

低電流でのスキルミオン制御に成功 —省エネで情報操作可能な電子デバイス機能を創出—

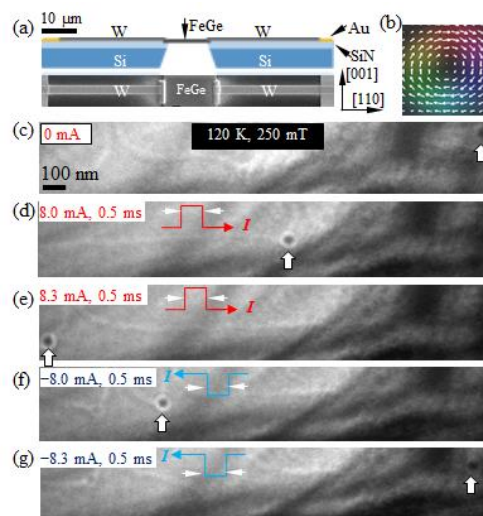
理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター電子状態マイクロコピー研究チームの于秀珍チームリーダー、強相関量子構造研究チームの有馬孝尚チームリーダー（東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）、強相関理論研究グループの永長直人グループディレクター（東京大学大学院工学系研究科教授）、強相関物性研究グループの十倉好紀グループディレクター（東京大学卓越教授／東京大学国際高等研究所東京カレッジ）らの共同研究グループ^{*}は、低電流密度のパルス電流によって、直径約1万分の1ミリサイズの磁気渦「スキルミオン^[1]」の生成・消滅・移動を制御することに成功しました。

本研究成果は、省エネで大容量の情報処理ができる電子デバイスの開発につながると期待できます。

スキルミオンは、微小電流で移動を制御できることがこれまでも提唱されていますが、単一スキルミオンではまだ実証されていませんでした。

今回、共同研究グループは、小さな「切り欠き」をつけたらせん磁性体 FeGe（Fe：鉄、Ge：ゲルマニウム）のマイクロデバイスを作製しました。このデバイスに、レーストラック・メモリ^[2]で使用される電流密度より3桁低い微小電流の超短パルスを流した結果、直径80ナノメートル（nm、1nmは10億分の1メートル）の単一スキルミオンとスキルミオン格子^[1]が生成・消滅・移動することが分かりました。さらに、スキルミオンクラスター（凝集体）の回転運動を初めて直接観察しました。

本研究は、科学雑誌『*Science Advances*』の掲載に先立ち、オンライン版（6月17日付：日本時間6月18日）に掲載されました。



微小電流の正負パルス電流によりスキルミオン（白矢印の黒点）が横方向に移動する様子（c-d）

※共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター

電子状態マイクロコピー研究チーム

テクニカルスタッフ |

中島 清美 (なかじま きよみ)

チームリーダー

于 秀珍 (う しゅうしん)

強相関量子構造研究チーム

特別研究員 (研究当時)

森川 大輔 (もりかわ だいすけ)

(現 東北大学 多元物質科学研究所 助教)

基礎科学特別研究員 (研究当時)

柴田 基洋 (しばた きよう)

(現 東京大学 生産技術研究所 助教)

チームリーダー

有馬 孝尚 (ありま たかひさ)

(東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻 教授)

強相関理論研究グループ

グループディレクター

永長 直人 (ながおさ なおと)

(東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授、

科学技術振興機構 (JST) CREST 研究代表者)

強相関物性研究グループ

グループディレクター

十倉 好紀 (とくら よしのり)

(東京大学卓越教授 / 東京大学 国際高等研究所東京カレッジ)

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻

講師

金澤 直也 (かなざわ なおや)

研究支援

本研究は日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金基盤研究 (A) 「電子顕微鏡によるトポロジカルスピン構造とそのダイナミクスの実空間観察 (研究代表者: 于秀珍)」、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST 「ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御 (研究代表者: 永長直人)」 による支援を受けて行われました。

1. 背景

固体中に存在する多数の電子スピンは、磁場などの外部刺激を加えると「渦」のように整列し、磁気渦構造を生成することがあります。この「スキルミオン」と呼ばれる磁気渦は、トポロジカル数^[3]「-1」として特徴づけられ、一度生成されると安定した粒子として振る舞います。低電流密度で駆動できるなどの特性も発見されており、新しい磁気記憶媒体としての応用に適した特性を多く持っていることが分かっています。

