

平成 30 年 5 月 25 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03553

研究課題名(和文)磁気的幾何学構造の外場制御と伝導の物理

研究課題名(英文)Control of topological magnetic texture -Theoretical study-

研究代表者

小椎八重 航(Koshibae, Wataru)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・上級研究員

研究者番号：20273253

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：らせん磁気構造や磁壁そして磁気渦と異なる、トポロジカル磁気テクスチャ、skyrmionは、様々の特性をもつ。極めて小さな電流により駆動できる運動特性はその典型である。我々はLandau-Lifshitz-Gilbert方程式を用いた数値シミュレーション法によりskyrmionの実時間ダイナミクスを理論的に調べた。これにより、skyrmion, antiskyrmionそして磁気Berry位相の物理、多層系における結合skyrmionの運動性能、3次元skyrmion生成/消滅とモノポール-反モノポールの対生成/消滅、不純物系における電流駆動skyrmionのダイナミクスなどが明らかにされた。

研究成果の概要(英文)：Magnetic skyrmion in magnets is an emergent topological particle made from many spins swirling and pointing all the directions. The skyrmion has several unique features distinct from the other spin textures such as domain wall, helical structure, and vortex. The experimental studies reveal that skyrmion, the nano-sized magnetic texture, is driven by a much smaller electric current density than that for the magnetic domain wall motion, and hence the potential application of the skyrmion has attracted much attention. The key to develop the magnetic memory devices is nothing more than the control technique of the magnetic texture by external fields. We theoretically study the creation, annihilation and current-driven motion of skyrmion in the chiral and dipolar magnets in two dimensions, by numerically solving Landau-Lifshitz-Gilbert equation. By the numerical study, we explore the optimal condition to control the skyrmion in the ferromagnetic background.

研究分野：物性理論

キーワード：skyrmion

1. 研究開始当初の背景

「鉄くぎ」は(磁石でこするなどの簡単な方法で)磁場をかけると磁石になる。これは、磁区の均衡が破れ、自発磁化が露出したものである。磁区の外場(磁場、電場、熱、温度勾配、電流、力学的圧力など)制御は、磁気記録の原理を与え、その研究の歴史は基礎物理学と応用を表裏一体とした一大分野を築き上げてきた。本研究開始当初、「磁区の学理」は、新たな局面を迎えていた。その鍵を握るのは、「トポロジー」である。中でも磁気 skyrmion の研究は、精力的・戦略的に展開され始めていた。

2. 研究の目的

本研究計画の核は、磁区(磁気)構造が磁性体中に創り上げる、skyrmion, antiskyrmion, 磁気バブル、さらには磁壁の時空構造などに代表されるトポロジカルな実体の外場応答と非平衡実時間ダイナミクス of the 物理の新展開にある。

元来 skyrmion とは、ハドロン物理学の展開の中で導入されたトポロジカル粒子である。これに相似な概念が適応されるトポロジカル磁区構造が、本研究の標的のひとつとなる磁気 skyrmion である: 磁気記録媒体に多用される TbFeCo などの長距離擬双極子相互作用が基本的な磁性体や、空間反転対称性を破る MnSi, FeGe などの磁性体、そして磁気不整合(フラストレーション)状態を含む磁性体など、言うなれば極めて広く多種多様の磁性薄膜において、この skyrmion が膜を貫く円柱磁気構造として具現化される(図1)。図1の例では磁気モーメントが中心から動径方向に向かって、膜面に対し、面直下向きから面直上向きへと連続的に回転し、磁気モーメントの回転面は常に動径ベクトルと直交している。この skyrmion の大きさは材料により数 nm ~ 数百 nm 程度であり、マクロな数の磁気モーメントが創りあげる位相構造、すなわちトポロジーは、磁気モーメントが張る立体角により特徴付けられる。この skyrmion を構成する磁気モーメントは「連続的な回転」のもとにすべての向きを網羅し、ひとつの球面とおなじ立体角を張る。一方、らせん構造や単純磁壁さらには完全強磁性構造では、磁気モーメントが張る立体角はゼロ、すなわち互いにトポロジー的に同相である。同相であれば、互いの磁気構造は連続的な変形のもとに繋がる。しかし、トポロジーが異なる場合、例えば完全強磁性構造と skyrmion の磁気構造は連続変形では繋がらない。これは、自明なトポロジー環境下に作られたトポロジカル粒子 skyrmion が備える著しい安定性を導く。

本計画、磁区の外場制御に関する問題の焦点は、外場誘起トポロジカル転移の物理に収束する。本研究は、磁石の中のトポロジカル磁気テクスチャの外場制御を理論的に調べ、トポロジカル転移の物理学だけでなく、応用

面への基礎研究を目的として計画された。

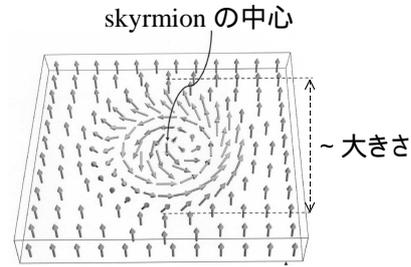


図1. 磁性薄膜における skyrmion .

