

トポロジカル反強磁性体におけるスピン蓄積による面直有効磁場の発現

— 垂直磁化膜の高効率な磁化反転へ —

理化学研究所量子ナノ磁性研究チーム 近藤 浩太
東京大学物性研究所 大谷 義近

はじめに

スピン軌道相互作用の強い常磁性重金属に電流を印加すると、スピンホール効果によって電流と直交方向にスピンの流れが生成します。そのため、常磁性重金属と強磁性金属を接合させた二層膜に界面に沿って電流を流すと、常磁性重金属のスピンホール効果によって界面にスピンの蓄積し、隣接する磁性体には、トルク(回転力)が作用します。このトルクはスピントルクと呼ばれ、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、白金などのスピン軌道相互作用の強い遷移金属におけるスピンホール効果や、トポロジカル絶縁体のスピン分裂した表面状態を利用した“エデルシュタイン効果”による電流誘起の磁化制御が実証されてきました。そして、現在も、より省電力な磁化制御を実現するため、高効率な電流-スピン変換現象の探索・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ンホール効果やエデルシュタイン効果では、対称性の観点から界面に蓄積するスピンの向き(スピン偏極方向)が、膜面内に固定されています。このため、不揮発性磁気メモリなどの応用上重要な垂直磁気異方性を有する薄膜(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、我々はこれらの問題を解決すべく、近年発見されたトポロジカル反強磁性体における磁気スピンホール効果に着目しました。我々は最近、このトポロジカル反強磁性体では、新奇なスピンホール効果である磁気スピンホール効果が発現するこ

とを明らかにしました[1]。この材料における、磁気スピンホール効果は、トポロジカル反強磁性体の微小磁化の方向(磁気八極子の向き)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ます。さらに、時間反転対称性の破れに起因した面直方向に偏極したスピンの蓄積が理論的に予測されています(図1[1])。そこで、本研究では、この新たなスピンホール効果に由来するスピン蓄積が、隣接する強磁性体にどのようなスピントルクを与えるのかを実験的に明らかにすることを目的に研究を行いました。

1. 研究方法および結果[2]

本研究では、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)を成膜した素子を作製しました(図2)。このトポロジカル反強磁性体の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。

この素子の界面に沿って電流を流すと、磁気スピンホール効果によって Mn_3Sn 表面にスピンの蓄積し、隣接する強磁性体の磁化にトルクが作用します。このトルクの大きさは、スピントルク強磁性共鳴法により測定することができ

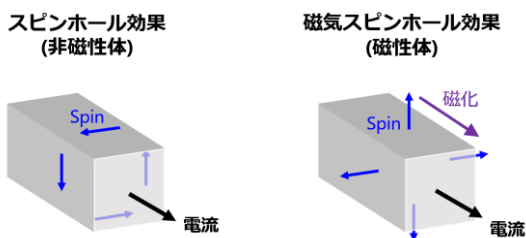


図1| スピンホール効果と磁気スピンホール効果

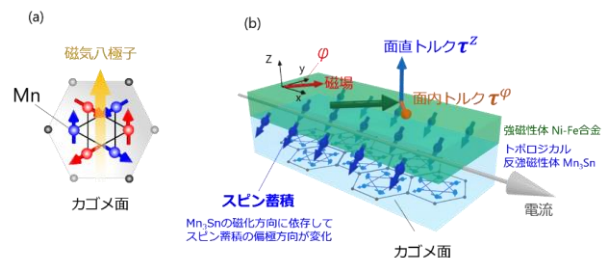


図2| トポロジカル反強磁性体 Mn_3Sn における電流によるスピン蓄積(a) Mn_3Sn における磁気八極子 小さな磁場で磁化方向の制御が可能[3] (b) Mn_3Sn 単結晶/NiFe 二層デバイス Mn_3Sn に流れる電流によるスピン蓄積が強磁性体(NiFe)に与えるトルクを計測

