

2025 年 9 月 29 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

三次元磁気スキルミオンひもの非相反性を観測 ～省エネ・創エネデバイス実現への新発見～

【発表のポイント】

- 磁気スキルミオンと呼ばれるナノスケールで実現する磁気渦は、室温でも高い安定性を有し、またその電氣的制御の容易性から革新的省エネ・創エネデバイスへの応用に向けた研究が進められています。
- 三次元的な磁気プロファイルを有する磁気スキルミオンひもにおいて、電流誘起ダイナミクスが非相反性^[注 1]を示すことを世界で初めて観測しました。また、膜面直方向の磁気渦の振れ方（ヘリシティ）が非相反性に強く影響することを明らかにし、かつそれを制御する方法を確立しました。
- 磁気スキルミオンの非相反運動を用いた新たな創エネデバイスの実現に向け、重要な知見となる成果です。

【概要】

ナノメートルスケールにおいて極めて高い安定性を持つと期待されるトポロジカル磁気構造の応用へ向けた研究が進められています。特に近年、二次元的（2D）トポロジカル磁気構造の一種である磁気スキルミオンを膜面直方向に拡張したひものような三次元的（3D）トポロジカル磁気構造が高い安定性や非線形的な励起が期待できることから注目を集めています。しかしながら、そのような三次元的な構造に特有の電流誘起ダイナミクスは、これまで明らかにされていませんでした。

今回、独マインツ大学ヨハネスグーテンベルグ校及び東北大学からなる研究チームは、3D 磁気スキルミオンひも（図 1）の電流誘起ダイナミクスが印加する電流の極性によって異なる振る舞いを示す、非相反性と呼ばれる性質を示すことを世界で初めて発見しました。さらに、その非相反性は、磁気スキルミオンの膜面垂直方向の磁気渦の巻かれ方（ヘリシティ）によって制御できることを実証しました。

3D 磁気スキルミオンひもの非相反運動を用いる新たな省エネ・創エネデバイスの実現に向けた研究開発が進展することが期待されます。

本研究成果は、2025 年 9 月 26 日（英国時間）に出版された科学誌 Nature Communications に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

近年、物性分野において連続変形の過程で保たれる物体のカタチに着目するトポロジー^(注2)と呼ばれる概念が注目されています。磁性体においてトポロジーで記述される微細な磁気構造は、トポロジカル磁気構造と呼ばれ、その代表例として磁気スキルミオンがあります。トポロジカル磁気構造は、それらの有するトポロジカル数によって定義され、異なるトポロジカル数を持つ磁気構造には連続変形によって移り変わることができないため、極めて高い安定性を持つと期待されています。

2009-10 年頃の磁気スキルミオンの実験的観測を契機に、2D 磁気スキルミオンが盛んに研究されてきましたが、近年になって図 1 に示すような、スキルミオンを膜面直方向にひも上に伸ばしたスキルミオン“ひも”に代表される 3D トポロジカル磁気構造がより高い安定性、非線形なダイナミクス励起、情報の高集積化等の観点から、より注目を集めています。しかしながらそのような 3D 構造では、2D 構造と比較して、どのような電流応答が実現されるのか実験的に明らかにされていませんでした。

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、独マインツ大学ヨハネスグーテンベルグ校の Mathias Kläui 教授らからなる共同研究チームは、強磁性層/非磁性/強磁性層の積層構造を何回も積層することで、人工反強磁性結合スキルミオンひもを形成（図 1）し、この課題に取り組みました。人工反強磁性結合したスキルミオンひもでは、上部のスキルミオンと下部のスキルミオンが、逆方向に向いており、それぞれの磁化の強さ（矢印の大きさ）の比を調節することで、磁気渦の巻かれ方を膜面直方向に沿って自在に制御することができます。この特徴を巧みに利用して 3D 磁気構造を制御しながら磁気スキルミオンひもの電流誘起ダイナミクスを詳細に調べました。

図 2 に実験結果と、明らかになった描像をまとめた模式図が示されています。膜面直方向に渦の巻かれ方が変化する 3D 型の磁気スキルミオンひもでは、電流によって動くときに、スキルミオン Hall 角^(注3)が印加された電流の極性によって異なることがわかりました。一方通常の 2D 型スキルミオンでは、従来通り、電流の極性によって運動は変わらないことがわかります。この対照実験により、3D スキルミオンひもでは、電流の極性によって異なるダイナミクスを示す：非相反性という性質を有することが実験的に明らかになりました。また、この非相反性の制御には、膜面直方向に沿って渦の巻かれ方が変化していく 3D 磁気構造が本質的な役割を果たしているという、これまでになかった新しい知見を実験及びシミュレーションから明らかにしました。

