

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 : 柴田 基洋

近年発見された渦状のナノスケールスピン構造である磁気スキルミオン（以下、スキルミオン）は、低電流密度での駆動や粒子的な安定性など工学的に優れた特性を有するため、磁気デバイスにおける情報担体として応用が期待されている。これまでスキルミオンの電磁気的な応答については詳細に調べられてきたが、応用において肝要なスキルミオンの構造についての理解及び制御については十分な知見が得られていない。本論文では透過型電子顕微鏡法を用いた磁気構造の実空間観察によりスキルミオンの構造について包括的に研究を行い、外場等に対するその構造変化を分析することで新規制御法を見出した。本論文は全7章で構成され、その概要は以下のとおりである。

第1章・第2章では、本研究の背景、即ちスキルミオンに関する従前の研究のまとめ、本研究で用いた実験手法、についてそれぞれ述べている。

第3章では、異なる磁気周期を有する $B20$ 型化合物 $MnGe$ と $FeGe$ に着目し、それらの混晶である一連の $Mn_{1-x}Fe_xGe$ の磁気周期と磁性のヘリシティを調べている。ローレンツ電子顕微鏡法によるスキルミオン格子とらせん磁気構造の実空間観察、エネルギー分散型 X 線分光法による組成分布の取得、収束電子回折法による結晶のカイラリティの判別を $x = 0.3 - 1.0$ の広い組成範囲で適用し、磁性のヘリシティと結晶のカイラリティの間の相関が組成 $x \sim 0.8$ において反転することを示した。また、組成に対する磁気周期の $x \sim 0.8$ での発散を見出した。これらは、組成に対しジャロシンスキー・守谷相互作用 (DMI) の強さが $x \sim 0.8$ での符号反転を伴い連続的に変化したものとして理解される。本研究成果は遍歴磁性体における DMI を理解する上で重要な実験として理論研究を活性化し、その後のバンド構造中のバンド交差点に基づく DMI の理解のきっかけとなったことが指摘されている。

第4章では、異方的な応力がスキルミオンの構造に与える影響を調べている。 $B20$ 型 $FeGe$ について、低温で一軸の引張熱応力が生じる構造を集束イオンビームで作製し、磁気構造観察が行われた。熱応力が小さい高温ではスキルミオンに歪みが観測されないのに対し、熱応力が大きい低温では結晶格子歪み ($\sim 0.3\%$) に対してスキルミオン格子及び個々のスキルミオンに大きな歪み ($\sim 15\%$) を観測している。異方的に変調された DMI を仮定した磁気構造シミュレーションと解析計算では、実験で観測されたスキルミオンの歪みが再現された。本成果は、異方的応力印加によるバンド構造変調により DMI が変調されることを示唆している。

第5章では、電子線ホログラフィーにより $B20$ 型 $FeGe$ におけるスキルミオンの磁気構造の温度・磁場依存性を観察している。位相分布から、スキルミオン内の磁気モーメントの空間分布情報を抽出している。温度の変化に対しては、局所磁化の内部構造はほとんど変化せず、局所磁気モーメントが平均場的な依存性を示すこと、磁場印加に対しては、スキ

ルミオン間の距離は大きく変化しないが、内部構造が変調されることなどの特徴を明らかにし、理論との比較を議論している。また、スキルミオン格子の単位胞の端で局所磁分布に現れる六角形状の歪みについても議論している。

第6章では、空間反転対称性を有する磁性体中のスキルミオンに類似した磁気バブルのダイナミクスを分析している。 M タイプヘキサフェライト $\text{BaFe}_{12-x-0.05}\text{Sc}_x\text{Mg}_{0.05}\text{O}_{19}$ ($x = 1.8$) では、無磁場下においてヘリシティの異なる磁気バブルが三角格子状に整列し、転移温度近傍で三角格子を保ったまま個々のヘリシティが変化する動的過程を観測している。動画の分析からヘリシティ反転に要する典型的な時間スケールの温度依存性を見積もり、アレニウスの式から反転の励起エネルギーを約 1 eV と推算している。磁気バブルを一次元円環スピン系と単純化したシミュレーションで得られたダイナミクスから、トポロジカル不変量としてのスキルミオン数を保ちながら、磁壁中のキンク対生成及び対消滅をヘリシティ反転の過程として提案している。シミュレーションで得られた転移温度直下 ($T \sim T_c - 15 \text{ K}$) でのキンク対構造生成エネルギーは実験とオーダーで一致している。

第7章では、本研究で得られた成果について総括している。

以上をまとめると、本論文ではスキルミオンの構造を透過型電子顕微鏡の実空間観察手法により包括的に研究し、スキルミオンの詳細構造の解明及びその構造制御法の開拓を行い、またその起源についても明らかにした。本研究によりスキルミオンの磁性体メモリへの応用に向けて有用な知見が得られたといえる。加えて、考察されている磁気構造制御の起源は、遍歴磁性体におけるジャロシンスキー・守谷相互作用 (DMI) の制御という観点からも重要な成果である。得られた成果は物性科学・物理工学の発展への貢献が期待されるものであり、よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。