

研究報告書

「高いデバイス機能を有するナノスケールトポロジカル磁気テクスチャの理論設計」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成26年月～平成29年3月

研究者: 望月 維人

1. 研究のねらい

現代の高度情報化社会において、高性能のデータストレージを希求する声が上がっている。キラル磁性体中で実現する「磁気スキルミオン」と呼ばれるナノサイズの磁気渦は、(1)数 nm から数十 nm の極小サイズ、(2)位相幾何学的(トポロジカル)な安定性、(3)高い転移温度に加え、(4)極小の外場で駆動できるといった性質を兼ね備え、次世代磁気メモリ素子の情報担体の候補として大きな可能性を秘めている。この磁気スキルミオンを実際に高密度・省電力な磁気メモリ素子に応用するためには、これを「書く」、「消す」、「読む」、「動かす」といったメモリ素子としての基本的な要素技術確立する必要がある。これらの基礎技術を、数値シミュレーションと微視的理論の構築を通じて探索・設計し、その物理機構を解明することが本研究のねらいである。また、磁気スキルミオンをメモリ素子に応用するためには最適な材料開発が不可欠になるが、現在までに発見されているスキルミオンを発現する物質は、B20 型金属磁性体や絶縁性キラル磁性体 Cu_2OSeO_3 などに限られている。研究・開発の裾野を広げ、この分野を大きく展開するためにも、スキルミオンやそれに類似した高いデバイス機能を持つトポロジカル磁気テクスチャを発現する新しい物質群の探索は重要である。そこで電子構造や結晶構造と言った物質の個性をまじめに考慮して、このような磁気テクスチャを発現する新しい物質群を発見するための物質探索の指針を理論的に打ち立てることと、磁気相互作用や磁気異方性、格子と磁化のカップリングに由来する新しいトポロジカルナノ磁気テクスチャを磁性体中に実現する方法を理論的に設計することも本研究のねらいである。

2. 研究成果

(1) 概要

磁気スキルミオンを利用した磁気メモリ素子の形態としては、レーストラックメモリ(磁壁駆動型メモリ)の強磁性磁区をスキルミオンに置き換えた「スキルミオントレインメモリ」が有望である。また、スキルミオンを情報担体とする MRAM(磁気抵抗変化型メモリ)も、もう一つの有望な形態である。これらの磁気メモリ素子の実現には、スキルミオンの「駆動」と「書き込み」技術の確立が不可欠である。磁気スキルミオンの駆動機構として、以前に提案したスピン偏極電流を利用する方法以外に、本さがけ研究ではマグノン流を利用する方法を理論的に確立した。また、スキルミオンの書き込み技術として、絶縁性キラル磁性体の薄膜試料に針状電極で局所的に電場を印加する方法を理論的に提案した。これらの「マグノン流」や「電場」を利用する方法は、ジュール発熱によるエネルギー損失を伴う「電流」を使う方法に比べ、省電力な方法となる。また、スキルミオンを発現する新しい物質群として、極性を持つ(polar な)非キラル磁性体を提案し、海外の実験研究者と共同研究をすることで、新しいスキルミオン物質 GaV_4S_8 を発見した。さらに、磁気スキルミオンが巨大なマイクロ波整流効果を示すことや、らせん磁性強誘電

体の磁場誘起分極フロップが決定論的に起こることを理論的に実証し、これらの磁気テクスチャの高いデバイス性能と可能性を実証した。

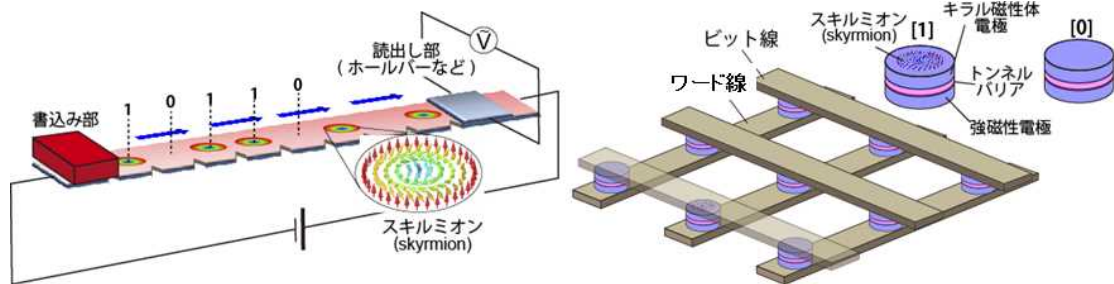


図1 (左)磁壁駆動型メモリの強磁性磁区をスキルミオンに置き換えた「スキルミオントレインメモリ」の概念図。(右)スキルミオンを情報担体とする磁気抵抗メモリ(MRAM)の概念図。

