

2026 年 8 月 18 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

磁気スキルミオンが押し合い 跳ね返る瞬間をナノ秒で観測 —超高速・高密度スピントロニクスデバイス実現へ新指針—

【発表のポイント】

- 磁気スキルミオン^(注1)と呼ばれるナノメートルスケールの磁気渦は、高い安定性と電氣的制御性を有することから、超高速・高密度スピントロニクスデバイスへの応用が期待されています。
- 時間分解 X 線顕微鏡^(注2)を用い、電流で動く多数のスキルミオンが互いに押し合い、電流を切った直後に跳ね返る様子を、ナノ秒スケールの実時間軌道として世界で初めて直接捉えました。
- この反跳軌道からスキルミオン間の反発相互作用を定量化し、さらに高電流領域では、慣性遅れや横方向の曲がりを伴わず、スキルミオン格子全体が一体的に直進することを実証しました。超高速・高密度スピントロニクスデバイスの実現に向けた重要な知見となる成果です。

【概要】

近年、情報処理技術のさらなる高速化と低消費電力化に向けてスピントロニクス技術が注目されています。その一つである磁気渦「磁気スキルミオン」は有力な次世代デバイスへの応用が期待され、研究が盛んに行われていますが、ナノ秒スケールで起こる過渡的な運動を直接捉えることは困難でした。

東北大学とドイツ・マインツ大学ヨハネスグーテンベルグ校からなる国際共同研究チームは、人工反強磁性多層膜中のスキルミオン格子を用い、電流駆動下での集団運動を時間分解 X 線顕微鏡で直接観測しました。研究では極限的な空間・時間分解能で軌道を追跡したところ、低電流領域ではスキルミオン同士の「反跳運動」を捉え、反発相互作用ポテンシャルを直接・定量的に抽出しました。また高電流領域では、格子全体が直進し慣性遅れがないことを実証しました。本成果は、多数のスキルミオンを高密度に集積したデバイスにおける相互作用や応答時間の制御に関する設計指針となるもので、今後は超高速・高密度・低消費電力なスピントロニクスデバイスの実現に向けた研究開発が大きく進展することが期待されます。

本研究成果は、2026 年 8 月 10 日（英国時間）に出版された科学誌 Nature Physics に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

社会がますます情報処理技術に依存するにつれ、半導体素子のさらなる微細化、高速化、低消費電力化が求められています。その中で、電子のスピンを利用するスピントロニクス技術は、不揮発性、省エネルギー性、集積性の観点から、ポスト CMOS 技術の有力候補として注目されています。

磁気スキルミオンは、磁性体中に形成されるナノメートルスケールの渦状の磁気構造です。トポロジに由来する高い安定性を持ち、電流によって動かすことができるため、レーストラック磁気メモリ、論理回路、脳型計算などへの応用が期待されています。一方で、通常の強磁性スキルミオンでは、電流を流した際に進行方向に対して横方向に曲がってしまうスキルミオン Hall 効果^(注3)が生じるため、高密度デバイス化に向けた課題となります。

この課題を解決する有力な候補として注目されているのが、反強磁性スキルミオン（図 1 右下）です。反強磁性スキルミオンでは、二つのスキルミオンが互いに反対向きに結合しているため、トポロジに起因する横方向の力が相殺され、スキルミオン Hall 効果が抑制されます。そのため、電流方向に沿った高速な直進運動が可能になります。

しかし、実際の情報処理素子では、単一のスキルミオンではなく、多数のスキルミオンを高密度に並べて利用する必要があります。このような高密度状態では、スキルミオン同士の相互作用や散乱が無視できず、デバイスの安定性、信号の再現性、動作速度を左右する重要な要因になります。

また、デバイスのクロック周波数を決めるにあたり、スキルミオンを用いたデバイスを高速動作させるためには、単に速く動くことだけでなく、電流パルスに対して遅れなく応答し、パルス停止後に不要な運動が残らない（慣性遅れがない）ことも重要です。一般に、スキルミオンの運動では内部構造の変形やピン止め^(注4)、層間結合の有限性などにより、慣性遅れが高速動作の上限を決める可能性があります。

特に人工反強磁性スキルミオンでは、二つの磁性層中のスキルミオンが反対向きに結合しているため、横方向に曲がる力は相殺されると期待されますが、加速時に上下のスキルミオンの間に一時的なずれが生じる可能性があり、その実時間検証が必要でした。