スキルミオン格子構造の存在は、2009年にキラル結晶^[4]MnSi (Mn: マンガン、Si: シリコン) において初めて観察されました^{注1)}。2010年には、MnSiと同じ結晶構造を持つFe_{0.5}Co_{0.5}Si (Fe: 鉄、Co: コバルト) において、スキルミオン格子および単一スキルミオンの内部のスピン配列の可視化がローレンツ電子顕微鏡観察^[5]により実現しました^{注2)}。スキルミオンは微小電流で移動を制御できることが提唱されていますが^{注3)}、単一スキルミオンの制御はまだ実証されていませんでした。

また、キラル結晶におけるスキルミオンは、電流によって高速で動くうえ、スキルミオン自体の大きさも 100 ナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル) 以下と微小であることから、微小電流下のスキルミオンの動的観察には、究極の時間分解能と空間分解能^[6]を持つイメージング法の開発が求められています。

注 1) S. Mühlbauer, *et al.*, Skymion Lattice in a Chiral Magnet *Science* 323, 915 (2009)

注 2) X. Z. Yu, *et al.*, Real-space observation of a two-dimensional skyrmion crystal. *Nature* 465, 901 (2010)

注 3) 2012 年 8 月 8 日プレスリリース「電子スピンの渦「スキルミオン」を微小電流で駆動」
https://www.riken.jp/press/2012/20120808_2/index.html

2. 研究手法と成果

共同研究グループはまず、微小電流で直径 100nm 以下の単一スキルミオンおよびその結晶状態を制御するために、小さな「切り欠き」をつけたらせん磁性体 FeGe (Ge:ゲルマニウム) のマイクロデバイスを作製しました。このデバイスに、右側から左側へと流れる「負電流」と、逆に左側から右側へと流れる「正電流」を流した場合の電流密度分布をシミュレートしたところ、切り欠き付近で高い電流密度分布を示しました (図 1a, c)。

次に、このデバイスにおけるスキルミオンの生成と電流・温度の関係を実験で調べました。デバイスに電流を流さない場合は、スキルミオン相は 250K (約 23°C) 付近の狭い温度領域 (磁気秩序温度^[7]) にしか存在せず、それ以下の温度ではスキルミオンの生成が困難であることが分かりました (図 1b)。デバイスを正電流パルスで刺激すると、スキルミオン相は広い温度範囲まで広がるのが観察され、電流でスキルミオンを生成できました (図 1d)。一方、負電流パルスで刺激すると、250K 以下で生成されたスキルミオンが消えました。これらの結果から、この切り欠きがついたデバイスでは、流れる電流パルスの極性によってスキルミオンの生成・消滅を制御できることが分かりました。