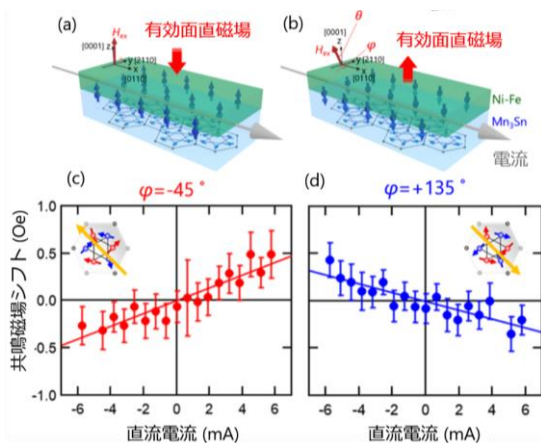


図 3| Mn_3Sn の磁化方向に依存したスピンの蓄積と有効面直磁場 (a, b) 面内磁場角度 -45 度と $+135$ 度におけるスピンの蓄積の面直成分 (c, d) 直流電流による有効磁場の検出。磁気八極子の向きが反転することで、有効磁場が反転する。

ます。そこで、まず、面直方向に偏極したスピンの有無を調べるため、 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、面直方向に発現する有効磁場により、強磁性層にフィールドライク(Field-like: FL)トルクが作用することが分かりました(図 3)。さらに、磁気八極子の向きを反転させると、その有効磁場が反転することも明らかにしました(図 3(c)(d))。以上の実験結果は、界面に蓄積したスピンの隣接する強磁性体に対して磁場のように作用し、さらに Mn_3Sn の磁化反転によって、蓄積するスピンの面直成分が反転したことを示しています。

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(Spin transfer: ST)トルクも共存していることが分かりました。これらの結果から、 Mn_3Sn の磁気八極子の向きをカゴメ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 4)。さらに興味深いことに、これらのトルクは従来の白金などの遷移金属を用いた場合よりも数倍以上大きくなります。

2. まとめと将来展望

本研究では、近年発見された磁気スピンホール効果に由来するスピントルクを詳細に計測しました。その結果、面直成分を有するスピン蓄積が生成し、大きな有効磁場として隣接する強磁性層に作用することを実験的に明らかにし

ました。これらの研究成果は、トポロジカル反強磁性体をスピン源として用いることで、応用上重要な垂直磁気異性を有する強磁性体の高効率な磁化反転の実現や、従来よりも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ことが期待されます。

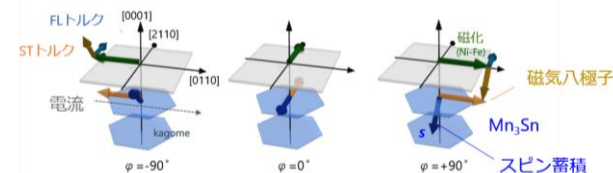


図 4| 磁気八極子の角度に応じたスピンの蓄積方向とそれによるスピントルクの変化

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ができれば、より効率的な面内トルクが働くことが予想される。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、効率的にトルクが与えられ、より高速な磁化反転が期待される。

謝辞

本研究成果は、東京大学 大学院理学系研究科物理学専攻：中辻 知 教授、肥後 友也 特任准教授、東京大学 物性研究所 富田 崇弘 特任助教、Muhammad Ikhlas 氏、Hua Chen コロラド大学 Assistant Professor、Allan H. MacDonald テキサス大学オースティン校 教授との共同研究によるものです。本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST (JPMJCR18T3) 未来社会創造事業 (JPMJMI20A1)、文部科学省科学研究費助成事業 (19H05629, 19H02586, 19H00650)の一環として行われました。

- [1] M. Kimata *et al.*, Nature **565**, 627 (2019).
- [2] K. Kondou, H. Chen, T. Tomita, M. Ikhlas, T. Higo, A. H. MacDonald, S. Nakatsuji, and Y. Otani, Nat Commun **12**, 6491 (2021).
- [3] S. Nakatsuji, N. Kiyohara, and T. Higo, Nature **527**, 212 (2015).