

PRESS RELEASE

理化学研究所
 東京大学
 科学技術振興機構 (JST)
 ニューサウスウェールズ大学

散逸的な磁壁運動による創発電場の発生

—磁壁の電流駆動における「摩擦」が生む巨大応答—

概要

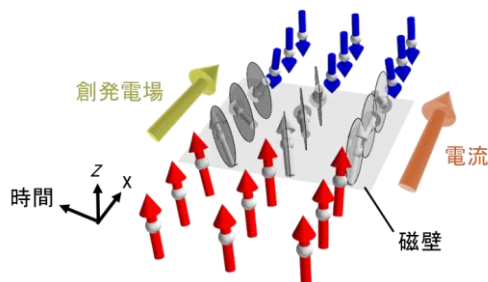
理化学研究所 (理研) 創発物性科学研究センタートポロジカル量子物質研究ユニットの山田林介客員研究員 (東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻助教)、マックス・ヒルシュベルガーユニットリーダー (東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻准教授)、創発機能設計研究ユニットの奥村駿ユニットリーダー (東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター特任准教授)、強相関量子構造研究グループの中島多朗客員研究員 (東京大学物性研究所附属中性子科学研究施設准教授)、強相関量子伝導研究チームの十倉好紀チームディレクター (東京大学卓越教授/東京大学国際高等研究所東京カレッジ)、ニューサウスウェールズ大学物理学科のオレグ・トレチャコフ准教授らの国際共同研究グループは、磁壁^[1]の散逸的な運動^[2]によって現れる創発電場^[3]の観測に成功しました。

本研究成果は、磁壁駆動を活用したスピントロニクス^[4]デバイスや古典的なコイルに対応する極小サイズのインダクタの応用研究への貢献が期待されます。

国際共同研究グループは、磁気力顕微鏡測定^[5]と呼ばれる手法を用いて、磁気ドメイン^[6]およびその境界に現れる磁壁の空間分布を観測し、マイクロメートル (μm 、 $1\mu\text{m}$ は 100 万分の 1 メートル) サイズのデバイスに振動電流を加えることで磁壁を動かしました。

複素インピーダンス測定^[7]という手法を用いて、磁壁の振動運動によって生じる量子力学的な創発電場の観測に成功し、磁壁運動に伴う「摩擦」がその発現に重要な役割を持つことを明らかにしました。

本研究は、科学雑誌『*Nature Physics*』オンライン版 (1 月 15 日付: 日本時間 1 月 15 日) に掲載されました。



電流によって駆動される磁壁 (灰色部分) の運動と創発電場の発生

背景

磁性体の中で電子スピン^[1]の向きが切り替わる境界である磁壁は、外部磁場や電流によって動かすことができます（図 1）。磁壁の運動に伴って、量子力学的な効果により電子に影響を与える「仮想的な」電場が生じることが知られており、これを「創発電場」と呼びます。

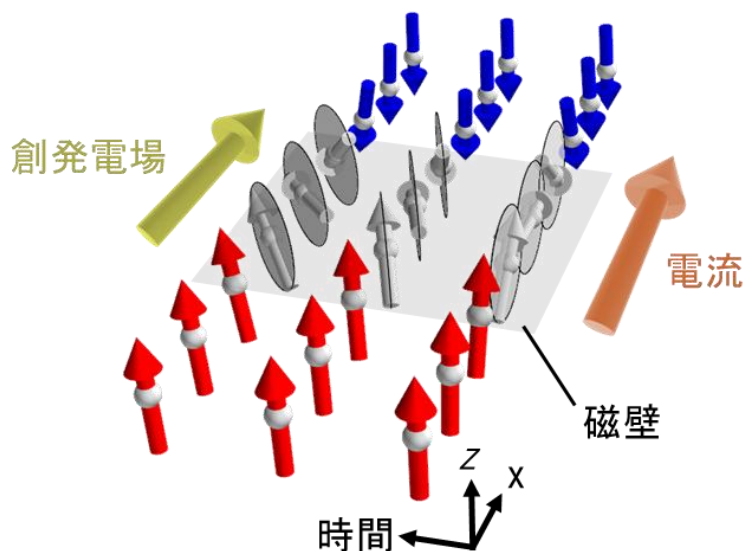


図 1 電流によって駆動される磁壁の運動

電子スピンの上向き磁気ドメイン（赤色）と下向き磁気ドメイン（青色）の境界に、電子スピンの面内成分を持つ領域である磁壁（灰色）が現れる。電流（オレンジ色）を流すと、磁壁における電子スピンの向きが動的に変化し、仮想的な電場である創発電場（黄色）が生じる。

