

2022年2月21日

報道関係者各位

慶應義塾大学

## 磁気回転効果を用いて磁性体から起電力を取り出す機構の発見 —音波を用いたスピントロニクスデバイス応用へ—

慶應義塾大学グローバルリサーチインスティテュートの船戸匠特任助教（スピントロニクス研究開発センター）と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、磁気回転効果によって起電力が発生することを理論的に示しました。

アインシュタインやバーネットらによって発見された磁気回転効果は、物質の磁気の起源がスピンと呼ばれる電子の自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トロニクスデバイスへの応用が不可能とされていました。しかし最近、表面弾性波と呼ばれる音波を用いることで結晶格子点を1秒間に10億回以上回転させて、磁気回転効果を用いたスピンの流れを生み出す方法が実証されました。さらにこのスピンの流れを起電力に変換する方法も発見されていましたが、貴金属を含む複雑なデバイス構造が必要でした。

そこで本研究グループは、表面弾性波を注入することで格子の回転運動を誘起した磁性金属薄膜単体中の磁化、電子スピン、格子回転の三者の絡み合い方を記述する理論を構築し、起電力が発生することを突き止めました。これは貴金属および複雑なデバイス構造を必要としないため、これまで困難だった磁気回転効果のスピンド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、2022年2月18日（米国東部時間）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、回転運動の保存則に基づく、マクロな回転運動と磁気が互いに変換する普遍的な効果である。
- これまで磁気回転効果に関連する現象は、1秒間に10億回以上の速さで原子が回転する音波を用いて実現されてきたが、貴金属や複雑なデバイス構造が必要不可欠であった。
- 本研究は、強磁性金属単膜というシンプルな構造のデバイスへ音波を注入することで、磁気回転効果に由来する起電力が発生することを理論的に発見した。
- 本研究のメカニズムでは、貴金属および複雑なデバイス構造も必要としないため、これまで困難だった磁気回転効果のスピンドバイス応用に大きく道を拓くことが期待される。

### 2. 研究背景

電子は電気的な性質だけでなく、「スピン」と呼ばれる電子の自転運動（ミクロな角運動量<sup>※1</sup>）に起因する磁気的な性質を持っています。この2つの性質を同時に利用することを目指すスピントロニクス分野では、磁場や電流を用いたスピン制御が盛んに研究され、工学応用の実現がされてきました。

今から約 100 年前、ミクロな角運動量である電子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<sup>※2</sup>、バーネット<sup>※3</sup>によって実験的に検証されました。この現象を磁気回転効果と呼び、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重要な効果として知られています。物質を高速回転させるほど磁気回転効果は大きくなりますが、最先端技術において実現可能な毎秒 1 万回転程度の高速回転を用いても、磁場換算で地磁気以下の極めて微弱な効果しか得られません。そのため、磁気回転効果はスピントロニクス分野において全く注目されてきませんでした。

その後、松尾衛准教授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]。最近、能崎幸雄教授らの研究グループが、固体表面を伝搬する音波（表面弾性波）を用いることで、結晶格子点を 1 秒間に 10 億回以上回転させ、磁気回転効果によってスピンの流れ（スピン流）が生み出されることを実証しました[2,3]。能崎らは、表面弾性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を励起することに成功しました。その後、同グループは、スピン流と電流を相互に変換する物質として知られている白金を銅と強磁性体の複合材料へ接合させることで、磁気回転効果により生み出された交流スピン流を起電力へ変換させ、電気的に検出しました[4]。しかしながら、白金のような希少な物質や 3 種類の物質を複合させるような複雑なデバイス構造が必要などの制限がありました。

### 3. 研究内容・成果

今回、本研究グループは、強磁性金属の単膜というシンプルなデバイス構造において磁気回転効果に由来した起電力が発生することを理論的に提案しました。強磁性金属へ表面弾性波を注入すると、強磁性体内の自由電子スピンには格子の回転変形に伴って磁気回転効果が働きます。同時に、強磁性体の磁気には弾性変形に伴って向きが変化する効果（磁気弾性効果<sup>※4</sup>）が働くことで、磁気の波が励起されます[5,6]。この磁気の波が自由電子スピンへ作用することで起電力が発生します（図 1）。本研究グループは、自由電子スピンへ働く磁気回転効果と磁気へ働く磁気弾性効果の 2 つの効果が組み合わさることで、貴金属や複雑なデバイス構造を必要とせずに、磁気回転効果に由来する起電力が発生することを発見しました。本研究では、表面弾性波の一種であるレイリー波<sup>※5</sup>により発生する起電力を解析し、弾性波の進行方向および磁性体の膜厚方向へ起電力が生じること、またレイリー波の進行方向と磁性体の磁気の向きについて非相反性<sup>※6</sup>が現れることを見出しました。さらに、強磁性金属としてニッケルを用いた場合に実験で観測可能な大きさの起電力が生じることがわかりました。

### 4. 今後の展開

本研究で発見したメカニズムを用いれば、これまで困難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。磁気回転効果により生み出されたスピン流を利用するためには、微細加工や貴金属の利用が必要不可欠でした。本研究は音波さえ生み出すことができれば、他に制限を受けることなく幅広いスピンデバイスへ磁気回転効果を応用することが可能となります。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ているために磁気デバイスの高性能化・省電力化することができるだけでなく、貴金属を必要としないため安価なレアメタルフリー技術として大きく貢献できます。

