



先端エネルギー物性研究チーム
Advanced Energy Materials Research
Team

物質の力で切り拓く
次世代エレクトロニクス
ナノの世界から創る未来のエネルギー

- 吉川貴史 Kikkawa Takashi[チームリーダー]
- 船戸 匠 Funato Takumi (日本学術振興会 特別研究員PD)

現代の電子機器や情報技術の進展には、物質の構造や性質を解き明かす物性物理学の貢献が欠かせません。

しかし、エネルギー変換の分野では、その可能性をまだ十分に引き出せていないのが現状です。

私たちのチームは、物性物理学とエネルギー技術を組み合わせ、原子を構成する“電子”や“原子核”が示す私たちの直感に反した不思議な性質（例えばスピンと呼ばれる自転のような性質）や物質内部の規則的な構造（結晶格子）を活かした、新しいエネルギー変換原理の創出を目指しています。

最先端の薄膜生成技術やナノ微細加工に加え、当機構が保有する巨大な加速器を駆使し、物質の構造やエネルギー変換のメカニズムを精密に分析したりすることで、これまでになかった物質機能を開拓します。

私たちの身の回りにあるすべての物質(図1a)は、目に見えないほど小さな「原子」からできています(図1b, 1c)。そのサイズは、なんと1ミリメートルの1,000万分の1(=約0.1ナノメートル)ほどしかありません。さらに原子は、その中心にある「原子核」と、その周りを回る「電子」によって構成されています(図1d, 1e)。この構造を身近な例にたとえるならば、太陽の周りを惑星が公転している太陽系のようなイメージが近いかもしれません(図1c)。

このような極小の世界では、私たちの直感が通用しない「量子力学」が重要なルールとして登場します。量子力学とは、極めて小さな世界における物質のふるまいを支配する物理法則であり、私たちの常識や日常的な感覚では想像もつかない現象を数多く説明します。たとえば、電子や原子核が持つ「スピン」と呼ばれる性質が挙げられます。スピンとは、身近な例でい

ば地球の自転のようなものですが、実際には回っているわけではなく、量子力学的な“性質”として存在します(図1d, スピンは慣例的に矢印で表現されます)。こうした物質の性質を量子力学の観点から理解し、物質が外部からの刺激(電気、光、熱、振動など)に対してどのように応答するかを明らかにする分野は「物性物理学」と呼ばれており、現代物理学の中心的な分野のひとつとなっています。

実はこのスピンこそが、私たちの身の回りにある「磁石」のもとになっている性質です。磁石は、冷蔵庫にくっついているような大きなものから、コンピューターの中にある微小なものまで、さまざまな形で使われています。最新のナノテクノロジーを駆使すれば、10ナノメートル程度(1ミリメートルの10万分の1)の小さな磁石の膜を作製することができ、これが情報を記録・保持するために重要な役割を果たしています。磁石の

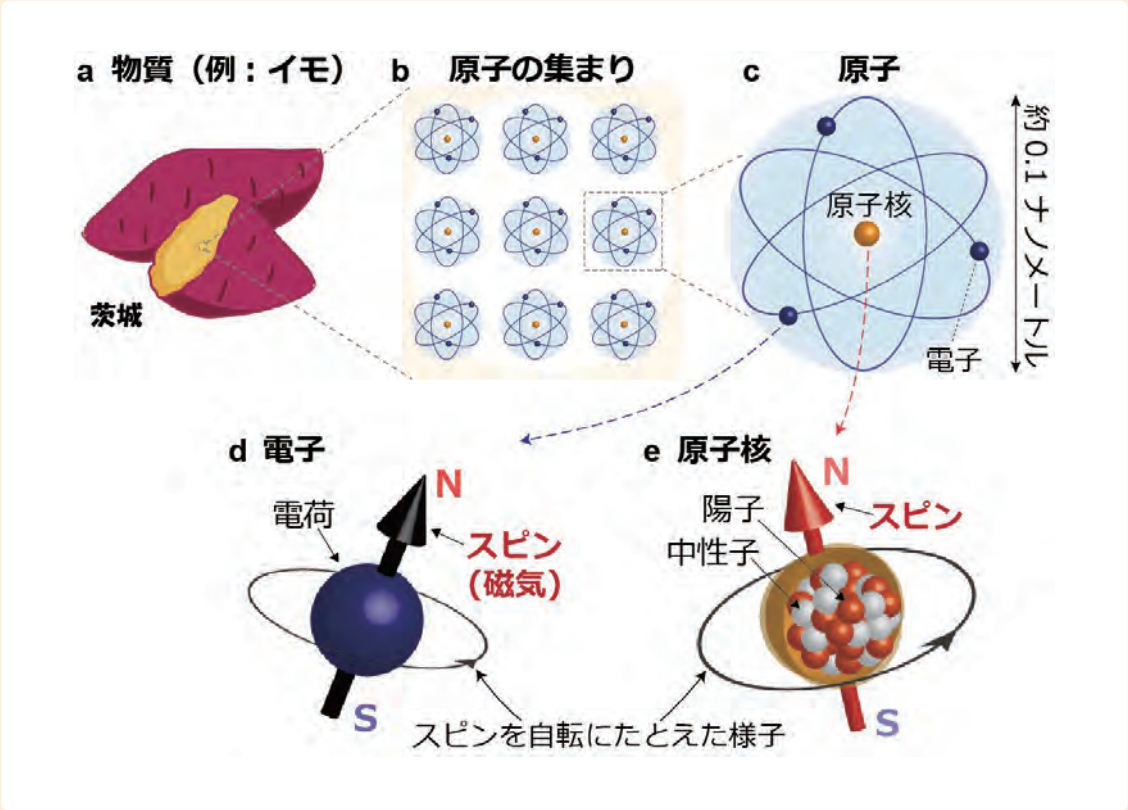


図1

図1: 物質の階層及び電子・原子核の模式図

N極とS極の向き(図1d)によって、0と1のデジタル情報を記録できるのです。こうした技術はクラウド上のデータ保存など、現代の情報社会を支える柱のひとつとなっています。

