



2019年5月30日

報道関係者各位

慶應義塾大学
理化学研究所

電流の渦から磁気を生み出すことに成功 —銅の傾斜材料を利用したスピントロニクス材料革命—

慶應義塾大学大学院理工学研究科の岡野元基(おかのげんき・博士課程2年、学振研究員(DC1))、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、大沼悠一博士研究員、理化学研究所創発物性科学研究センターの前川禎通上級研究員らは、表面を酸化した銅において電流が磁気の流れ「スピン流」を生み出す現象[1]が、電流の渦を起源とする証拠を発見しました。本研究で実証された新しいスピン流生成法によって、磁石や貴金属を必要としない省エネルギー磁気デバイスの実現が期待されます。

本研究成果は、米国物理学会誌「Physical Review Letters」に、5月29日(現地時間)付でオンライン掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ・表面酸化銅は、電流からスピン流を高効率に生成する一方、スピン流から電流の逆変換はほとんど起こらないこと(これまでのスピン流生成法では見られない非相反性)を発見した。
- ・電気伝導率の傾斜構造による電流渦(電子の巨視的な回転運動)がスピン流に変換される新しい理論により実験結果が説明できた。
- ・磁石や貴金属を必要としない画期的な磁気デバイスの実現に大きく道を拓いた。

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、室温で強い磁気を持つ物質において、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。これらの効果は、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の1500分の1程度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。

これに対し、2013年に中国科学院大学カブリ理論科学研究所の松尾准教授らが室温で磁気を持たない銅やアルミニウムなどの金属でも、マクロな角運動量を与えることにより、金属中に電子のスピンの方向が揃った状態(スピン蓄積状態)を作ることができる理論を発表しました[2]。スピン蓄積は、自転方向の揃った磁気の流れ「スピン流」の源です。スピン流を流す際に発生する熱量は、電流

よりもはるかに小さいことが知られており、不揮発性メモリなど省電力デバイスの開発が精力的に進められています。これまでのスピン流生成には、プラチナのような貴金属や磁石が用いられており、銅のようなありふれた安価な金属は不向きとされてきました。松尾准教授らの理論は、物質に回転を与える音波を使うことにより、銅からスピン流を生成できることを予言したものです。レイリー波^{*4}と呼ばれる音波による銅のスピン流生成は、2017年に慶應義塾大学の能崎教授らが実験検証に成功しました[3]。

しかし、音波による格子回転は、空間・時間的に変動するため、生成できるスピン流は交流であり、不揮発メモリの情報書き換え（磁化反転）には利用できません。一方、回転運動による直流スピン流生成は、液体金属の流れの渦を利用した報告[4]がありますが、固体では実現していませんでした。

3. 研究内容・成果

今回、本研究グループは、表面を酸化した銅薄膜の深さ方向に形成される電気伝導率の傾斜構造が電子の巨視的な回転運動（電流渦）を生み、それが直流スピン流に変換されることを実験検証しました。図(a)に示すように電気伝導率の勾配を有する領域に電圧を加えると、電子は散乱体に衝突しながら進むものの、電気伝導率が高い領域を移動する電子の移動速度は、電気伝導率が低い領域を移動する電子の移動速度よりも速くなります。すなわち、電気伝導率の勾配を有する領域では、電気伝導率が一樣である通常材料中とは異なり、電子の移動速度に分布が生じます。このとき、この領域中の微小領域に着目すると、電子の移動速度の違いによって、電子の速度場（ベクトル場）が回転していると考えることができます。この電流渦の大きさは、渦度として捉えられ、この領域中の複数の電子の流れの中に「角運動量」が存在することとなります。この渦度に比例した角運動量が一方向のスピンに変換され、アップスピン及びダウンスピンの平衡状態を乱し、アップスピン及びダウンスピンの相対的な分布に偏りを生じさせます。その結果、分布の偏りを解消する方向にスピン流が生じます。

本研究グループは、表面酸化させた銅に存在する電流渦がスピン流を生成することを証明するため、電流とスピン流の変換における相反性を詳しく調べました。電流からスピン流への変換を一方向性スピンホール磁気抵抗効果^{*5}により、スピン流から電流への変換をスピンプンピング効果^{*6}とスピンホール効果^{*7}により評価しました。その結果、プラチナでは相反性の高い電流⇄スピン流変換が実現するのに対し、表面酸化銅では、電流⇒スピン流の変換効率に対してスピン流⇒電流の変換効率が320分の1以下と極めて小さい非相反性を示すことがわかりました(図(b))。この非相反性は、従来のスピン流生成理論では全く説明できないものです。本研究グループは、格子の巨視的な回転運動が交流スピン流を生成する現象と類似の物理的起源により、電子の巨視的な回転運動が非相対的に直流スピン流を生成する可能性を指摘し、実際に測定された直流スピン流の大きさも同理論によって説明できることを確かめました。この研究成果は、電気伝導率に傾斜構造があればどのような物質でも直流スピン流を生成できることを示したものであり、磁石や貴金属を必要としない画期的な磁気デバイスの実現に大きく道を拓くものといえます。