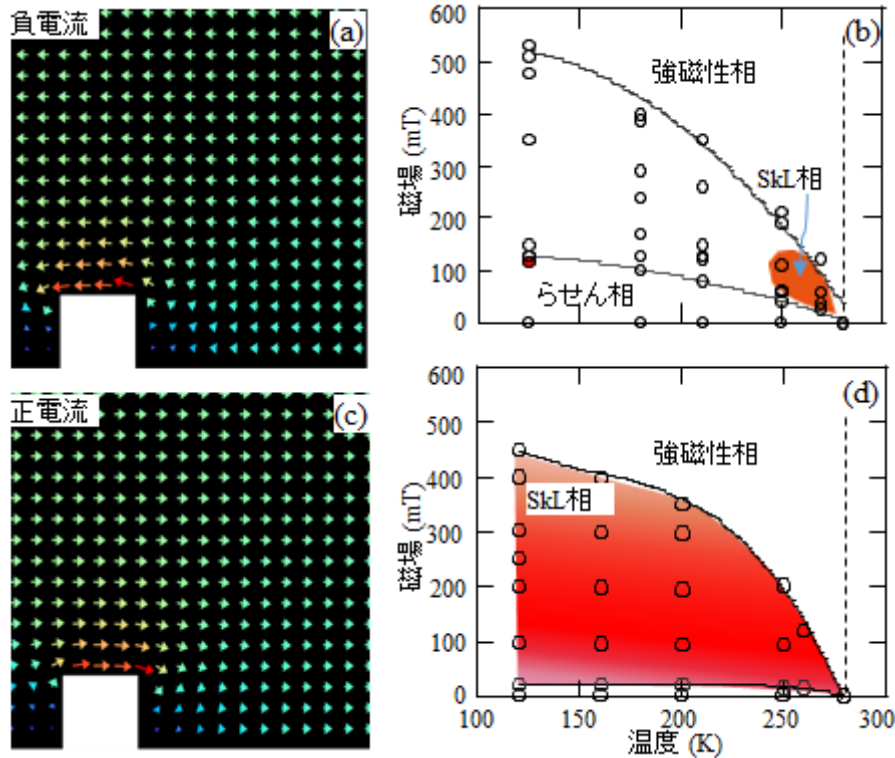


図1 小さな「切り欠き」をつけたデバイスにおける電流密度分布と相図

- (a) デバイスに負電流（右側→左側）を流したときの電流密度分布。切り欠き（図中左下）付近の電流密度が高い。
- (b) 負電流パルスまたは電流を流さないときの相図。赤で示すように、スキルミオン相（SKL相）は250K以上の狭い温度領域にしか存在しない。
- (c) デバイスに正電流（左側→右側）を流したときの電流密度分布。切り欠き（図中左下）付近の電流密度が高い。
- (d) 正電流パルスを流したときの相図。スキルミオン相が広い温度範囲まで広がった。

また、電流パルスの刺激でスキルミオンが生成するメカニズムを調べるため、電流の大きさとパルス幅を調整しながら、切り欠き付近の磁気構造を観察しました。その結果、①ゼロ磁場の状態では10 mA、0.1 ミリ秒 (ms) の1回の電流パルスだけでらせん磁気構造^[8]の伝播方向を回転させることができ、切り欠きの周辺に半円状に伝播するらせん（スキルミオン核）が生成されました(図 2a, b)。また、②薄片に160 ミリテスラ (mT) の弱磁場を加えた状態で電流パルスの幅を10 msに固定し、電流値を徐々に増やすと、スキルミオン格子が最初に切り欠きの角付近に生成され、その後、デバイス中に一気に広がるのが分かりました(図 2c-e)。切り欠きの無い状態では①②の物理現象が見られないことから、この小さな切り欠きが電流でスキルミオンを誘起するうえで鍵になっていることが明らかになりました。

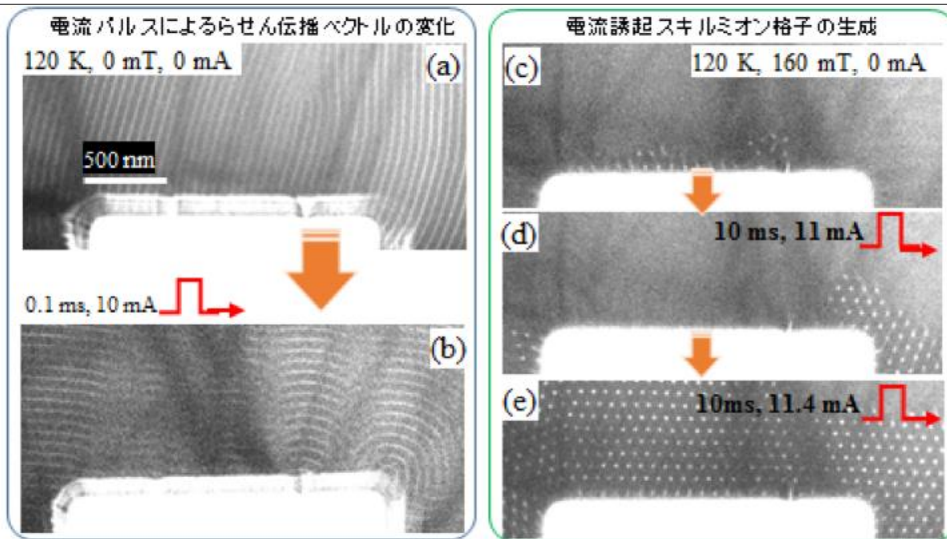


図2 正電流パルスによるらせん磁気構造の伝播方向回転とスキルミオン格子の生成

- (a)(b) ゼロ磁場でデバイスを正電流パルスで刺激すると、らせん磁気構造の伝播方向が回転した。
 (c)(d)(e) 160mTの磁場下では、正電流パルスの電流値を徐々に増やすと、スキルミオン格子が切り欠き付近から、デバイス中に広がった。