(2) 詳細

研究テーマ A「トポロジカルナノ磁気テクスチャの探索と制御方法」

マグノン流によるスキルミオン駆動 [論文8]: キラル磁性体薄膜に光や電子線を照射することで微小な温度勾配を導入すると、熱励起された磁化の振動(マグノン、スピン波)が温度勾配の方向に流れる。この熱拡散マグノン流が「スピン移行トルク機構」を通じて磁気スキルミオンの回転運動や並進運動を引き起こすことを理論的に明らかにした[図2左参照]。マグノン流は電流と異なり、絶縁性の試料でも流れるため、金属、絶縁体を問わないスキルミオンの駆動機構となる。また、マグノン流は電流と異なりジュール発熱によるエネルギー損失がほとんどないため、省エネルギーな駆動機構になりうる。この研究成果を論文にまとめて発表した。また、プレスリリースを出した。

新規スキルミオン物質の発見 [論文4]: Dzyaloshinskii-守谷相互作用に起因するナノサイズの磁気スキルミオンは、これまでに B20 型磁性体や Cu_2OSeO_3 などのキラル磁性体でしか発見されていなかった。本さがけ研究で、キラル磁性体でなくとも、極性を持ち空間反転対称性の破れた結晶構造を持つ磁性体では、Dzyaloshinskii-守谷相互作用が活性化し、スキルミオン

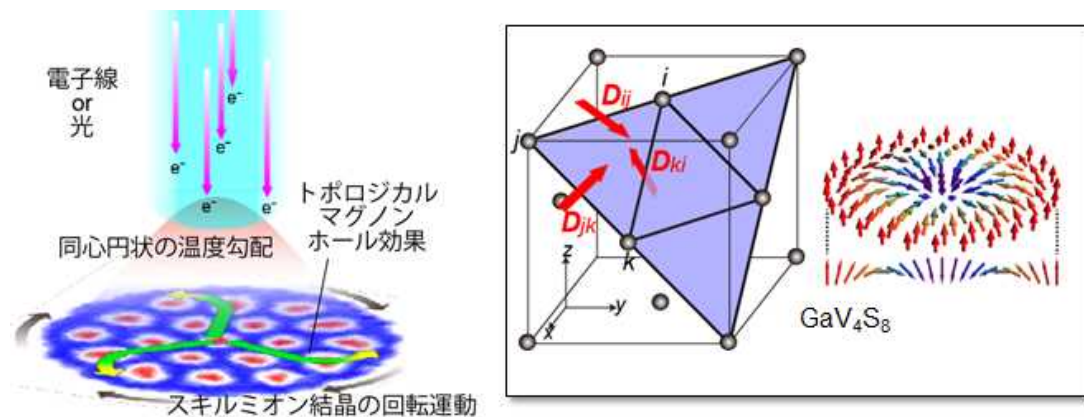


図2. (左)光や電子線照射により導入された温度勾配のもとで生じる熱拡散マグノン流のトポロジカルマグノンホール効果と、それにより誘起されるスキルミオン結晶の回転運動。(右)新たに Dzyaloshinskii-守谷相互作用に起因するスキルミオンの発現が発見された絶縁性極性磁

性体 GaV_4S_8 と、そこで実現しているネール型スキルミオンの磁気渦構造。

ンが発現することを予言した。この理論予言に基づき、ドイツやスイス、ハンガリーの実験グループと物質探索を行い、絶縁性の極性磁性体 GaV_4S_8 でスキルミオンが実現していることを発見した[図2右参照]。これは、絶縁磁性体では世界で二例目、非キラル磁性体では世界初のスキルミオン物質の発見例となった。さらに、理論計算により、このスキルミオンが、これまでキラル磁性体で発見されていた「ブロッホ型」ではなく、「ネール型」と呼ばれる構造であることを明らかにした。また、温度－磁場平面で実験的に得られている磁気相図を理論計算により再現した。この発見により、物質探索における自由度と可能性が大きく広がった。また、この物質群で実現しているネール型スキルミオンは、従来のブロッホ型とは異なる応答ダイナミクスを示すと考えられることから、今後の研究により新たな物理現象やデバイス機能の発見が期待される。

