

微小な熱流によるナノスケールスキルミオンの駆動に成功

ーグリーン情報テクノロジーに向けた電子デバイス機能の創出ー

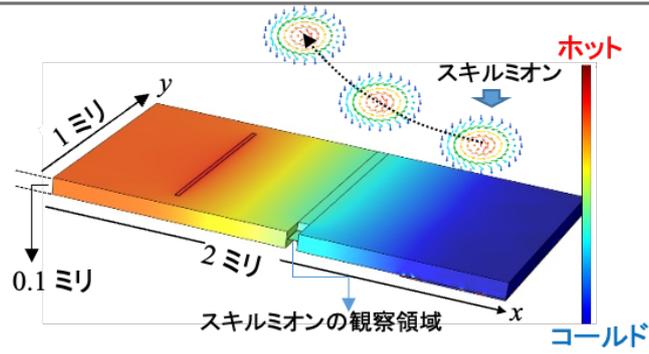
理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター電子状態マイクロコピー研究チームの于秀珍チームリーダー、動的創発物性研究ユニットの賀川史敬ユニットリーダー（東京大学大学院工学系研究科准教授）、強相関界面研究グループの川崎雅司グループディレクター（東京大学大学院工学系研究科教授）、強相関理論研究グループの永長直人グループディレクター（東京大学大学院工学系研究科教授）、十倉好紀センター長（理研強相関物性研究グループグループディレクター、東京大学卓越教授／東京大学国際高等研究所東京カレッジ）らの共同研究グループ^{*}は、絶縁体中の直径約 60 ナノメートル（nm、1nm は 10 億分の 1 メートル）の磁気渦「スキルミオン^[1]」のクラスターを微小な熱流によって駆動させることに成功しました。

本研究成果は、廃熱を利用するグリーン情報技術への応用に向けた電子デバイスの開発につながるものと期待できます。

これまで、スキルミオンは金属中では微小電流によって駆動させられることが分かっていたましたが、絶縁体中での駆動は実現していませんでした。

今回、共同研究グループは、作製した絶縁体 Cu_2OSeO_3 （Cu：銅、O：酸素、Se：セレン）の薄板に垂直な磁場を加えて、直径約 60nm のスキルミオンをクラスター状に生成させました。この薄板に電流を流し、発生するジュール熱により微小な温度勾配^[2]（約 0.02K/mm）をつけて熱流を生じさせたところ、スキルミオンが低温側から高温側に駆動することが分かりました。このスキルミオン駆動に必要な熱流は、従来の金属中における磁壁^[3]の駆動に必要な熱流の 100 分の 1 程度でした。

本研究成果は、科学雑誌『*Nature Communications*』オンライン版（8月23日付：日本時間8月23日）に掲載されました。



微小熱流によってスキルミオンが試料の高温側に駆動する仕組みの模式図

※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

電子状態マイクロスコープ研究チーム

テクニカルスタッフ I	中島 清美 (なかじま きよみ)
特別研究員	ヤシン・フェミ (Yasin Fehmi)
チームリーダー	于 秀珍 (う しゅうしん)

動的創発物性研究ユニット

ユニットリーダー	賀川 史敬 (かがわ ふみたか)
(東京大学 大学院工学系研究科)	准教授)

強相関界面研究グループ

研究員 (研究当時)	久保田 将司 (くぼた まさし)
(現 村田製作所 研究員)	

上級研究員	中村 優男 (なかむら まさお)
グループディレクター	川崎 雅司 (かわさき まさし)
(東京大学 大学院工学系研究科)	教授)

強相関理論研究グループ

訪問研究員	ヤン・マーセル (Jan Masell)
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、
科学技術振興機構 (JST) CREST 研究代表者)	

創発物性科学研究センター

センター長	十倉 好紀 (とくら よしのり)
(創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 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)	

東京大学 大学院工学系研究科附属総合研究機構

物理工学専攻

准教授	関 真一郎 (せき しんいちろう)
(科学技術振興機構 (JST) さきがけ研究者)	

研究支援

本研究の一部は、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)」、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 CREST 「Beyond Skyrmion を目指す新しいトポロジカル磁性科学の創出 (研究代表者: 于秀珍)」「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)」による助成を受けて行われました。

