

# スピン流を組み込み、物理学を書き換える

## Integrating spin currents into physics of matter

齊藤 英治

力学的物質・スピン制御研究グループ

Eiji Saitoh

Research Group for Mechanical Control of Materials and Spin Systems

電子は電荷とともに、自転に似たスピンという性質を持つ。電荷の流れとして電流があるように、スピンの対してスピン流という流れがある。スピン流は極微な世界で現れる現象だが、ナノテクノロジーの進展によりスピン流を利用することが可能になってきた。少ない消費電力で大量の情報を処理したり、環境中の熱や音を利用して発電したりすることが可能になるかもしれない。「ただし、そのような応用の土台となる現在の電磁気学や力学には、スピン流の記述が抜け落ちています。私たちは、スピン流を組み込み、物理学を書き換えるという壮大な挑戦を進めています」。こう語る齊藤英治グループリーダーたちは、スピン流の測定方法を世界で初めて発見。さらに、電磁波や熱、音などさまざまな方法でスピン流を生成できることを実証している。

### 物理学の美しいところ

2001年に博士号を取得した齊藤英治グループリーダー(GL)は、2006年、慶應義塾大学に研究室を立ち上げた。「私は博士課程で物性物理学の強相関電子系を、助手としてナノテクノロジーを研究しました。しかし自分の研究室を初めて持つ機会に、研究テーマを変えて新しいことを始めようと考えました。そして研究テーマを探しているときに、物理学の論理体系に“美しいところ”を見つけました。ある現象の記述が決定的に抜け落ちているのです。それがスピン流です」

電子は電荷とともにスピンという性質を持つ。スピンは地球の自転に似た角運動量だ。地球には自転することで棒磁石のような磁場が生まれている。同じように電子にはスピンによって磁力が発生している。ただし、物質の回転には右回りも左回りもさまざまな回転速度もあり得るが、スピンの回転は右回りのアップスピンと、それを反転させたダウンスピンの2種類しかない。

それではスピン流とは何か。「電荷の流れとして

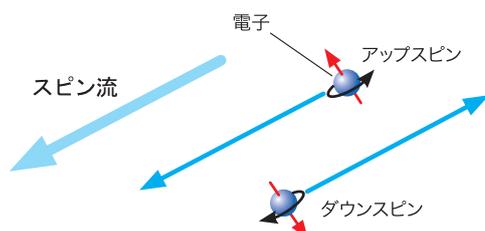


図1 伝導電子スピン流の概念図

電流があるように、スピンにはスピン流という角運動量の流れがあります」

スピン流にはいくつかの種類があり、そのうちの一つに「伝導電子スピン流」がある(図1)。「金属の中で、ある方向に進む電子と、それとは逆向きに進む電子は、互いに逆向きのスピンを持ちやすいとします。すると電荷の流れは打ち消し合ってゼロとなり、スピンだけが流れている状態になります。つまり、電流は流れず、スピン流だけが流れます。それが伝導電子スピン流です」

スピン流をイメージしていただくことはできただろうか。「イメージできなくても安心してください。そもそもスピン流という概念を正確にイメージすることは困難で、中途半端なイメージを持って実験を行うと間違ってしまう。とにかくここでは、電荷の流れが電流、そのスピン版がスピン流だと理解してください」

従来の電子工学では、電子の電荷とスピンのうち電荷だけを利用してきた。「例えば、銅の中ではスピン流は1マイクロメートルも進むことができません。ですから電磁気学がつけられた約200年前には、無視してもよい現象でした。実際に電磁気学はスピン流を無視してつくり、その土台の上に電子工学が発展しました」

ところが1990年代半ばから、電子工学においてスピンやスピン流が注目され始めた。「それはナノテクノロジーの進展によります。マイクロスケール、そしてナノスケールの微細加工が実現可能となり、



### 齊藤 英治 (さいとう えいじ)

1971年、東京都生まれ。博士(工学)。東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。

慶應義塾大学理工学部物理学科助手などを経て、2009年東北大学金属材料研究所教授。2010年より先端基礎研究センター 力学的物質・スピン制御研究グループリーダーを兼任。専門は物性物理学。

そのスケールになるとスピンやスピン流が現れるからです。従来の電子工学は電気や磁気を操作して情報処理などを行ってきました。しかし、例えばナノスケールの領域に情報を書き込むには、とても大きな電流が必要です。スピンやスピン流を直接操作した方が有利なのです」

こうして電荷とスピンの両方を利用しようという「スピントロニクス」の研究が始まり、1990年代後半には、スピンを利用した巨大磁気抵抗効果という現象がパソコンのハードディスクに応用され、記憶容量が飛躍的に増大した。

