

物理法則の新たな 歴史を創るスピン流

従来のエレクトロニクスは電子の持つ電荷に注目して構築されてきたが、20世紀後半のナノテクノロジーの発展は、電子の自転であるスピンの利用を可能にした。スピンの流れ、すなわちスピン流の物理現象に世界に先駆けて着目し、スピン流の基礎物理法則を解明してきたのが、東京大学大学院工学系研究科の齊藤英治教授だ。スピン流を組み込んだ電磁気学の体系化とともに、新しいエネルギー技術の開発や次世代磁気デバイスへの応用を目指す。

方程式に潜む角運動量を発見 物理学の体系化を決意

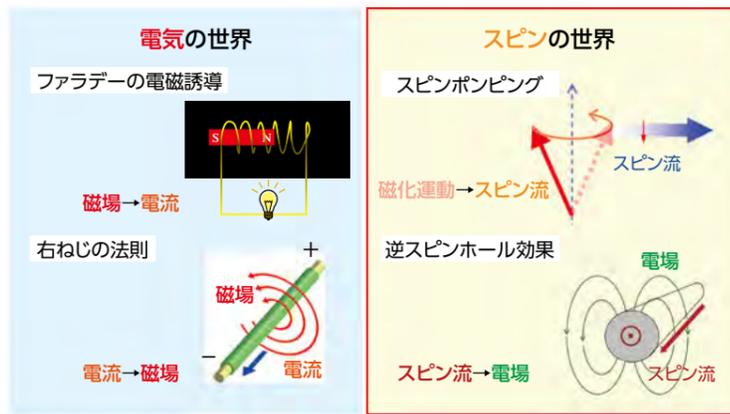
「現代の物理学者にも、ニュートンやアインシュタインのように、新しい基礎物理法則を発見できるチャンスはあります」。東京大学大学院工学系研究科の齊藤英治教授の言葉は力強い。

2006年、初めて自分の研究室を立ち上げるに当たって、齊藤さんは新しい科学の出発点となるような研究を探していた。そして見つけたのが、ある物理現象が物理学の論理体系に記述されていないことだった。「物理方程式の中に、スピン流という未知の物理量が潜むことに気付いた時の興奮は、今でも鮮明に記憶しています」と振り返る。

さいとう えいじ
齊藤 英治

東京大学 大学院工学系研究科 教授

2001年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。慶應義塾大学理工学部専任講師、東北大学金属材料研究所教授などを経て、18年より現職。07～11年さきかけ研究者、10～15年CREST研究代表者、14年よりERATO齊藤スピン量子整流プロジェクト研究総括。



■ 図1 スピン流は電流の基礎法則と対応する法則を持つ。磁性体の磁化が変化すると、磁石に接した金属にスピン流が流れる。この効果はスピンポンピングと呼ばれ、磁場が変化すると電流が流れるファラデーの電磁誘導の法則に対応する。逆スピンホール効果は、電流が流れると磁場が生じるアンペールの右ねじの法則に対応する。

電子は、電気(電荷)の性質とともに、電子の自転によって生まれる磁石の性質(スピン)を持つ(図1、P6コラム)。電荷の流れとして電流があるのと同じように、スピンの回転運動の大きさ(角運動量)の流れがある。

しかしエレクトロニクスの基礎となる従来の電磁気学や力学では、ミリメートル以上の距離を流れる電流のみが扱われ、スピン流の記述は見当たらなかった。固体中のスピン流はわずか1マイクロメートルで消えてしまうからだ。

ところが1990年代半ば、ナノテクノロジーが進展すると、「マイクロスケールやナノスケールの微細加工が可能となり、スピンやスピン流が見えてきました」。電荷を利用するエレクト

ロニクスに次いで、電荷とスピンの両方を利用するスピントロニクスが注目されるようになった。

一方で、スピン流を制御するために必要なスピンの物理法則はほとんど知られていなかった。「物理法則を探り、スピン流という物理量を組み込んだ物理体系に自らの手で書き換えよう」と齊藤さんは決意した。こうして、物理法則の新たな歴史を創る壮大な挑戦が始まった。

測定方法の開発に成功 精密科学の対象に

スピン流の存在は理論的には知られていたが、測定する方法がなかった。短い距離で消えるスピン流を、どうやって測るか。

電流が流れると周りに磁場が生じる。この磁場の力を捉えることで電流を測定できる。「それならば逆に、磁石の性質を持つスピン流を流せば、電場が生まれてスピン流を測定できるのではないか」とひらめいた。