この創発電場は、通常の電場や磁場とは異なり、スピンの空間的・時間的にどのように変化しているかに応じて現れる量子力学的な効果です。磁壁のようなスピン構造が動的に変化すると、電子がその中を移動する際に創発電場の影響を受け、異常な輸送現象や新しい電気応答が引き起こされます。

近年、スキルミオン（固体中の電子スピンの形成する渦状の磁気構造体）やらせん磁性体などで創発電場の観測が報告されてきました^{注1, 2)}。特に、交流電流は磁気構造の周期的な運動を生み出し、その結果として入力電流に対して位相ずれを伴った創発電場が発生することが知られています^{注3)}。

磁気ドメインの境界に生じる磁壁は、これらの磁気構造よりも一般的に多くの磁気材料において現れ、室温以上でも観測されており、メモリーなどへの応用が期待されています^{注4)}。しかしながら、磁壁の動的な運動に伴って生じる創発電場の性質には未解明な点が多く残されています。特に、磁壁の運動がどのように創発電場を生み出し、電子輸送特性にどう影響するのかを明らかにすることは、基礎物理の視点からも、スピントロニクス素子の高効率化という応用面からも重要な課題となっています。

- 注 1) T. Schulz *et al.*, Emergent electrodynamics of skyrmions in a chiral magnet, *Nature Physics* **8**, 301-304 (2012).
 注 2) T. Yokouchi *et al.*, Emergent electromagnetic induction in a helical-spin magnet, *Nature* **586**, 232-236 (2020).
 注 3) N. Nagaosa, Emergent inductor by spiral magnets, *Japanese Journal of Applied Physics* **58**, 120909 (2019).
 注 4) S. Parkin & S.-H. Yang, Memory on the racetrack, *Nature Nanotechnology* **10**, 195-198 (2015).

研究手法と成果

国際共同研究グループは、磁壁駆動による創発電場の検出に向けて、磁性ワイル半金属^[9]「NdAlSi (Nd: ネオジウム、Al: アルミニウム、Si: シリコン)」に着目しました。磁性ワイル半金属ではシンプルなバンド構造が現れるとともに、磁気スピンと電荷が強く結合しており、創発電場の物理を探索する上で理想的な物質プラットフォームとなっています。

本研究で対象とした磁性ワイル半金属 NdAlSi では、Nd 原子が磁性を担い、磁気モーメントが結晶の *c* 軸方向に対して「上-上-下」もしくは「下-下-上」と整列するようなフェリ磁性^[10]が現れることが知られており、この磁気構造を研究用原子炉 JRR-3 における中性子散乱によって確かめました (図 2a)。

このようなフェリ磁性体では、磁場がゼロの場合には、磁気モーメントの総和が上向きの磁気ドメイン (領域) と下向きの磁気ドメインが共存し、それらの境界として磁壁が形成されます (それぞれ図 2a における赤色、青色、灰色の領域)。磁気力顕微鏡測定を用いて、これらの磁気ドメインおよび磁壁の空間分布を調べました。その結果、磁気ドメインは 0.5~数マイクロメートル程度の大きさであり、その境界にストライプ状の磁壁が存在することが明らかになりました (図 2b)。