「ただし、私が初めて研究室を立ち上げた当時、スピン流を組み込んで電磁気学や力学を書き換える必要があることを説明しても、共感してくれる人は非常に少数でした。“これはいける！ 誰も手を付けていない真っさらな世界が目の前に広がっている”と感じました。こうして私はスピン流を研究テーマとすることに決めました」

### スピン流で電場が生まれる

齊藤GLが最初に着手したのは、スピン流の測定方

法の開発だ。「電流の測定には磁場を捉えます。電流を流すと磁場が生じるからです。では、スピン流を流すと何が生じるのか。電場ができます。この現象そのものが存在しなくてはならないことは、相対性理論の対称性を考えると当たり前のことです。私はスピン流を流すと電場が生じることを実験で実証しました」

スピン流により電場が生じる現象は「逆スピンホール効果」と呼ばれ、その発見により、齊藤GLには数々の賞が贈られている。「この現象によって、スピン流を電流により測定することが初めて可能になったのです。それまでスピン流という現象があることは理論的には知られていましたが、測定する方法がありませんでした。測定方法の開発によりスピン流の実験が初めて可能になったのです」

### 熱でスピン流をつくる

さらに齊藤GLは、スピン流を生成する方法の研究を進めた。2006年には電磁波、そして2008年には金属の両端の温度差によりスピン流が生じることを実証した(図2)。

なぜ、温度差という熱によりスピン流が生まれるのか。「それは角運動量保存の法則によります。フィギュアスケートのスケーターをイメージしてください。回転しているときに両腕をすぼめると回転

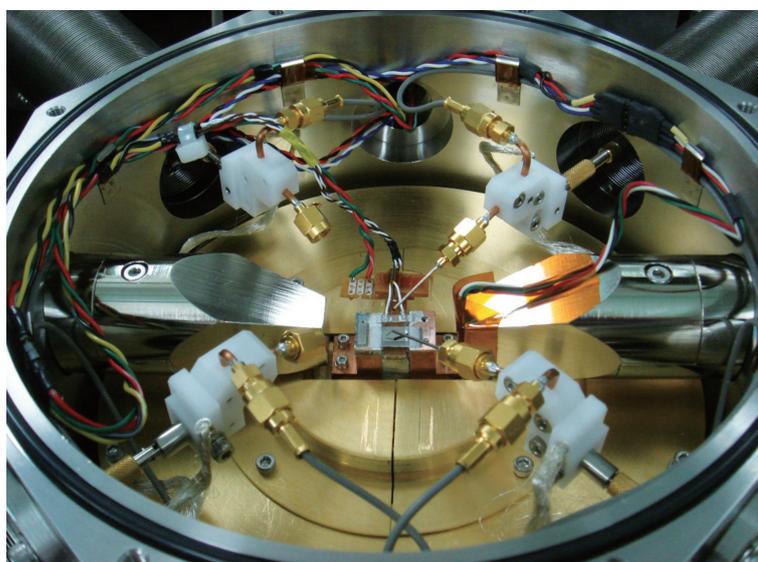
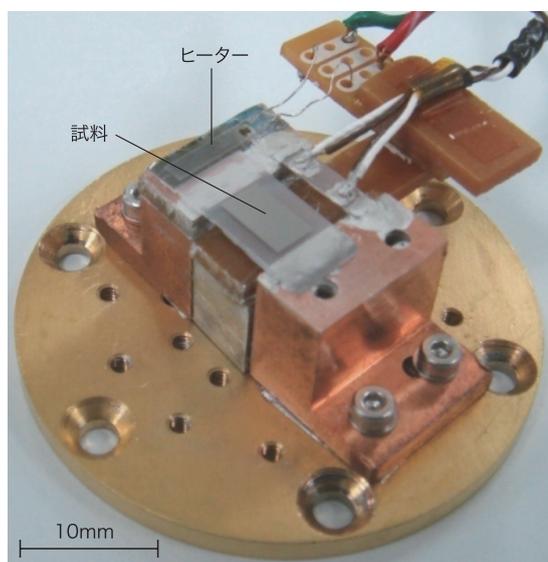


図2 熱でスピン流を生成する実験装置 ヒーターで試料の片方を温めることで温度差が生じ、スピン流が生成される。スピン流を生成するほかの方法も、同様の装置で実験を進めている。

