

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 : 岩崎 惇一

近年、物質における種々の構造をトポロジーの観点から見直すことが盛んに行われている。トポロジカル絶縁体は運動量空間における電子状態のトポロジーが非自明となる例であるが、一方で実空間におけるトポロジーも多くの興味深い問題を含んでいる。特に、磁性体においては、スピンの構造がトポロジーによって特徴づけられることが多く、古くからホモトピー理論による分類などが行われてきたが、最近では電子状態との関連で研究が進んでいる。

反転対称性を破った結晶構造を持つ磁性体においてはジャロシンスキー・守谷相互作用が働くために、スピンの回転するヘリカル構造が自然に現れるが、3方向の波数ベクトルを持つヘリカル構造を重畳すると、スキルミオンと呼ばれるトポロジカルスピン構造を3角格子上に並べた結晶となる。このスキルミオン結晶だけでなく、単独の“粒子”としてのスキルミオンが、ローレンツ顕微鏡によって観測されて以来、スキルミオンの研究が世界中で爆発的に進展している。このような背景下、岩崎氏は早い時期からこのスキルミオン結晶、およびスキルミオン粒子のダイナミクスの研究に着手し、Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を使った数値シミュレーションと解析的な手法を組み合わせることで、数多くの結果を得てきた。また、スキルミオン研究で得た知見を元に、ブロッホラインを多数持つ磁壁のダイナミクスも理論的に明らかにした。本博士論文はこれらの成果の総まとめとなっている。

本論文は9章と付録からなり、以下に述べる構成を持つ。

1. Introductionでは、まず磁壁、スキルミオンの説明と、非共線スピン構造に伴う創発電磁場の概念が導入されている。その後、スピントランスファートルクによる電流駆動運動の説明がなされた後、スキルミオンに関してなされた実験的研究がレビューされている。
2. Microscopic Description of Spin Dynamics では、スピンのベリー位相について述べられた後、LLG方程式の説明がなされている。
3. Current-Induced Skyrmion Motion では、まず自由空間におけるスキルミオン結晶の電流駆動運動が調べられている。数値的に“普遍的な j - v 関係”(j :電流密度、 v :スキルミオン結晶の速度)、不純物ポテンシャルの影響がほとんど見えないこと、など磁壁の周期構造であるヘリカル状態との顕著な違いが得られている。この結果はThiele方程式を用いて解析され、スキルミオンのトポロジーによるベリー位相に起因することが示されている。その後、有限サイズの系における単一スキルミオンの電流駆動運動をシミュレートし、境界からのポテンシャルの影響により、速度が加速すること、慣性質量が発生すること、などをThiele方程式から説明した。
4. Inertia, Diffusion and Dynamics of a Driven Skyrmion では、有限温度における熱揺らぎをLLG方程式にランダムトルクを加えることで取り入れ、熱拡散を議論した。やはり、ベリー位相の効果で熱拡散が抑えられることを示した。さらに進んで、駆動方法によって慣性質量が大きく異なることを見出し、これらの結果を“一般化したThiele方程式”としてまとめ上げた。
5. Theory of Magnon-Skyrmion Scattering in Chiral Magnets では、マグノン（スピン波）とスキルミオンの衝突をシミュレートした。(i)スキルミオンは、そのトポロジーに保護されて、変形

はしても粒子としての同一性を失わないこと、(ii)マグノンがスキルミオンによりスキュー散乱されること、(iii)その反作用として、スキルミオンはマグノンとほぼ逆方向に動くこと、などを見出した。そして、マグノンのスキュー散乱は、スキルミオンによる創発磁場による散乱で良く説明できること、マグノンとスキルミオンの散乱角はスピン系の運動量保存により説明できること、などを示した。

6. Memory Functions of Magnetic Skyrmions では、以上得られたスキルミオンの特性を生かしてデバイスへの応用を考察した。有限サイズの系でのLLG方程式を用いたシミュレーションで、種々のメモリ機能を理論的に提案している。

7. Large Anisotropic Deformation of Skyrmions in Strained Crystalでは、歪の入った系で実験的に見いだされたスキルミオン結晶の変形を解析した結果が説明されている。小さい歪が、ジャロシンスキー・守谷相互作用の大きな異方性を引き起こすことが結論されている。

8. Current-Induced Motion of Domain Walls with Many Bloch Lines では、大きなスキルミオン数を持つ、ブロッホラインが多数入った磁壁の電流駆動運動が議論されている。磁場駆動運動の場合は、ブロッホラインが磁壁の運動を阻害するのに対して、電流駆動の場合は、逆に促進することが予言されている。

9. Summary and Perspectives では、全体のまとめと、今後の展望が述べられている。

以上、岩崎氏はスキルミオンを中心としたトポロジカルスピントクスチャーのダイナミクスの諸側面を理論的に明らかにする先駆的な仕事を成し遂げ、今回得られた成果は、物性科学・物理工学の発展に大きく寄与すると期待されるため、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。