



東北大学

RIEC



平成 27 年 12 月 11 日

報道機関 各位

東北大学 電気通信研究所
東北大学 省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター
東北大学 国際集積エレクトロニクス研究開発センター
東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)

ミクロな磁気構造のゆっくりした変化に統一的理解

～弾性界面のクリープ運動の統計物理、高性能磁気メモリ素子の開発に光～

<概要>

国立大学法人東北大学（総長：里見進／以下、東北大学）電気通信研究所の大野英男教授（同大学省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンター（以下、CSIS）・センター長、国際集積エレクトロニクス研究開発センター（以下、CIES）・教授、原子分子材料科学高等研究機構・主任研究者兼任）、CSISの深見俊輔准教授（CIES・准教授兼任）らのグループは、金属性の磁石からなる細線の内部に形成されたミクロな磁気構造が外部からの駆動力によってゆっくりと変化するクリープ運動を詳細に調べ、駆動力の種類（磁場、電流）とその物理的な作用のしかたに関して統一的な理解をもたらしました。これまでの研究では半導体材料においては磁場と電流は異なるかたちで作用することが確認されていたのに対して、金属材料ではこれらは同じように作用することが報告されていました。今回の研究によって、試料がある条件を満たしたときには材料の細かな性質には依存せずに電流は磁場とは異なるかたちで磁気構造に影響を及ぼすことが分かりました。近年電流を用いて磁気構造を操作する高性能磁気メモリ素子の開発が活発に行われていますが、本

研究はこのようなデバイス応用を実現するための基礎的な理解も大いに促進するものと期待されます。本研究成果は、英国科学誌「Nature Physics（ネイチャー・フィジクス）」のオンライン版（日本時間12月15日出版）に掲載されます。

<背景と課題>

我々の身の回りには、領域と領域の境界部分（界面）が形状を変形させながらじわじわと一方向に移動していく現象が多く見られます。これらはクリープ運動と言われ、液体の浸透、バクテリアコロニーの成長、金属や高分子材料の塑性変形、地底プレートの運動など形態は様々ですが、これらにおける界面の運動速度はいずれも駆動力のべき乗で表されるスケーリング則で記述できることが知られています。この「べき」の値はスケーリング指数と呼ばれ、界面の次元、駆動力の対称性、系と界面の相互作用の様式のみによって決まります。そして現象が同一のスケーリング指数で記述できる場合、それらの間には「普遍性」があると言うことができます。上述のような界面のクリープ運動における普遍性の研究は、巨視的な観測結果が微視的な世界の相互作用を反映したものであることから、統計力学における非常に興味深い問題です。

磁石の内部はN極/S極の磁化方向が揃った「磁区」と呼ばれる領域に分かれており、それらの境界にはナノメートルスケールで磁化の方向が緩やかに変化する「磁壁」が形成されています。磁壁の位置は磁場や電流によって移動させられることが知られており、近年ではこれを利用した高性能な磁気メモリデバイスの開発が活発に行われています。また最近の研究から微弱な磁場や電流を印加した場合には、磁壁はスケーリング則で記述できるクリープ運動をすることが分かっていたのですが、その普遍性に関して統一的な理解は得られていませんでした。具体的には、強磁性半導体からなる細線においては磁壁が電流と磁場で駆動された場合で異なる普遍性クラスに属するのに対し、強磁性金属からなる細線においては同一の普遍性クラスに属することが実験で示されていました。

<研究手法と成果>

本研究では強磁性金属材料である CoFeB からなる細線を用い、磁場及び電流によって誘起されるクリープ運動の普遍性クラスを調べました (図 1)。用いた試料の膜構成は、基板側から Ta(0.5nm)/ CoFeB(1.2 nm)/ MgO(1.5 nm)/ Ta(1 nm)となっており、CoFeB と MgO の間で形成される特殊な電子状態により、磁化は基板垂直方向に向くように設計されています。試料をリソグラフィーでマイクロメートルスケールの細線に加工し、磁気光学効果^(注1) を利用した顕微鏡により、磁場・電流によって誘起される磁壁の移動を観察しました (図 2)。