速度が速くなります。それも角運動量保存の法則によります」

ただし、スピンには本質的に重要な点があり、スピンの歳差回転は1方向しかない。

「熱は粒子のランダムな運動なので、普通の物質ならば右回転と左回転がランダムに生じます。しかし、スピンの回転は1方向です。スピンにはランダムな運動を一定の運動に変換する整流作用があるので。そして熱により角運動量が増えることで、角運動量保存の法則によりスピン流が生成されるのです」

こうして熱で生成されたスピン流を逆スピンホール効果で電流に変換することができる。つまり熱から電気をつくる新しい発電方法を、齊藤GLたちは発見したのだ。「この現象をスピンゼーベック効果と呼びます。ただし私たちはこの現象が実用に結び付くとは、まったく思ってもいませんでした。すでに半導体を利用して熱と電気を変換する熱電変換素子が実用化されているからです。ところがこの発見を発表したところ、すぐにあるメーカーの人が訪ねてきました」

現在、実用化されている熱電変換素子は、p型とn型という種類の異なる半導体をつなげたp-n接合という構造により熱と電気を変換する。「私は熱電変換素子の最大の課題は変換効率だと思っていました。ところが訪ねてきたメーカーの人に、“普通の環境中から熱を使って発電する際の最大の課題は、変換効率ではなくコストです”と指摘されました」

情報化社会の未来形として、さまざまな環境中に小型センサーを取り付けて情報を集め、装置をコントロールしたり有用な情報を人々に提供したりするアンビエント情報社会が目指されている。

「その際、センサーの電源として唯一の選択肢となるのが熱電変換です、とそのメーカーの人は言います。ただし、大幅なコストダウンが絶対条件です。例



図3 力学的物質・スピン制御研究グループの研究者たち

えば、体温によって腕時計1個を駆動させる電力を、従来の半導体の熱電変換素子で発電するには、約6万個のp-n接合が必要です。このような構造をつくり込む必要があるため、現在の熱電変換素子はコストが高くなってしまいます。一方、スピン流による熱電変換は特別な構造は必要なく、ありふれた材料に起きる現象を利用するので、コストを大幅に下げることができるはずですが、現在は理論値の100分の1の変換効率しか実証できていませんが、将来は携帯電話に素子を貼り付けて、体温を利用したスピン流による熱電変換で消費電力を賄える可能性があります」

### 絶縁体でもスピン流により情報伝達が可能

齊藤GLたちは、絶縁体にスピン流を流して電気信号を伝達できることも実証した。現在の電子工学の大きな課題は、電流を流して電気信号を伝える際、電気抵抗によってジュール熱が発生してエネルギーが無駄になっていることだ。電気抵抗がゼロとなる超伝導現象を利用する研究も進められているが、現在知られている、最も高い温度で超伝導になる物質でも、マイナス100℃以下の極低温まで冷やす必要がある。

「私もおかつ超伝導の研究をしたことがあります。特殊な環境でしか現れないその現象を実用化して広く普及させるには、多くの課題が残されています。スピン流は室温でさまざまな物質に起きる普遍的な現象なので、実用化にとっても有利です」

スピン流を使って電気信号をやりとりすることで、消費電力が極めて少ない情報処理や通信が実現できる。

### 音波や回転運動でスピン流をつくる

齊藤GLは2009年に東北大学金属材料研究所の教授に就任、さらに2010年には原子力機構先端基礎研究センターに力学的物質・スピン制御研究グループを立ち上げ、研究を進めている(図3)。

「先端基礎研究センターでは、音波による振動や回転運動などの力学的な手法でスピン流を生成する研究を進めています」

齊藤GLたちは2011年、音波により物質を振動させることでスピン流を生成し、発電できることを実証した(図4)。その原理を用いることにより、金属・絶縁体・磁性体・非磁性体を問わず、あらゆる物質から電気・磁気エネルギーを取り出すことが可能だ。建造物の壁や床に貼るだけで環境中の雑音を電気に換える素子を開発できると期待されている。

「さらに私たちは回転運動からスピン流を生成し

て発電することも目指しています。どのようにすればよいのか原理は分かっているので、原子力機構に蓄積された回転運動の技術を駆使して、ここ数年で実証したいと思います」

### 今後10年で物理学を書き換える

齊藤GLたちは、なぜ次々とスピンの新しい発見を成し遂げることができるのか。

「私たちはスピンの重要性にいち早く気づき、その原理を築いてきたので、ほかの研究者たちに先んずることができます。これまで発表した以外にも、スピンの生成方法のアイデアがあります。今後、それを実験で実証するとともに、それぞれの現象が起きる仕組みを、理論として書き上げる必要があります」