4. 今後の展開

今回、金属薄膜の表面酸化が電流渦を生成し、大きな直流スピン流を生み出すことを実験的に解明しました。一方、異種物質を原子層オーダーで積層する最先端の成膜技術を駆使することにより、酸化手法に比べて電気伝導率の傾斜構造をより精密に制御できます。これにより、表面酸化銅やプラチナを上回るスピン流生成効率が実現できると考えられます。また、従来のスピン流生成法とは異なり、磁石や貴金属を必要としないため、磁気デバイスの高性能化・省電力化だけでなく、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。

※この研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（科研費）の補助を受けて行われました。

<参考文献>

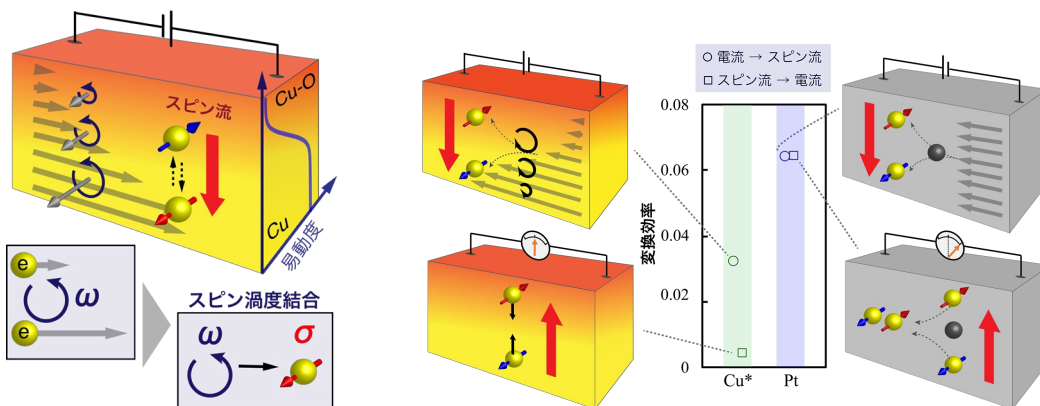
- [1] H. An, Y. Kageyama, Y. Kanno, N. Enishi, K. Ando: Spin-torque generator engineered by natural oxidation of Cu, Nat. Commun. **7**, 13069 (2016).
- [2] M. Matsuo, J. Ieda, K. Harii, E. Saitoh, S. Maekawa: Mechanical Generation of Spin Current by Spin-Rotation Coupling, Phys. Rev. B **87**, 180402(R) (2013).
- [3] D. Kobayashi, T. Yoshikawa, M. Matsuo, R. Iguchi, S. Maekawa, E. Saitoh, Y. Nozaki: Spin Current Generation Using a Surface Acoustic Wave Generated via Spin-Rotation Coupling, Phys. Rev. Lett. **119**, 077202 (2017).
- [4] R. Takahashi, M. Matsuo, M. Ono, K. Harii, H. Chudo, S. Okayasu, J. Ieda, S. Takahashi, S. Maekawa, and E. Saitoh: Spin Hydrodynamic Generation, Nat. Phys. **12**, 3526 (2016).

<原論文情報>

G. Okano, M. Matsuo, Y. Ohnuma, S. Maekawa, Y. Nozaki: Nonreciprocal spin current generation in surface-oxidized copper films, Physical Review Letters, ** (2019).

<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。この実験は、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 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。
- ※5 一方向性スピンホール磁気抵抗効果：スピン流を生成する非磁性金属を強磁性金属と積層した複合材料の電気抵抗が強磁性金属の磁化ベクトルの向きによって変化する現象。この電気抵抗変化の大きさからスピン流強度を測定できる。
- ※6 スピンポンピング効果：非磁性金属と強磁性体を積層した複合材料において、強磁性体の磁気量の時間変化によって非磁性金属にスピン流が生成される効果。非磁性金属にスピン流を生成する手法として広く使われている。
- ※7 スピンホール効果：非磁性金属にスピン流が流れると、スピン流の流れと垂直な方向に起電力が生じる現象。特殊相対論的な効果により、金属中でスピン流が電流に変換されることに起因しており、電流からスピン流への変換も同じ効率で起こる（相反的な効果）。



図(a)電流渦によるスピンの生成の原理図、図(b)表面酸化銅(Cu*)とプラチナの電流⇄スピン流変換効率の比較

※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きます。

- 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@phys.keio.ac.jp

- 本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (村上)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

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

理化学研究所 広報室 報道担当

TEL : 048-467-9272 FAX : 048-462-4715

Email : ex-press@riken.jp