

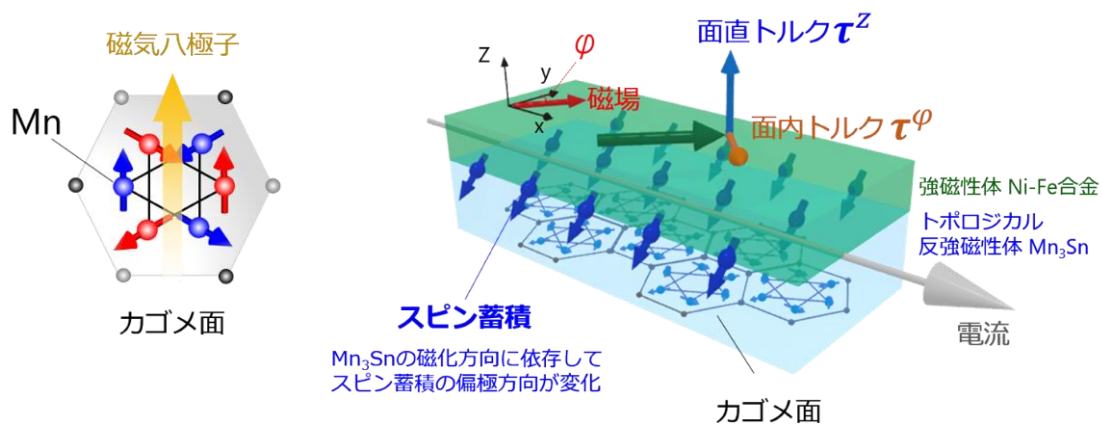
面直スピンの有効磁場の発現 — 垂直磁化膜の高効率な磁化反転へ —

理化学研究所（理研）創発物性科学研究センター量子ナノ磁性チームの近藤浩太上級研究員、大谷義近チームリーダー（東京大学物性研究所教授）、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻の中辻知教授、肥後友也特任准教授、東京大学物性研究所の富田崇弘特任助教らの国際共同研究グループ^{*}は、トポロジカル反強磁性体^[1]Mn₃Sn（Mn：マンガン、Sn：スズ）単結晶薄体の表面に蓄積する面直スピン（面直スピン蓄積）を用いて、有効磁場（フィールドライクトルク^[2]：FLトルク）を発現させることに成功しました。

本研究成果により、今後、トポロジカル磁性材料をスピントルク^[2]源として利用することで、高速かつ省電力のスピントロニクス^[3]デバイスの設計開発が可能になると期待できます。

今回、国際共同研究グループは、トポロジカル反強磁性体 Mn₃Sn 単結晶薄体と強磁性体薄膜からなるスピントロニクス素子を作製し、Mn₃Sn 表面のスピンの蓄積に由来するスピントルクを調べました。その結果、これまで理論的に予言されていた面直スピン蓄積が磁場のように（フィールドライクに）働くことを明らかにしました。さらに、それによって生じる FL トルクは白金などの遷移金属よりも数倍大きいことが分かりました。

本研究は、科学雑誌『Nature Communications』オンライン版（11月18日付：日本時間11月18日）に掲載されます。



トポロジカル反強磁性体 Mn₃Sn における電流によるスピン蓄積

※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

量子ナノ磁性研究チーム

上級研究員

近藤 浩太 (こんどう こうた)

チームリーダー

大谷 義近 (おおたに よしちか)

(東京大学物性研究所 教授)

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻

教授

中辻 知 (なかつじ さとる)

特任准教授

肥後 友也 (ひご ともや)

東京大学物性研究所

特任助教

富田 崇弘 (とみた たかひろ)

テキサス大学 オースティン校

教授

アラン・マクドナルド (Allan H. MacDonald)

コロラド大学

Assistant Professor

フア・チェン (Hua Chen)

研究支援

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 チーム研究 (CREST) 「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出 (研究総括: 上田正仁)」研究領域における研究課題「電子構造のトポロジを利用した機能性磁性材料の開発とデバイス創製 (研究代表: 中辻知)」および同未来社会創造事業「トリリオンセンサ時代の超高度情報処理を実現する革新的デバイス技術 (研究代表: 中辻知)」における研究課題「スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成」による支援を受けて行われました。

1. 背景

常磁性重金属と強磁性金属の二層デバイスに電流を流すと、常磁性重金属のスピホール効果^[4]によって界面にスピが蓄積します。この電流によるスピ蓄積効果は隣接する磁性体にトルク (回転させる力) を与え、磁化方向を制御性良く反転できることから、スピントロニクスデバイスの駆動原理として重要な現象の一つとなっています。

