

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

トポロジカルナノ磁気構造の発現・安定性
機構の理論研究

Theoretical study of emergence and stabilization
of topological nano magnetic structures

申請者

田中	康平
Kohei	TANAKA

ナノ理工学専攻 ナノキラル科学研究

2021年2月

1. 論文内容の要旨

磁気スキルミオンは、主にキラル磁性体中で交換相互作用とジャロシンスキー・守谷 (DM) 相互作用の競合のもとに発現する、直径数十ナノメートルから数百ナノメートル程度の渦状の磁気構造である。スキルミオンは、その磁化配置が立体角 4π を埋め尽くすような構造をしており、有限のトポロジカル数を持つ。そのため、スキルミオンから別のトポロジカル数の構造に連続的に移ることはできず、別の磁気構造に移るには構造を破壊しなければならない。その移行には局所的な磁化反転が必要であり、これは磁気構造としては交換相互作用におけるエネルギーコストを伴うことになるため、磁気スキルミオンは外部からの熱揺らぎなどの擾乱に対して安定性を持つという特長を持つものになる。また、スキルミオンは電流で駆動できることが知られている。これは、伝導電子とスキルミオンとの間に生じるスピン移行トルク効果に基づくが、この駆動の際に必要な閾値電流密度は、従来の磁壁を駆動する際の電流密度に比べて 5~6 桁程度小さい。これらナノメートルオーダーの極小サイズ、トポロジカルな安定性、及び駆動における閾値電流密度が小さいことにより、スキルミオンは高い情報密度、擾乱に対する安定性、及び省電力性を兼ね備えた情報記憶担体への応用が期待されている。実際にスキルミオンの応用例としては、上記の磁壁を電流駆動して磁壁に情報を持たせるレーストラック・メモリに対して、磁壁の代わりにスキルミオンを用いるスキルミオントレインメモリ、スキルミオンを書き込んだ磁気抵抗効果素子 (TMR 素子) を多数配列したスキルミオン MRAM などが考えられている。また、近年では上記三つの特徴に加え、スキルミオンをランダムに配置した際に系が有する非線形性を情報処理に利用する、リザーバコンピューティングへの応用が期待されている。

このように、興味深い性質を多数備え、それらを利用した応用例も多数考案されている磁気スキルミオンであるが、応用の上で非常に重要な課題を抱えている。スキルミオンは合金、半導体、及び絶縁体の様々な物質中で発現することが実験により確認されているが、温度-磁場相図においてスキルミオンはヘリカル転移温度直下の狭い温度-磁場領域にしか発現しない。さらに、その相図はどれも似通っており、その安定領域を拡大することは基礎物理の観点からも、応用の観点からもきわめて重要である。安定領域を拡大する試みは様々なものが提案されているが、その中でも近年の報告として磁性体に一軸方向の歪みを加えるものがある。合金 MnSi では、圧縮方向の歪みを加えることでスキルミオンの安定領域が拡大する。しかし、この際の安定領域の拡大は、温度にして数ケルビン程度である。また、MnSi 中ではひずみの DM 相互作用への影響は小さいことが報告されているが、絶縁体 Cu_2OSeO_3 の場合は、引っ張り方向の歪みを加えることでスキルミオンが最低温度付近まで安定化する。このように、引っ張り歪みによるスキルミオンの安定化に関する実験結果は報告されているが、その機構の理論的説明はなされていなかった。

また、磁気構造であるブロッホラインが磁気メモリの観点より注目を浴びている。ブロッホラインは磁壁と磁壁の先頭の磁化同士が向き合った際、そこで新たな磁化のねじれが生じるものである。ブロッホラインはそのサイズが磁気バブルの 10 分の 1 程度であり、磁気バブルによるメモリよりも高密度のメモリの開発に適していると考えられている。従来、ブロッホラインは、磁壁の先頭の磁化同士の向き合いの箇所では連続的にスピンのねじれる構造をとるものと考えられてきた。しかし、近年、微分位相コントラストスキャン法を用いた磁気顕微鏡の機能改善により、高解像度な磁気構造の観察が可能となり、永久磁石の一種である M 型ヘキサフェライト中で先頭と先頭が互いに入れ違った構造を持つ、非整合なブロッホラインの存在が実験的に確認されていた。しかし、その発現機構についての理論的研究は少

ない。

本論文の第一章では、研究の背景として、専門技術用語の説明と研究の目的及び意義について述べている。

第二章では、本研究で理論的解明に用いた方法である、磁化の時間発展方程式であるランダウリフシッツギルバート (LLG) 方程式及び熱平衡状態の物理量を得るためのモンテカルロ計算によるシミュレーションについて説明し、さらに、一軸引っ張り歪によるスキルミオンの安定化の解明に用いたモデルハミルトニアンについて述べている。

