

熱で磁気の流れを作るスピナーゼーバック効果を発見!

齊藤 英治、内田 健一

磁石の両端に温度差をつけることで磁気の流れ「スピン流」が発生する新たな物理現象を、慶應義塾大学工学部の齊藤英治専任講師、東北大学金属材料研究所の前川禎通教授らの研究チームが世界で初めて確認した。新たな磁気デバイスの開発、発電源などに道を開く成果で、*Nature* 2008年10月9日号¹に掲載された。今回の実験は、齊藤研究室の大学院生内田健一さん（当時大学4年生）が卒業研究で行ったもので、その意義、苦勞などを2人に聞いた。

独自の検出技術で、新たな熱エネルギー変換現象を見つける

Nature Digest — スピン流版のゼーバック効果の発見ですね。

齊藤 — 金属の両端に温度差をつけることで電圧が生成される現象「ゼーバック効果」は、ドイツの物理学者トーマス・ゼーバックが今から2世紀も前の1821年に発見しました。これを応用し、熱電変換能の異なる2つの金属を接合した素子「熱電対」は精密な温度計として広く利用されています。電流はマイナスの電荷を帯びた電子の運動ですが、電子には電荷のほかにもう1つスピンという微小磁石の性質があります。スピンは上向き、下向きの2つの状態があり、この偏りが磁石になるわけです。電流が流れない、このスピンだけの運動が「スピン流」とよばれるもので、簡単にいえば磁石の流れ。ゼーバック効果のように熱によってスピン流も生成できないだろうかと、世界中の研究者が長年、探し求めてきました。スピン流をとらえることが非常にむずかしかったのですが、我々は、2006年に発表した逆スピンホール効果^{2,3}を利用した独自の検出技術を駆使し、スピン流版のゼーバック効果（「スピナーゼーバック効果」と命名、図1）の実証に初めて成功しました。この検出技術が大きな前進を導いたこととなります。

ND — 逆スピンホール効果とはどのようなものですか？

齊藤 — スピンホール効果^{4,5}とは、金属や半導体に電流をかけると、電流と垂直な方向にスピン流が発生する現象です。逆スピンホール効果は、この反対の現象。つまり、スピン流が発生すると、その流れに垂直な方向に電圧が生じる現象のことです。電荷を伴わないスピン流によって電圧が生じるの

は、スピン流を担っている電子を横向きに曲げる力が物質中で働くからです。この現象は「スピン軌道相互作用」として知られていて、曲げる方向はスピンの向きに依存します。スピン流は、上向きのスピンをもつ電子と下向きのスピンをもつ電子がそれぞれ同じ数、逆向きに流れているため、上向きのスピンの流れと下向きのスピンの流れは同じ方向に曲げられるわけです。スピン流と横向きの力、この作用によってスピン流に垂直な方向に電圧が発生することになるわけです。

ND — 検出技術はこの逆スピンホール効果をとらえるわけですね。

齊藤 — そうです。逆スピンホール効果を検出するかぎりは白金です。白金がスピン流を効率よく電気変換するからです。我々は、鉄とニッケルの合金（Ni₈₁Fe₁₉）と白金からなる素子を作製しました。合金に温度差をつけると、そこで励起されたスピン流が、白金によって電気変換され、その電圧を検出するという仕組みです（図2）。合金は、厚さこそ20nmと薄いですが、縦6mm、横4mmと大きいものです。これがよい結果につながりました。というのも、従来、スピン流の流れは、長くても数μmのオーダーで消えてしまうために微小な試料を作製しなければならず、それが検出をむずかしくしていました。しかし、大きな素子では逆スピンホール効果による出力電圧が増幅されるため、効率よくスピン流を観測することができるのです。そして測定の結果、数mmの長い試料に流れるスピン流の観測に成功しました。従来の技術より1000倍以上の長い距離にわたってスピン流が生成可能であることも証明したわけです。

