

2024年2月27日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

様々なトポロジカル磁気構造の作り分けに成功 — 超低消費電力電子素子の実現に一步 —

【発表のポイント】

- トポロジカル磁気構造^(注1,2)と呼ばれる磁気渦は、高い熱安定性が期待され、革新的情報処理技術への応用に向けた研究が進められています。
- 反強磁性^(注3)的に結合したメロン、アンチメロン、バイメロンと呼ばれる新奇なトポロジカル磁気構造^(注2)を実現し、制御する方法を確立しました。
- 反強磁性トポロジカル磁気構造を用いた革新的情報デバイスの実現に向け、重要な知見となる成果です。

【概要】

近年、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^(注1,2)が革新的情報処理技術への応用に向けて研究されています。その代表例に磁気スキルミオン(図1左側)があります。この磁気構造をうまく活用することができれば、従来の電子素子に比べて桁違いに消費電力を下げられると期待されています。

これまでに磁気スキルミオンを超えた第二、第三のトポロジカル磁気構造の実現が相次いで報告されています。しかしながら、どのような材料系で磁気スキルミオン以外の反強磁性トポロジカル磁気構造が安定的に実現できるのか明らかにされていませんでした。

今回、東北大学電気通信研究所の土肥昂堯助教、独マインツ大学の Mathias Kläui(マティアス クラウイ)教授からなる日独共同研究チームは、二枚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体を用いて、磁気スキルミオンとは異なる反強磁性トポロジカル磁気構造の実現を試みました。強磁性層を系統的に変化させながら観測したところ、様々なトポロジカル磁気構造:メロン、アンチメロン、バイメロンを作り分けることに成功しました。

今回得られた知見を土台にして、様々な反強磁性トポロジカル磁気構造を用いる

革新的情報デバイスの実現に向けた研究開発の進展が期待されます。
本研究成果は、2024年2月26日(英国時間)に学術誌 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 1)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^(注 2)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。また特に、それらを反強磁性的に結合した反強磁性スキルミオン(図 1 左側)が超高速動作の観点から応用において非常に有望視されています(東北大学プレスリリース『[ナノの世界で現れる磁気渦の高速直進運動を初めて実現～スピントロニクスを駆使した新たな情報処理・蓄積技術へ～](#)^(注 4)』、『[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立 — 革新的省エネデバイスの実現に期待—](#)^(注 5)』)。

磁気スキルミオンに関しては、これまで数多くの研究報告がある一方で、トポロジカル磁気構造は、他にも多く存在します。例えば、図 1 (右側) に示すような構造は、メロン・アンチメロンと呼ばれ半整数のトポロジカル数を有します。しかしながら、これまで磁気スキルミオン以外の反強磁性トポロジカル磁気構造がどのような材料系において安定的に実現できるのか、またそのヘリシティ(渦の巻かれ方)を制御可能かといったような基礎的な点ですら明らかではありませんでした。

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 (マティアス クラウイ) 教授からなる日独共同研究チームは、二枚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体を用いてスキルミオンとは異なるトポロジカル磁気構造の観測を試みました。今回は、これらのトポロジカル磁気構造を正確に同定するために、3 つの観測手法が用いられました、まず X-線を用いた観測手法によって準備した磁性多層膜が反強磁性結合をしていることを確認した後、三次元的なスピンの方向を明らかにするために、スピン偏極電子顕微鏡及び磁気力顕微鏡の二つの手法を用いて詳細に磁気構造を観察しました。図 2 に実験結果と、明らかになった構造が示されています。三手法それぞれの観測結果を組み合わせることによって実際に反強磁性メロン・アンチメロン、更には、それらの構造が結合したバイメロン構造も実現していることが明らかになりました。

これ加えて図 3 に示す通り、上部の磁化の強さと下部の磁化の強さを変えることによって渦の巻かれ方(ヘリシティ)を制御できることを実証しました。これは、磁性層の組み合わせを適切に選択することによって所望の反強磁性トポロジカル構造が実現

できるということを意味しています。

更に、我々の構造を適切に表す理論モデルを構築することによって、これらの磁気構造に重要な因子を明らかにすることを試みました。図 4 には、新たに構築されたモデル計算による磁気構造の相図を示しています。一般的に、トポロジカル磁気構造を安定させるためには、磁性層の捩れの強さを表すジャロシンスキー守谷相互作用 (DMI) が大きいことが要求されます。興味深いことに、今回我々が用いた人工反強磁性系では、磁性層間の強い結合が、トポロジカル磁気構造を安定させるために必要な DMI を著しく下げることが示されました。これは、人工反強磁性系が反強磁性トポロジカル磁気構造の実現する上で、優れた系であるということを意味しています。

今後の展開

これまでどのような材料系で磁気スキルミオン以外の反強磁性トポロジカル磁気構造が安定的に実現できるのか明らかにされていませんでした。本研究では、人工反強磁性体で反強磁性メロン、アンチメロン、バイメロンを実現し、そのヘリシティ制御を実証しました。今後は、これらの構造の電氣的制御をいかに実現するかが、革新的情報デバイスの実現に向け重要となると考えられます。

反強磁性スキルミオン 反強磁性メロン・アンチメロン



図 1. 反強磁性スキルミオンと反強磁性メロン・アンチメロンのスピン構造。矢印がスピンの方向を示している。スキルミオンでは、中心で上(下)向きスピンを持ち、外側に行くにつれそのスピンの向きが回転し、最も外側の部分では下(上)向きスピン(180度回転)を示す。一方でメロンとアンチメロンでは、中心でのスピンの向きは、スキルミオンと同じだが、最も外側では、90度回転したスピンで終端される。また本研究で用いた人工反強磁性系では、上下の磁性層がお互い逆方向に結合し、“反”強磁性構造を形成する。

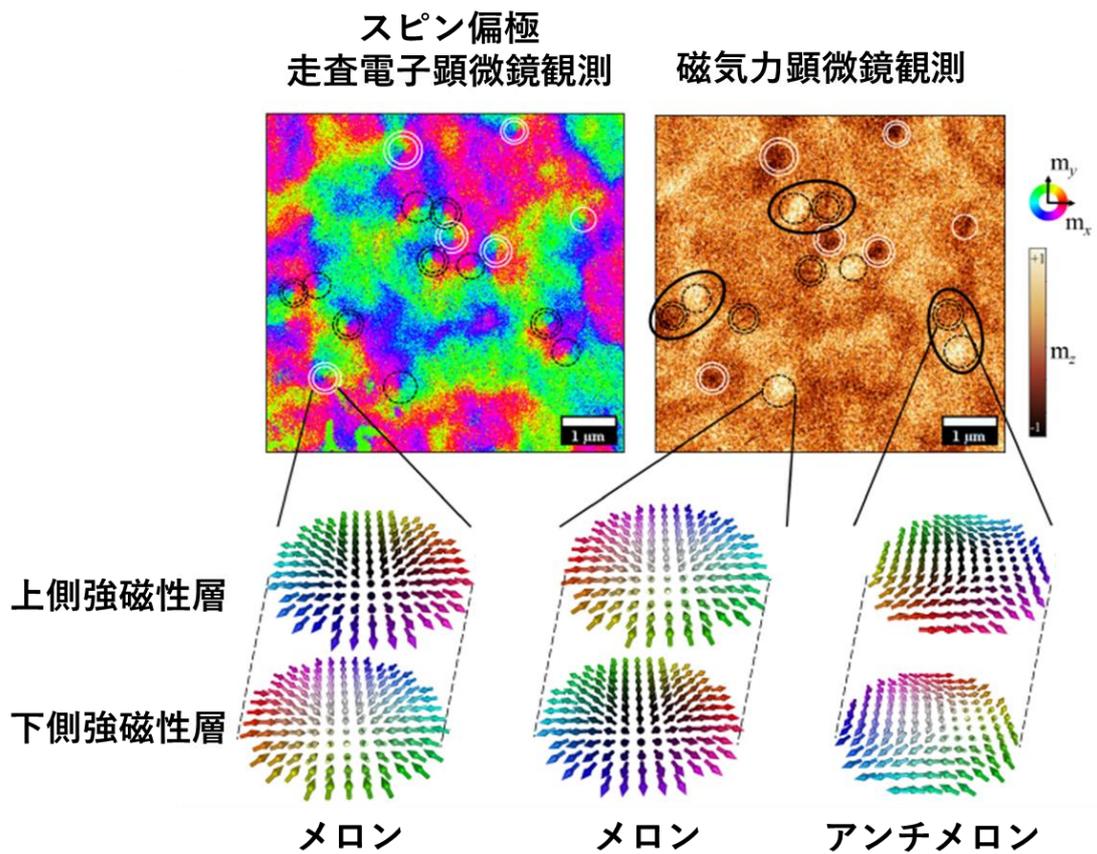
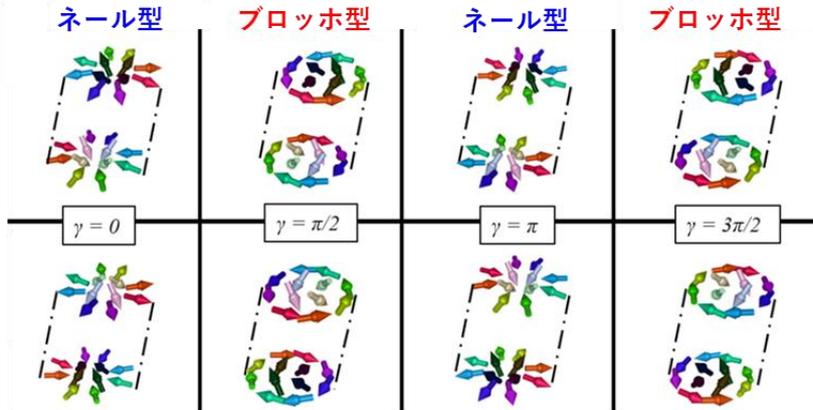
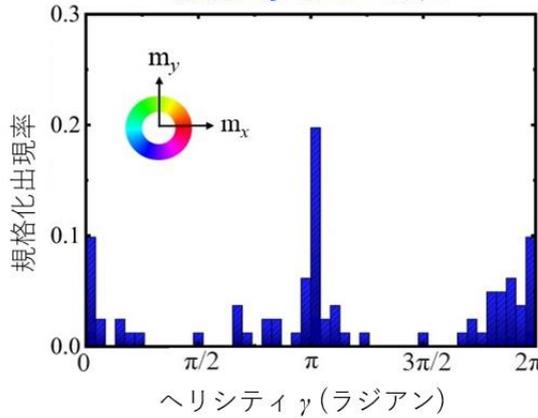


図 2. 異なる二つの測定手法によって明らかにされた磁性層の磁気構造。左側の手法では、横方向スピンの向きを、右側の手法では、中心が上向きか下向きかを同定することができる。これらの組み合わせによって対応するトポジカル磁気構造が実験的に明らかになった。下図にはそれぞれ観測されたメロン、アンチメロンの模式図を示している。また右図では、それらが結合したバイメロン構造(右図:太丸)も実現していることが明らかになった。

ヘリシティ: γ の違い
(渦の巻かれ方)



上下の磁石の強さが
ほぼ等しい場合



上下の磁石の強さが
大きく異なる場合

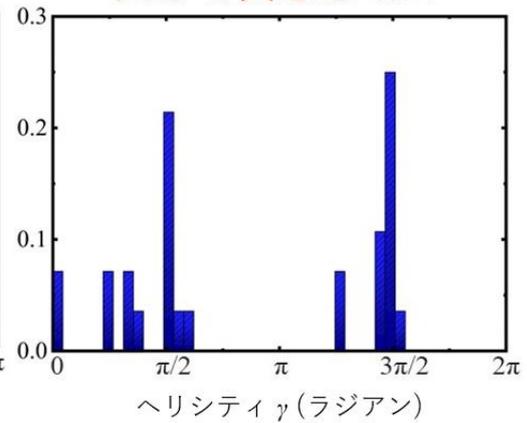


図 3. メロン・アンチメロンは、渦の巻かれ方(ヘリシティ)の違いによってブロッホ型かネール型に分類される(上図)。上下の磁石の強さを変えながら観測された磁気構造を統計的に処理した結果、上下の磁石の強さが等しくなるにつれ、ネール型が安定になり(左図)、大きさが大きく異なると、ブロッホ型が安定する(右図)ことが明らかになった。