今後の展開

今回の成果は、単なる基礎研究にとどまりません。非相反運動はすでにダイオードなどの電子部品で利用されており、「電流を一方向にだけ流す」役割を担っています。スキルミオンのようなトポロジカル磁気構造は、固体中で創発電磁場として振る舞うことが知られており、今回の研究で得られた三次元スキルミオンひもの非相反性を活用すれば、大気中の電磁波エネルギーを変換し、取り出すようなナノスケール・創エネデバイスを実現できる可能性があります。本研究では、三次元スキルミオンひもの内部自由度である磁気渦の振れと非相反な電流誘起ダイナミクスとの関係を明らかにし、その制御を実証しました。一方、三次元トポロジカル磁気構造のダイナミクスは、まだ未解明な部分が多く残されています。今回の成果は、その複雑な動きを理解するための重要な一歩であり、今後はさらに制御精度を高め、実際のデバイス応用へとつなげていくことが期待されます。

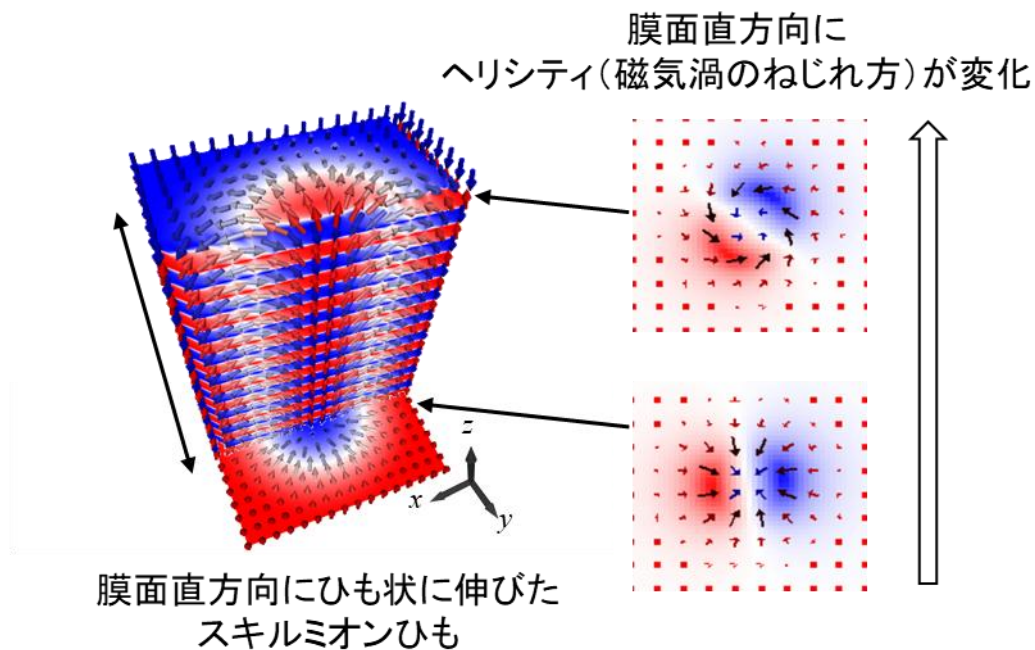
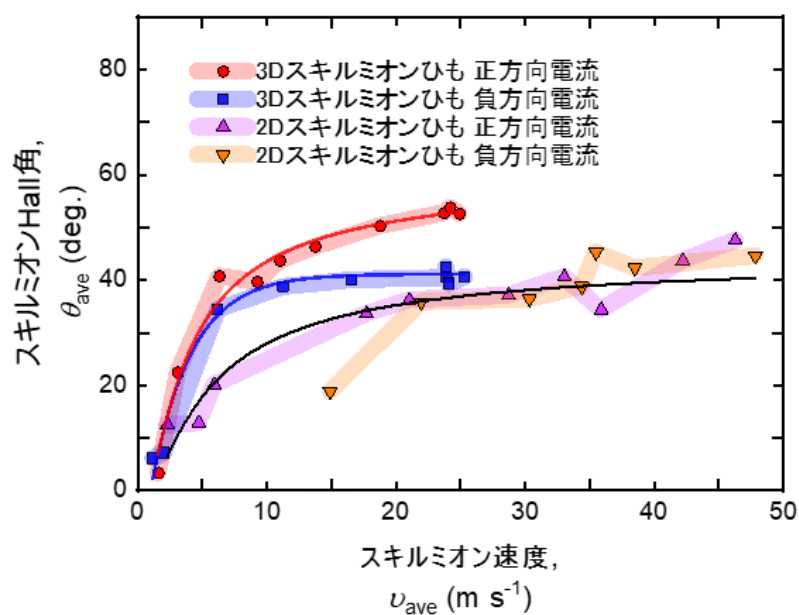