慶應義塾大学 齊藤英治

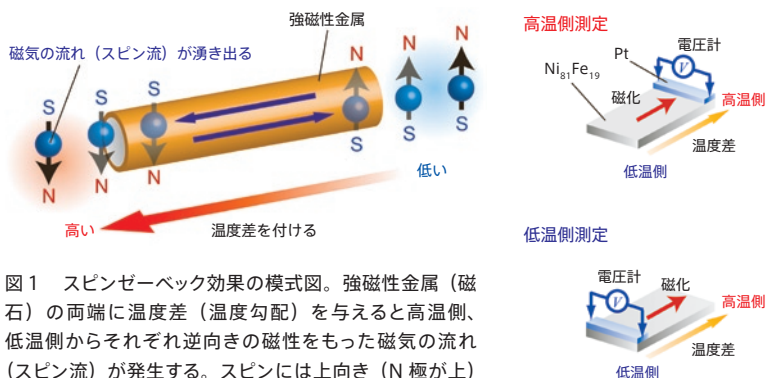


図1 スピナーゼーバック効果の模式図。強磁性金属（磁石）の両端に温度差（温度勾配）を与えると高温側、低温側からそれぞれ逆向きの磁性をもった磁気の流れ（スピン流）が発生する。スピンには上向き（N極が上）と下向き（N極が下）の2種類がある。

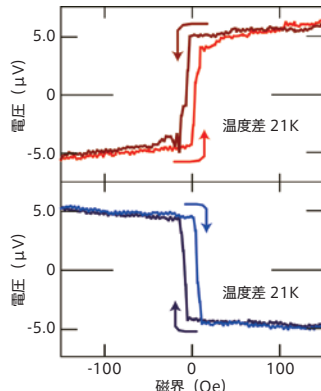
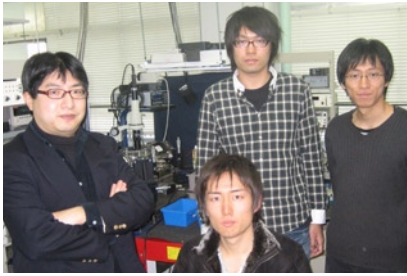


図2 逆スピンホール効果によって生じた電圧が磁場に依存することを示す実験。鉄とニッケルの合金（Ni₈₁Fe₁₉）と白金からなる素子において、白金が高温側にある場合と低温側にある場合の測定で、それぞれ逆符号の起電力が観測された。このような起電力のふるまいは、温度差によってスピン流が生じたことを示す（スピナーゼーバック効果）証拠となる。温度差を大きくするほど、生じる起電力も大きくなる。

Uchida K. et al. Nature 455, 778-781 (2008)



齊藤 英治 (さいとう・えいじ) / 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科専任講師。工学博士。1971年、東京都生まれ。1996年、東京大学工学部物理工学科卒業。2001年、同大学院工学系研究科博士課程修了。同年、工学博士取得、慶應義塾大学理工学部物理学科助手。2006年より現職。2004年、英国ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所客員研究員、2007年科学技術振興機構 (さきがけ) 研究員。2002年、武井賞 (日本応用磁気学会)、2008年、サー・マーティン・ウッド賞。

内田 健一 (うちだ・けんいち) / 慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻修士課程1年。1986年、神奈川県生まれ。2008年、同大理工学部物理情報工学科を首席で卒業。2008年、秋季応用物理学学会の講演奨励賞など受賞多数。

左の写真は、今回の研究に携わった齊藤研究室のメンバー。左が齊藤専任講師、手前が内田さん。後方は博士課程1年の安藤和也さん (中央) と博士課程3年の針井一哉さん (右)。

卒論で未開拓分野を切り開く

ND — 今回の成果は学部生だった内田さんの卒論でもあります。その意味でも話題を集めました。

内田 — テーマは、最先端分野ですので、試行錯誤の連続でした。スピントロニクスを捕捉するのに半年、その現象を的確に説明する理論を構築するのに半年かかりました。素子の作製は、そのプロセスが重要で、作製条件を変えながら何度も素子を作っては測定を繰り返しました。検出の精度は徐々に上がってきて、3か月ほどで手応えを感じました。理論は、スピントロニクスの基礎を理解することから始めました。スピントロニクスがなぜ起こるのか、その駆動力はスピンの濃度勾配 (拡散方程式) が考えられていました。つまりスピンの蓄積の濃度差で、濃度の高いほうから低いほうへスピントロニクスが起るわけです。しかし、スピントロニクス効果は、この拡散方程式では説明が付きません。そこで新たな仮説を立て、東北大学と共同で解析を繰り返し、新たな理論に至りました。それは拡散ではなく、スピントロニクスという概念です。