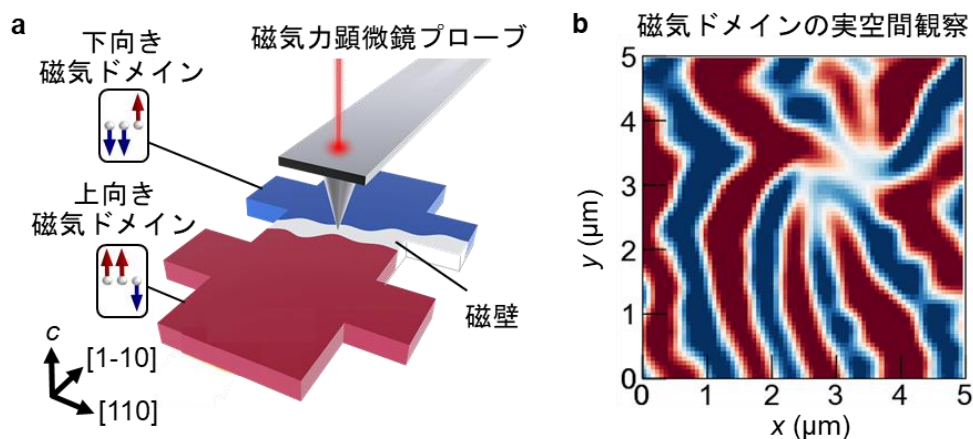


図 2 磁気力顕微鏡を用いた磁気ドメインおよびその境界に現れる磁壁の実空間観察

(a) 磁気力顕微鏡を用いた磁気ドメインの実空間観察の概念図。小さな磁性を帯びたチップ (磁気力顕微鏡プローブ) で試料全体をスキャンすることで、上向き/下向きの磁気ドメインの配置およびその境界に現れる磁壁の空間分布を測定できる。(b) フェリ磁性体 NdAlSi における磁気ドメインの実空間観察像。

続いて、電流に対する磁壁のダイナミクスが輸送特性へ与える影響を調べるために、集束イオンビーム^[11]を使用してマイクロメートルサイズのデバイスを作製しました (図 3)。このデバイスでは、高い電流密度を加えることで磁壁を電流駆動することが可能です。

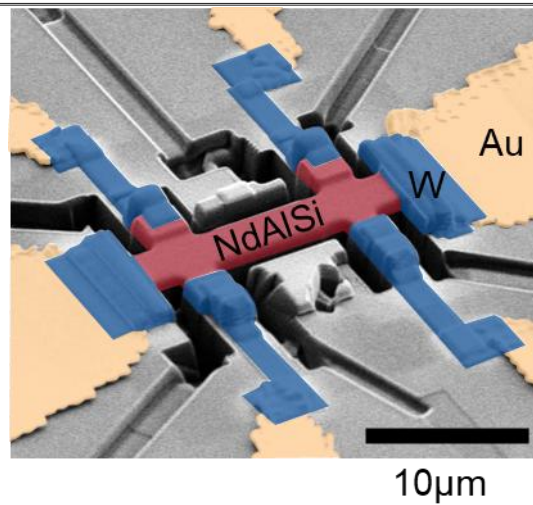


図3 輸送測定に用いたデバイスの電子顕微鏡写真

集束イオンビームを使用して NdAlSi の大きな結晶から切り出されたマイクロメートルスケールのデバイス（赤色）において輸送測定を行った。

磁壁駆動によって誘起される創発電場を観測するため、NdAlSi のデバイスに対する複素インピーダンス測定を磁場中で行いました。NdAlSi では 0.2 テスラ（T：磁束密度の単位）程度の磁場をかけると、試料全体が上向きもしくは下向きの磁気ドメインとなり、磁壁が消失します（図 4a）。

創発電場は入力電流に対応して振動する電圧として現れ、複素インピーダンス虚部^[7]として検出されます。この複素インピーダンス虚部は、磁壁が現れる 0.2T 以下においてのみ増大しており、この検出結果は、磁壁駆動による創発電場の観測に成功したことを示しています（図 4b）。さらに、複素インピーダンス虚部の符号が負になっていることを考慮して、数値計算の結果と照らし合わせた結果、NdAlSi の磁壁駆動における創発電場の発現には、散逸を伴う磁壁運動の「摩擦」が重要な役割を果たすことを明らかにしました。