<謝辞>

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）および JSPS 科研費 21K20356, 20H01863, 21H04565 の助成を受けたものです。

<参考文献>

- [1] M. Matsuo, J. Ieda, K. Harii, E. Saitoh, and 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] Y. Kurimune, M. Matsuo, and Y. Nozaki: Observation of Gyromagnetic Spin Wave Resonance in NiFe Films, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 217205 (2020).
- [4] S. Tateno, G. Okano, M. Matsuo, and Y. Nozaki: Electrical evaluation of the alternating spin current generated via spin-vorticity coupling, *Phys. Rev. B* **102**, 104406 (2020).
- [5] M. Weiler, H. Huebl, F.S. Goerg, F.D. Czeschka, R. Gross, and S.T.B. Goennenwein: Spin Pumping with Coherent Elastic Waves, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 176601 (2012).
- [6] T. Kawada, M. Kawaguchi, T. Funato, H. Kohno, M. Hayashi: Acoustic spin Hall effect in strong spin-orbit metals, *Sci. Adv.* **7** eabd9697 (2021).

<原論文情報>

T. Funato and M. Matsuo: “Spin Elastodynamic Motive Force” (スピン弾性起電力), *Physical Review Letters*, (Vol. 128, No. 7) 077201 (2022)  
doi: 10.1103/PhysRevLett.128.077201

<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、磁気の起源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に変化する効果。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磁気回転効果とは別の効果。

※5 レイリー波：物質表面を伝わる表面弾性波の一種であり、物質を構成する原子の局所的な楕円運動が波として伝搬していく現象。

※6 非相反性：レイリー波の進行方向を逆向きにするとは異なる大きさの起電力が発生する現象。

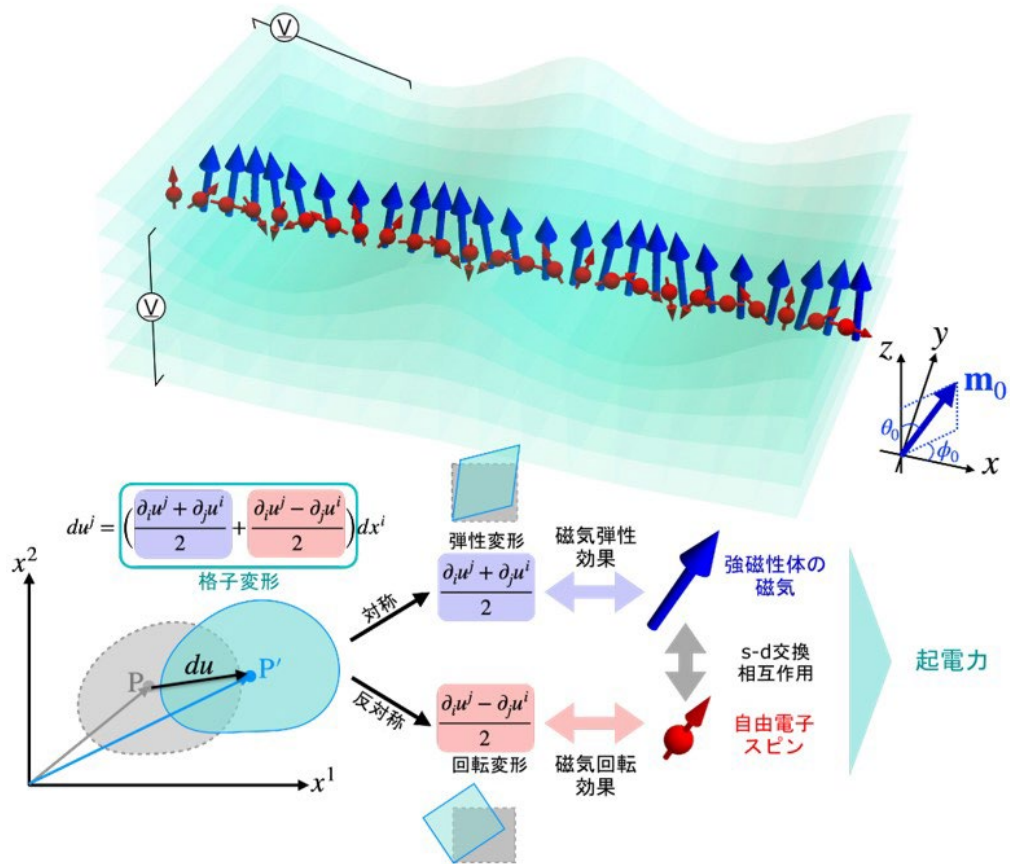


図1 音波の磁気回転効果に由来する起電力発生メカニズムの模式図  
強磁性体の磁気には弾性変形による磁気弾性効果が、自由電子スピンの回転変形による磁気回転効果が働く。これら2つの効果が組み合わさることで、貴金属や複雑なデバイス構造を必要とせず、磁気回転効果に由来する起電力が発生する。

※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。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 グローバルリサーチインスティテュート 特任助教 船戸 匠 (ふなと たくみ)  
TEL : 045-566-1677 FAX : 045-566-1677 E-mail : t\_funato@keio.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (澤野)  
TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

Email : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>