

博士論文概要

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

2020年12月

「情報社会」と呼ばれる現代の社会で日々非常に多くの量のデータがやり取りされる中、従来の半導体素子はその製造に関して理論値における限界に達しつつある。これに伴い、高密度、省電力性、従来の半導体素子との互換性などを兼ね備えた新規のメモリデバイスの開発は急務となる。本研究で注目する磁性体内のナノ磁気構造は、新規メモリデバイスの開発に非常に適した対象として、これまで数十年にわたり盛んに研究されてきた。磁性体が主に優れている点として、一つに磁性が本質的に量子効果に基づくことが挙げられる。古典電磁気学に基づく情報読み取り、書き込みでは、系のサイズを小さくするに伴って信号が弱くなってしまいうという欠点があるが、量子効果に基づく磁性の場合系のサイズを小さくしても信号を大きく保てる可能性がある。また、従来の素子の欠点として電源を切ると情報が失われてしまい、そのためにコンピュータの電源を入れて使えるようになるまでにかかなりの時間がかかってしまうという欠点があるが、磁性体の場合は電源を切っても外部環境によって磁化の配置が決まるため、電源を切っても情報が失われにくい。このような特徴を兼ねそなえた磁気構造の中で、特に本研究では「磁気スキルミオン」と「ブロッホライン」と呼ばれる二つの磁気構造に焦点を当てる。

磁気スキルミオンは、キラルな磁性体中で発現する渦のような構造をした磁気テクスチャである。もともとのスキルミオンの概念は素粒子物理学の分野で **Tony Skyrme** が提案したバリオンのモデルで、このモデルでは矢印が球を埋め尽くすような配置としてスキルミオンが提案されている。近年物性物理の分野で、磁性体、ボースアインシュタイン凝縮体、超伝導体、液晶などでのスキルミオン構造の存在が報告された。磁性体中ではもともとのモデルのスキルミオンを二次元に射影したような構造が、磁化の配置として生じる。このスキルミオンが新規のメモリデバイスに適している理由は主に三つあり、(i) そのトポロジカル数が有限の値を持っているため、連続変形で別のトポロジカル数を持つ構造に移り変わることがなく、そのために外部からの擾乱に対して安定であること、(ii) そのサイズがナノメートルオーダーで極小であり、高密度の情報素子への応用が期待されること、(iii) 非常に小さい電流密度で駆動が可能で、省電力デバイスへの応用が期待されることが挙げられる。また、特にここ数年ではスキルミオンのその他の性質に注目して、スキルミオンを利用した機械学習デバイスの提案、スキルミオンの三次元チューブ構造を利用した素子の提案なども行われている。このようにその応用が非常に注目されているスキルミオンであるが、応用における大きな課題を抱えている。スキルミオンは通常、温度-磁場相図における非常に狭い領域にしか安定化しない。スキルミオンを素子として応用するにはこの安定領域の拡大が非常に重要な課題となる。この安定領域を拡大する試みは過去にいくつかなされてきたが、本研究では特に、一軸引っ張り歪みによるスキルミオンの安定化に注目した。これは磁性体に引っ張り歪みを加えた際、外部磁場と歪みの相対角度に依存してスキルミオンの安定性が変化するというもので、合金と絶縁体の両方でその実験結果が報告されている。特に絶縁体 Cu_2OSeO_3 では、外部磁場と張力が垂直である時にスキルミオンが最低温度付近まで安定化する。

そのメカニズムの候補として、引っ張り歪みに伴いジャロシンスキー守谷相互作用が変調するというものが過去の報告では挙げられている。ジャロシンスキー守谷相互作用は交換相互作用とスピン軌道相互作用の二次摂動として与えられる相互作用であり、中心対称性が破れた磁性体内で有限の値をとる。ジャロシンスキー守谷相互作用はスピンを互いに 90 度にひねろうとする相互作用であり、これとスピンを互いに平行、反平行に向けようとする交換相互作用の競合のもとで、ある特定の温度-磁場領域において磁気スキルミオンが発現する。本研究では、この引っ張り歪み由来でのジャロシンスキー守谷相互作用の変調を取り入れた数値計算により、確かにスキルミオンの安定性が変化することを確認した。理論計算で得られた結果は過去に実験で報告された相図と非常によく合致しており、スキルミオンの安定性の変化にジャロシンスキー守谷相互作用の異方性が主要因になりうることを確認した。なお、歪みには本来非対角成分が存在し、「ずれ」や「ねじれ」といった寄与も存在しうるが、本研究では最も簡単な計算として、立方晶から正方晶に変化する形で、一方向の長さのみが変化する系を対象として計算している。