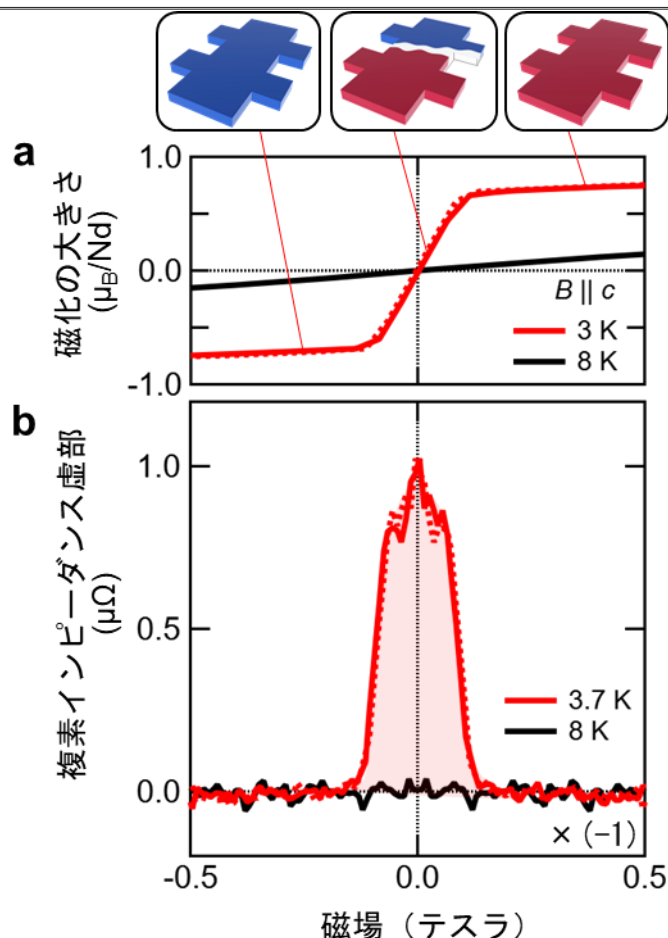


図4 複素インピーダンス測定を用いた磁壁駆動による創発電場の検出

(a) NdAlSiにおける磁化の大きさの磁場依存性。磁気転移温度以下において、磁場が正の場合には試料全体が上向きの磁気ドメインになり、負の場合には下向きの磁気ドメインとなる。一方で、磁場がゼロの付近では二つの磁気ドメインが共存し、その境界に磁壁が現れる。(b) 複素インピーダンス測定を用いた創発電場の検出。磁場がゼロの付近であり磁壁が存在する低温においてのみ、複素インピーダンス虚部が増大することから、電流によって磁壁が駆動される際に大きな創発電場が生じることが明らかになった。ここで、縦軸を-1倍しており、負の値が観測されている。 μ_B はボーア (Bohr) 磁子、 $B \parallel c$ は磁場 (B) が結晶軸 (c 軸) と平行にかかっていることをそれぞれ示す。Kは絶対温度の単位ケルビンを表し、 $\mu\Omega$ (マイクロオーム) は複素インピーダンスの単位オームの100万分の1に対応する。

今後の期待

本研究により、磁壁の散逸的な運動が創発電場を生み出すことを実証しました。今後は、この仕組みを活用することで、電流による効率的なスピン操作や低消費電力のスピン트로ニクス素子の開発が期待されます。さらに、創発電場を基盤とした新しい量子輸送現象の探索や、古典的なコイルに対応する極小サイズのインダクタなど次世代の量子デバイスへの応用にもつながる可能性があります。

論文情報

<タイトル>

Emergent electric field induced by dissipative sliding dynamics of domain walls in a Weyl magnet

<著者名>

Rinsuke Yamada, Daichi Kurebayashi, Yukako Fujishiro, Shun Okumura, Daisuke Nakamura, Fehmi S. Yasin, Taro Nakajima, Tomoyuki Yokouchi, Akiko Kikkawa, Yasujiro Taguchi, Yoshinori Tokura, Oleg A. Tretiakov, and Max Hirschberger