スピン流を作るのも測るのも、あらゆることに初めてだったが、1年後、世界で初めてスピン流の測定に成功した。白金の薄膜を使った実験で、スピン流の流れに対して垂直に電圧が生じたことを確認できたのだ。電流からスピン流が生成される「スピンホール効果」とは逆の新しい物理現象であることから、「逆スピンホール効果」と名付けた。「この実験結果を論文にして科学雑誌に投稿したところ、『あまりにも話が出来過ぎていて、最初は信じられなかった』と査読者に言われました」と齊藤さんは笑う。

スピン流の物理現象は室温で現れることが多く、比較的短い期間で応用に結び付けられると期待される。測定方法の開発によって、スピン流は実験科学や精密科学の対象となり、スピン流の物理現象のさらなる探索や、発見された物理法則の応用への道が拓いた。

新しい発電原理の発見 熱電変換素子に応用

磁気デバイスの発展には、スピン流を自在に操ることが欠かせない。齊藤さんは、スピン流の物理体系の基礎となるスピン流の基礎物理現象の開拓を進めた。

08年、熱でスピン流が生成される物理現象、すなわち、スピン流を利用した全く新しい熱電変換原理を発見した。電流や磁界を使わずとも、磁性体の両端に貼った金属膜に温度差を与えるだけで、熱流からスピン流が生成される。このスピン流が、さらに逆スピンホール効果で電流に変換されて、温度差に比例した電圧が生じる仕組みだ。金属の両端に温度差を与えると電圧が生じる現象「ゼーベック効果」に由来して、そのスピン版として「スピンゼーベック効果」と呼ぶこととした。

スピンゼーベック効果に基づく熱電

変換素子は、磁性体と金属を貼り合わせた単純な構造なので、半導体を使った従来のゼーベック効果の素子と比較して低コストで製造できる(図2)。エレクトロニクスにはない設計原理で材料や素子を開発できると、スピン流への期待は大きい。

スピン流だけを流す物質 エネルギー損失の低減に期待

半導体や絶縁体など、物質は電流の流れやすさで分類されている。「電流は流れずにスピン流が流れる物質も多数あるはずだ。スピン流の流れやすさで物質を分類し直したいと考えました」。

10年には、電気を通さない絶縁体にスピン流を流して、電気信号を伝えることに成功した。絶縁体であるイットリウム鉄ガーネットの両端に白金電極を取り付け、一方の電極から電流を流したところ、まるで絶縁体を通り抜けたかのように、もう一方の電極に伝わるのを確認できた。これは、入り口の電極ではスピンホール効果により電流がスピン流に変わって絶縁体中を伝わり、それが出口の電極で逆スピンホール効果により再び電流に変わったことを意味している(図3)。

スピン流だけを流す物質は、まだ世界で知られていなかったが、期待は高まっていた。エレクトロニクスの課題は、電流を流して電気信号を伝える過程で、電気抵抗によって発生



したジュール熱がエネルギーを放出してしまうことだ。スピン流だけが流れる物質であれば、エネルギーの損失を抑えた情報処理や通信を実現できる。

さらにスピンゼーベック効果が絶縁体でも現れることを見だし、絶縁体を使って熱発電する実験に成功した。従来の常識では考えられなかったことだが、絶縁体から電気や磁気エネルギーを取り出す新手法としての可能性が示された。

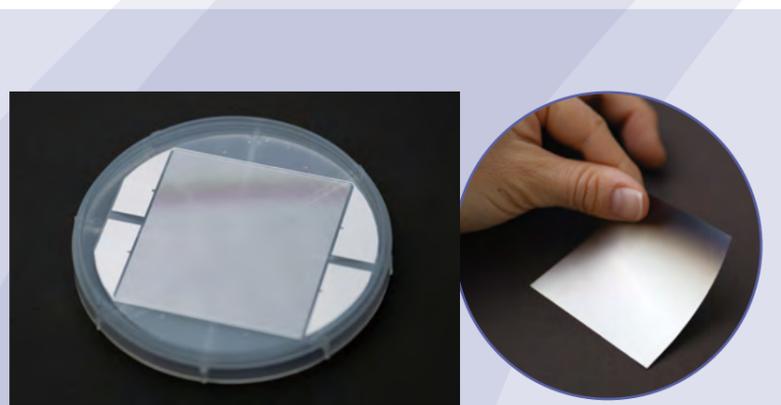
応用研究に向けて、「スピン量子整流・スピンゼーベックアソシエーション」という産業界向けの組織を立ち上げ、スピンゼーベック効果に関心のある企業との情報交換会議を開催している。技術シーズを提供するとともに、産業界のニーズを掘り起こして、

