

令和元年 7 月 9 日

報道機関各位

東北大学

流動中の磁気スキルミオン格子の変形挙動観測に成功

【発表のポイント】

- カイラル磁性体 MnSi で形成される磁気スキルミオンが、電流下の流動状態においても格子構造を保つことを確認した。
- 流動状態においては磁気スキルミオン格子が塑性変形することを観測した。
- 塑性変形の形状から試料端における摩擦力の存在が示唆される。
- 本研究で解明された磁気スキルミオンの電流下の流動挙動は磁気スキルミオンを用いた省エネルギーデバイス実現に貢献するものと期待される。

【概要】

東北大学多元物質科学研究所の奥山大輔助教、佐藤卓教授、アメリカ国立標準技術研究所(NIST)の Bleuel Markus 研究員、スイスパウル・シェラー研究所(PSI)の White Jonathan 研究員、スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)の Ronnow Henrik 准教授、理化学研究所創発物性科学研究センターの田口康二郎グループディレクター、十倉好紀センター長、東京大学の永長直人教授、東北大学金属材料研究所の南部雄亮准教授の研究グループは、カイラル磁性体^{*1} MnSi に形成される磁気スキルミオンの電流下の流動挙動を中性子小角散乱^{*2} によって詳細に調べました。その結果、磁気スキルミオンは駆動中も格子構造を保つこと、さらに試料端付近に生じる摩擦力的な機構により塑性変形^{*3} を起こすことが観測されました。今回解明された電流下の流動挙動は従来の予想とは本質的に異なるものであり、磁気スキルミオンを用いた省エネルギー情報伝達デバイス実現のために重要な情報であると考えられます。

本研究成果は、2019 年 7 月 11 日(日本時間 18 時)「Communications Physics」オンライン版に掲載される予定です。

【詳細な説明】

(背景)

渦などに代表される位相幾何学的な欠陥^{*4}は、古くから研究が行われているサイエンスの一分野です。位相幾何学的欠陥は連続的な変形で消失することができないため、一旦形成されると粒子のように振る舞うと考えられています。近年、カイラル磁性体 MnSi において、位相幾何学的な欠陥の一種である磁気スキルミオンが三角格子^{*5}を形成して存在することが微視的な観測手段である中性子小角散乱で明らかにされました[1]。その発見が引き金となり、様々なカイラル磁性体において同様な磁気スキルミオン格子相が発見され、現在では磁気スキルミオン格子はカイラル磁性体を取りうる普遍的な磁気構造の一つとして認識されています。

磁気スキルミオンは電流と強く結合することが予想されています。実際過去の研究から、磁気スキルミオンが僅か 10^6 A/m² 程度の電流密度により駆動できることが知られていました[2, 3]。この電流密度は磁性薄膜において磁気ドメイン^{*6}を駆動するために必要な電流密度と比較して3桁以上小さい値であり[4]、省エネルギースピントロニクスデバイス実現に向けては極めて有利であると言えます。しかしながら、過去の研究では電流印加状態での磁気スキルミオン流動挙動は解明されておらず、微視的な実験手段による磁気スキルミオン流動挙動の解明が望まれていました。

(研究手法・成果)

本研究グループは、磁気スキルミオンが安定的に存在する相を持つカイラル磁性体 MnSi に電流を印加し、電流駆動状態での磁気スキルミオンの微視的挙動を中性子小角散乱手法を用いて詳細に調べました。その結果、磁気スキルミオンは 10^6 A/m² の電流密度を印加すると三角格子を保ったまま流れはじめることが観測されました。また、試料の端付近では磁気スキルミオン格子が塑性変形を起こしながら流れていることが明らかになりました。

実験はアメリカ国立標準技術研究所(National Institute of Standards and Technology)の NG7 中性子小角散乱装置、及びスイスパウル・シェラー研究所(Paul Scherrer Institut)の SANS-II 中性子小角散乱装置を用いて行われました。試料に電流を印加する前の中性子小角散乱パターンは、図 1(a)のように6回対称の磁気回折を示します。一方、閾電流密度 10^6 A/m² 以上の電流を印加すると回折ピークの6回対称性は崩れることなく、その幅が広がることが観測されました(図 1(b))。このピーク幅増大の起源を明らかにするため、更に図 1(g)のように試料の両端のみに中性子ビームを照射したところ、磁気スキルミオン反射の回転が観測され、更に左右の端で回転方向が逆であることが判明しました。また、この磁気スキルミオンの回転は電流方向を反転すると逆転します。