<雑誌>

Nature Physics

<DOI>

10.1038/s41567-025-03124-z

補足説明

[1] 磁壁

電子スピン ([8]参照) が上向きと下向きの磁気ドメイン ([6]参照) の境界に現れる構造。電子スピンの方向が連続的に変化する領域であり、その運動は電子輸送や創発電場 ([3]参照) の発生に直結する。

[2] 散逸的な運動

摩擦や抵抗によってエネルギーが失われる運動。今回の研究では、磁壁の散逸的な運動が大きな創発電場を生み出す要因となった。

[3] 創発電場

スピン構造の動的変化に伴って電子に影響を与える「仮想的な電場」。通常の電場とは異なり、電子の量子力学的な位相に起因する。

[4] スピントロニクス

電子の電荷だけでなくスピンの自由度を活用する研究分野。低消費電力デバイスや新しい量子機能の開拓につながる。

[5] 磁気力顕微鏡測定

試料表面の磁気分布をナノスケールで観察できる顕微鏡技術を用いた測定手法。磁壁や磁気ドメイン構造の直接観察に利用される。

[6] 磁気ドメイン

物質中で電子スピンが同じ方向にそろった領域。磁壁によって区切られ、磁気ドメインの大きさや分布は磁性体の特性に影響を与える。

[7] 複素インピーダンス測定、複素インピーダンス虚部

交流電流に対する物質の応答を、実部（抵抗成分）と虚部（位相差成分）で解析する手法。特に複素インピーダンス虚部を用いることで、高感度に創発電場を検出するこ

とが可能となる。

[8] 電子スピン

電子が持つ小さな磁石のような性質。上向き・下向きの2種類があり、磁性やスピントロニクス基礎となる。

[9] ワイル半金属

電子が「ワイル粒子」と呼ばれる質量のない準粒子として振る舞う特異な量子物質。電気伝導や磁気特性において通常の金属とは異なる性質を示し、新しい電子デバイスやスピントロニクス応用が期待されている。

[10] フェリ磁性

異なる種類の磁気モーメントが部分的に打ち消し合いながらも、全体として有限の磁化を持つ磁性。NdAlSiはこの性質を示す。この性質を示す物体をフェリ磁性体という。

[11] 集束イオンビーム

イオンを集束して試料を微細加工する技術。今回の研究ではNdAlSiからマイクロメートルサイズの測定デバイスを作製するのに用いられた。

国際共同研究グループ

理化学研究所 創発物性科学研究センター

トポロジカル量子物質研究ユニット

客員研究員

(東京大学 大学院工学系研究科

ユニットリーダー

山田林介

(ヤマダ・リンスケ)

物理工学専攻 助教)

マックス・ヒルシュベルガー

(Max Hirschberger)

(東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 准教授)

極限量子固体物性理研 ECL 研究ユニット

理研 ECL 研究ユニットリーダー

藤代有絵子

(フジシロ・ユカコ)

創発機能設計研究ユニット

ユニットリーダー

奥村 駿

(オクムラ・シュン)

(東京大学 大学院工学系研究科

特任准教授)

附属量子相エレクトロニクス研究センター

強相関物質研究グループ

上級研究員

中村大輔

(ナカムラ・ダイスケ)

上級技師

吉川明子

(キッカワ・アキコ)

グループディレクター

田口康二郎

(タグチ・ヤスジロウ)

電子状態マイクロコピー研究チーム

客員研究員

フェミ・ヤシン (Fehmi S. Yasin)

強相関量子構造研究グループ

客員研究員

中島多朗

(ナカジマ・タロウ)

(東京大学 物性研究所 附属中性子科学研究施設 准教授、

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 客員准教授)

創発量子スピントロニクス研究ユニット

ユニットリーダー	横内智行	(ヨコウチ・トモユキ)
強相関量子伝導研究チーム		
チームディレクター	十倉好紀	(トクラ・ヨシノリ)
(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)		

ニューサウスウェールズ大学 (オーストラリア)	物理学科
助教 (研究当時)	紅林大地 (クレバヤシ・ダイチ)
准教授	オレグ・トレチャコフ (Oleg A. Tretiakov)