革新的デバイスの開発につなげていくことが狙いだ。

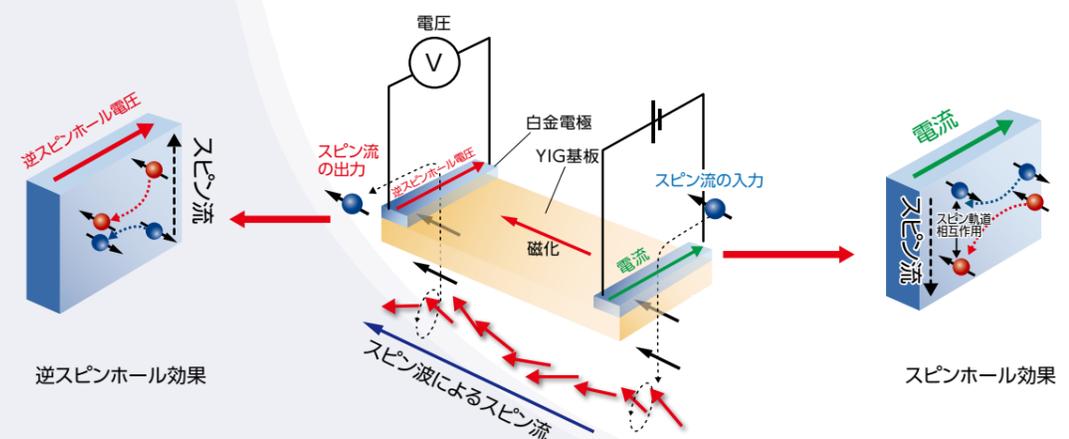
熱力学と流体力学の 方程式を書き換える

通常、物体を回転させるには外部からエネルギーを加える必要があり、その回転はいつか止まる。しかし電子のスピンの回転が止まることはない。

「スピンは永遠に一方に回転し続けます」。これを物理用語で「時間反転対称性を破る」と呼ぶ。時間反転とは、動画を逆再生するように時間の流れを逆向きにする。電流は時間を逆向きにする反対側に流れるが、スピン流は変わらない。永遠に自立回転するモーターともいえる。「量子力学に固有な量でこの特性を持つのは、



■ 図2 スピンゼーベック効果を用いた熱電変換素子。製造過程で高温の熱処理が不要なため、プラスチックフィルムなどの表面に作製が可能になり、さまざまな形状に加工できるフレキシブル素子を実現した。



■ 図3 イットリウム鉄ガーネット(YIG)結晶に付けた白金電極に直流電流を流すと、スピンホール効果によってスピン流が誘起される。このスピン流がYIGの中にスピン波スピン流を作り、絶縁体中を伝播する。このスピン波はスピンポンピングで白金の出口電極にスピン流を生成し、逆スピンホール効果によって電圧に変換される。

スピンとブラックホールしかありません。この2つは非常に良く似ていて、両者を相補的に研究することで、それぞれの物理を読み解けるのではないかと推測しています」。

熱力学や流体力学の基礎方程式に時間反転対称性の破れを明確に取り入れる方法はわかっていない。「スピンという物理量を考えた場合、2つの力学が角運動量保存の法則を満たしていないことは明白」と、流体の運動量と質量の保存則のみだったナビエ・ストークス方程式を書き換えた。

これらの理論研究を基に、齊藤さんはMEMS(微小な電気機械システム)にスピン流を取り入れたデバイスの設計にも着手した。メカニクスとスピンの融合であることから、既存のスピンロニクスをさらに広げたスピンメカニクスと呼べる新たな研究領域の創造だ。

ランダムな運動を整流 エネルギー変換の効率化

電気とスピンは、それぞれ得意なものや不得意なものがある。相反していることが多く、電気が苦手なものほどスピンは得意だという。スピントロニクスとエレクトロニクスは相互に

補完しながら活用されていくと考えられる。「一方で、スピンだからこそ実現可能な機能を見つけ出すことも重要です。最も注目している性質が、整流性です」と齊藤さんは強調する。