3. 研究の方法

外場によるトポロジカル磁気テクスチャの制御は、磁気モーメントの実時間非平衡ダイナミクスそのものといえる。磁気モーメントの運動方程式は、ひとたびハミルトニアンが設定されれば Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式に帰着される。我々は、数値シミュレーション法を開発し、空間反転対称性が破れたらせん磁性体や長距離擬双極子相互作用が基本的な磁性体など、様々の系におけるトポロジカル磁気テクスチャの時間発展を調べた。ここに開発した手法により、電場、磁場、熱、それらの勾配、さらには多種の熱力学的外力の組み合わせに対する磁気テクスチャの応答を調べることが可能となった。

4. 研究成果

本研究で達成された成果のいくつかを示そう。

(1) skyrmion, antiskyrmion そして磁気 Berry 位相の物理: 磁気 skyrmion の位相幾何学的な特徴は、いわゆる skyrmion 数 (N_{sk}) により同定される。これは正にも負にもなる。すなわち局所的に磁気モーメントが張る立体角が織り成す Berry 位相の積分値が skyrmion 数を与える(図2)。この N_{sk} は、例えば電流駆動 skyrmion の Hall ダイナミクスに結びつく。我々は、積分値 N_{sk} だけでなく、Berry 位相の空間分布も、磁気テクスチャのダイナミクスに重要な役割を果たすことを明らかにした。この Berry 位相の空間分布由来のダイナミクスは、磁気テクスチャの重心運動すら導くことを実時間シミュレーション法により示した。この描像は、skyrmion と antiskyrmion の衝突の時間発展のような、ト

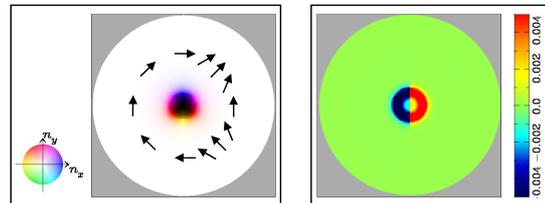


図2. 磁気テクスチャ(左)と Berry 位相の空間分布(右)。左のパネルの矢印は、面内磁気モーメントの winding の様子を示している。右のパネルは、局所磁気モーメントが張る立体角の空間分布を示している。(雑誌論文 のデータから作った図である。)

ポロジ値数の異なる磁気テクスチャのダイナミクスを統一的に説明することが明らかとなった。

(2) 2層系らせん磁性体での skyrmion ダイナミクス：磁性薄膜での電流駆動 skyrmion の知見が深まってくると、自然な形で、異なる薄膜間で相互作用する skyrmion ダイナミクスへと問題は発展を遂げる。2層系 skyrmion、すなわち、独立した2次元磁石を積層することにより、個々の層に含まれる skyrmion が互いに近づくとき興味深いダイナミクスが生まれるのである。とりわけ反強磁性的に結合した2層系 skyrmion の電流駆動は応用面にも重要な示唆を与える電流駆動特性を示す。この結合 skyrmion は、互いに符号の異なる N_{sk} をもつ。重要なのは、この結合 skyrmion を引き離すような外力を与えた場合のダイナミクスである。この外力に対し、結合している skyrmion には復元力が働き、その力の向きは互いに逆である。トポロジ値数 N_{sk} は、skyrmion の渦度をも意味し、力に垂直な向きのマグナス効果を説明する。結合 skyrmion の復元力は、その力に垂直な向きのマグナス効果を各 skyrmion に導く。互いに符号が異なる N_{sk} をもつ skyrmion に働くマグナス効果は同じ向きに働き、復元力に垂直な向きの重心駆動を導く。我々は、数値シミュレーション法を用いて、反強磁性的に結合した2層系 skyrmion の電流駆動を調べた。そして、その駆動速度は電流密度 10^{11}A/m^2 で $200 \sim 400 \text{m/s}$ に及ぶことを示した(図3)。