1. 背景

「スキルミオン」は、固体中の電子スピン^[4]が形成する渦状の磁気構造体であり、トポロジカル数^[5]「-1」として特徴付けられ、安定した粒子として振る舞い

ます。また、直径が1~100 ナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル) であることに加え、低電流で駆動できることから、高性能の磁気記録デバイスへの応用が期待されています。

複数のスキルミオンが規則正しく並んだスキルミオン格子^[1]の存在は、2009年にキラル結晶^[6]の金属 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年には于秀珍チームリーダーらが、ローレンツ電子顕微鏡^[7]を用いて、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の可視化を実現し^{注2)}、2012年に絶縁体 Cu₂OSeO₃ (Cu: 銅、O: 酸素、Se: セレン) における、直径 60 ナノメートル (nm、1nm は 10 億分の 1 メートル) のスキルミオンの三角格子の生成にも成功しました^{注3)}。

さらに、2020年に金属 FeGe において、直径 80nm の単一スキルミオンとスキルミオン格子が微小電流による磁壁の駆動で制御できることを実証しました^{注4)}。一方で、絶縁体におけるスキルミオンの駆動には電場や熱流などによる制御が提唱されているものの、実証された例はありませんでした。そこで、今回は絶縁体 Cu₂OSeO₃を用いて、スキルミオンの駆動を試みました。

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4月19日東京大学プレスリリース「電場で制御可能なナノスケールのスピントル (スキルミオン) を発見」

https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/a_00032.html

注4) 2020年6月18日プレスリリース「低電流でのスキルミオン制御に成功」

https://www.riken.jp/press/2020/20200618_1/index.html

2. 研究手法と成果

共同研究グループはまず、バルク状単結晶 Cu₂OSeO₃ を幅 1mm、長さ 2mm、厚さ 0.1mm の薄板に成形し、中央付近にローレンツ電子顕微鏡の電子線が透過できる厚さ 100nm の薄膜部分 (thinner area) を作りました (図 1a, b)。その薄膜部分の両側に抵抗線、右側にヒーター線を付けました。抵抗線、ヒーター線はどちらも白金 (Pt) でできています。

20K (-253°C) で薄板に垂直に磁場 175 ミリテスラ (mT) を加え、ローレンツ電子顕微鏡で薄膜部分を観察したところ、直径約 60nm のスキルミオンの三角格子状クラスターが現れました (図 1c)。この状態で、ヒーター線に 0.1mA の微小電流を流し、発生したジュール熱により薄板の長さ方向に温度勾配をつけて熱流を生じさせました。このとき抵抗線 R1 と R2 で測定された抵抗値は、いずれも 3,800 オーム (Ω) でほぼ同じでした。これは、温度勾配の実測値が抵抗測定の精度を超えるほど微小であることを示しています。このような微小な

熱流であるにもかかわらず、スキルミオンが薄板の低温側から高温側に駆動する様子が観察されました (図 1d)。

試料中に発生された熱流の量を見積もるため、市販の COMSOL ソフトを用いて薄板中の温度マップを計算しました。すると、ヒーター線に 0.05mA の電流を流したときは薄板両端 (長さ 2mm) の温度差は 0.003K であり、0.1mA の電流を流した場合は 0.03K であることが分かりました (図 1e)。

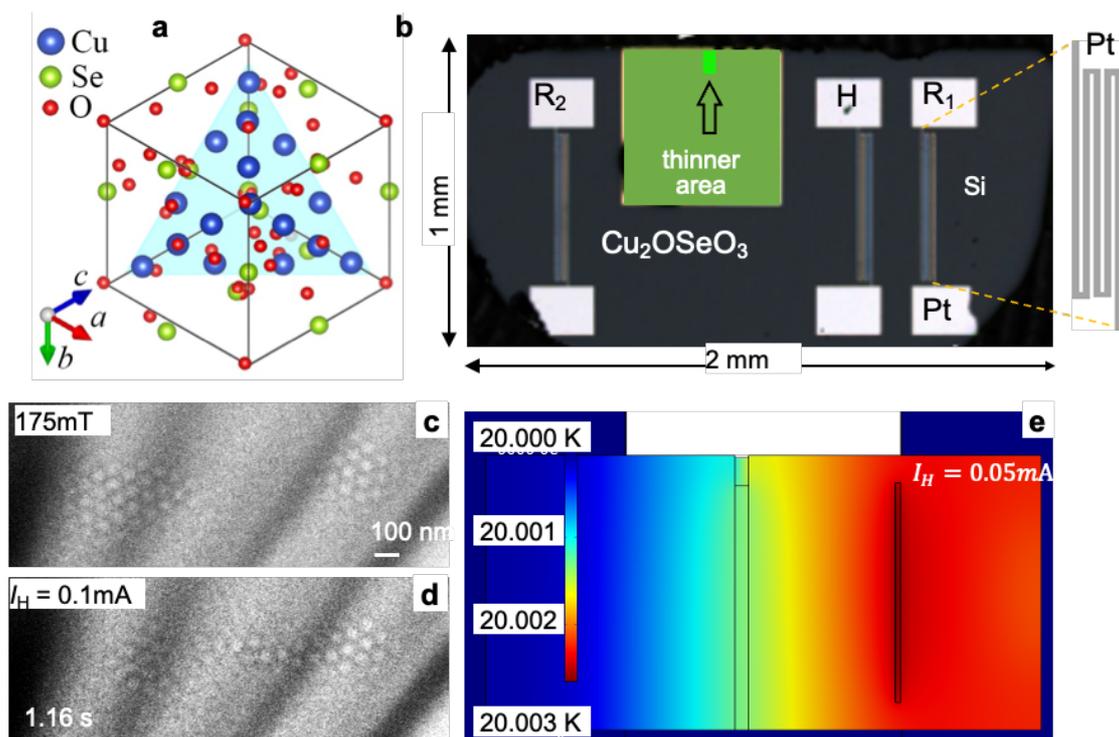


図 1 デバイスの構造とスキルミオン駆動の様子、デバイス中の温度分布

- (a) 絶縁体 Cu_2OSeO_3 の結晶構造。
- (b) 抵抗線 (R1 と R2) およびヒーター線 (H) を付けた Cu_2OSeO_3 薄板。抵抗線、ヒーター線ともに、白金 (Pt) でできており、長さ 2.34mm、幅 0.0021mm、厚さ 0.000025mm のワイヤーである。薄板の中央付近の一部に、ローレンツ電子顕微鏡観察用の薄膜部分 (thinner area) が作り込まれている。
- (c) 20K (-253°C) で、薄板に垂直に 175mT の磁場をかけたとき生成されたスキルミオンクラスター。
- (d) (c) の状態で、0.1mA の電流をヒーター線に流し、1.16 秒後に観察されたスキルミオンクラスター。(c) の左側 (低温側) のクラスターが右側 (高温側) に駆動したことが分かる。
- (e) COMSOL ソフトを用いて計算した、0.05mA の電流をヒーター線に流したときの薄板における温度分布。両端 (長さ 2mm) の温度差は 0.003K であった。

次に、ヒーター線の電流を変化させ、試料中に生成した温度勾配を見積もった上で、スキルミオンの駆動速度が温度勾配に対してどのように変化するかを評価しました。その結果、薄板中に生成されたスキルミオンの駆動速度は熱流の増加に伴い、非線形に増加することが分かりました (図 2)。また、スキルミオン

を駆動できる温度勾配の閾値（最小値）はわずか 0.02K/mm であり、この熱流は従来の金属中における磁壁の駆動に必要な熱流の 100 分の 1 程度であることも分かりました。

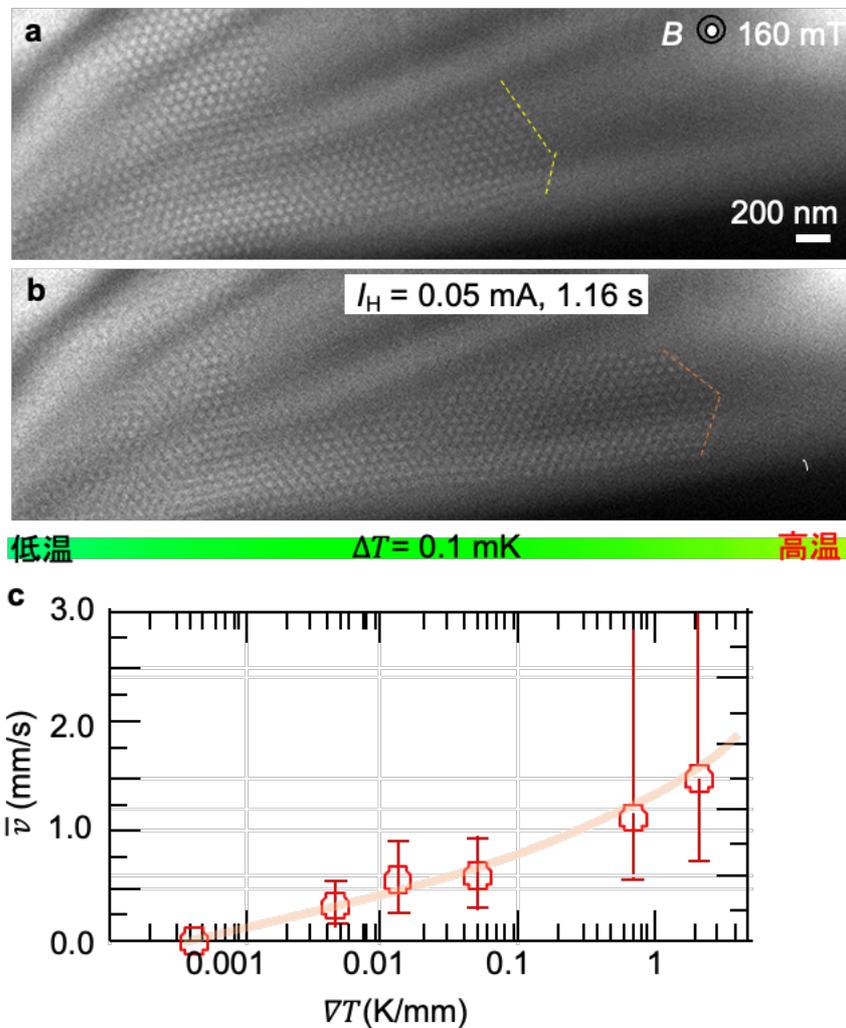


図2 スキルミオン駆動速度の温度勾配依存性

- (a) 20K (-253°C)、薄板に垂直に 160mT の磁場を加えたとき生成されたスキルミオンクラスター。
- (b) (a)の状態、0.05mA の電流をヒーターに流し、1.16 秒後のスキルミオンクラスター。(a)の左側（低温側）のクラスターが右側（高温側）に駆動した。
- (c) 縦軸はスキルミオンの駆動速度、横軸は温度勾配を示す。熱流（温度勾配）の増加に伴い、スキルミオンの駆動速度は非線形に増加している。

最後に、熱流の向きを反転した場合でも、スキルミオンは薄板の低温側から高温側に流れることを示しました（図3）。

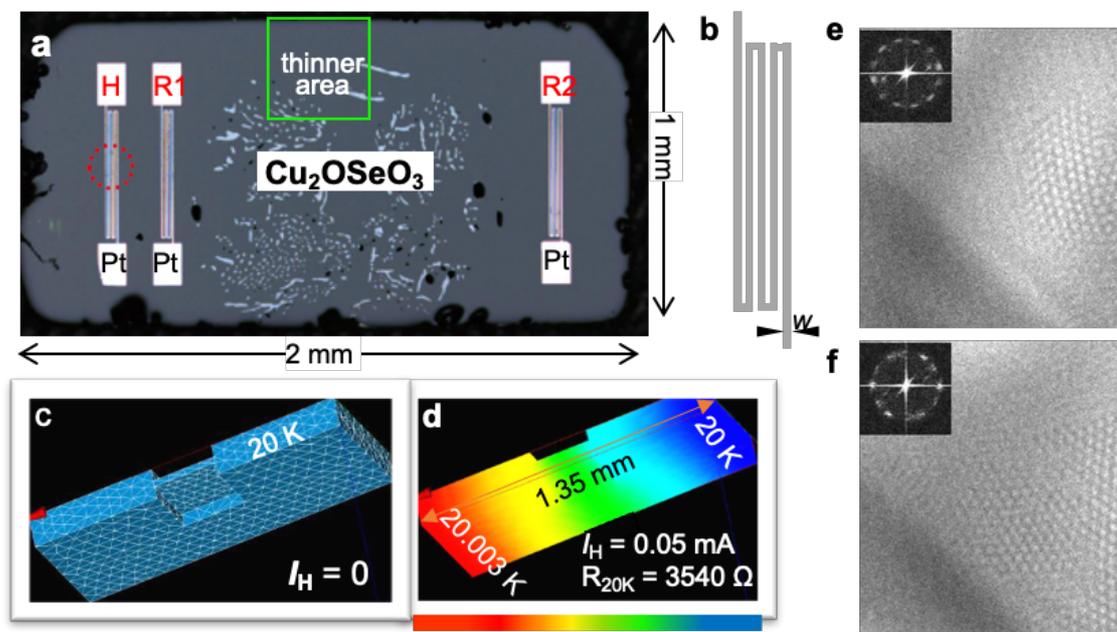


図3 熱流を反転したときのスキルミオン駆動の顕微鏡観察

- (a) 図1(b)とは反対向きに、抵抗線およびヒーター線を付けた Cu_2OSeO_3 の薄板。
- (b) 抵抗線およびヒーター線の拡大図。
- (c) ヒーター線に電流を流す前の薄板の温度分布。薄板全体が 20K (-253°C) である。
- (d) ヒーター線に 0.05mA の電流を流したときの薄板の温度分布。左側が高温、右側が低温になった。
- (e) 20K (-253°C)、45mT の磁場で、薄板中に生成したスキルミオンクラスター。
- (f) (e) の状態で、ヒーター線に 0.1mA の電流を流すと、スキルミオンクラスターは回転しながら薄板の左側（高温側）へ駆動した。

3. 今後の期待

本研究では、ナノメートルサイズのスキルミオンを温度勾配による微小熱流で駆動させることに世界で初めて成功しました。熱流を用いた絶縁体中のスキルミオンの制御は、金属中のスキルミオンの電流制御よりもエネルギー効率を上げる新しい選択肢であり、次世代情報操作技術の開発につながるものと期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Real-space observations of 60-nm skyrmion dynamics in an insulating magnet under low heat flow

<著者名>

Xiuzhen Yu, Fumitaka Kagawa, Shinichiro Seki, Masashi Kubota, Jan Masell, Fehmi S. Yasin, Kiyomi Nakajima, Masao Nakamura, Masashi Kawasaki, Naoto Nagaosa and Yoshinori Tokura

<雑誌>

Nature Communications

<DOI>

10.1038/s41467-021-25291-2

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] 温度勾配

任意の2地点間における温度の変化率のこと。単位は単位距離あたりの温度差であり、本研究では K/mm を使用した。

[3] 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。

[4] 電子スピン

電子は、「スピン」と呼ばれる小さな棒磁石に相当する性質を持つ。通常の磁石(強磁性体)では、自発的にスピンのそろいことで巨視的な磁化が現れる。

[5] 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、磁気渦を特徴付ける「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。

[6] 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。

[7] 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. 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

電子状態マイクロコピー研究チーム

チームリーダー 于 秀珍（う しゅうしん）

動的創発物性研究ユニット

ユニットリーダー 賀川 史敬（かがわ ふみたか）

（東京大学 大学院工学系研究科 准教授）

強相関界面研究グループ

グループディレクター 川崎 雅司（かわさき まさし）

（東京大学 大学院工学系研究科 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）

創発物性科学研究センター

センター長 十倉 好紀（とくら よしのり）

（創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 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）

<機関窓口>

* 今般の新型コロナウイルス感染症対策として、理化学研究所では在宅勤務を実施しておりますので、メールにてお問い合わせ願います。

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