これまでの研究では、白金などのスピ軌道相互作用^[5]の強い遷移金属におけるスピホール効果や、トポロジカル絶縁体^[6]などの特殊な表面状態を用いたエデルシュタイン効果^[7]を利用することで、電流による磁化制御が実証されてきました。また、より省電力な磁化制御を実現するため、高効率な電流-スピ変換現象を目指した検証実験が続けられています。

一方、このような従来のスピホール効果では、原理的に界面に蓄積するスピの向き (偏極方向) は、膜面内に固定されています。このため、応用上重要な垂直磁化膜における磁化反転には最適ではないことも知られていました。

そこで、国際共同研究グループは近年発見された「トポロジカル反強磁性体」におけるスピホール効果に着目しました。同グループではこれまでに、この材料におけるスピホール効果は従来とは異なり、トポロジカル反強磁性体の微

小磁化方向（磁気八極子^[8]の向き）を変えることで、表面に蓄積するスピンの偏極方向を制御できる「磁気スピンホール効果^[4]」であることを明らかにしています。さらに、スピン蓄積が面直方向に偏極することも理論的に予測しています。今回の実験では、この面直スピン蓄積に注目し、隣接する磁性体にどのようなトルクを与えるのか実験的に明らかにしました。

2. 研究手法と成果

国際共同研究グループは、トポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn (Mn: マンガン、Sn: スズ) 単結晶を、集束イオンビームを用いてマイクロメートルサイズの薄体加工し、その上に強磁性体 NiFe 合金 (Ni: ニッケル、Fe: 鉄) を成膜したスピントロニクス素子を作製しました (図 1a, b)。このトポロジカル反強磁性体を特徴づける磁気八極子の向きは小さな外部磁場を用いて回転できるため、外部磁場の印加方向に対応して変化するスピンの偏極方向を詳細に調べることができます。

この素子の面内方向に電流を流すと、磁気スピンホール効果によって Mn_3Sn 表面にスピンが蓄積し、隣接する強磁性体の磁化にトルクを作用させます。このトルクの大きさは、スピントルク強磁性共鳴法^[9]により測定することができます。そこで、 Mn_3Sn の磁気八極子の向きが異なる条件で、スピントルク強磁性共鳴実験を行いました。その結果、 Mn_3Sn に直流電流を流すと、磁気八極子の向きに依存して面直方向の有効磁場（フィールドライクトルク: FL トルク）が発現することが分かりました (図 1c, d)。これは、表面に蓄積したスピンのように働き、さらに Mn_3Sn の磁化反転によって、面直スピン成分が反転したことを示しています。