図 1. 人工反強磁性多層膜に形成された反強磁性結合したスキルミオンひも。ヘリシティ（磁気渦のねじれ方）という内部自由度を巧みに利用することで、通常の磁気スキルミオンとは、質的に異なるダイナミクスが期待できる。



3Dスキルミオンひもの 非相反な電流誘起移動

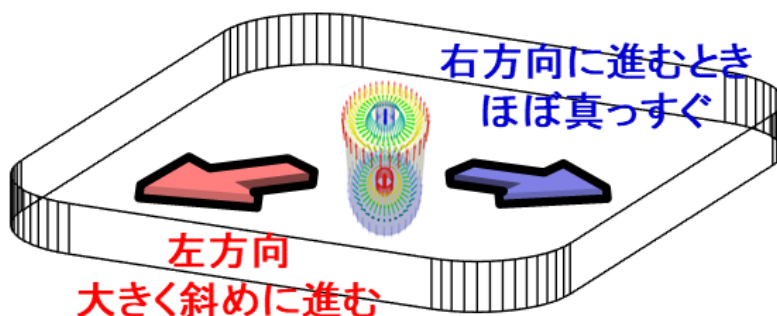


図 2. 3D スキルミオンひもと 2D スキルミオンのスキルミオン Hall 角の電流方向依存性（上）及び非相反運動の概念図（下）。3D スキルミオンひもにおいて、高速で動くケースでは、正方向と負方向に電流を流した際に、スキルミオン Hall 角が有意に異なることがわかる。一方で 2D スキルミオンでは、どちらの極性でもスキルミオン Hall 角にほとんど差が見られない。

【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）等の支援の下で行われたものです。

【用語説明】

注1. 非相反性

「行き」と「戻り」で同じ動きをしない性質。典型的な例である半導体ダイオードは、電流を一方向には通すが、逆向きにはほとんど流さない。でこぼこの坂道にボールを置くと、右には転がるが左には戻りにくいラチェット運動も非相反性の例である。工学的には、この非相反性を巧みに利用することで、整流作用に基づく信号の制御やエネルギー変換などに応用される。現代テクノロジーを支える重要な原理の一つ。

注2. トポロジー

何らかの系のカタチを連続変形の観点から分類する幾何学。良く知られた例としてドーナツとコップの例が挙げられる。ドーナツとコップは同じ穴の数を有しており、連続変形によってお互いに移ることができるが、球のような穴の数が異なる物体には移り変わることができない。ここで、穴の数はトポロジカル数と呼ばれ、この数が異なる系には、移り変わることができないため、ある種の安定性を意味している。磁性体では、磁気モーメント（図1におけるそれぞれの矢印）が球を何回覆うかという指標がトポロジカル数となる。

注3. スキルミオン Hall 効果・スキルミオン Hall 角

印可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。

【論文情報】

タイトル : “Observation of a non-reciprocal skyrmion Hall effect of hybrid chiral skyrmion tubes in synthetic antiferromagnetic multilayers” (人工反強磁性多層膜におけるハイブリッドカイラルスキルミオンひもの非相反スキルミオン Hall 効果の観測)

著者 : Takaaki Dohi*, **, Mona Bhukta*, Fabian Kammerbauer*, Venkata Krishna Bharadwaj, Ricardo Zarzuela**, Aakanksha Sud, Maria-Andromachi Syskaki, Duc Minh Tran, Sebastian Wintz, Markus Weigand, Simone Finizio, Jörg Raabe, Robert Frömter, Jairo Sinova, 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 Communications

DOI: 10.1038/s41467-025-63759-7

URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63759-7>

【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 総務係

TEL: 022-217-5420

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