これらの結果は、流動中の磁気スキルミオンが三角格子構造を保つこと、さらに試料端領域においてはわずかに回転していることを示しています。さらに興味深いことに、この磁気スキルミオン格子の回転は電流印加を中止しても残り続けます。すなわち一旦電流駆動により変形を受けたスキルミオン格子は静止してもその変形を保持し続けるわけです。このような変形は塑性変形と呼ばれます。

試料の両端で逆回転を示すという事実からは、試料端で摩擦力的な機構が働き中央部に比較して遅れて流れていることが考えられます(図2)。今回の実験での中性子の照射領域は試料の端から約 0.3 mm 程度であるため、磁気スキルミオン流動状態における塑性変形は試料端の数ナノメートルの現象ではなく、試料内部まで広がるバルクの現象であると考えられます。これらの結果は、これまで微視的な観測手段で明らかにされてこなかった位相幾何学的欠陥の流動挙動を初めて明らかにしたものです。さらに、磁気スキルミオンの流動において試料端の影響がバルクを支配しているという情報は、磁気スキルミオンを使ったレーストラックメモリ^{*7}など省エネルギー情報伝達デバイス実現に重要であると考えられます。

【今後への期待】

本研究により位相幾何学的欠陥の一つである磁気スキルミオンが、試料端の影響を大きく受けて駆動することが判明しました。このような情報は、磁気スキルミオンを用いた省エネルギー情報伝達デバイスを開発する上で重要な情報であるといえます。今後、塑性流動の空間分布や塑性変形発現の時間スケールの情報を得ることで、将来的な省エネルギー情報伝達デバイス実現のための基礎を作ることにつながると考えられます。