研究テーマ B「磁気強誘電性を持つトポロジカル磁気構造の制御方法とデバイス機能」

2010 年にスキルミオンが発見されたキラル磁性体 B20 化合物 (MnSi , FeGe , $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ など) は金属磁性体であるが、2012 年になって絶縁性のキラル磁性体 Cu_2OSeO_3 においてもスキルミオンが実現していることが実験的に発見された。スキルミオンのような非共線的な磁気構造は、絶縁磁性体中でスピン軌道相互作用を通じて電荷分布の偏りを引き起こし、電気分極を誘起する。その結果、磁化と電気分極のカップリング(電気磁気結合)を通して、電場で磁化を制御・励起することが可能になる。

電場によるスキルミオン書き込み [論文3, 5]: 本さがけ研究では、絶縁性キラル磁性体の薄膜試料に探針電極を使って局所的に電場を印加することで、強磁性状態の試料にスキルミオンを書き込めることを理論的に明らかにした[図3左参照]。この方法は、電場印加により電気分極の空間配列に変調を引き起こすと、電気磁気結合を通じて、それと連動した磁化反転が起きることを利用している。また、強磁性状態のみならず、ヘリカル磁性状態にもスキルミオンが書き込めることや、薄膜の面方位や印加電場の符号の選択が重要なこと、試料の中央ではなく試料端近傍に電場を印加することで書き込みの閾値磁場を大幅に低減できることを明らかにした。これらの成果を特許出願し(出願人: 科学技術振興機構)、論文に発表した。

スキルミオンのマイクロ波整流効果 [論文2, 7]: さらに、絶縁性キラル磁性体では、電気磁気結合を通じて、マイクロ波の交流磁場成分のみならず、交流電場成分でもスキルミオンの共

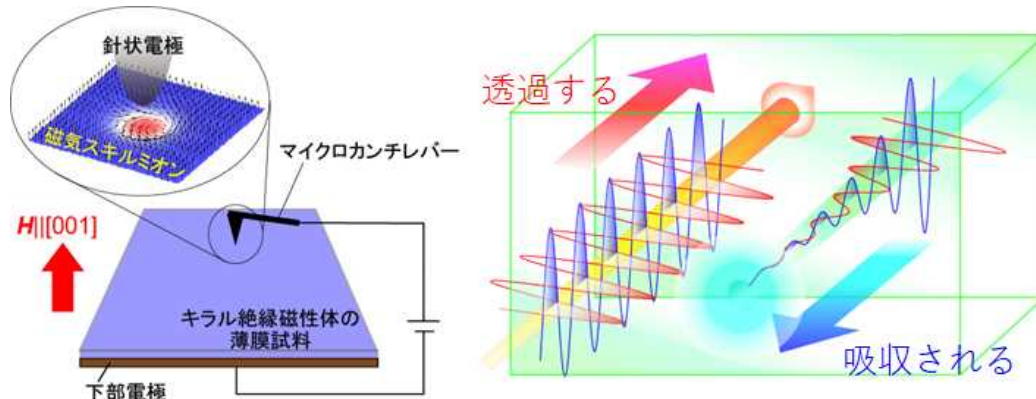


図3. (左) 絶縁性キラル磁性体の薄膜試料に針状電極で局所的に電場を印加することでスキ

ルミオンを書き込む方法の概念図。(右)スキルミオンが実現している絶縁性キラル磁性体が示すマイクロ波の整流効果の概念図。

鳴励起モード(エレクトロマグノン)を励起することができる。このスキルミオンのエレクトロマグノン励起が持つ「電場」と「磁場」の二種類の励起チャネルの干渉効果を利用することで、マイクロ波の巨大な非相反方向二色性を実現できることを理論的に発見した。これは、スキルミオンが実現している絶縁性キラル磁性体に、ある方向からマイクロ波を入射すると透過するが、逆方向から入射すると、強く吸収されてしまい、あまり透過しないというマイクロ波の整流現象である[図3右参照]。方向二色性の強度は、印加する磁場強度にも依存するが、最大で30%程度にもおよぶことが微視的な理論計算により分かった。これは、バルク試料ではこれまでに報告例がないほど巨大な効果である。この発見は、スキルミオンがメモリ素子の情報担体としてのみならず、マイクロ波素子や光素子への応用にも大きな可能性を秘めていることを示した重要な成果である。この成果も特許出願し(出願人:理化学研究所)、論文にまとめて発表した。

スパイラル磁性強誘電体の磁場誘起分極フロップ[論文1, 6]: 絶縁性磁性体中でスパイラル磁性がDzyaloshinskii-守谷相互作用の逆効果を通じて強誘電分極を誘起しているスパイラル磁性強誘電体(マルチフェロイックス物質)ペロフスカイト型 Mn 酸化物(TbMnO_3)を対象に、スパイラル磁性の伝搬ベクトル(Qベクトル)に平行に磁場を印加すると強誘電分極が 90 度フロップする現象(磁場誘起分極フロップ現象)を理論的に研究した。例えば、結晶軸の c 軸正の方向を向いていた電気分極 $P||+c$ は、磁場印加により 90 度フロップを起こし、結晶軸の a 軸方向を向くことになるが、この際に分極が a 軸正の方向を向く($P||+a$)か、負の方向を向く($P||-a$)かは、両者がエネルギー的に縮退しているため、確率的に選択されると考えられてきた。しかし、これが磁場の符号に依存した磁気トルクによって、決定論的に起こることを明らかにした。この成果は、これまで不可能と考えられてきた磁場による決定論的な分極制御が可能であることを示したものであり、世界中で研究がおこなわれている磁性強誘電体のメモリ素子応用に道を拓く重要な成果である。これは、スイスETHの磁気光学実験グループや大阪大学の物質合成グループとの共同研究の成果であり、共著で論文を発表した。また、JST、青山学院大学、東北大学、大阪大学と共同でプレスリリースを行った。

研究テーマ C「トポロジカル磁気テクスチャを利用した論理回路の理論設計」

本さがけ研究では、スキルミオンを利用した論理演算素子の理論設計も目指した。ナノスケールの領域で閉じた磁気構造であるスキルミオンは「粒子性」を示し、ピン止め中心となりうる磁性不純物を回避して運動することができる。この性質は、スキルミオン駆動に要する閾電流密度が通常の磁気構造に比べて 10 万分の1から 100 万分の1と非常に小さいことの原因となっている。しかし、通常の粒子が、受ける力(ポテンシャル勾配)と平行に運動するのに対し、スキルミオンは、受ける力(ポテンシャル勾配)に対して垂直に運動するという特殊なダイナミクスを示す。このため、二つのスキルミオンが出会うと互いの周囲を回ったり、横方向にスライドしたりする運動を示す。また、試料の端から受ける斥力ポテンシャルを感じて、端に沿って運動するといった現象も起こる。そのような、スキルミオンの特殊な運動形態を利用することで、AND やOR, NANDといった論理演算を実現する素子の理論設計を目指した。そこでまず、設計し

た回路内でのスキルミオンの電流駆動ダイナミクスを数値シミュレーションするためのソフトウェアの開発から研究をスタートした。ソフトウェアでは、描画ソフトで描いた形状や電極位置が色で指定されたビットマップ形式の回路図を読み込んで、有限要素法により回路内の電位差および電流密度分布を計算する。その電流密度の空間分布データを読み込んで、電流がある場合の磁化の時間発展方程式(Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式)を数値シミュレーションする。このソフトウェアを使って、論理演算素子として機能する回路の設計を目指した。一応、AND やORの動作をする回路はできたが、回路形状が複雑な上に、回路構造の長さや幅、印加磁場などを精密にチューニングする必要があり、実用化に向けたさらなる研究に耐えられるものではない。現在、単純な構造で、かつ精密なパラメータチューニングの必要ない汎用性の高い回路構造を探索しているが、あまりうまくいっておらず、引き続き取り組んでいく課題として残った。