物質のランダムな運動を一定の方向にそろえる整流は、電気には難しい場合がある。しかしスピン流として一方向に流れを整えれば、外部から大きなエネルギーを加えることなく、スピン流を別のエネルギーに変換したり、情報処理したりできるようになる。

スピンゼーベック効果で熱発電できたのも、原子や分子の熱によるランダムな運動に整流機能が働いたからだ。これまで別の物理量を使っていた仕事をスピン流に置き換えることで、効率性を高められる。

14年に発足したERATOプロジェクトでは、「スピン量子整流」を掲げ、原子核物理や固体物理、材料科学の研究者も参画して、理論構築と実験実証の両輪で研究を進めている。

あらゆる回転で 電気や運動を作る

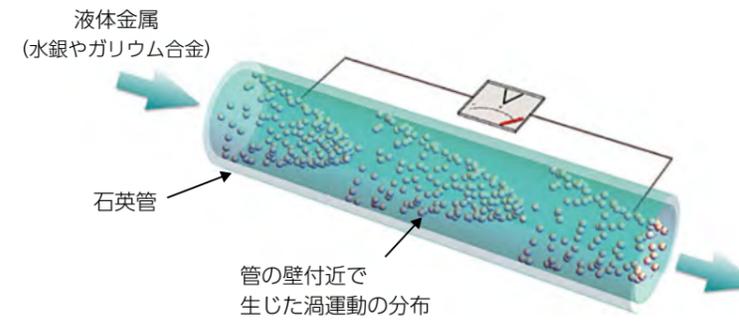
スピンの整流性を利用すれば、熱のみならず、光や音など環境中のエ

ネルギーから電力や運動を取り出せると、齊藤さんは考えた。

単にスピンといえば、電子の自転を指すが、自転する量子は電子だけではない。原子核や光の量子である光子(光子)も自転がある。音にも光子と同じような性質があり、齊藤さんの最近の実験により、スピン流に変換できることがわかった。

これから本格的に到来するIoT(モノのインターネット)社会で鍵を握るのは、あらゆるものに搭載され、大量の情報を処理するセンサーだ。「スピン流を利用すれば、1つのセンサーで、多様なエネルギー源を同時に測定可能です。しかもスピン流は電流に変換されるので、発電システムも兼ね備えています。まさに、究極の理想的なセンサーを実現できるのです」。

15年には、液体金属を流すだけで電気エネルギーを取り出せるという、驚くべき現象を発見した。数百マイクロメートルの細い管に液体金属を流すと、管の壁付近で液体金属中に渦運動ができる。この渦が磁場として働いてスピン流が生成され、100ナノボルトの電気信号が得られた。電子スピンの流体の渦の回転も、同じ角運動量で説明できる物理現象だ(図4)。



■図4 直径数百マイクロメートル(実証実験では400マイクロメートル)の石英管に水銀やガリウム合金などの液体金属を流すと、管の内壁面の近くに液体金属の渦運動が生じる。実証実験では、この渦運動の分布により発生する電圧を、管の流入・流出口に設置した端子により測定した。

核スピンとスピン流を利用した スピントロニクスの実現へ

齊藤さんが解明してきた数々の基礎物理法則は、スピントロニクス領域の新たなデバイス開発への道筋を示す。

半導体を利用した熱電変換素子は、p型とn型という種類の異なる半導体を直列につなげた構造により、熱と電気を変換する。齊藤さんは、超伝導体に磁束が浸入するときのポルテックス(渦糸状態)を回転の流れ(ほぼスピン流)と見なせることに気づき、上向きスピンと下向きスピンの超伝導体をつなぐアップダウン接合を使うことで渦糸の流れの整流に成功した。「非常に高感度で、極微小な環境のゆらぎでも検出できます。理論的には、宇宙の未発見の構成物質である『ダークマター』も、ダークマターの正体が何であるかに依存しますが、

検出できる可能性を示しました」。

このセンサーは超伝導体を使っているため極低温でなければ動作しないが、齊藤さんはこう語る。「地球上で生活していると常温動作に関心がいきがちですが、宇宙環境での動作を考えれば、常温動作にこだわる必要はありません」。

超伝導量子ビットを使った量子コンピューターを実現するには極低温環境が不可欠だが、極低温では熱機関は動作しない。従って、極低温環境下で熱機関に代わるものが必要となる。