第三章では、第二章で説明した方法を用いて得られた計算結果について説明し、引っ張り歪みによるスキルミオンの安定化機構について理論的に考察している。理論計算から得られた相図は、すでに実験で報告されていた歪みのもとでの相図とよく合致していることが明らかとなった。本研究により、歪み由来のスキルミオンの安定化において DM 相互作用の異方性が重要な役割を占めることの理論的裏付けが得られたことは、本学術分野の発展に寄与するものと評価できる。また、本研究では、あくまで DM 相互作用の変調のみを計算に取り入れており、歪みそのものを計算モデルで考慮したわけではない。そのため、DM 相互作用の変調の原因は歪みである必要はない。例えば、近年、他グループにより報告されているように、スピン流やねじれを磁性体に加えることでも DM 相互作用は変調できる。これに伴いスキルミオンの安定性が変化する可能性についても本研究により示唆されており、意義深いことである。

第四章では、非整合ブロッホラインの発現機構に関する計算結果とそこから得られた理論的考察についてまとめている。交換相互作用、磁気双極子相互作用、面直方向の磁気異方性、及び M 型ヘキサフェライト由来の 6 回対称性の異方性を考慮したハミルトニアンのもとで LLG 方程式とモンテカルロ法によるシミュレーションを行うことにより、この非整合ブロッホラインが得られることを理論的に示した。また、磁気双極子相互作用を考慮しない計算では通常ブロッホラインが計算結果として得られるが、非整合なブロッホラインは得ることができず、非整合ブロッホラインの形成に際して磁気双極子相互作用が重要であることを示したことは高く評価できる。

2. 質疑応答内容、論文審査結果

2021 年 1 月 13 日の公聴会では、論文内容説明と質疑応答が行われた。多数の質疑応答のやり取りがあったが、その一部を以下に報告する。

- (1) 「DM 相互作用が J の 0.8 倍というのは、通常のオーダーに比べて強いが、これは粗視化の影響と見ていいのか。粗視化を行わない場合らせんのピッチがより多数のサイト数になるのではないか」との質問に対して、「らせん磁性やスキルミオンは膨大な数のスピンで構成されているため、計算コストを下げするために一定の数の磁化をブロック磁化と見なす粗視化を行っている。これにより DM 相互作用のパラメータが強めの値になっているが、粗視化したモデルの結果をスケーリング則で変換してやることで、現実の系に対応する結果を得ることができるので問題ない」と回答した。
- (2) 「計算結果を見る限りだと、異方性が強い場合ほどスキルミオンが出現するということになるが、どうなのか」との質問に対して、「本研究の計算結果だけだとなにも言えないところがある。DM 相互作用の異方性を強める部分はある程度強めたところまでの計算しか行っていないためである」、と回答した。
- (3) 「DM を x 成分のみ強くした場合に、らせん構造が斜めを向いた構造が出現するのは

なぜか。 x 成分のみを強めるのであれば、普通は x 方向に巻くらせん構造が出現するのではないか」との質問に対して、「計算では有限サイズの系を考えており、らせん構造の周期に系のサイズが整合していないためであると考えられる」と回答した。

- (4) 「ブロッホラインについて、この計算結果は非整合なブロッホラインが実際にエネルギー的に安定ということが良いのか。また、磁化の初期配置にかなり依存していると考えて良いか」との質問に対して、「計算結果は非整合ブロッホラインが実際に安定であることを示している。初期配置に関しては、何ヶ月もの時間をかけて試行計算したが、最もバイアスの無いランダムな初期配置から出発しても非整合ブロッホラインが発現することを確認できた」と説明した。
- (5) 「絶縁体と合金に対して様々計算しているように思うが、この特徴をハミルトニアンに考慮しているのか」との質問に対して、「絶縁体と合金で、一軸歪みによるDM相互作用の変調のメカニズムは異なるが、今は具体的なメカニズムには立ち入っていない。これにより絶縁体か合金かという系の伝導特性に依らない普遍的なスキルミオン安定化の機構が提唱できたと考えている」と回答した。

質疑応答後、主査、副査の間での審議により、質疑応答として完全に回答しきれなかった箇所に加筆も含め本論文を修正して、主査、副査に提出することとした。加筆・修正された本論文は、すべて適切に修正なされていること、ならびに剽窃や研究不正は一切ないことを確認した。

以上の研究内容説明と質疑応答を通して、申請者が研究の目的と意義を理解し、物性物理学の十分な学識と考察力を備えていると評価する。本研究は、当該学術分野の発展に寄与する研究成果であることから、主査および副査は博士(理学)の学位論文として相応しいと認める。

2021年2月

審査員

(主査) 早稲田大学教授 博士(理学)早稲田大学 朝日 透 _____

(副査) 早稲田大学教授 博士(理学)東京大学 望月 維人 _____

早稲田大学教授 博士(理学)東京大学 勝藤 拓郎 _____

早稲田大学教授 博士(理学)東京工業大学 長谷川 剛 _____