一方、ブロッホラインは磁壁の境界部分でスピスがねじれた構造をとるものである。ブロッホラインのある部分とない部分にそれぞれ情報を持たせることで、情報ビットとしての利用が可能になる。特にブロッホラインを利用したメモリは、従来の磁気バブルメモリよりも 10 倍以上の高密度な情報素子を実現しうる対象として盛んに研究されてきた。本研究では、Kurushima らが実験的に確認した非整合なブロッホラインの形成に注目する。微分位相コントラストスキャン法を用いた電子顕微鏡を利用して、従来よりも高解像度の顕微鏡画像を M 型ヘキサフェライトの磁気構造に対して得たところ、ドメインの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を Kurushima らは確認した。この発現の理論的側面を明らかにすべく、本研究では六回対称な異方性、磁気双極子相互作用を考慮したハミルトニアンを用いた数値計算を行った。数値計算の結果、この六回対称な異方性と磁気双極子相互作用が非整合なブロッホラインの形成において重要な役割を果たすことがわかった。

本論文は全五章から構成されている。第一章では、まずトポロジカルナノ磁気構造の形成に重要になる相互作用として交換相互作用、ジャロシンスキー守谷相互作用についての詳細を述べる。交換相互作用はスピンの内積の形で表される相互作用であり、スピンを平行あるいは反平行に揃える役割を担う。ジャロシンスキー守谷相互作用は交換相互作用と相対論的なスピン軌道相互作用の二次摂動で生じる相互作用であり、中心対称性の破れた系で有限の値を持つ。ジャロシンスキー守谷相互作用はスピン同士の外積で表され、スピンを互いにひねろうとする相互作用である。特にキラル磁性体中では、この二つの相互作用の競合によりスピスがらせん状の基底状態をとる。この状態にさらに温度の効果、外部磁場とのゼーマン相互作用が加わると、ある温度-磁場領域で磁気スキルミオンが生じる。次に本研究で注目する磁気構造であるスキルミオン、ブロッホラインに関わる構造として、らせん磁

性、磁壁、キルク、渦について述べる。さらにその次の節ではスキルミオンと非整合ブロッホラインの詳細について述べる。

第二章では、本研究での数値計算に用いた Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式によるマイクロマグネティックシミュレーション、モンテカルロ計算についての詳細を述べる。磁化の時間発展は、磁化の運動方程式である Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式に従う。またスキルミオンの形成には有限温度による熱揺らぎが重要な役割を果たすが、そのような有限温度における熱平衡状態での磁化配置、物理量を得る上でモンテカルロ計算は有用である。

第三章では本研究で得られた計算結果として、引っ張り歪み由来の異方性ジャロシンスキー守谷相互作用を考えた際のスキルミオンの安定性変化について述べる。本研究では、モンテカルロ計算の結果得られた磁化、比熱、帯磁率を元にして相を判別した。磁場に対して垂直な方向にジャロシンスキー守谷相互作用に異方性を持たせた際には、スキルミオンが最低温度付近まで安定化する一方、磁場に対して平行な方向にジャロシンスキー守谷相互作用に異方性を持たせた際には、スキルミオンが全く安定化しないことが示された。この数値計算の結果は既に実験で報告された相図と非常によく整合している。磁場と垂直な方向にジャロシンスキー守谷相互作用の変調を加えた計算結果におけるエネルギーの振る舞いを調べると、スキルミオンが安定化する状況では面内のジャロシンスキー守谷相互作用によるエネルギーの利得があることがわかった。これはらせんの伝播方向が面内に向くことがスキルミオンの形成に関わるといふ、従来の研究で提唱されてきた振る舞いと合致する。また本研究では、ジャロシンスキー守谷相互作用をどの程度変調させることでスキルミオンが安定化するかについても調べた。これによると、1.1%程度の異方性を持たせるだけでスキルミオンが安定化し始めることがわかった。本研究の計算により、引っ張り歪み由来のスキルミオンの安定化の上で、ジャロシンスキー守谷相互作用の変調が主要因になりうることを示された。