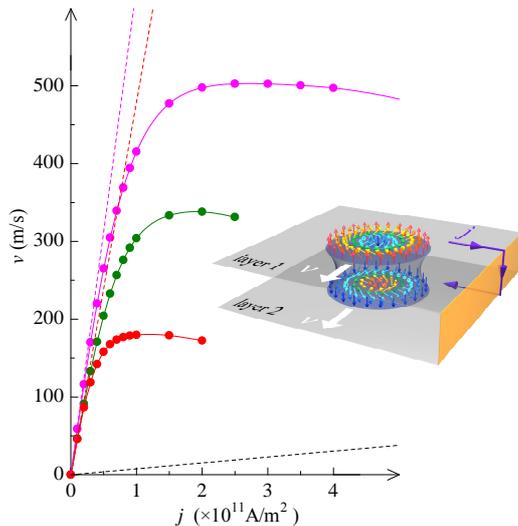


図3. 反強磁性的に結合した2層系 skyrmion の電流密度(j)と skyrmion 速度(v)の関係。赤、緑、赤紫の点は、2層間相互作用の大きさ J_{inter} と1軸異方性 K の大きさが層内相互作用 J のを単位として「 $J_{inter}/J=0.1, K/J=0.06$ 」、「 $J_{inter}/J=0.5, K/J=0.06$ 」、「 $J_{inter}/J=0.5, K/J=0.08$ 」のときの LLG シミュレーションで得られた結果。(雑誌論文のデータから作った図である。)

(3) skyrmion の生成/消滅とモノポール-反モノポールの対生成/消滅のダイナミクス：磁気 skyrmion は、切り口の磁気テクスチャが図1のようなナノスケール渦巻構造を持った円柱磁気構造である。磁石の「大きさ」を考えたとき、試料の大きさは容易にミリメートルスケールにも及ぶ。このとき、長さ/太さのアスペクト比が100万にも達する skyrmion 円柱に何が起こるだろう？こうした準一次元構造は、もちろん、ソリトン-反ソリトン生成の脆弱性をもつ。それは skyrmion 円柱では、磁気モノポール-反モノポールの対生成/消滅の不安定性に結び付く。我々は、不純物系におけるモノポール-反モノポールのダイナミクスを調べ、実験グループと共同で skyrmion の消滅過程の研究を進めた(図4)。これは、新たな研究、「3次元 skyrmion ダイナミクス」への出発点を与えている。

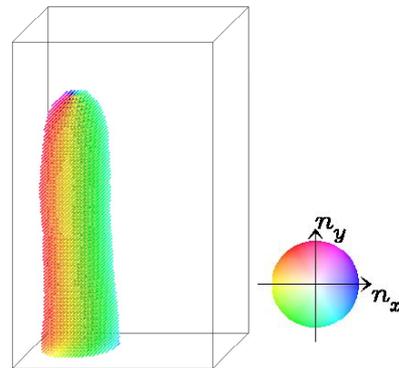


図4. 不純物にピン止めされた磁気モノポールを含む skyrmion。(雑誌論文のデータから作った図である。)

(4) 不純物効果と電流駆動 skyrmion：トポロジカルな磁気粒子 skyrmion は、その渦度に由来する様々な特性をもつ。例えば、運動している skyrmion が不純物に散乱されるとき、外力に垂直な向きにマグナス効果が現れる特徴から、結果として不純物を避ける運動が導かれる。これは極めて小さな電流により駆動できる skyrmion の運動特性を具現化する原理を与える。しかし、一方で、現実の系では必ず存在する乱れの効果の下で、電流駆動 skyrmion には、閾値電流が存在する。不純物効果がどのような skyrmion ダイナミクスを導くのか、これを明らかにすることが求められている。我々は、数値シミュレーション法を用いて、不純物系における skyrmion 集団の動的振る舞いを調べた。これをまとめると以下のようなものである：印可電流の増加とともに、(A) ピン止め状態、(B) ピン止めが外れた状態、(C) skyrmion の増殖/消滅現象、そして(D) skyrmion の凝集現象が次々に出現する。これらのうち(C)の増殖現象は、強く歪んだ skyrmion の分裂に起因する：すなわち、skyrmion は多くの磁気モーメントにより構成される磁気テクスチャであり、不純物の空間プロファイルを反映した局所的な歪みをみせることになる。ここに働く駆動電流はまた、

skyrmion の歪みを大きくする効果を持つ。強い不純物効果と電流駆動のもとで、skyrmion は大きく歪み、ついには千切れ、skyrmion の増殖をもたらす。この skyrmion の分裂の様子を図 5 に示した。また (D) の凝集現象は不純物に散乱される skyrmion が放つスピン波が、skyrmion 間の引力を媒介することによる：不純物系を運動している skyrmion から眺めると、運動方向前方から、次々と不純物が降り注ぎ、これにともなう揺動を常に受ける。この揺動は skyrmion の動的な歪みを生み出し、歪みの緩和はスピン波として skyrmion から放出される。このスピン波はまた、他の隣接 skyrmion に衝突し、揺動を与える。言い換えれば、隣り合う電流駆動 skyrmion は、スピン波を交換することになる。我々は、スピン波が skyrmion 間の引力を媒介し、電流駆動 skyrmion の凝集現象が導かれることを数値シミュレーション法を用いて明らかにした。

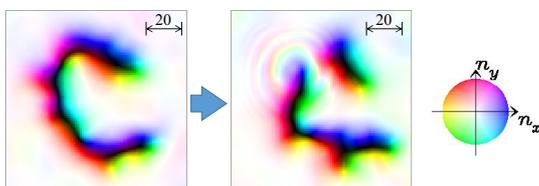


図 5 . 電流駆動 skyrmion の増殖。(雑誌論文のデータから作った図である.)