3. 今後の展開

本さがけ研究により、メモリ素子応用に向けたスキルミオンの「write(書込み)」、「delete(消去)」、「drive(駆動)」方法の理論設計に関しては、かなり確立してきたと考えている。「delete」に関しては、特に明示的には書いていないが、電流で駆動して試料端に衝突させる方法や、電場や磁場による書き込みの逆プロセスで簡単に消去できることも分かった。今後の展開として、これらの理論的に設計された方法を、実際に実装するには、薄膜作成やデバイス作成の実験研究者との共同研究が必要になる。実験的には、キラル磁性体の結晶キラリティが揃った単結晶薄膜を作ることが最大の困難になることが予想される。スキルミオンの巻き方は結晶のキラリティが決める Dzyaloshinskii-守谷相互作用の符号に依存するので、薄膜試料中にキラリティの異なるドメインがあると、そこに飛び移るのにスキルミオンの全磁化の巻き方を一斉に変えなくてはならず、大きなエネルギーを必要とする。そのため、スキルミオンが試料中をスムーズに移動し、情報が伝送されるためには、試料の結晶キラリティを単一に揃える必要がある。

将来的に、キラル磁性体の単結晶薄膜の作成が非常に難しいことが明らかになって場合、代わりとして、接合界面を持つ磁気細線を使う方法が考えられる。強磁性を示す CoNi 合金と非磁性の白金 Pt を貼り合わせた磁気細線では、接合界面での空間反転対称性の破れに起因して Dzyaloshinskii-守谷相互作用が活性化し、スキルミオンを発現する。この場合、単結晶性は必要ないため、より簡便なデバイス作成が可能になると期待される。しかし、多結晶やアモルファス試料においては、「動きやすく、駆動に必要な電流などの外部パラメータが極小である」というスキルミオンの利点がどこまで生き残るのか検討が必要になる。

その他の展開として、「読み出し技術の理論設計」と「論理演算素子の理論設計」を考えている。

読み出し技術の理論設計

「スキルミオントレインメモリ」の場合、スキルミオンビットの読み出しは、ホールクロスによるホール電圧測定が有望である。スキルミオンは隣り合う三つの磁化が張る立体角の和が単位球のそれ(+4 π あるいは-4 π)に等しい。このような磁気構造は、伝導電子に対して1つの量子磁束として振る舞う。これをスキルミオンの面積で割った有効磁場(磁束密度)の大きさは、数十 nm 径のスキルミオンの場合、数百テスラに相当する巨大なものとなる。したがって、ホールクロス部にスキルミオンがいると、トポロジカルホール効果に由来する巨大なホール電圧が測定されるはずである。このホール測定のSN比の評価や、感度向上のための材料の選択や形状の設計は重

要な課題になる。また、「スキルミオン磁気抵抗メモリ(Sk-MRAM)」の場合は、MTJ(磁気トンネル接合)が最も自然な読み出し方法であるが、この場合も、取り組むべき課題は同じである。

論理演算素子の理論設計

本さがけ研究では、スキルミオン論理演算素子の理論設計に用いる数値シミュレーション用のソフトウェアを開発し、それを使って素子の設計に取り組んだ。一応、AND と OR の動作をする回路を見つけることをできたが、パラメータやデバイス形状の微妙なチューニングが必要であり、汎用性のあるものとはとても言えない。さがけ研究期間終了後も、引き続き簡便で、エラーレートが小さく、汎用性のある素子回路の設計に取り組んでいきたい。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

本さがけ研究では、磁気スキルミオンを情報担体として利用するための要素技術を理論的に多数提案し、その基礎学理を構築することができたと自負している。特に、スキルミオンの書き込み技術として提案した「絶縁性薄膜に電場を印加する方法」は、ジュール熱によるエネルギー損失がほとんどなく省エネルギー性に優れている。また、印加領域をナノサイズに絞ることが困難な「磁場」で、狙った場所に狙った数だけナノサイズのスキルミオンを生成する技術の提案は、磁場以外の様々な外部パラメータによる書き込み技術にも応用可能である。今後、ストレージ素子のさらなる大容量化を目指す、磁気ビットサイズを数十 nm から数 nm まで小さくすることが必要になると考えられるが、その時に必要不可欠な技術になると考えている。また、熱勾配でスキルミオンを駆動する技術は、熱拡散マグノン流を磁気構造の制御に使おうという、これまでにない新しい概念である。マグノン流も電場同様、ジュール発熱によるエネルギー散逸がない省エネルギー性に優れた制御・駆動機構であり、今後スピントロニクス研究やデバイス研究における新しい研究分野になりうる先駆的な成果であると考えている。さらに、これまでは限られたキラル磁性体でしか発見されていなかったナノサイズのスキルミオンが、非キラル磁性体でも実現することを理論的に予言し、海外の物質合成や測定・観察実験の研究者を巻き込んだ国際的な共同研究を展開することで、実際の物質(群)を発見したことは、デバイス開発に不可欠な材料探索に大きな道を拓いた重要な成果であると考えている。また、スキルミオンがメモリ素子応用だけでなく、マイクロ波デバイス応用にも大きな可能性を秘めていることを発見した成果や、スパイラル磁性強誘電体のメモリ素子応用に向けた核となる現象を発見した成果も、本さがけ研究における重要で先駆的な成果であると考えている。

