

マンガン酸化物薄膜におけるスキルミオン形成とトポロジカルホール効果の観測

本研究では、空間反転対称性を持つ強磁性体であるペロブスカイト型マンガン酸化物の薄膜において、磁気異方性を制御することでナノスケールのスキルミオンの形成とそれに伴うトポロジカルホール効果を観測した。基板からのエピタキシャル歪みと Ru ドーピングを組み合わせることで、薄膜の垂直磁気異方性の増強とその精密な制御を可能とした。垂直磁気異方性と磁気双極子相互作用が競合している薄膜において明瞭なトポロジカルホール効果が観測された。また、磁気力顕微鏡やローレンツ電子顕微鏡によってナノスケールのスキルミオン形成を確認した。

スピンの空間的な配列は電気伝導特性に大きな影響を与える。代表的な例は、ペロブスカイト型マンガン酸化物などで観測される超巨大磁気抵抗効果である。これは、温度変化や磁場印加によってスピンの配列が反強磁性から強磁性的に変化する際に、数桁にもわたって電気抵抗が変化する現象である。また強磁性体では、電子が磁場中で受けるローレンツ力に起因する正常ホール効果に加えて、磁化に比例する異常ホール効果が生じることも昔から知られている。近年、ねじれたスピンの配列を持つ磁性体において、スピンの張る立体角に比例した有効磁場を伝導電子が感じることで新たなホール効果が生じることが明らかになった。このホール効果はトポロジカルホール効果と呼ばれ、それが現れる磁気構造の一つが図 1 に示すスキルミオンと呼ばれる渦状の磁気構造である。スキルミオンは安定な粒子として振る舞い、一般的な強磁性磁壁に比べて 3 桁程度も低い電流で駆動できることから、磁気メモリにおける情報キャリアとしての応用が期待されている。トポロジカルホール効果の大きさはスキルミオンの密度に比例するため、その観測にはナノスケールのスキルミオンが形成されることが望ましい。近年報告されている 100 ナノメートル以下のスキルミオンの形成には、結晶構造の空間反転対称性が破れた特殊な磁性体が必要である。一方、世の中に普遍的に存在する空間反転対称性を持つ強磁性体においてもスキルミオン形成は可能であるが、そのサイズは通常ミクロン以上と巨大であるためトポロジカルホール効果の観測は期待できなかった。

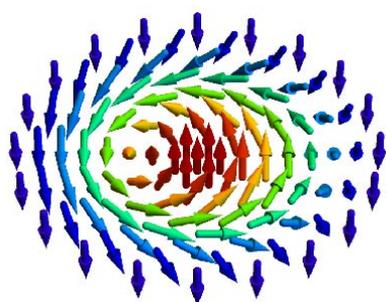


図 1. スキルミオンの磁気構造

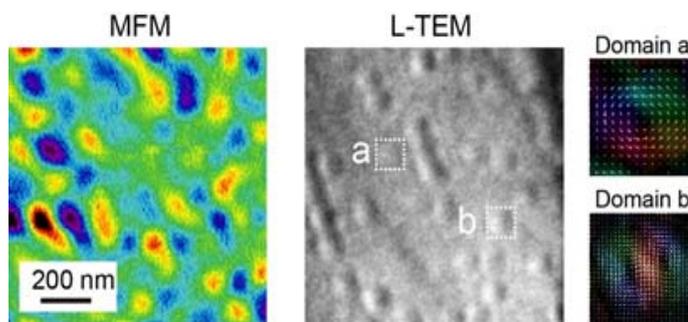


図 2. Ru5%置換した LSMO 薄膜の MFM 像及び L-TEM 像

最近、理化学研究所のメンバーを中心とする研究グループは、空間反転対称性を持つ強磁性体であるペロブスカイト型マンガン酸化物 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO)のエピタキシャル薄膜において、磁気異方性を精密に制御することで 100 nm 程度のサイズのスキルミオン形成を誘起し、これにともな

うトポロジカルホール効果を観測することに成功した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2018 年 7 月号に掲載された。

空間反転対称性を持つ強磁性体においてスキルミオンを形成するためには、垂直磁気異方性エネルギーが磁気双極子相互作用のエネルギーを上回ることが必要である。特に両者のエネルギーがつりあった時に理論上スキルミオンのサイズは最小となる。本研究では、LSMO の Mn サイトの一部を Ru で置換し、かつ格子定数が LSMO よりわずかに小さな基板を用いてエピタキシャル応力による圧縮歪みを薄膜に与えることで、磁化の大きさや強磁性転移温度を大きく損なうことなく垂直磁気異方性を増強することを可能とした。Ru 置換量を増やすにしたがって垂直磁気異方性が強くなり、5%置換したときに垂直磁気異方性と磁気双極子相互作用がつりあって競合した状態が実現された。ホール効果の磁場依存性を測定した結果、Ru5%置換した薄膜においてのみ正常ホール効果でも異常ホール効果でも説明のつかないホール効果が顕著に観測された。このホール効果がスキルミオン形成によるトポロジカルホール効果であることを示すために、磁気力顕微鏡(MFM)やローレンツ電子顕微鏡(L-TEM)を用いた実空間観察を行い、100 nm 程度のスキルミオンが形成されていることが確認された(図 2)。LSMO は伝導電子のスピンのほぼ 100%偏極したハーフメタルであることも、明確なトポロジカルホール効果が観測された一つの理由であると考えられる。

本研究は、空間反転対称性を持つ普遍的な強磁性体の薄膜においても、磁気異方性を調整することでナノスケールのスキルミオンを実現でき、トポロジカルホール効果によってその検出が可能であることを実証した。この成果は、スキルミオンを用いたデバイスの実現に向けた応用研究への大きな刺激となることが期待される。

原論文

[Emergence of topological Hall effect in half-metallic manganite thin films by tuning perpendicular magnetic anisotropy](#)

[Masao Nakamura, Daisuke Morikawa, Xiuzhen Yu, Fumitaka Kagawa, Taka-hisa Arima, Yoshinori Tokura, and Masashi Kawasaki: *J. Phys. Soc. Jpn.* 87 \(2018\) 074704](#)

問合せ先：中村優男（理化学研究所創発物性科学研究センター）

川崎雅司（東京大学大学院工学系研究科）