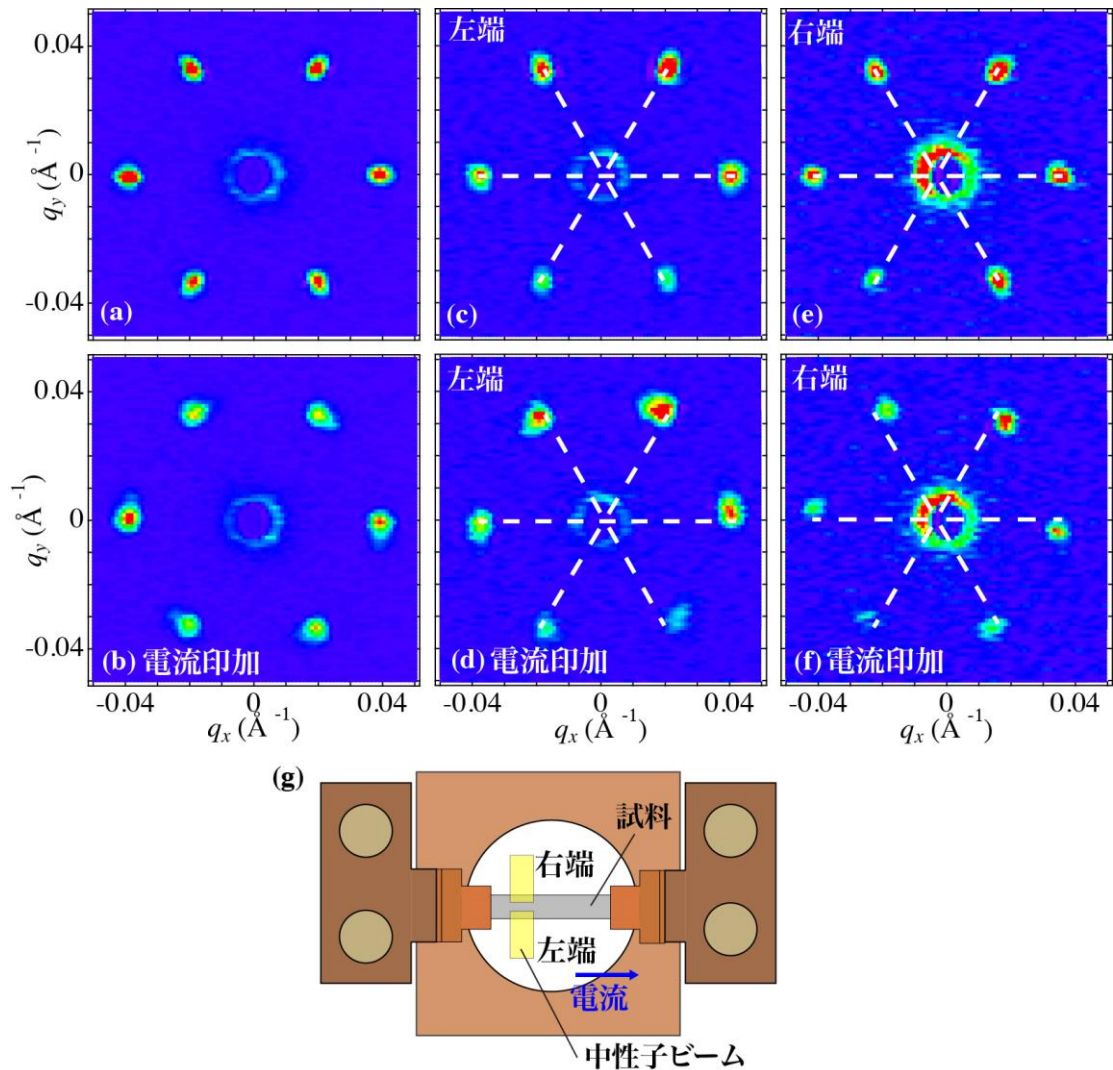


図 1：中性子小角散乱で観測された磁気スキルミオンからの磁気回折線。磁気スキルミオンが形成する三角格子を反映し、6 回対称の反射が観測されている。(a) 試料全体に中性子ビーム照射時に観測される磁気スキルミオン反射。(b) 閾電流密度以上の電流印加時に観測される磁気スキルミオン反射。(c, e) 電流印加前の試料の左端(c)と右端(e)に中性子ビーム照射時に観測される磁気スキルミオン反射。(a)と同様な反射が観測されている。(d, f) 閾電流密度以上の電流印加時に観測される磁気スキルミオン反射。白点線は電流印加前の磁気スキルミオン反射の位置を示している。右端では時計回り、左端では反時計回りに磁気スキルミオン反射の回転が観測されている。(g) 実験配置の概念図及び中性子ビームの照射位置の説明。

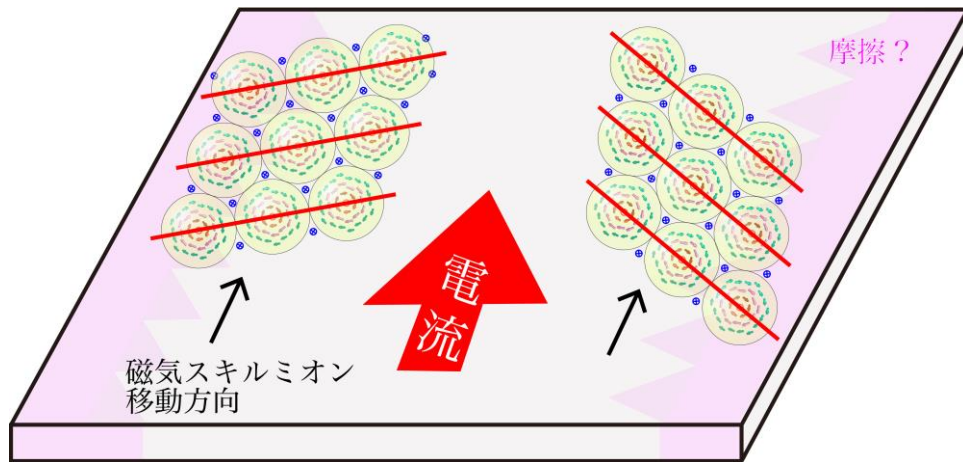


図 2 : 流動中の磁気スキルミオン格子の想像図。電流印加方向と同じ方向に磁気スキルミオン格子は駆動すると考えられる。試料の端付近では摩擦力的な機構により塑性変形が発生している様子を示している。その結果、右端では磁気スキルミオン格子は時計回りに回転し、左端では反時計回りに回転することが予想され、図 1 の磁気スキルミオン反射のデータにその様子が見られている。

【参考文献】

- [1] S. Muhlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, P. Boni, *Science* **323**, 915 (2009).
- [2] F. Jonietz, S. Muhlbauer, C. Pfleiderer, A. Neubauer, W. Munzer, A. Bauer, T. Adams, R. Georgii, P. Boni, R. A. Duine, K. Everschor, M. Garst, A. Rosch, *Science* **330**, 1648 (2010).
- [3] T. Schulz, R. Ritz, A. Bauer, M. Halder, M. Wagner, C. Franz, C. Pfleiderer, K. Everschor, M. Garst, A. Rosch, *Nat. Phys.* **8**, 301 (2012).
- [4] M. Yamanouchi, D. Chiba, F. Matsukura, H. Ohno, *Nature* **428**, 539 (2004).

