

自然界最小の磁気渦を初めて見る

[1] 要旨

電子スピンの渦構造である磁気スキルミオンは、次世代磁気メモリやニューロモルフィックコンピューティングなどへの応用が期待されている。超高密度な情報素子実現のためはスキルミオンサイズの小型化が重要な課題であり、極小スキルミオンを形成する固体物質の探索が近年盛んに行われている。放射光を用いた共鳴 X 線散乱実験によって単純な六方晶の結晶構造を有する二元合金 GdGa_2 の短周期のらせん磁気構造が明らかになった。ここでは、直径わずか1ナノメートルという世界最小の磁気スキルミオンの存在が提唱されている。

[2] 本文

高度な磁気機能デバイスを実現するためには、材料工学の知見を用いた固体の磁気特性の制御が重要となる。例えば、スピントロニクス分野において、磁性体中を流れる電流の制御や弱い磁化の検出に利用されるスピンバルブデバイスの実現には、各材料の磁気異方性や保磁力の精密な制御が不可欠である。磁気スキルミオンはスピンの局所的な渦構造であり、粒子としての性質を持つために計数可能であるとともに、電流、熱、磁場などによる操作が可能である。このため、磁気スキルミオンは次世代スピントロニクスデバイスや人間の脳を模倣したニューロモルフィックコンピュータへの応用が期待されている。さらには量子コンピュータの実現に向けた代替戦略としても利用可能であることが提案されている。このような背景の中で、磁気スキルミオンのさらなる小型化はスキルミオンデバイスの性能向上を目指す材料工学分野において重要な課題となっている。



図 1. (a) 研究対象物質 GdGa_2 の結晶構造。(b) 先行研究で発見されたブロッチ型磁気スキルミオン。(c) 本研究で提案したナノメートルサイズのネール型磁気スキルミオン。

単純な三角格子構造を持つ磁性体は、多数の電子スピンの織りなす複雑な量子統計力学的性質を実現するための有力な舞台となっている。三角格子上の各サイトは6つの隣接サイトと結合しており、複数の磁気相互作用が競合することで最安定状態がただ一つに定まらない「幾何学的フラストレーション」と呼ばれる機構が働く。幾何学的フラストレーションは、低温まで磁気秩序が起こらない量子スピン液体といった特異な磁気状態をもたらすだけでなく、らせん磁気秩序のような複雑な磁気構造の安定化にも有利である。2012年に三角格子上においてフラストレーション機構による小

さな磁気スキルミオン渦の発現が理論的に予測され、2019年に初めてその存在が実験的に確認された。それ以来、多くの研究者によって三角格子物質における磁気スキルミオンが探索されてきたが、これまでのところ成功例は限られている。

最近、理化学研究所創発物性科学研究センターと東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の共同研究グループは、三角格子構造を持つ二元合金物質 GdGa_2 [図 1(a)]の単結晶を合成し、高エネルギー加速器研究機構の大型放射光施設フォトンファクトリーの BL-3A にて共鳴 X 線散乱実験を行って、磁気構造を詳細に調べた。その結果、短周期の変調を持つらせん磁気構造を発見し、直径 1 ナノメートルという世界最小の磁気スキルミオンの傍証を得た。この成果は JPSJ の 2025 年 2 月号に掲載された。

極小の磁気スキルミオンを発現する物質を設計するためには、結晶格子の幾何学に加えて、磁気相互作用の種類が本質的に重要となる。研究グループは、ルーダーマン-キッテル-糟谷-芳田 (RKKY) 型と称される磁気相互作用が支配的な希土類金属材料に着目した。この相互作用は、伝導電子の媒介によって局在した 4f 電子の磁気モーメントの間に生じるものであり、1~10 ナノメートル程度の短周期の磁気変調をもたらすことが 1950 年代から知られていた。近年になって、RKKY 相互作用による磁気スキルミオンの安定化機構が理論的に提案され、 Gd_2PdSi_3 、 $\text{Gd}_3\text{Ru}_4\text{Al}_{12}$ 、 GdRu_2Si_2 、 EuAl_4 といったいくつかの金属間化合物において直径約 2 ナノメートルの磁気スキルミオンが発見されている。これらの磁気スキルミオンは、図 1(b)に示すように磁気モーメントが磁気渦のコアを中心に円を描くように回転する「ブロッホ型」スキルミオンであることが明らかになっている。これに対して、研究グループは、 GdGa_2 に対して図 1(c)に示すように磁気モーメントが磁気渦の中心に向かって回転するハリネズミ型の「ネール型」スキルミオンを提唱している。

RKKY 相互作用を起源としたナノメートルサイズのネール型スキルミオンが実現していれば最初の例となるため、本研究は多くの研究者の注目を集めることが予想される。将来的には、 GdGa_2 の複雑な相図のより詳細な同定、電子構造の研究、さらには、デバイスを用いた磁気スキルミオンダイナミクスの研究が期待される。

原論文 (2025 年 1 月 27 日公開済)

Triangular Lattice Magnet GdGa_2 with Short-Period Spin Cycloids and Possible Skyrmion Phases

P. R. Baral, N. D. Khanh, M. Gen, H. Sagayama, H. Nakao, T. Arima, Y. Ōnuki, Y. Tokura, and M. Hirschberger, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 024705 (2025).

<情報提供：有馬 孝尚 (理化学研究所 創発物性科学研究センター)
ヒルシュベルガー マクシミリアン (東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻) >