

2020年5月28日

慶應義塾大学
科学技術振興機構（JST）

音波を用いた磁気回転効果の発見 —磁気回転効果のスピンデバイス応用に道を拓く—

慶應義塾大学大学院理工学研究科の栗宗勇貴（当時修士課程2年）と理工学部 of 能崎幸雄教授、中国科学院大学カブリ理論科学研究所の松尾衛准教授は、磁石に音波を注入すると、磁気回転効果により、磁気波「スピン波」が発生することを発見しました。

磁気回転効果は、物質の磁気の源が電子の回転運動であることを示す歴史的にも重要な現象ですが、その効果はとても小さく、物質の磁気制御が不可欠なスピンデバイスへの応用が不可能とされていました。

本研究グループは、膜厚が20ナノメートルの薄膜ニッケル鉄合金磁石を作製し、固体表面を伝搬しながら結晶格子点を1秒間に10億回以上回転させる音波を注入することにより、磁気回転効果に由来するスピン波が発生することを発見しました。

本研究は、音波が巨大な磁気回転効果を生み出すことを世界で初めて実証したものであり、これまで不可能だった磁気回転効果のスピンデバイス応用に大きく道を拓くことが期待されます。

本研究成果は、2020年5月27日（米国東部夏時間）発行の米国物理学会誌「Physical Review Letters」のオンライン版で公開されました。

1. 本研究のポイント

- 磁気回転効果は、磁性の起源を追求する1世紀前の基礎科学上極めて根源的な問いから見つかった効果であり、力学的な回転運動と磁気に変換できることがアインシュタインらによって発見されていた。
- 磁気回転効果の大きさは、最新の遠心分離器の到達限界回転数でも地磁気以下の効果しかなく、物質の磁気制御を動作原理とするスピンデバイスには応用できないと考えられていた。
- 本研究では、1秒間に10億回以上の速さで原子が回転する音波がニッケル鉄合金磁石に巨大な磁気回転効果（地磁気の10万倍以上に相当）を発生することを世界で初めて発見した。
- 本研究で発見した音波を用いた磁気回転効果は、回転運動の保存則に基づく普遍的な効果であり、磁石の性質とは無関係なので、すべての最先端磁気デバイスに応用できる。
- ジュール熱を伴う電流に比べてエネルギー損失の少ない音波によるスピンデバイス動作に大きく道を拓くものであり、スピンデバイスの大幅な省電力化を実現できる。

2. 研究背景

電子は、電気と磁気の2つの性質を持ち、磁気の起源は「スピン」と呼ばれる電子の自転運動（ミクロな角運動量^{*1}）です。スピンは、磁場によって方向を制御できることが知られており、ハードディスクドライブのような磁気デバイスでは、素子中の電子のスピンの向きを保ったり反転させたりすることによって情報の読み書きを行います。

今から約100年前、ミクロな角運動量である電子のスピンの力学的な回転運動（マクロな角運動量）と互いに変換可能であることが、アインシュタインとドハース^{*2}、バーネット^{*3}によって実験的に検証されました。この磁気回転効果は、磁性の起源を追求する基礎科学上極めて根源的な問いから見つかった基礎物理学的に重要な効果として知られています。この効果は、物質を高速回転させるほど大きくなりますが、最先端の高速化移転技術によって実現できる、毎秒1万回転程度の回転速度を用いたとしても、磁場に換算すると地磁気以下の極めて微弱な効果しか得られず、これをデバイス応用する研究はほとんど行われてきませんでした。

その後、松尾衛准教授（中国科学院大学カブリ理論科学研究所）らによる非磁性体の磁気回転効果に関する理論予言（2013年）を契機に、磁気と回転の相互作用が再び注目を集めました[1]。そして2017年になり、小林・能崎（慶大）らの研究グループが固体表面の原子の回転運動が伝搬する音波を用いてこの理論予言を証明する実験を行いました[2]。彼らは、音波を非磁性金属の銅と強磁性体を複合した材料に注入することにより、交流の磁気の流れ（スピン流）を銅の中に生み出し、これを隣接する強磁性体に作用させることによって磁気の波（スピン波）を励起することに成功しました（図(b)）。このような音波によるスピン波の励起は、磁気弾性効果^{*4}の大きな特定の磁石を用いる方法が2011年にドイツのWeilerらによって報告されていましたが[3]、小林らの実験はこれとは全く異なる原理に基づく現象として注目を集めました[4]。しかし、これらの音波による磁気の制御には、磁気弾性効果を持つ磁性体やスピン流を生成する非磁性体が必要なため、材料やデバイス構造に制限がありました。

3. 研究内容・成果

今回、本研究グループは、音波によって銅に生成されるスピン流の強度から音波の磁気回転効果を磁場に換算したところ、原子が1秒間に10億回以上局所回転するレイリー波^{*5}と呼ばれる音波が地磁気の10万倍以上の磁場を発生することを把握し、これを直接磁性体に使うことによって、大きな磁気回転効果が発現するのではないかとの着想に至り、実験を行いました。図(a)に示すようなSAWフィルター素子^{*6}を作製し、レイリー波の放射アンテナと、検出アンテナの間にニッケル鉄合金を貼り付けました。レイリー波がニッケル鉄合金に注入されると、原子が高速に回転し、磁気回転効果によりニッケル鉄合金の磁気が振動してスピン波が励起されます（図(c)）。本研究グループは、外部磁場によりレイリー波とスピン波の周波数を一致させたとき、レイリー波の振幅が大きく変化することを発見しました。これは、レイリー波のエネルギーの一部が、スピン波の励起に利用されたことを示しており、音波の磁気回転効果の決定的な証拠です。さらに、スピン波の強度がレイリー波の周波数（原子の回転周波数）の4乗に比例して増加し、磁気弾性効果を用いた場合よりもレイリー波の高周波化によるスピン波励起の増幅率が大きいことがわかりました。