今回の取り組み

今回、東北大学電気通信研究所の土肥昂堯助教、ドイツ・マインツ大学ヨハネスグーテンベルグ校の Mathias Kläui 教授からなる共同研究チームは、二種類の強磁性層を極薄の非磁性層を介して人工的に反強磁性的に結合させた人工反強磁性多層膜を作製しました。この多層膜では、鉄を多く含む磁性層とコバルトを多く含む磁性層を用いることで、X 線のエネルギーを選択することにより、

二つの磁性層それぞれの磁気構造を個別に観察できます（図 1）。

作製した人工反強磁性多層膜において、電流パルスを印加することにより、室温下で反強磁性スキルミオン格子が形成されました。また、この格子は広い磁場範囲で安定であることが確認されており、反強磁性的な性質に由来する高い安定性を示しています。

研究チームは、ポンプ・プローブ型の時間分解走査型透過 X 線顕微鏡を用いて、電流パルスを印加した際の反強磁性スキルミオン格子の運動を直接観察しました。この手法により、従来のように電流を流す前後の静止画像を比較するだけではなく、電流を流している最中および電流を止めた直後の運動を、1 ナノ秒刻みで追跡することが可能になりました（図 1 右上）。

低い電流領域では、電流によって動くスキルミオンと、局所的な欠陥などによりその場に固定されたスキルミオンが同時に存在する「非一様流動」が観測されました。動くスキルミオンは固定されたスキルミオンに近づくことで局所的に圧縮され、電流を切ると相互作用により元の配置へ戻ろうとして反跳運動を示しました（図 2）。この反跳運動の時間スケールは 3~20 ns の範囲であり、スキルミオン間相互作用と局所的なピン止めポテンシャルを反映していることがわかりました。

さらに、この反跳軌道を詳細に解析することで、スキルミオン間に働く反発相互作用を定量的に求めました。Thiele 方程式^(注 5)に基づく逆解析により、実験から得られた相互作用パラメータは、シミュレーション計算の結果とも整合しました。これにより、反強磁性スキルミオン間の相互作用ポテンシャルを、実時間の散乱・緩和軌道から直接抽出できることが示されました（図 2）。

一方、高い電流領域では、局所的なピン止めの影響を上回る駆動力により、格子中のすべてのスキルミオンが一体となって動く「一体的流動」が実現しました。このとき、観測されたスキルミオンは相対的な位置関係を保ったまま電流方向に沿って移動し、横方向へのずれはほとんど観測されませんでした。さらに、二つの磁性層の間にナノ秒スケールで検出可能な時間遅れはなく、スキルミオン速度は電圧パルスに遅れなく追従しました。これは、今回の反強磁性スキルミオン格子では、デバイスの高速動作を妨げる慣性遅れが検出限界内で抑制されていることを示しています（図 3）。

今後の展開

本研究では、反強磁性スキルミオン格子のナノ秒スケールの集団運動を実空間で直接観測し、低電流領域ではスキルミオン間相互作用に由来する散乱・反跳運動を、高電流領域では Hall 効果や慣性遅れのない一体的直進運動を明らかにしました。これは、反強磁性スキルミオンを用いたデバイス設計において、個々のスキルミオンだけでなく、スキルミオン集団の相互作用と過渡応答を考慮する必要があることを示しています。

特に、高電流領域で観測された、変形や慣性遅れを伴わない再現性の高い直進運動は、GHz 級の高速動作を目指すスピントロニクスデバイスにとって重要な性質です。今後、様々な磁気特性を最適化することで、より高密度で安定に動作する反強磁性スキルミオンデバイスの実現につながる事が期待されます。