さらに、本さがけ研究の開始当初は、スキルミオン自体が業界でほとんど認知されていなかったが、スキルミオンに関する多数の解説記事、著書、英文レビューを執筆し、国内外の学会や研究会で多くの招待講演を行うことで、その情報担体として有望性をアカデミアや企業の研究・開発者に広く認識させることができた。これには、JSTのScifos活動に参加させていただき、様々な企業で磁気デバイスの研究・開発に従事している(従事していた)方々にスキルミオンをアピールする機会をいただいたことも大きい。今後、スキルミオンと使った高密度・省電力のストレージ素子を社会実装するためには、様々な分野やレイヤーの研究者が開発に参画する必要があるが、そのための確固たる礎を築くことができたと考えている。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

2009年に発見されて間もないトポロジカル磁気テクスチャーであるスキルミオンについて、これを情報担体として使うというデバイス応用へのアイデアを実験しやすい例示の形で理論展開し、スキルミオンの制御法確立への道筋を理論的に示した。具体的には、スキルミオンの熱的駆動、電場や磁場による書き込みなどを、先駆的なシミュレーション技術を活用して高いレベルで研究を進展させた。当初目標以上の想定していなかった成果として、マイクロ波による巨大な整流効果の発見や、初のネール型磁気スキルミオンをもつ物質(GaV_4S_8)の発見が特筆される。これらの成果は、Nature Materials 誌などの著名誌に8報の論文として掲載されるとともに、国際学会で9件、国内学会で7件の講演に招待された。

さががけ研究の期間内に日本物理学会若手奨励賞や文部科学大臣表彰若手科学者賞も受賞した。さががけ研究の終了のタイミングで早稲田大学教授に昇進することが決まったことは、さががけ研究者のキャリアアップとして素晴らしい成功例になった。産業的な応用を見据えて競合する他技術との比較分析から競争優位性を検証すること、課題は何であるのかを明確にすること、国内外の材料・デバイス分野の研究者との議論や共同研究を進めて“使える”技術としての進展を図ることなどのコメントを胸に刻んで、今後も物理とデバイスの両方を見据えた活躍を期待したい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. M. Mochizuki, “Theory of Magnetic-Field-Induced Polarization Flop in Spin-Spiral Multiferroics” *Physical Review B* **92**, 224412/1–6 (2015).
2. M. Mochizuki, S. Seki, “Dynamical magnetoelectric phenomena of multiferroic skyrmions” *Journal of Physics: Condensed Matter* **27**, 50300/1–24 (2015).
3. M. Mochizuki, “Creation of Skyrmions by Electric Field on Chiral-Lattice Magnetic Insulators” *Advanced Electronic Materials* **1**, 1500180 (2015).
4. I. Kezsmarki, S. Bordács, P. Milde, E. Neuber, L. M. Eng, J. S. White, H. M. Ronnow, C. D. Dewhurst, M. Mochizuki, K. Yanai, H. Nakamura, D. Ehlers, V. Tsurkan, A. Loidl, “Neel-type skyrmion lattice with confined orientation in the polar magnetic semiconductor GaV_4S_8 ” *Nature Materials* **14**, 1116–1122 (2015).
5. M. Mochizuki, Y. Watanabe, “Writing a skyrmion on multiferroic materials” *Applied Physics Letters* **107**, 082409/1–5 (2015).
6. M. Matsubara, S. Manz, M. Mochizuki, T. Kubacka, A. Iyama, N. Aliouane, T. Kimura, S. Johnson, D. Meier, and M. Fiebig, “Magnetoelectric domain control in multiferroic TbMnO_3 ” *Science* **348**, 1112–1115 (2015).
7. M. Mochizuki, “Microwave Magnetochiral Effect in Cu_2OSeO_3 ” *Physical Review Letters* **114**, 197203/1–5 (2015).

