic Dzyaloshinskii-Moriya interactions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 034404(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.4.034404	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 望月維人	4. 巻 第15巻
2. 論文標題 「局所電場印加による磁気スキルミオン書き込み技術の理論設計」	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本磁気学会報「まぐね」	6. 最初と最後の頁 1月号(192-198)
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 無
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 K. Shimizu, and M. Mochizuki	4. 巻 101
2. 論文標題 Theoretical study on slit experiments in Rashba electron systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 045301(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.045301	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. Mochizuki, T. Koide, M. Ikka, and A. Takeuchi	4. 巻 META2019
2. 論文標題 Microwave-Active Dynamics of Magnetic Skyrmions under Application of a Tilted Magnetic Field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of META 2019 Lisbon - Portugal	6. 最初と最後の頁 609-610
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 無
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. Mochizuki	4. 巻 5
2. 論文標題 Dynamical magnetoelectric phenomena of skyrmions in multiferroics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Sciences Reviews	6. 最初と最後の頁 1(20190017)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/psr-2019-0017	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. Koide, A. Takeuchi, and M. Mochizuki	4. 巻 100
2. 論文標題 DC spinmotive force from microwave-active resonant dynamics of skyrmion crystal under a tilted magnetic field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 014408(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.014408	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 望月維人	4. 巻 88
2. 論文標題 「磁気スキルミオンのマイクロ波誘起現象と素子機能」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 7月号(460-464)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.88.7_460_	査読の有無 無
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 A. Takeuchi, S. Mizushima, and M. Mochizuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Electrically driven spin torque and dynamical Dzyaloshinskii-Moriya interaction in magnetic bilayer systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9528(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-46009-x	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 K.-J. Kim, M. Mochizuki, and T. Ono	4. 巻 12
2. 論文標題 Prediction of topological Hall effect in a driven magnetic domain wall	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 053006(1-3)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab1801	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 L. V. Abdurakhimov, S. Khan, N. A. Panjwani, J. D. Breeze, M. Mochizuki, S. Seki, Y. Tokura, J. J. L. Morton, and H. Kurebayashi	4. 巻 99
2. 論文標題 Magnon-photon coupling in the noncollinear magnetic insulator Cu ₂ OSeO ₃	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 140401(R)(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.140401	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. Kobayashi, M. Mochizuki	4. 巻 3
2. 論文標題 Theory of magnetism-driven negative thermal expansion in inverse perovskite antiferromagnets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 024407/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.024407	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 K. Kurushima, K. Tanaka, H. Nakajima, M. Mochizuki, S. Mori	4. 巻 125
2. 論文標題 Microscopic magnetization distribution of Bloch lines in a uniaxial magnet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 53902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5042678	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. Ikka, A. Takeuchi, M. Mochizuki	4. 巻 98
2. 論文標題 Resonance modes and microwave-driven translational motion of a skyrmion crystal under an inclined magnetic field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.184428	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 I. Aupiais, M. Mochizuki, H. Sakata, R. Grasset, Y. Gallais, A. Sacuto, M. Cazayous	4. 巻 3
2. 論文標題 Colossal electromagnon excitation in the non-cycloidal phase of TbMnO ₃ under pressure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-018-0130-3	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 A. Takeuchi, M. Mochizuki	4. 巻 113
2. 論文標題 Selective activation of an isolated magnetic skyrmion in a ferromagnet with microwave electric fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physic Letters	6. 最初と最後の頁 72404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5045629	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. Mochizuki	4. 巻 111
2. 論文標題 Controlled creation of nanometric skyrmions using external magnetic fields	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 092403/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4993855	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. Nakajima, A. Kotani, M. Mochizuki, K. Harada, and S. Mori	4. 巻 111
2. 論文標題 Formation process of skyrmion lattice domain boundaries: The role of grain boundaries	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192401/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4991791	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. Mochizuki, K. Ihara, J. Ohe, and A. Takeuchi	4. 巻 112
2. 論文標題 Highly efficient induction of spin polarization by circularly polarized electromagnetic waves in the Rashba spin-orbit systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 122401/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5022262	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. Mochizuki, M. Kobayashi, R. Okabe, and D. Yamamoto	4. 巻 97