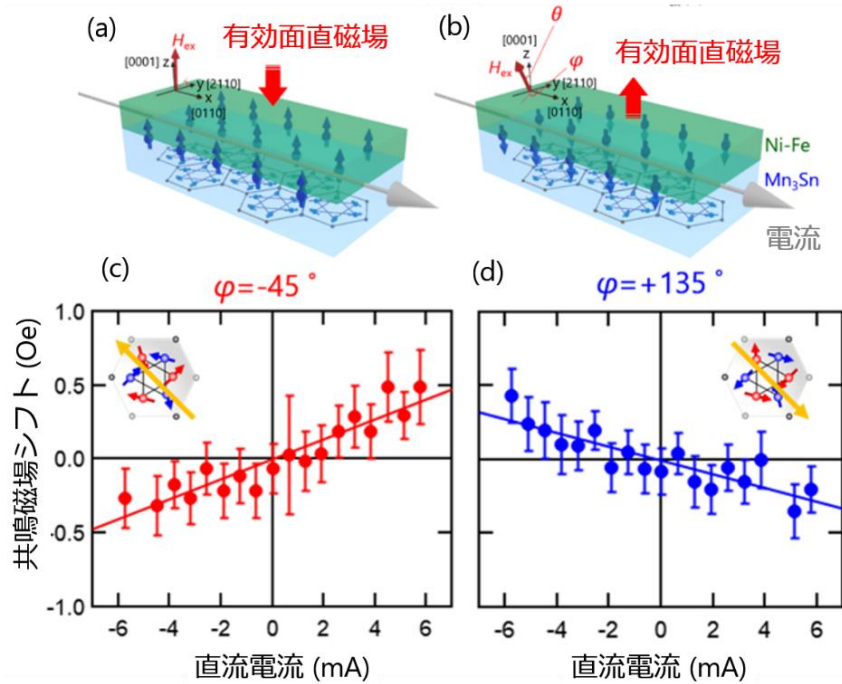


図1 Mn₃Snの磁化方向に依存したスピン蓄積と有効面直磁場

(a, b) 面内磁場角度 -45 度と $+135$ 度におけるスピン蓄積の面直成分。

(c, d) 直流電流による有効磁場の検出。磁気八極子の向きが反転することで、有効磁場が反転する。

また、スピントルク強磁性共鳴スペクトルの面内磁場角度依存性と理論モデルを比較したところ、面直スピンによるFLトルクと同程度の大きさで、面内に偏極したスピン（面内スピン）によるスピントランスファートルク^[2]（STトルク）も共存していることが分かりました。このことから、Mn₃Snの磁気八極子の向きを面内で回転させると、表面に蓄積するスピンの偏極方向が、面直上向きから下向きへと変化していることが明らかになりました（図2）。そして、これらのトルクが従来の白金などの遷移金属を用いた場合よりも5~9倍程度大きくなることも分かりました。

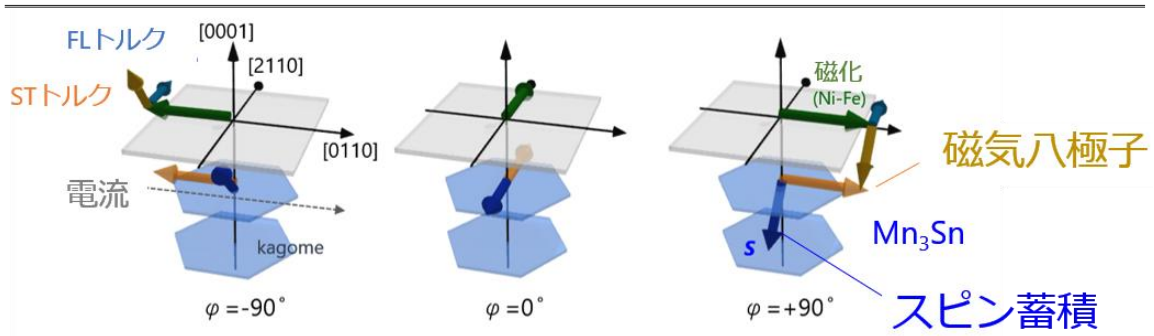


図2 磁気八極子の角度に応じたスピンの蓄積方向とそれによるスピントルクの変化

今回の試料では、面内方向の外部磁場によって Mn_3Sn と強磁性体 (Ni-Fe: 面内磁化膜) の磁化がともに反転するため、スピントランスファートルク (ST トルク) とフィールドライクトルク (FL トルク) による面内トルクが相殺されている。独立に磁化制御することで、より効率的な面内トルクが働くことが期待される。また、垂直磁化膜の場合には、面直方向のトルクが相殺されないことから、強磁性層の磁化に効率的にトルクが与えられる。さらに面直スピンによる FL トルクによって、より高速な磁化反転も期待される。

3. 今後の期待

本成果により、トポロジカル反強磁性体が、磁性材料の磁化方向を制御するために用いられるスピントルク源として有用な材料であることが示されました。今後、スピントロニクスデバイスにおいて、トポロジカル磁性材料を用いることで、高速かつ省電力スピントロニクスデバイスの実現に向けた研究が発展するものと期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Giant field-like torque by the out-of-plane magnetic spin Hall effect in a topological antiferromagnet

<著者名>

K. Kondou*, H. Chen, T. Tomita, M. Ikhlas, T. Higo, A. H. MacDonald, S. Nakatsuji, and Y. Otani

<雑誌>

Nature Communications

<DOI>

10.1038/s41467-021-26453-y

5. 補足説明

[1] トポロジカル反強磁性体

近年発見されたトポロジカル反強磁性体 Mn_3X ($X=Sn, Ge$) では、Mn 原子が三角格子（カゴメ格子）上に並び、それぞれのスピンは 120 度ずつ傾きながら配置している。そのため、正味の磁化は非常に小さい反強磁性体となる。しかし、特殊な電子状態を運動量空間に持つことから、反強磁性体にもかかわらず、異常ホール効果やネルンスト効果などの強磁性体で見られるような巨視的な応答が現れることが分かっている。この特長は、近年、超高速駆動を目指す反強磁性スピントロニクスを研究する上で非常に有用であると考えられている。