8. M. Mochizuki, X. Z. Yu, S. Seki, N. Kanazawa, W. Koshibae, J. Zang, M. Mostovoy, Y. Tokura, N. Nagaosa, “Thermally driven ratchet motion of a skyrmion microcrystal and topological magnon Hall effect” Nature Materials **13**, 241–246 (2014).

(2)特許出願

研究期間累積件数:2件

1.

発 明 者: 望月維人

発明の名称: スキルミオン生成装置、スキルミオン生成方法、および磁気記憶装置

出 願 人: 国立研究開発法人科学技術振興機構

出 願 日: 2015/3/31

出 願 番 号: 2015-072079

2.

発 明 者: 岡村嘉大、賀川史敬、関真一郎、久保田将司、石渡晋太郎、小野瀬佳文、
望月維人、十倉好紀、川崎雅司

発明の名称: 電磁波の透過率制御方法、電磁波の透過率制御デバイス

出 願 人: 国立研究開発法人科学技術振興機構

出 願 日: 2013/11/20

出 願 番 号: 2013-240064

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表

- 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2014)
題目: Thermally Driven Ratchet Motion of a Skyrmion Microcrystal and Topological Magnon Hall Effect
(Hilton Hawaiian Village, Honolulu, Hawaii, 2014 年 11 月 3-8 日)
- International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2014)
題目: Magnon Current-Driven Dynamics of Magnetic Skyrmions in Chiral-Lattice Magnets (Grenoble France, 2014 年 7 月 7-11 日)
- 2014 American Physical Society (APS) March Meeting
題目: Theoretical Studies on Dynamical Phenomena of Magnetic Skyrmions
(Denver, Colorado 2014 年 3 月 4 日)

受賞

- 受賞日: 2014 年 3 月 27 日
表彰名称: 日本物理学会若手奨励賞(領域 8)
業績題目: 「マルチフェロイック Mn ペロブスカイトの電気磁気現象に関する理論研究」
主催団体: (一社)日本物理学会
- 受賞日: 2015 年 4 月 15 日
表彰名称: 科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞
業績題目: 「マグノン励起による磁性制御の理論研究」
主催団体: 文部科学省

著作物(著書)

1. M. Mochizuki 他 ``Topological Structures in Ferroic Materials: Domain Walls, Skyrmions and Vortices” (Springer Series in Materials Science, edited by J. Seidel), Chapter contribution (Chapter title: Current-Driven Dynamics of Skyrmions)
ISBN 978-3-319-25301-5
2. S. Seki, M. Mochizuki ``Skyrmions in Magnetic Materials” (Springer Briefs in Physics)
ISBN 978-3-319-24651-2

著作物(解説記事)

1. 望月維人 「スキルミオンを作る・消す・動かす」 日本磁気学会報「まぐね」第 10 巻第 4 号 (2015 年 8 月号特集記事) pp. 192-198.
2. 望月維人、関真一郎 「絶縁体中の磁気スキルミオン相が示す電気磁気ダイナミクス」 日本物理学会誌 第 69 巻第 3 号 (2014 年 3 月号「解説」) pp. 132-139.
3. 望月維人、永長直人 「磁気スキルミオンが示す特異な熱励起・電流誘起ダイナミクス」 固体物理 第 49 巻第 3 号 (2014 年 3 月号「トピックス」) pp. 25(125)-35(135).

プレスリリース

1. 「夢の多機能電子素材 新しい制御手法の基礎原理を世界で初めて確立ー電気と磁気を兼ね備える多機能素材の活用ーに光ー」(2015 年 6 月 5 日)
2. 「キラル磁性体中の「スキルミオン」が示す回転現象を発見ー高密度・省電力メモリ素子への応用に向けスキルミオンの制御法にめどー」(2014 年 1 月 26 日)

その他

1. さきがけ「ナノエレ複合領域」ニュースレター第 1 号 (2014 年 6 月 26 日)
「電子スピンの作る磁気渦「スキルミオン」を光や電子線の照射により制御する方法を発見」
2. 理化学研究所 Research Highlight (2014 年 3 月 20 日)
「Dance of the skyrmions: Turning magnetic whirls using an electron beam」
<http://www.riken.jp/en/research/rikenresearch/highlights/7739/>