試料を様々な温度に保った状態で、磁場及び電流の大きさを変えて磁壁移動速度を測定し、その関係からスケーリング指数を求めたところ、磁場・電流それぞれの場合で温度や細線幅などには依存しない《普遍的な》スケーリング指数が得られました (図 3)。興味深いことに、従来の強磁性金属材料で得られていた結果とは異なり、今回用いた金属製の試料では磁場と電流の場合で異なる普遍性クラスに属することが分かりました。これは磁場と電流では磁壁に対する働き方が本質的に異なっていることを意味しています。また磁場で駆動されたクリープ運動は、これまでに理論的に知られていた普遍性クラスに属するのに対し、電流の場合には既存の理論では説明されない普遍性クラスに属し、このときのスケーリング指数は以前強磁性半導体において観測されていたものと近い値となりました。電流を印加した際の磁壁の振る舞いを詳細に調べた結果、磁場とは対称性の異なる断熱スピントルク^(注2) が磁壁に作用していることが分かりました。すなわち、断熱スピントルクが支配的に働くように膜構成が設計された試料においては、材料の性質(金属か半導体か、その微視的な構造がどうであるか、など)には依存しない普遍的な磁壁クリープ特性が実現されることが明らかになりました。

<研究成果の意義>

本研究で得られた成果は、基礎物理、デバイス応用の両面で意義を有しています。基礎物理の観点では、磁場と電流の磁気構造への作用のしかたに本質的な差異があり、こ

れが試料の材質や微視的な構造には依存しない普遍的なものであることが明らかになったという点が挙げられます。また形状が可変な弾性界面のクリープ運動に関する一般的な理解がより一層深まりました。これは第二種高温超伝導体中の磁束の運動などを理解する上でも重要な知見をもたらすことが期待されます。

デバイス応用上の意義としては、磁壁移動デバイスの実現のための有用な知見が得られたという点が挙げられます。これまでの研究から、磁壁を断熱スピントルクで駆動させた場合には、駆動に必要な電流は磁壁位置の熱安定性^(注3)とは独立に決まることが示されており、応用上好ましい特性が得られることが分かっていました。今回の研究から、断熱スピントルクを有効に作用させるための材料の設計指針が明確になり、これにより現在行われているデバイス開発をより一層発展させられることが期待されます。

本成果は、文部科学省『未来社会実現のための ICT 基盤技術の研究開発』採択課題：「耐災害性に優れた安心・安全社会のためのスピントロニクス材料・デバイス基盤技術の研究開発（研究代表者：大野英男）」、及び内閣府・革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「無充電で長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現（PM:佐橋政司）採択課題「スピントロニクス集積回路を用いた分散型 IT システム（研究開発責任者：大野英男）」の支援により得られたものです。