ND — それは、どんな概念ですか？

齊藤 — 簡単に説明すれば、熱を与えたとき、その熱がどれだけ運動エネルギーに転換されるのかを表す量の違いです。同じ熱を与えたとき、スピンによって、運動エネルギーが高くなりやすいのか、なりにくいのかの差があり、スピントロニクスが運動エネルギーの高いほうから低いほうへ流れ、スピントロニクスが生じるというものです。今回のスピントロニクス効果は既存の理論では説明できない現象でしたが、実験と理論がうまくかみあって理解が進んでいくという意味で、理想的な成果だと思います。

スピントロニクスの中核を担う研究成果

ND — 今回の成果はどんな分野に応用できますか？

齊藤 — 大容量メモリとして期待される「MRAM」など磁気デバイスは、微小な磁石の向きを「0」「1」に置き換えて情報を記録します。現在、この向きの制御に電流や磁界を用いますが、消費エネルギーが大きく、限界があります。今回の成果は、磁石の両端に温度差をつけるという非常に単純な方法でこの壁を破る可能性を示すものです。熱でできたスピントロニクスによって磁化の向きの制御をしたり、そのスピントロニクスを電気

エネルギーに変換し、利用したりすることも可能になります。これまでない簡単な手法でスピントロニクス源や電流源を確保でき、超低損失磁気デバイス開発などに道を開くものです。温度勾配さえあればスピントロニクスを長距離にわたって生成できるので、スピントロニクスに関する実験研究もしやすくなり、発展が期待できます。スピンの情報を利用して、新たな電子デバイスを開発するスピントロニクス研究の中核を担うと思います。

ND — この分野に進んだ経緯とおもしろさを教えてください。

齊藤 — 慶應義塾大学の物理学科で助手をしていたころは、ナノ磁性の研究をしていました。時はナノテクブームの真っただ中です。磁性体の研究では、スピントロニクスが重要なかぎを握っていますが、実はその原理、概念はわかっていないことが多いことに気づきました。物理の根幹である概念に迫り、原理を開拓していこうと思いました。1988年の巨大磁気抵抗効果の発見など、スピントロニクス分野は発展の可能性が大きい。新しい金脈や新現象を見つけることができる、科学の進展に貢献できるというやりがい、満足感があると思っています。

内田 — 学部生のときに所属していた学科が工学系だったので、3年生のときは私も工学系の研究室に進もうと思っていました。でも研究室配属の直前に、最先端の基礎研究分野に大きな魅力を感じ、齊藤研究室を選びました。齊藤先生は若くて面倒見もよく、研究室も自由な雰囲気、環境もすばらしい。知的好奇心は尽きません。研究者の道をめざしたいと思っています。

ND — 最後に学生や若い研究者に送るメッセージを。

齊藤 — この研究室もそうですが、物理学の新たな概念の発見などは、1人というよりチームの共同作業なしに実現しません。今回の成果も研究室のほかのメンバーの蓄積の上に成り立ったものです。若い研究者には、そうした視点も忘れないでほしいと思います。

ND — ありがとうございます。

聞き手は、長谷川聖治 (読売新聞科学部記者)。

1. Uchida K. et al. *Nature* **455**, 778-781 (2008).
2. Saitoh E. et al. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 182509 (2006).
3. Ando K. et al. *Phys. Rev.* **B78**, 014413 (2008).
4. Kato Y. K. et al. *Science* **306**, 1910-1913 (2004).
5. Wunderlich J. et al. *Phys Rev Lett.* **94**, 047204 (2005).