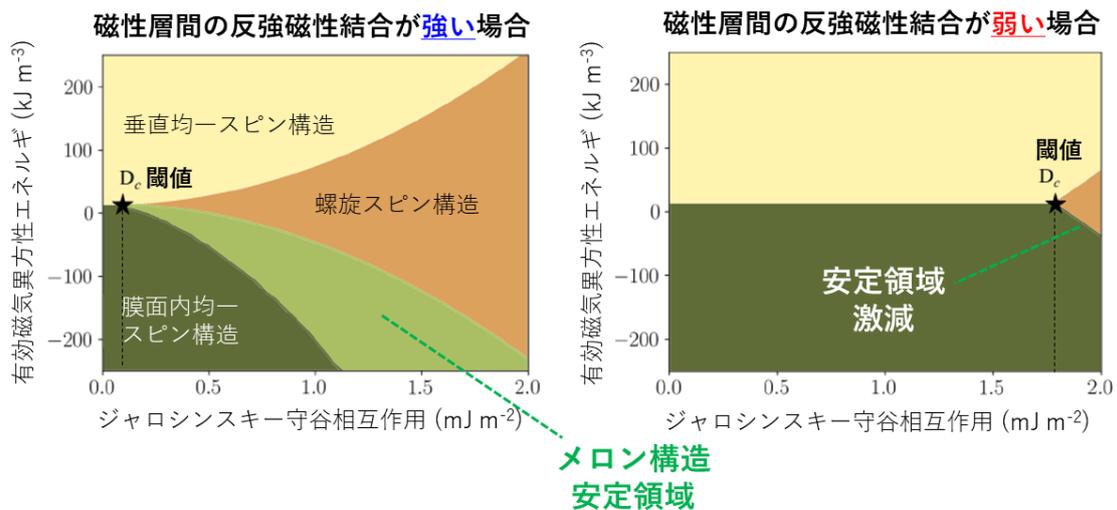


図 4. 理論モデルによってどのような条件でメロン構造が安定になるか示した計算結果。横軸は、磁性層の振れの強さであるジャロシンスキー守谷相互作用、縦軸は磁気的な異方性の強さを表している。磁性層間の反強磁性結合が強い場合（左図）、広い範囲でメロン構造が安定になることが示されている一方、層間の結合が弱い場合（右図）、メロン構造が安定することが難しいことがわかる。閾値 D_c は、今回使用した膜の異方性エネルギーに対応してメロン構造を安定させるために、要求される最小の振れの強さを表している。

【謝辞】

本研究はヨーロッパキヤノン財団、日本学術振興会科学研究費助成事業 (JP23K13655) などの支援の下で行われたものです。

【用語説明】

注1. 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ジカル数となる。

注2. トポジカル磁気構造(メロン、アンチメロン、バイメロン)

トポジカル数が有限なものをトポジカル磁気構造と呼ぶ。代表例と

して良く知られた磁気スキルミオンはトポロジカル数が1をとるのに対し、メロンは $\pm 1/2$ 、アンチメロンは $\mp 1/2$ という値をもつ。バイメロンは、メロンもしくはアンチメロンが結合することにより、再び1となる。メロンの英語表記は、フルーツの melon ではなく、meron であり、ギリシャ語で“部分”、“分数”の意味を持つ“μερος”にちなんで名付けられた。

注3. 反強磁性

隣り合う磁気スピンのそれぞれ反対方向を向いて整列し、全体として磁気モーメントを持たない磁性。強磁性体と接合することで強磁性体の磁気的な性質を大きく変化させる。

注4. 東北大学 2019 年 11 月 15 日プレスリリース

『ナノの世界で現れる磁気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>

注5. 東北大学 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 立 — 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>

【論文情報】

タイトル : “Homochiral antiferromagnetic merons, antimerons and bimerons realized in synthetic antiferromagnets”

著者 : Mona Bhukta, *Takaaki Dohi, Venkata Krishna Bharadwaj, Ricardo Zarzuela, Maria-Andromachi Syskaki, Michael Foerster, Miguel Angel Niño, Jairo Sinova, *Robert Frömter, and *Mathias Kläui

*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 : <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45375-z>

URL: <http://www.akermanlab.com/>, <http://www.spin.riec.tohoku.ac.jp/>

【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