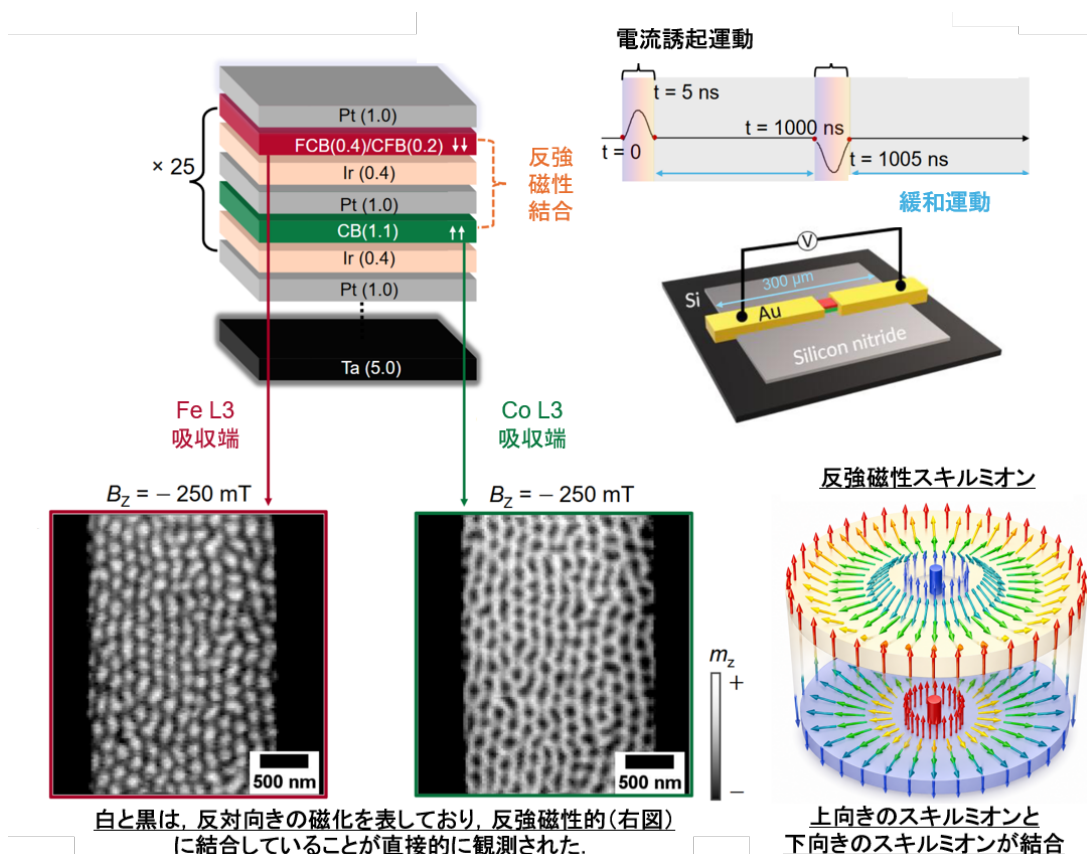


図 1. 人工反強磁性多層膜に形成された反強磁性スキルミオン格子と電流誘起運動

本研究で用いた人工反強磁性多層膜と、時間分解 X 線顕微鏡による測定の模式図。鉄を多く含む磁性層とコバルトを多く含む磁性層が、非磁性層を介して反強磁性的に結合している。X 線のエネルギーを変えることで二つの磁性層を個別に観察でき、反対向きに結合したスキルミオン格子が形成されていることを確認した。右上には電流駆動の方法を示している。