また、ローレンツ顕微鏡を用いた実空間観察により、レーストラック・メモリで使用される（磁壁^[9]を移動する）電流閾値より3桁小さい電流下で、単一スキルミオンの横方向の運動（ホール運動）が明らかになりました（図3）。

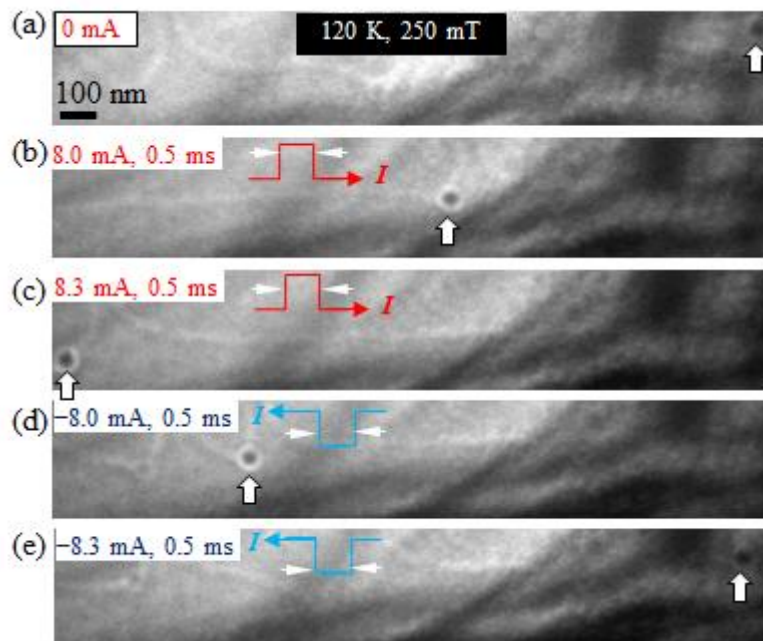


図3 正負パルス電流により単一スキルミオンが横方向に移動する様子

- 1回の電流パルスをデバイスに与えた後観察されたローレンツ電顕像。白矢印で示した黒い点が単一スキルミオンである。(a)は初期状態、(b-c)はデバイスに正電流パルス、(d-e)はデバイスに負電流パルスを与えた後の画像である。

さらに、スキルミオン 3 個からなるクラスター（凝集体）を負電流パルスで刺激すると、クラスターは反時計回りに回転しながらデバイスの右上へ移動し、次に負電流パルスで刺激すると、クラスターがさらに同じ方向へ回転しながら移動することが分かりました（図 4）。

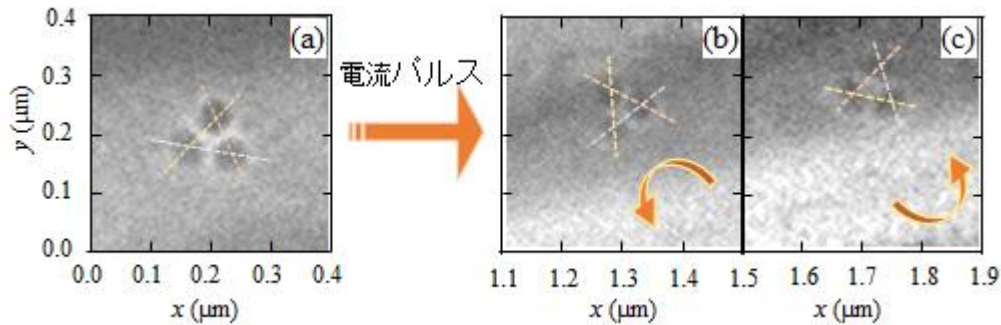


図 4 負電流パルスによるスキルミオンクラスターの回転移動

スキルミオン 3 個のクラスター(a)を負電流パルスで刺激すると、クラスターは反時計回りに回転しながら右上に移動し(b)、さらに刺激すると、さらに回転移動する(c)。