第四章では本研究で得られた計算結果として、非整合ブロッホラインの形成について述べる。本章の計算では、交換相互作用、磁気双極子相互作用、異方性を取り入れたハミルトニアンを考慮した。異方性としては、本研究で注目している M 型ヘキサフェライトが六回対称性を持つことから、六回対称な異方性も考慮した。計算により確かに非整合なブロッホラインの形成が確認された。特に磁気双極子相互作用、六回対称な異方性をそれぞれ考慮しない場合の計算結果ではこの非整合なブロッホライン構造が見られないことから、非整合なブロッホラインの形成では磁気双極子相互作用、六回対称な異方性の存在が重要であることが示された。

第五章では、本論文の総括について述べる。

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名： 田中 康平

印

(2020年 12月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	○Kohei Tanaka, Ryosuke Sugawara, Masahito Mochizuki, Theoretical study on stabilization and destabilization of magnetic skyrmions by uniaxial-strain-induced anisotropic Dzyaloshinskii-Moriya interactions, <i>Physical Review Materials</i> , 4 , 034404 (March 2020).
論文	○Kosuke Kurushima, Kohei Tanaka, Hiroshi. Nakajima, Masahito Mochizuki, and Shigeo Mori, Microscopic magnetization distribution of Bloch lines in a uniaxial magnet, <i>Journal of Applied Physics</i> , 125 , 053902 (February 2019).
論文	Rikio Soda, Kohei Tanaka, Kenta Takagi, Kimihiro Ozaki, Simulation-aided development of magnetic-aligned compaction process with pulsed magnetic field, <i>Powder Technology</i> , 329 , 364-370 (April 2018).
講演	Kohei Tanaka, Toru Asahi, Masahito Mochizuki, “Theoretical study of the stabilization of magnetic skyrmion induced by anisotropic Dzyaloshinskii-Moriya interaction” [poster] Molecular Chirality Asia 2020, P-08, 1, November, 2020, Tokyo, Japan
講演	田中康平, 朝日透, 望月維人, 「張力歪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・不安定化の理論研究」, 日本物理学会2020年秋季大会, [口頭] 9aH2-4, 2020年9月9日, オンライン
講演	田中康平, 朝日透, 望月維人, 「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」, 日本物理学会第75回年次大会, [資料アップロード] 18pB21-9, 2020年3月18日, オンライン
講演	田中康平, 朝日透, 望月維人, 「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」, 日本物理学会第74回年次大会, [口頭], 17aF201-8, 2019年3月17日, 福岡
講演	田中康平, 曾田力央, 高木健太, 尾崎公洋, 「不規則形状粒子の三次元シミュレーション法の開発と圧密成形への応用」, 粉体粉末冶金協会第120回秋季大会, [口頭] 4-17A, 2017年11月9-10日, 京都
講演	Kohei Tanaka, Yoshiyuki Ogino, Hiroki Toriyama, Tomoha Tohaya, Masahito Tanaka, Togo Shimozaawa, Toru Asahi, “Solution and Solid State Chiroptical Analysis for Dynamic Multimerization of Thalidomide” [poster] 29th International Symposium on Chirality, P-034, 9-12, July, 2017, Tokyo, Japan
講演	田中康平, 荻野禎之, 田中真人, 柴田哲男, 朝日透 「分光学的手法によるヒト血清アルブミンとの相互作用におけるサリドマイド関連分子間の比較」, [ポスター], 第4回CSJ化学フェスタ, PB-064, 2014年10月14-16日, 東京
講演	Kohei Tanaka, Nami Takada, Yoshiyuki Ogino, Masahito Tanaka, Norio Shibata, Toru Asahi, “Spectroscopic study of the interaction between thalidomide related molecules and human serum albumin” [oral and poster] The 1st International Conference on ‘Three Dimensional Development of Lab-Exchange Type Biomedical Science Research Consortium ’ W22, 14, September,

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名： 田中 康平

印

(2020年 12月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	2014, Kamogawa, Japan Kohei Tanaka, Nami Takada, Yoshiyuki Ogino, Msahito Tanaka, Norio Shibata, Toru Asahi “ Spectroscopic analysis for intermolecular interaction between thalidomide-related molecules and human serum albumin” [poster] Symposium on Molecular Chirality 2014, P-072, 6-7, June, 2014, Sendai, Japan
その他	2017 年11 月 粉体粉末冶金協会 第120 回秋季大会 優秀講演発表賞