【論文情報】

掲載誌名 : *Communications Physics*

論文タイトル : Deformation of the moving magnetic skyrmion lattice in MnSi under electric current flow

著者 : D. Okuyama, M. Bleuel, J. S. White, Q. Ye, J. Krzywon, G. Nagy, Z. Q. Im, I. Zivkovic, M. Bartkowiak, H. M. Ronnow, S. Hoshino, J. Iwasaki, N. Nagaosa, A. Kikkawa, Y. Taguchi, Y. Tokura, D. Higashi, J. D. Reim, Y. Nambu, and T. J. Sato

DOI : 10.1038/s42005-019-0175-z

本研究は、科研費基盤研究(S)(JP24224009)、基盤研究(A)(JP18H03676)、若手研究(B)(JP17K14327)、新学術領域研究(JP26103006)、挑戦的萌芽研究(JP17K18744)の研究費支援を受け、また、「物質・デバイス領域共同研究拠点」における「人・環境と物質をつなぐイノベーション創出ダイナミック・アライアンス」のCOREラボ共同研究プログラムの助成を受けたものです。

【用語説明】

*1 カイラル磁性体

系の磁性を担う原子が結晶内で鏡映と反転の対称操作を含まない磁性体を指す。螺旋磁気秩序構造をとることがあり、その場合は結晶の対称性を反映して、螺旋の巻き方向(ヘリシティ)が揃う場合がある。磁気スキルミオンは、平面内の3つの方向に伝播するヘリシティが揃った螺旋磁気構造の重ね合わせで説明される。

*2 中性子小角散乱

中性子散乱とは、原子炉で作られた中性子を物質に入射し、散乱される中性子を観測することで物質内部の結晶/磁気構造やそれらの励起の情報を得る手法である。特に散乱角の小さい領域を測定する手法を小角散乱と呼び、数 nm から数百 nm 程度の構造の情報を得ることに特化されている。

*3 塑性変形

結晶構造や磁気構造などの周期的構造を形成する系では、周期的構造が途切れ、新しい周期構造が形成される場合がある。周期的な構造が続いている領域をドメインと呼び、ドメインとドメインの間の乱れた領域を転位と呼んでいる。物体に剪断力が加わりその物体の降伏点を越えた時、ドメイン間を転位が滑りながら移動することで変形することを塑性変形という。一度降伏点を越えると剪断力が消えても変形は消えないことが特徴である。

*4 位相幾何学的な欠陥

連続体を分類する概念である位相幾何学において、周辺の位相とは異なった位相を持つ領域が孤立して存在する状態を指している。結晶の螺旋欠陥や、第二種超伝導体で現れるボルテックス、カイラル磁性体の磁気スキルミオンなどが例として挙げられる。

*5 三角格子

カイラル磁性体における磁気スキルミオン相では、高濃度の磁気スキルミオンが周期的な構造をなし、特に三角格子をつくることがよく観測されている。三角格子は2次元平面内で半径が等しい円を充填する際の最密構造となっている。

*6 磁気ドメイン

周期的な構造が続いている領域をドメインと呼び、周期的な磁気構造が続いている領域を磁気ドメインと呼ぶ。強磁性体の場合は磁気ドメインのことを磁区と呼んでおり、記憶媒体として利用されている。近年、この磁気ドメインを磁場ではなく、より扱いやすい電流や電場で制御することが試みられている。

*7 レーストラックメモリ

従来の2次元上に記憶媒体を並べた構造に変わり、情報密度を増加させるべく3次元構造にした記憶媒体のアイデアの一つである。細長いワイヤ形状をした磁性体の磁気ドメインの配列で情報を記録する。パルス電流やスピン偏極した電流で磁気ドメインを駆動し情報を制御することが考えられている。

【問い合わせ先】

東北大学 多元物質科学研究所
助教 奥山 大輔（おくやま だいすけ）
Tel : 022-217-5349
E-mail : okudaisu@tohoku.ac.jp

東北大学 多元物質科学研究所
教授 佐藤 卓（さとう たく）
Tel : 022-217-5348
E-mail : taku@tohoku.ac.jp

【報道関連】

東北大学 多元物質科学研究所 広報情報室
Tel : 022-217-5198
E-mail : press.tagen@grp.tohoku.ac.jp