齊藤GLは、今後の展望を次のように語る。「スピン流を含む形で電磁気学や力学を書き換え、物質中の量子力学を完成させることが重要です。それには一般相対性理論を理論に組み込む必要があるため、膨大な作業量になります。その壮大な挑戦に、5年ほど前から東北大学金属材料研究所の前川禎通 教授(現・先端基礎研究センター長)たちと一緒に取り組んできました。私たちは今後10年で、物理学を書き換えるつもりです」

現在の電子工学は、コイルの中で磁石を動かすと電流が流れるという電磁誘導の法則に基づいている。「電磁誘導は特殊な環境だけで成り立つ現象ではなく、普遍性があります。そして高度に完成された電磁気学という強固な土台の上で現代の電子工学は発展を遂げ、今日の私たちの社会や暮らしを支えています。応用が大きく進展するには、現象の普遍性と、しっかりとした論理体系が必要です」

電磁誘導と同様にスピン流も普遍的な現象だと齊藤GLは強調する。「私たちのスピンの実験はいずれも、特別な技術を用いているわけではありません。ただし、その現象の原理は誰も考えたことのないものです」

スピン流は電子工学をどのように発展させ、私たちの社会や暮らしに変革をもたらすのか。「それは私にも分かりません。19世紀にマイケル・ファラデーが電磁誘導を発見したとき、何に役立つか聞かれて、答えられなかったそうです。物理学の原理をつくる時、役に立つかどうかを考えることはあまり意味のないことなのです。スピン流を利用した応用例をいくつか紹介しましたが、実際の社会のニーズや市場がどこにあるのか、研究者には見えないことがあります。私たちのやるべきことは、スピンのしっかりとした論

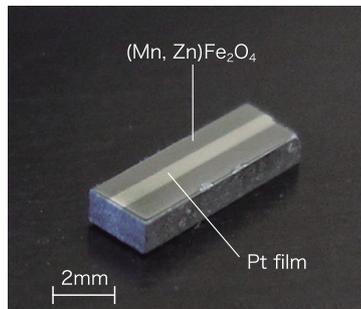


図4 音波でスピン流を生成する実験に用いた試料 絶縁体である鉄酸化物単結晶の試料に音波を伝えて振動させることでスピン流を生成。そのスピン流に伴う電場を、試料の上に付けた白金電極で測定した。

理体系を完成させること、そしてスピンの普遍性や優位性を分かりやすく社会に示すことです」

### 物理学をさらに美しくする

「高校生のころは、科学者になるとは思ってもいませんでした」と齊藤GLは振り返る。「5歳のときからピアノを習い、将来は作曲家になりたかったのです。しかしやがてその道をやめ、物理学を志しました」

齊藤GLにとって物理学の魅力とは何か。「美しさです。それはクラシック音楽の美しさとよく似ています。クラシック音楽には、調和性や均衡といった建築学的な美学があり、歴史に残る名曲は論理的に完璧です。物理学も論理体系の完璧性を持ち、物理法則そのものが美しいのです。ただし、クラシック音楽も物理学も、その美しさ分かるまでには修行が必要です。そして奥が深いところも似ています。のめり込めばのめり込むほど、その美しさに驚嘆します」

齊藤GLは、「発想の原点も美しさです」と続ける。「美しい物理学の論理体系の美しくない部分が気になるのです。なぜ美しくないかを考えていくと、論理の矛盾や欠陥が見えてきます。5年前に見つけた美しくないところには、スピン流が欠けていたのです。さらに、それが役立つ技術に発展する様子を目の当たりにし、ますます基礎の重要性を感じています」

(取材・執筆:立山 晃)

#### ●参考文献

- [1] Conversion of spin current into charge current at room temperature: inverse spin-Hall effect. E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, *Applied Physics Letters* **88** (2006) 182509-1-182509-3.
- [2] Observation of the spin Seebeck effect. K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh\*, *Nature* **455** (2008) 778-781.
- [3] Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator. Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa, and E. Saitoh\*, *Nature* **464** (2010) 262-266.
- [4] Spin Seebeck insulator. K. Uchida, J. Xiao, H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, J. Ieda, T. Ota, Y. Kajiwara, H. Umezawa, H. Kawai, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, and E. Saitoh\*, *Nature Materials* **9** (2010) 894-897.
- [5] Electrically tunable spin injector free from the impedance mismatch problem. K. Ando, S. Takahashi, J. Ieda, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C.H.W. Barnes, S. Maekawa, E. Saitoh, *Nature Materials* **10** (2011) 655-659.