3. 今後の期待

今回の研究は、磁壁を移動する電流の閾値（下限）より 3 桁小さい微小電流パルスで、スキルミオンの生成・消滅・移動、およびスキルミオンクラスターの回転運動を実証しました。

本研究で得られた結果は、スキルミオンを用いた記憶・演算素子における情報担体、またはニューロモーフィックコンピューティング^[10]のシナプスとして、省エネルギー・高密度・超小型化の電子デバイスの創出につながると期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Motion tracking of 80-nm-size skyrmions upon directional current injections

<著者名>

Xiuzhen Yu, Daisuke Morikawa, Kiyomi Nakajima, Kiyoyu Shibata, Naoya Kanazawa, Takahisa Arima, Naoto Nagaosa and Yoshinori Tokura

<雑誌>

Science Advances

<DOI>

10.1126/sciadv.aaz9744

5. 補足説明

[1] スキルミオン、スキルミオン格子

スキルミオンは、渦状の模様を形成している電子スピンの集団構造（渦状スピン構造）のこと。スキルミオンの中心スピンと外周スピンは反平行であり、その間のスピンは少しずつ方向を変えながら、渦状に配列している。スキルミオンのスピンは球面を一周覆う（立体角 4π を覆う）ため、トポロジカル数は-1になる。また、複数のスキルミオンが規則正しく並んだ状態を、「スキルミオン格子」と呼ぶ。

[2] レーストラック・メモリ

電流で磁壁を移動する不揮発性メモリ。電源を切ってもメモリ効果が維持される。磁壁については[9]参照。

[3] トポロジカル数

「トポロジー」とは位相幾何学のことであり、磁気渦を特徴づける「巻き数」に相当する数は、渦の幾何学的な性質で決まる。これをトポロジカル数と呼び、渦が（連続的な）変形を起こしても、このトポロジカル数は変化しない。

[4] キラル結晶

右手と左手の関係のように、鏡に映して得られる構造が、元の自分自身の構造と重ならない結晶構造を「キラル」な結晶構造と呼ぶ。

[5] ローレンツ電子顕微鏡

磁場による電子線の偏向を利用して、磁性体の磁化状態を実空間で観察する手法。空間分解能が高く、ナノメートルオーダーの磁化状態の観察に適している。

[6] 時間分解能と空間分解能

顕微鏡などにおいて、時間的な精度と空間的な精度を評価するパラメーターのこと。

[7] 磁気秩序温度

ランダムに分布している磁気モーメントが整列し始める温度。

[8] らせん磁気構造

原子面に配列した電子スピンが原子層面ごとに少しずつ向きを変えて、らせん状に回転している磁気構造。

[9] 磁壁

磁化の向きが一様にそろった領域を磁区と呼ぶ。強磁性体やフェリ磁性体には多様な磁区が存在し、隣り合う磁区の境界を磁壁と呼ぶ。

[10] ニューロモーフィックコンピューティング

人間の神経細胞の仕組みを模倣して、極めて高い電力効率を保ちつつ、人間と同様に外部刺激から柔軟に学習できる高速演算処理のこと。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所 創発物性科学研究センター

電子状態マイクロスコープ研究チーム

チームリーダー 于 秀珍 (う しゅうしん)

強相関量子構造研究チーム

チームリーダー 有馬 孝尚 (ありま たかひさ)

(東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授)

強相関理論研究グループ

グループディレクター 永長 直人 (ながおさ なおと)

(東京大学 大学院工学系研究科 教授)

強相関物性研究グループ

グループディレクター 十倉 好紀 (とくら よしのり)

(東京大学卓越教授/東京大学 国際高等研究所東京カレッジ)

<JST事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

嶋林 ゆう子 (しまばやし ゆうこ)

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

東京大学 経営企画部国際戦略課東京カレッジチーム

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 広報室

科学技術振興機構 広報課