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

Wataru Koshibae and Naoto Nagaosa, Theory of current-driven skyrmions in disordered magnets, 査読有, Scientific Reports **8**, 6328 (2018).

DOI:10.1038/s41598-018-24693-5

Fumitaka Kagawa, Hiroshi Oike, Wataru Koshibae, Akiko Kikkawa, Yoshihiro Okamura, Yasujiro Taguchi, Naoto Nagaosa and Yoshinori Tokura, Current-induced viscoelastic topological unwinding of metastable skyrmion strings, 査読有, Nature Communications **8**, 1332 (2017).

DOI: 10.1038/s41467-017-01353-2

Kenji Tsutsui and Takami Tohyama, Incident-energy-dependent spectral weight of resonant inelastic x-ray scattering in doped cuprates, 査読有, Phys. Rev. B **94**, 085144 (2017).

DOI: 10.1103/PhysRevB.94.085144

Atsushi Okada, Shikun He, Bo Gu, Shun Kanai, Anjan Soumyanarayanan, Sze Ter Lim, Michael Tran, Michiyasu Mori, Sadamichi Maekawa, Fumihiro Matsukura, Hideo Ohno, and Christos Panagopoulos, Magnetization dynamics and its scattering mechanism in thin CoFeB films with interfacial anisotropy, 査読有, PNAS **114**,

3815-3820 (2017).

DOI: 10.1073/pnas.1613864114

Wataru Koshibae and Naoto Nagaosa, Theory of skyrmions in bilayer systems, 査読有, Scientific Reports **7**, 42645 (2017).

DOI: 10.1038/srep42645

Wataru Koshibae and Naoto Nagaosa, Berry curvature and dynamics of a magnetic bubble, 査読有, New J. Phys. **18**, 045007 (2016).

DOI:10.1088/1367-2630/18/4/045007

X. Z. Yu, K. Shibata, W. Koshibae, Y. Tokunaga, Y. Kaneko, T. Nagai, K. Kimoto, Y. Taguchi, N. Nagaosa, and Y. Tokura, Thermally activated helicity reversals of skyrmions, 査読有, Phys. Rev. B **93**, 134417 (2016).

DOI: 10.1103/PhysRevB.93.134417

J. Matsuno, N. Ogawa, K. Yasuda, F. Kagawa, W. Koshibae, N. Nagaosa, Y. Tokura, and M. Kawasaki, Interface-driven topological Hall effect in SrRuO₃-SrIrO₃ bilayer, 査読有, Science Advances **2**, e1600304 (2016).

DOI: 10.1126/sciadv.1600304

[学会発表](計 6 件)

W. Koshibae, Theoretical study of current-driven skyrmions in disordered magnets, APS March Meeting 2018, 2018 年 3 月 7 日, Los Angeles, CA

小椎八重航, Control of magnetic skyrmion: Theoretical design of skyrmion device, 2017 年 9 月 19 日, 第 41 回 日本磁気学会学術講演会, 九州大学伊都キャンパス

W. Koshibae, Theoretical study of interacting skyrmions in bilayer systems, APS March Meeting 2017, 2017 年 3 月 14 日, Ernest Morial Convention Center, New Orleans, Louisiana, USA

筒井健二, クラスタ計算に基づく銅酸化物高温超伝導体の銅 L 端共鳴非弾性 X 線散乱スペクトル, 理論研究会サテライトミーティング「放射光と計算物質科学の連携を目指して」, 2016 年 08 月 29 日, 関西学院大学三田キャンパス

W. Koshibae, Dynamics of magnetic skyrmions: Theoretical design of skyrmion devices, International Workshop on Topological Structures in Ferromagnetic Materials, 2015 年 5 月 20 日, University of New South Wales, Sydney, Australia

W. Koshibae, Skyrmionics - Theoretical Design of Skyrmion Memory Device -, The Third RIKEN-NCTU Symposium on Physical and Chemical Science, 2015 年 11 月 13 日, National Chiao Tung University, 1001 University Road, Hsinchu, Taiwan 300, ROC

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小椎八重 航 (KOSHIBAE, Wataru)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・上級研究員

研究者番号：20273253

(2) 研究分担者

森 道康 (MORI, Michiyasu)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：30396519

筒井 健二 (TSUTSUI, Kenji)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 放射光科学研究センター・上席研究員

研究者番号：80291011

(3) 連携研究者

連携者なし

(4) 研究協力者

研究協力なし