研究支援

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業基盤研究 (S) 「磁性伝導体における新しい創発電磁誘導 (研究代表者: 十倉好紀、JP23H05431)」、同新学術領域研究 (研究領域提案型) 「Anisotropic electron gas and memory application from spin-spiral formation (研究代表者: マックス・ヒルシュベルガー、JP22H04463)」、同研究活動スタート支援「実空間と波数空間の創発磁場を用いた新奇量子輸送現象の探索 (研究代表者: 山田林介、JP22K20348)」、同若手研究「極性ワイル半金属における非線形ホール効果 (研究代表者: 山田林介、JP23K13057)」「強相関材料の電荷秩序揺らぎによる熱電応答の探索 (研究代表者: 山田林介、JP25K17336)」「物質中の磁気単極子が示す非平衡電磁気現象の微視的理論 (研究代表者: 奥村駿、JP22K13998)」、同基盤研究 (B) 「強相関電子系におけるトポロジカル非線形機能の開拓 (研究代表者: 森本高裕、JP23K25816)」、同学術変革領域研究 (A) 「Exploration of spin textures via emergent inductance measurements in the ultra-quantum limit (研究代表者: マックス・ヒルシュベルガー、JP24H01607)」「量子極限における擬一次元強相関ディラック電子による新奇量子相の探索 (研究代表者: 山田林介、JP24H01604)」、科学技術振興機構 (JST) 創発的研究支援事業「中心対称な金属におけるメロン・スキルミオン構造の開拓 Pioneering meron and skyrmion textures in centrosymmetric metals (研究代表者: マックス・ヒルシュベルガー、JPMJFR2238)」、同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、JPMJCR1874)」「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、JPMJCR20T1)」、同戦略的創造研究推進事業さきがけ「スピン空間群に基づく格子偶数整合 p 波磁性体の開拓 (研究代表者: 山田林介、JPMJPR259A)」「超高压を用いた強相関電子系の量子相制御と開拓 (研究代表者: 藤代有絵子、JPMJPR2597)」「ディラックの弦の自在な制御による量子機能設計 (研究代表者: 奥村駿、JPMJPR2595)」、同先端国際共同研究推進事業 ASPIRE 「電荷秩序を用いたトポロジカル物質の磁気機能開拓 (研究代表者: マックス・ヒルシュベルガー、JPMJAP2426)」、藤森科学技術振興財団、新素材・情報材料研究財団、村田学術振興財団、みずほ学術振興財団、山田科学振興財団、服部報公会、池谷科学技術振興財団、マツダ財団、カシオ科学振興財団、高柳健次郎財団、稲盛財団、日本材料科学技術振興財団、八洲環境技術財団、矢崎科学技術振興記念財団、ENEOS 東燃ゼネラル研究奨励・奨学会、ドイツ研究振興協会「Transregio TRR 360 – 492547816」、オーストラリア研究評議会「研究代表者: オレグ・トレチャコフ、DP200101027、DP240101062」による助成を受けて行われました。

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

トポロジカル量子物質研究ユニット

客員研究員 山田林介 (ヤマダ・リンスケ)

(東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 助教)

ユニットリーダー マックス・ヒルシュベルガー

(Max Hirschberger)

(東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 准教授)

創発機能設計研究ユニット

ユニットリーダー 奥村 駿 (オクムラ・シュン)

(東京大学 大学院工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター)

特任准教授)

強相関量子構造研究グループ

客員研究員 中島多朗 (ナカジマ・タロウ)

(東京大学 物性研究所 附属中性子科学研究施設 准教授)

強相関量子伝導研究チーム

チームディレクター 十倉好紀 (トクラ・ヨシノリ)

(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)

ニューサウスウェールズ大学 (オーストラリア) 物理学科

准教授 オレグ・トレチャコフ (Oleg A. Tretiakov)

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 創発的研究推進部

加藤 豪 (カトウ ゴウ)

<機関窓口>

理化学研究所 広報部 報道担当

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

東京大学 物性研究所 広報室

科学技術振興機構 広報課

ニューサウスウェールズ大学 Media and Communications team