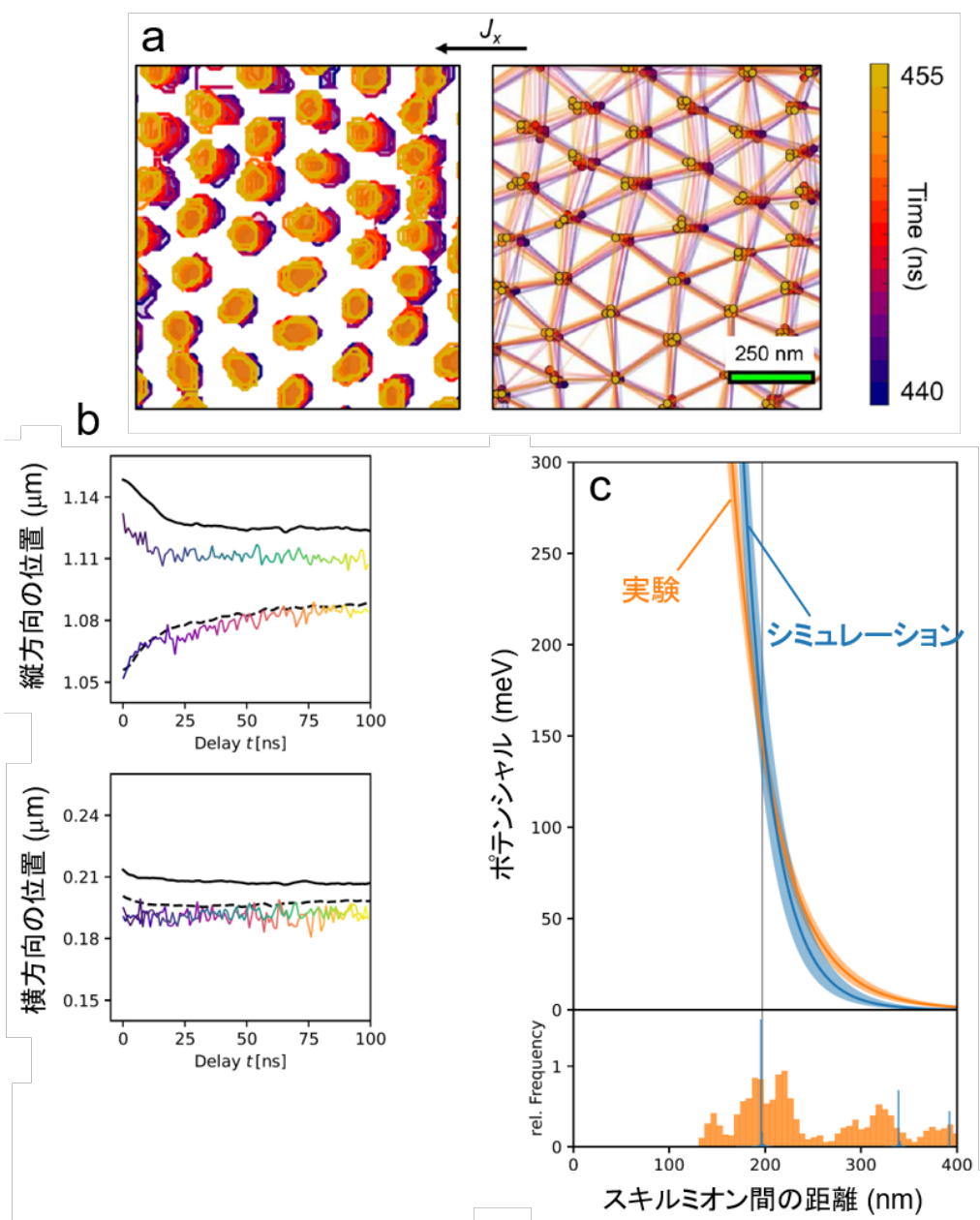


図2. 反強磁性スキルミオン格子における相互作用の可視化

a) 低電流を流した際には、動くスキルミオンと動かないスキルミオンが混在し、スキルミオン格子は局所的に圧縮される。右図は、Delaunay 解析による軌跡の定量化を示している。b) 電流を切ると (Delay $t = 0$)、スキルミオン同士の反発相互作用によって、直前の運動方向とは反対向きの反跳運動が生じる。このナノ秒スケールの反跳軌道を解析することで、c) 反強磁性スキルミオン間に働く相互作用ポテンシャルを定量的に抽出した。独立に決定された磁気特性から行われたシミュレーション結果と反発的な相互作用が非常によく一致していることがわかる。

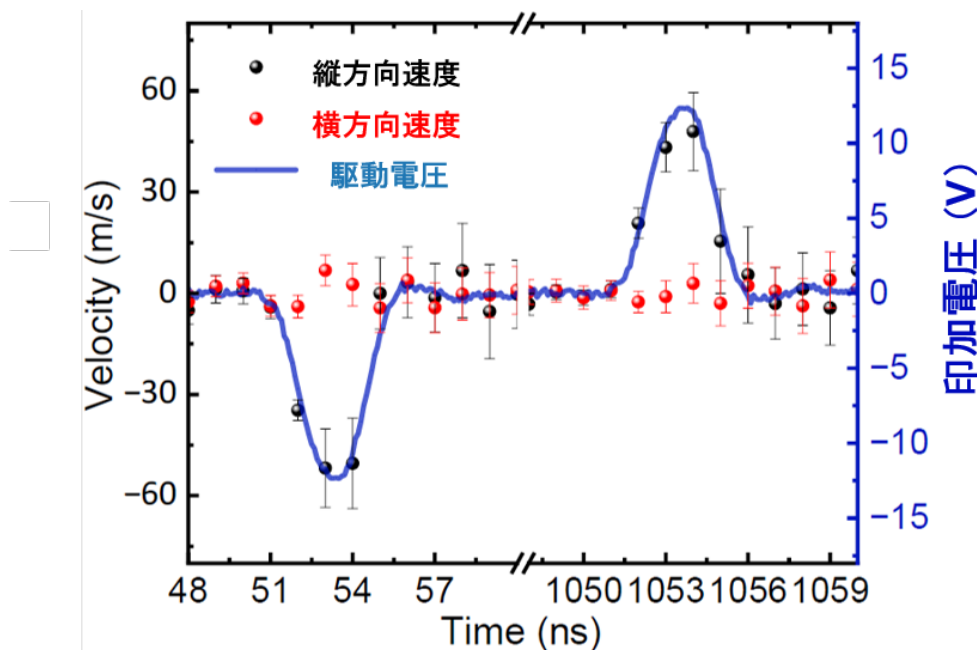


図3. 反強磁性スキルミオン格子の高速直進運動

高い電流を流すと、局所的なピン止めの影響を上回り、スキルミオン格子全体が形を保ったまま一体となって電流方向に移動する。スキルミオンをナノ秒スケールで追跡した結果、横方向へのずれや検出可能な慣性遅れ（駆動電圧とスキルミオン速度の差）は観測されなかった。