<参考図>

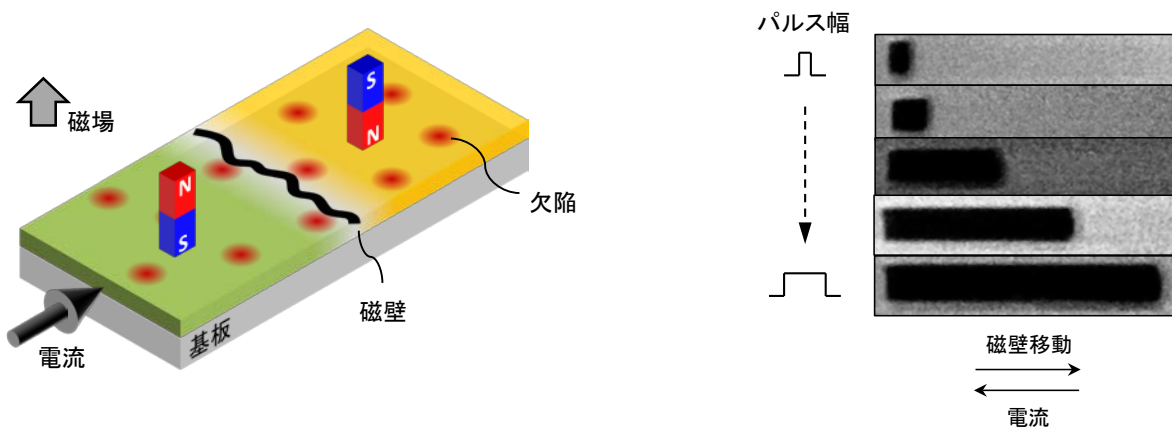


図 2：実験に用いた試料の模式図。磁化方向の異なる 2 つの磁石（磁区）の境界に形成される磁壁が試料中の欠陥に拘束されながら電流や磁場によってじわじわと一方方向に移動する（クリープ運動する）。

図 2：電流による磁気構造の変化の観察結果の例。磁気光学効果を利用した顕微鏡により磁壁の動いた領域を可視化。上から順に電流パルスの幅を長くしている。パルス幅の増加に伴い、磁壁の移動距離が長くなっている。

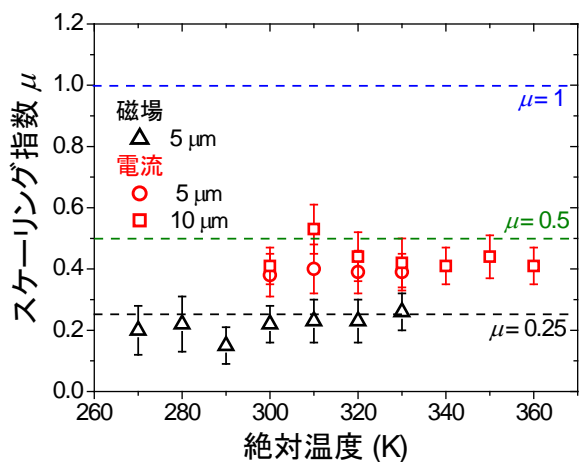


図 3：磁場・電流で駆動した場合の磁壁クリープのスケール指数の素子温度依存性。電流でのクリープは細線幅が 5 μm のものと 10 μm の 2 つの試料で行った。温度や細線幅によらず一定のスケール指数が得られており、普遍性クラスに属していることが分かる。横方向の破線は理論的に知られているスケール指数。

<用語解説>

(注 1) 磁気光学効果

物質の磁化状態や物質に印加されている磁場によって、透過光や反射光の偏光状態が変化する現象。今回の場合、試料に直線偏光した光を入射し、反射光の偏光面の回転方向が垂直方向の磁化成分によって変わることを利用し、磁区構造を観察している。

(注 2) 断熱スピントルク

スピン偏極した伝導電子の角運動量が、自発磁化のもととなる軌道角運動量に断熱的に受け渡されることで磁化に働くトルク。非断熱的に受け渡される場合には、スピンの方向に磁場が印加された場合と同じようなトルクが磁化に及ぼされるのに対し、断熱的に受け渡される場合にはそれに直交する方向にトルクが働く。

(注 3) 熱安定性

熱擾乱下においてどれだけ状態を安定に保持できるかを表す指標。磁気メモリ素子は情報の保持に電力を要さない不揮発性を有することが特徴であり、熱安定性が大きい系では高い不揮発性が実現される。

【論文情報】

S. DuttaGupta, S. Fukami, C. Zhang, H. Sato, M. Yamanouchi, F. Matsukura, and H. Ohno
 “Adiabatic spin-transfer-torque-induced domain wall creep in a magnetic metal,” Nature Physics,
 DOI: 10.1038/NPHYS3593 (2015).

(お問い合わせ先)

- 研究に関すること
 東北大学 省エネルギー・スピントロクス集積化システムセンター
 准教授 深見 俊輔
 電話番号：022-217-5555
 Eメール：s-fukami@csis.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
 電話番号：022-217-5420
 Eメール：somu@riec.tohoku.ac.jp