「それを実現するものが、原子核の自転である核スピンです」。齊藤さんは18年に核スピン由来のスピン流を電圧として検出することに成功した。核スピンは電子スピンよりも長い時間、スピンの情報を維持できる特徴を持つ。「ERATOプロジェクトでは、スピン流と核スピンをつなぐ技術を

研究しています。この技術が確立すれば、核スピンによる熱機関が実現します。あと1、2年で実現する目途が立っています」。

前人未踏の分野を拓く 現象の普遍性を追求

スピン流物理の構築を先導し、次々と先駆的な成果を挙げてきた齊藤さんに、その秘訣を語ってもらった。「前人未踏の分野を切り拓いていくことは大きなリスクを伴いますが、自分自身がワクワクしていないと、最初の一步は踏み出せません。この方向に進めば宝物を掘り当てられるというセンスを失わないためには、決して惰性で研究をしないこと。心底から科学が好きで、面白いと思わなければ、他人の研究の後追いになってしまいます」。

「これまでの成果は全てJSTの支援なしには成し得なかったことで、感謝は尽きません」と、研究総括の裁量による機動力の高さと、人的ネットワークを作ることができる仕組みを挙げた。「世界のスピードに伍していくには、即断・即決が求められます。その点で機動力の高さには大変助けられました。また、スピン流の研究開発には、幅広い分野の研究者の協力が不可欠であり、JSTのプロジェクトを通して多くの研究者との共同研究が実現したことは大きな財産となりました」。

高校時代に音楽家を目指していた齊藤さんは、予備校の授業をきっかけに物理学に魅了された。「物理学は理路整然とした学問で、音楽の芸術性や美しさと似ています。紙1枚に十分収まるほどの理論体系で神羅万象を説明できることが、非常に不思議でエキサイティングだと思いました」。

スピントロニクスの発展には、物理現象の普遍性と、高度に完成された論理体系が、土台として必要だ。今後の目標は、スピン流など角運動量を軸とする物質科学を確立すること。そして、これまでにない動作原理で稼働する革新的な情報処理デバイスを実現することだ。

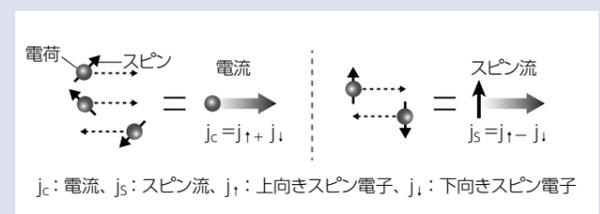
電流とスピン流

ナノテクノロジーという舞台上でスピン流が主役となるのはなぜか。電荷やスピンは流れる過程で電子の不純物やフォノン(音子)と衝突する。電荷の流れである電流は、衝突で散乱を受けるので、ある衝突から次の衝突までに進む距離の平均(平均自由行程)は、1~10ナノメートルと短い。消えずに伝わり続ける。一方、スピンの流れであるスピン流は、衝突しても散乱を受けにくい。そのため、スピン拡散長(電子がスピンの情報を失う長さスケール)は、電流の平均自由行程より長く、強磁性金属で5~10ナノメートル、非磁性金属では100ナノメートル~1マイクロメートルにもなる。

量子論では、磁場などによって決めた量子軸に対して、右ねじがプラスの方向に進む回転を持つスピンを上向き、マイナスの方向に進むスピンを下向きと呼ぶ。磁場がない状態では、それぞれランダムな方向を向いている。スピン流には、

磁性金属中で伝導電子が運ぶもの(伝導電子スピン流)と、磁性絶縁体で磁化の波動運動であるスピン波が運ぶもの(スピン波スピン流)がある。

図左は伝導電子が運ぶ場合で、上向きと下向きの数や流れが異なると、電流を伴うスピン流となる。図右のように上向きと下向きが同じ数で互いに逆向きに流れると、電荷の流れが打ち消されるので、電流を伴わないスピン流、すなわち純粋スピン流となる。



スピン科学の世界に飛び込もう!

Welcome



spinworld えーじ君

最先端の物理学をわかりやすく伝えるとともに、次世代科学の社会普及を通じて未来を創造していきたいと、大学院生や若手研究者を対象としたスクールの開催や、中高生向けの解説サイト「スピンワールド」の運営、LINEスタンプ(左)の作成など、アウトリーチ活動にも力を入れている。



<http://www.spinworld.jp/>