【謝辞】

本研究は、ヨーロッパキャノン財団、カシオ科学振興財団、日本学術振興会科学研究費助成事業（23K13655, 24H00039, 24H00409, 25K01645）、東北大学先端スピントロニクス研究開発センター（CSIS）共同研究プロジェクト等の支援の下で行われたものです。

【参考リンク】

- ・2019年11月15日プレスリリース

『ナノの世界で現れる磁気の渦の高速直進運動を初めて実現～スピントロニクスの原理を駆使した新たな情報処理・蓄積技術へ～』

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/11/press20191114-04-nano.html>

- ・2023年9月12日プレスリリース

『ナノメートルスケールの磁気渦「スキルミオン」の新たな特性を発見し制御技術を確認—革新的省エネデバイスの実現に期待—』

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2023/09/press20230912-03-skyrmion.html>

【用語説明】

注1. 磁気スキルミオン

磁性体中に形成されるナノメートルスケールの渦状の磁気構造。中心部と外側で磁化の向きが反対になっており、その間で磁化の向きが連続的に回転している。磁気構造のトポロジーに由来する高い安定性を持ち、電流によって移動・制御できることから、次世代の高密度・低消費電力スピントロニクスデバイスへの応用が期待されている。

注2. 時間分解 X 線顕微鏡

X 線を用いて磁性体内部の磁気構造を観察する顕微鏡手法。特定元素の吸収端に X 線エネルギーを合わせることで、元素ごとの磁化情報を取得できる。本研究では、ポンプ・プローブ法により電流パルスに対する応答を 1 ns 刻みで再構成し、スキルミオンの運動を時間分解して観察した。

注3. スキルミオン Hall 効果・スキルミオン Hall 角

印加する電流に対して磁気スキルミオンが斜め方向に動いてしまう現象。またその際の電流方向に対する角度。これは、野球の変化球と類似した現象で、磁気スキルミオンが本質的に持っている角運動量によって直進運動が妨げられ、進行方向に対して横方向に運動が曲がってしまう現象。反強磁性結合スキルミオンの場合、上下のスキルミオンが完全に等しい大きさの磁化の強さを持つ場合、スキルミオン Hall 効果は消失する。一方で、等しくない場合、磁気スキルミオンのサイズによっては、有限の Hall 角が生じることが知られている。

注4. ピン止め

材料中の欠陥、界面の粗さ、粒界などにより、スキルミオンなどの磁気構造の運動が局所的に妨げられる現象。本研究では、低電流領域において一部のスキルミオンがピン止めされ、それらが動くスキルミオンに対する散乱中心として働いた。

注5. Thiele 方程式

磁気スキルミオンなどの磁気構造を粒子のように扱い、外力、散逸、トポロジーに由来する力などを用いてその運動を記述する方程式。本研究では、電流停止後の反跳軌道を Thiele 方程式に基づいて逆解析することで、スキルミオン間相互作用ポテンシャルを抽出した。

【論文情報】

タイトル：“Time-resolved imaging of antiferromagnetic skyrmion interactions”
(反強磁性スキルミオン相互作用の時間分解イメージング)

著者： Mona Bhukta*, Takaaki Dohi^{*,**}, Kilian Leutner*, Maria-Andromachi Syskaki, Fabian Kammerbauer, Duc Minh Tran, Sebastian Wintz, Markus Weigand, Simone Finizio, Jörg Raabe, Hendrik Ohldag, Thibaud Denneulin, Joseph Vimal Vas, Rafal E. Dunin-Borkowski, Robert Frömter^{**}, and Mathias Kläui^{**}

*：共同筆頭著者

**：責任著者

東北大学電気通信研究所 助教 土肥 昂堯

掲載誌：Nature Physics

DOI：10.1038/s41567-026-03383-4

URL：<https://doi.org/10.1038/s41567-026-03383-4>

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学電気通信研究所

助教 土肥 昂堯

TEL: 022-217-5555

Email: tdohi@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学電気通信研究所 広報室

TEL: 022-217-5427

Email: riec-kohoshitsu@grp.tohoku.ac.jp