2. 論文標題 Spin model for nontrivial types of magnetic order in inverse-perovskite antiferromagnets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 060401(R)/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.060401	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28件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Masahito Mochizuki
2. 発表標題 Microwave-Active Dynamics of Magnetic Skyrmions under Application of a Tilted Magnetic field
3. 学会等名 The 10th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahito Mochizuki
2. 発表標題 Microwave-Induced Dynamical Phenomena of Magnetic Skyrmions
3. 学会等名 The 4th International Conference ``Nanomagnetism and spintronics" (Sol-SkyMag 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahito Mochizuki
2. 発表標題 Microwave-driven dynamics of magnetic skyrmions
3. 学会等名 The 5th International Workshop on Topological Structures in Ferromagnetic Materials (TOP02019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中康平, 朝日透, 望月維人
2. 発表標題 一軸張力ひずみによるスキルミオン相安定化・不安定化の理論研究：基底状態相図と有限温度相図
3. 学会等名 日本物理学会第75年次大会(2020年) 18pB21-9
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北山圭亮, 望月維人
2. 発表標題 Floquet理論を用いた $-(\text{BEDT-TTF})_{213}$ の光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75年次大会(2020年) 19aB21-8
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中康寛, 望月維人
2. 発表標題 有機導体 $-(\text{BEDT-TTF})_{213}$ における円偏光誘起トポロジカル状態の性質
3. 学会等名 日本物理学会第75年次大会(2020年) 19aB21-9
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 ニューラルネットワークによるn状態クロック模型のKT転移の検出
3. 学会等名 日本物理学会第75年次大会(2020年) 19pK36-2
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keisuke Kitayama, Masahito Mochizuki
2. 発表標題 Theoretical study of Photo-induced phase transition in $-(\text{BEDT-TTF})_{213}$ using Floquet theory
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019 (TopoMat2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中康寛, 望月維人
2. 発表標題 スピン軌道相互作用のある電子系における円偏光誘起スピン偏極の理論：数値計算とフロケ解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 11aD10-1
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水宏太郎, 望月維人
2. 発表標題 Rashba電子系におけるスリット型電子干渉実験の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 10aD15-7
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahito Mochizuki
2. 発表標題 Dynamical Phenomena and Device Functions of Magnetic Skyrmions
3. 学会等名 The 19th Japan-Korea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (JKT19) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 望月維人
2. 発表標題 空間反転対称性の破れた磁性体における磁気スキルミオン
3. 学会等名 新学術領域「J-Physics：多極子伝導系の物理」Tropical Topical Meeting「カイラル磁性体EuPtSiの電子物性--研究の現状と今後の展開--」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中康平, 菅原諒介, 朝日透, 望月維人
2. 発表標題 一軸張力歪みによるスキルミオン相安定化の数値的研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小出竜也, 竹内祥人, 望月維人
2. 発表標題 スキルミオン結晶を用いたマイクロ波による直流スピン起電力生成の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 一花幹人, 竹内祥人, 望月維人
2. 発表標題 マイクロ波によるスキルミオン伝送の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大木祐人, 竹内祥人, 望月維人
2. 発表標題 スキルミオン型トポジカル磁気構造のスピン軌道トルク駆動
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林賢也, 望月維人
2. 発表標題 逆ペロブスカイト型マンガン窒化物における負の熱膨張と磁気相転移の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅将之, 望月維人
2. 発表標題 円偏光マイクロ波による磁化反転とスキルミオン生成の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Mochizuki
2. 発表標題 Dynamical Phenomena and Device Functions of Magnetic Skyrmions
3. 学会等名 EDTM (Electron Devices Technology and Manufacturing Conference)2018 Symposium on Frontier Researches of Functional Oxide Devices and Material (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 望月維人
2. 発表標題 磁性強誘電体を示す電場励起マグノンと光・マイクロ波現象
3. 学会等名 第5回豊田理研ワークショップ「スピン秩序の動的光制御」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 望月維人
2. 発表標題 トポロジカル磁気構造が拓く新しいスピントロニクス
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会特別シンポジウム「物質中のトポロジー：応用にどのように結びつくのか？」（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Mochizuki
2. 発表標題 Dynamical Phenomena of Magnetic Skyrmions
3. 学会等名 International Workshop on Topological Structures in Ferroic Material（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内祥人, 望月維人
2. 発表標題 エレクトロマグノン励起を用いた孤立スキルミオンの駆動
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林賢也, 岡部玲央哉, 山本大輔, 望月維人
2. 発表標題 負の熱膨張を示す逆ペロブスカイト型Mn窒化物の磁気秩序と相転移の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小出竜也, 竹内祥人, 望月維人
2. 発表標題 スキルミオン結晶相においてマイクロ波が誘起する直流スピンの起電力成分の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大木祐人, 竹内祥人, 望月維人
2. 発表標題 スキルミオン型トポロジカル磁気構造のスピンの軌道トルク駆動の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 一花幹人, 竹内祥人, 望月維人
2. 発表標題 傾斜磁場中のスキルミオン結晶相が示すマイクロ波磁気共鳴モードの理論研究
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内祥人, 大江純一郎
2. 発表標題 スピンのカイラリティの空間勾配によるスピン流
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

望月維人研究室のホームページ
http://www.f.waseda.jp/masa_mochizuki/index.html
温めると縮む物質の負熱膨張現象メカニズムを解明
<https://www.waseda.jp/top/news/63708>

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	古川 信夫 (Furukawa Nobuo) (00238669)	青山学院大学・理工学部・教授 (32601)	
研究分担者	竹内 祥人 (Takeuchi Akihito) (80738328)	青山学院大学・理工学部・助教 (32601)	
研究協力者	森 茂生 (Mori Shigeo)	大阪府立大学・教授	
研究協力者	ロッシュ アヒム (Achim Rosch)	ケルン大学・教授	
研究協力者	ケツマルキ イステバン (Istvan Kezsmarki)	アウグスブルク大学・教授	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小野 輝男 (Ono Teruo)	京都大学・化学研究所・教授	
研究協力者	一花 幹人 (Ikka Masahito)	青山学院大学・理工学部・大学院生	
研究協力者	大木 祐人 (Ohki Yuto)	青山学院大学・理工学部・大学院生	
研究協力者	小出 竜也 (Koide Tatsuya)	青山学院大学・理工学部・大学院生	
研究協力者	小林 賢也 (Kobayashi Masaya)	青山学院大学・理工学部・大学院生	
研究協力者	三宅 将之 (Miyake Masayuki)	早稲田大学・先進理工学部・大学院生	
研究協力者	菅原 諒介 (Sugawara Ryosuke)	早稲田大学・先進理工学部・大学院生	
研究協力者	田中 康平 (Tanaka Kohei)	早稲田大学・先進理工学部・大学院生	