4. 今後の展開

本研究で発見した音波を用いた磁気回転効果は、回転運動の保存則に基づく普遍的な効果であり、磁石の性質とは無関係なので、すべての最先端磁気デバイスに応用することが可能です。ジュール熱を伴う電流に比べてエネルギー損失の少ない音波を用いたスピンドバイス動作に大きく道を拓くものであり、スピンドバイス（MRAMをはじめとするスピンメモリ、スピン波を用いた論理演算デバイス

など、省電力・高速動作を必要とする人工知能回路の基本構成部品)の大幅な省電力化の実現につながります。

※この研究は、科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業 CREST「ナノ構造制御と計算科学を融合した傾斜材料開発とスピンドバイス応用(研究代表者:能崎幸雄)」(課題番号:JPMJCR19J4)の支援を受けて行われました。

<参考文献>

- [1] M. Matsuo, J. Ieda, K. Harii, E. Saitoh, S. Maekawa: Mechanical Generation of Spin Current by Spin-Rotation Coupling, Phys. Rev. B **87**, 180402(R) (2013).
- [2] D. Kobayashi, T. Yoshikawa, M. Matsuo, R. Iguchi, S. Maekawa, E. Saitoh, and Y. Nozaki: Spin Current Generation Using a Surface Acoustic Wave Generated via Spin-Rotation Coupling, Phys. Rev. Lett. **119**, 077202 (2017).
- [3] M. Weiler, L. Dreher, C. Heeg, H. Huebl, R. Gross, M.S. Brandt, and S.T.B. Goennenwein, Elastically Driven Ferromagnetic Resonance in Nickel Thin Films, Phys. Rev. Lett. **106**, 117601 (2011).
- [4] 2017年8月18日プレスリリース記事
(<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2017/8/18/28-23198/>)

<原論文情報>

Y. Kurimune, M. Matsuo, and Y. Nozaki: “Observation of gyromagnetic spinwave resonance in NiFe films” (NiFe 薄膜における磁気回転効果由来のスピンド共鳴の観察), Physical Review Letters, (Vol.124, No.20) 217205 (1-6) (2020)
doi : 10.1103/PhysRevLett.124.217205

<用語説明>

- ※1 角運動量: 回転の方向と大きさを表す量。電子は、スピンと呼ばれるミクロな角運動量を持っており、磁気の原因であることが知られている。
- ※2 アインシュタイン・ドハース効果: 磁石の磁気量を変化させると磁石が回転しはじめる効果。1915年にアインシュタインとドハースが実験的に検証した。アインシュタインが行った唯一の実験と言われている。
- ※3 バーネット効果: アインシュタイン・ドハース効果とは逆に、磁石を回転させると磁気量が増加する効果。1915年にバーネットが実験により発見した。
- ※4 磁気弾性効果: 磁石を弾性変形すると磁気の向きが変化したり、逆に磁気の向きによって磁石が弾性変形する効果。
- ※5 レイリー波: 音波の一種であり、物質の局所的な振動が波として表面を伝搬する現象。レイリー波が伝搬する際、物質を構成する原子は1秒間に10億回以上の速さで回転する。
- ※6 SAW フィルター素子: 特定の振動周波数と波長を持つレイリー波のみが伝搬できる素子。マイクロ波帯の交流電気信号の高性能フィルターとして広く応用されている。

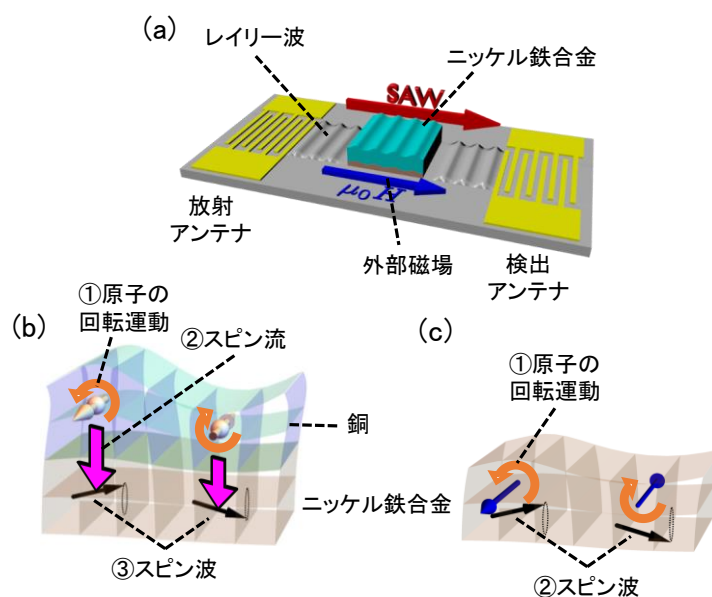


図 音波の磁気回転効果を用いたスピン波励起実験と原理図

(a) ニッケル鉄合金薄膜への音波注入素子の模式図、(b) 音波の磁気回転効果により生成されるスピン流を用いたスピン波励起（小林、能崎ら, PRL 2017）、(c) 音波の直接注入による磁性体の磁気回転効果によるスピン波励起（本研究）

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

・ 研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授 能崎 幸雄 (のざき ゆきお)

TEL : 045-566-1692 FAX : 045-566-1677 E-mail : nozaki[at]phys.keio.ac.jp

・ 本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (村上)

Email : m-pr[at]adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

科学技術振興機構 広報課

TEL : 03-5214-8404 FAX : 03-5214-8432

Email : jstkoho[at]jst.go.jp

・ JST 事業についてのお問い合わせ先

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

Email : crest[at]jst.go.jp