

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 : 岡村 嘉大

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、トポロジカル磁性としての基礎物理の重要性に加え、低電流密度での駆動や粒子的な安定性など応用上優れた特性を利用したメモリーデバイスにおける情報担体としての応用の観点からも期待されている。これまでスキルミオンの電磁気応答は主に金属系において精力的に研究されてきたが、絶縁体系においては、さらにジュール熱による損失のない制御法・機能性の発現が期待できる。本論文では、絶縁体の中でもマルチフェロイクスに注目し、その強い電気磁気結合を利用することで、スキルミオンの新奇な制御法や機能性の確立を目指した。本論文は全6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、すなわちスキルミオンに関する従前の研究をまとめ、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、マルチフェロイクスとしての性質を有するスキルミオン物質の Cu_2OSeO_3 のバルク・薄膜試料において、スキルミオンの電場制御をそれぞれ実証している。バルク試料においては、磁化率測定を行うことによってスキルミオンの各電場下における安定性を調べた。スキルミオン相が正電場・負電場によって安定化・不安定化することに加えて、正の電場を印加することで、スキルミオンが最低温まで準安定状態として保持されることを示した。この準安定状態の発現が熱力学的な安定性・準安定性の電場依存性によって理解できることを示し、またその知見に基づいてスキルミオンとコニカル磁気構造を不揮発的にスイッチできることを実証している。また薄膜においては、軟 X 線小角散乱実験を用いて電場応答を調べた。薄膜試料では各磁気相の安定性がバルクとは異なるため、電場の符号に依存して、スキルミオンが異なる変調方向のらせん磁気構造になるという振る舞いを示すことがわかった。特に、正電場下では、温度磁場走査では現れない磁気構造が発現する。これらの相変化について、各磁気相の電気分極の大きさ、スキルミオン格子の変形プロセスの観点から理解できることを示している。

第4章では、スキルミオンの磁気励起について調べるために広帯域マイクロ波分光測定を行った。まず Cu_2OSeO_3 においてマイクロ波の振動磁場と静磁場が垂直・平行になっている配置において、それぞれスキルミオン相に特徴的な共鳴モードを観測した。実験結果と理論計算を比較することで、それぞれのモードがスキルミオンのコアが反時計回りに回転するモード(CCW モード)、拡大縮小するモード(Breathing モード)によるものであることを明らかにした。同様に、 $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{Si}$ におけるスキルミオンの共鳴モードについて系統的にスペクトルを測定したところ、準安定状態のスキルミオンにおいては、高磁場側において Breathing モードにのみ共鳴周波数の磁場依存性に異常が現れ、3つの典型的な磁場領域があることがわかった。履歴依存性や実空間観測の結果を合わせて考えることで、3つの領

域がスキルミオン格子、スキルミオンガラス、孤立スキルミオン状態に対応した状態である可能性を議論している。

第5章では、 Cu_2OSeO_3 において、マイクロ波の伝播方向に依存して共鳴吸収の大きさが異なるという、方向二色性と呼ばれる現象の実証を行っている。まず、マイクロ波の伝播方向、磁場、電気分極がすべて垂直な配置において、対称性に基づいた選択則が満たされていることを示した。これらを踏まえた上で、第4章で同定したスキルミオンの共鳴モードについても方向二色性を観測できることを示した。得られた実験結果は、**CCW・Breathing**モードについて方向二色性の符号が反転する点など、理論計算と定性的によい一致を示している。また、マイクロ波の伝播方向、磁場方向が平行な配置について方向二色性スペクトルを系統的に調べることで、方向二色性の符号、大きさが電気磁気結合によって強く結合した磁化・電気分極のダイナミクスという観点から統一的に説明できることを示している。また得られた一般則はスキルミオンの共鳴モードにおける方向二色性の符号についての議論にも適用することが可能である。

第6章では、本研究によって得られた成果について総括を行っている。

以上をまとめると本論文では、マルチフェロイクスとしての性質を利用することで、スキルミオンの電場制御、それらの共鳴モードの電気磁気効果を実証している。本研究により、よりエネルギー損失の少ない磁性体メモリなどのスキルミオンデバイスの確立に向け有用な知見が得られたといえる。さらには、方向二色性などの磁気励起を利用した新奇な機能性の開拓は、近年発展のめざましいスピン波工学（マグノンクス）研究にも寄与する成果である。

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、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。