[2] フィールドライクトルク、スピントルク、スピントランスファートルク

物質表面に蓄積したスピンは、隣接した磁性体の磁化方向を制御するためのトルク（スピントルク）を与えることができる。このスピントルクには、スピン角運動量を受けわたすスピントランスファートルクとスピンの有効磁場として働くフィールドライクトルクの2通りが存在する。これらのトルクを効率的に生成し、組み合わせることによって、高効率かつ高速な磁化制御が可能になる。

[3] スピントロニクス

電子の電荷の性質を利用したエレクトロニクスの概念を拡張し、電子の持つ電荷とスピンの両方の性質を利用する電子工学分野。次世代の省電力・不揮発性の電子素子の動作原理を提供すると期待されている。

[4] スピンホール効果、磁気スピンホール効果

白金などのスピン軌道相互作用の強い遷移金属中では、電流とスピン流の相互変換を引き起こすことができる。この変換現象は、加えた電流と直交方向にスピン流が生成することから、スピンホール効果と呼ばれており、この効果によって生成するスピンの偏極方向は電流と常に直交方向になる。一方、近年発見された磁気スピンホール効果では、磁性材料の磁化方向に依存して、生成するスピンの偏極方向が変化する。これにより従来よりも高効率な磁化制御が期待される。

[5] スピン軌道相互作用

物質中で、電子の運動と電子のスピンの運動を結びつける相互作用で、スピンの情報を緩和させる原因になる。一方、スピン軌道相互作用の強い遷移金属中では、電流-スピン流の相互変換であるスピンホール効果の起源となるため、スピントロニクス機能を発現させるために重要な相互作用と考えられている。

[6] トポロジカル絶縁体

物質内部が絶縁体にもかかわらず、物質表面だけは金属であるという性質を持つ新しい材料。この表面では、電子の運動方向に依存して電子スピンの偏極方向が決まるスピン-運動量ロックという状態を発現することから、高効率なスピン流の生成・検出が可能となる。

[7] エデルシュタイン効果

空間反転対称性が破れた物質では、スピン軌道相互作用によってスピン-運動量ロッキング状態が発現する。ここに電流を流すことでスピン蓄積が生じる現象。

[8] 磁気八極子

Mn_3Sn の磁化方向は、二つのカゴメ格子に配置された六つのスピンを一つのユニットとして考えたクラスター磁気八極子の向きとして捉えることができる。この向きは、 Mn_3Sn のワイル点や仮想磁場の向きに対応するパラメータであることから、磁気八極子の向きを制御することで、異常ホール効果などの符号を反転させることが可能となる。今回の Mn_3Sn における磁気スピンホール効果は、磁気八極子の向きに依存したスピン蓄積効果といえる。

[9] スピントルク強磁性共鳴法

強磁性金属/常磁性重金属などの多層膜構造において、常磁性重金属中での電流-スピン流変換現象を観測する手法。常磁性重金属におけるスピンホール効果やエデルシュタイン効果によって生成したスピンは、強磁性金属/常磁性重金属界面に蓄積する。このスピン蓄積は、隣接する強磁性体の磁化にスピントルクを与えることのできるため、強磁性体共鳴スペクトルを解析することで、トルクの大さを定量評価できる。

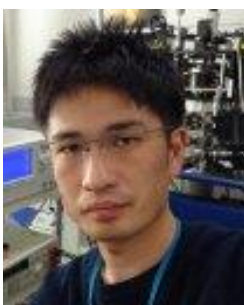
6. 発表者・機関窓口

<発表者>

理化学研究所 創発物性科学研究センター

量子ナノ磁性研究チーム

上級研究員 近藤 浩太 (こんどう こうた)
 チームリーダー 大谷 義近 (おおたに よしちか)
 (東京大学物性研究所 教授)



近藤 浩太



大谷 義近

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻
 教授 中辻 知 (なかつじ さとる)
 特任准教授 肥後 友也 (ひご ともや)
 東京大学物性研究所
 特任助教 富田 崇弘 (とみた たかひろ)

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当
E-mail : ex-press[at]riken.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室
TEL : 03-5841-8856
E-mail : kouhou.s[at]gs.mail.u-tokyo.ac.jp

東京大学物性研究所 広報室
TEL : 04-7136-3207
E-mail : press[at]jissp.u-tokyo.ac.jp

科学技術振興機構 広報課
TEL : 03-5214-8404 FAX : 03-5214-8432
E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ
嶋林 ゆう子 (しまばやし ゆうこ)
TEL : 03-3512-3531 FAX : 03-3222-2066
E-mail : crest[at]jst.go.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。