このような微小な磁石や電子のスピンを利用する最先端の研究分野が「スピントロニクス」です。スピントロニクスは、電子の「電荷」の性質に加えて「スピン」に注目した学術分野であり、21世紀に入って急速に発展してきました。従来のエレクトロニクスでは、電子の流れである「電流(図2a)」を制御することで、情報のやり取りや記録を行ってきましたが、スピントロニクスでは、電子の持つスピンの流れ、すなわち「スピン流」を制御して利用します。これは図2bのように原子サイズの小さな磁石が固体中を流れるようなイメージであり、量子力学に根ざした新しいアプローチです。スピン流を使うことで微細な磁石のN極とS極の向きを反転させ、情報の書き込みを極めて省エネルギーで行うことができます。このため、エネルギー消費の少ない磁気メモリ(MRAMなど)への応用が進められています。

さらに驚くべきことに、スピン流は発電にも使えることがわかってきました。たとえば、ある種の磁石を熱源の上に載せるだけで、スピン流が生まれ、それを電流に変換することで電気を取り出すことのできる「スピンゼーベック効果」が挙げられます。このデバイス構造は、原子炉など高い放射線環境でも使用でき、排熱な

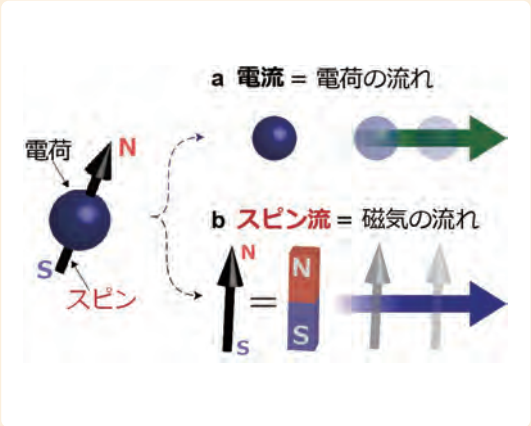


図2

図2: 電流とスピン流の模式図

どの熱エネルギーを電気に変換し、熱発電を可能にします。日本原子力研究開発機構(以下、当機構)は、この研究を推進する拠点として広く認知されています。このような試みは、当機構が進めているNXR「ニュクリア×リニューアブル(=再生可能エネルギー利用技術)で拓く新しい未来」の取り組みとして、機構での重要なミッションのひとつとなっています。

そして、私たちのチームが注目しているもうひとつのスピンの存在があります。それが「核スピン(図1e)」です。電子がスピンを持つと同様に、原子の中心にある原子核もスピンを持っています。核スピンは、電子スピンよりも非常に長い時間その状態を保つことができるという特徴があります(これを「スピン緩和時間が長い」といいます)。この性質を利用して、物質の内部の性質を調べる技術が「核磁気共鳴(NMR)」であり、医学で広く使われています。私たちの体の中にある核スピンを利用して、検査したい部位の状態を詳細に画像として映し出すことができます。原子核というと、原子核の崩壊を利用した原子力発電や放射線など、大がかりなイメージを持つかもしれませんが、しかし実際には、原子核は私たちの体の中にもあり、身近な存在なのです。

そして私たちの研究では、この核スピンを新たな方法でエネルギー変換に利用しようとしています。実際に当チームリーダーの吉川らは「核スピンゼーベック

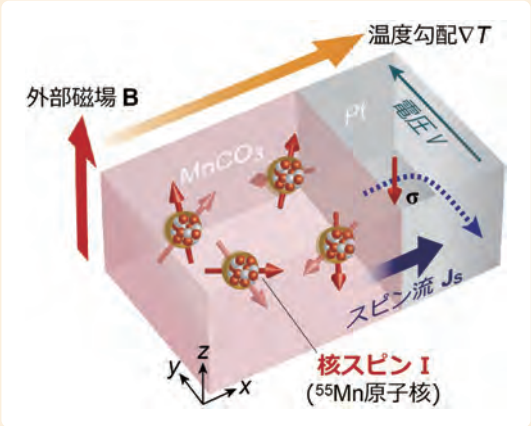


図3

図3: 核スピンゼーベック効果の模式図
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-24623-6>

効果(図3)」と呼ばれる、核スピンを利用した初の熱発電の実証に成功しています。これは、従来の電子スピンや電荷による発電では実現が難しかった、絶対零度(-273.15℃)近くの超低温でも発電できる技術です。こうした低温環境は、宇宙空間や量子コンピューターで必要とされる超低温環境であり、このような条件にも原理的に適用できる魅力的な現象といえます。

現在当チームでは、これまでの研究をさらに発展させ、単にエネルギーを変換するだけでなく、「貯蔵」や「制御」といった応用へと広げようとしています。最近、当チームが所属する先端基礎研究センターでは、新しい原理で駆動されるインダクタ(電気エネルギーを蓄える原理)の理論提案も行い、スピントロニクス技術と組み合わせることで、より効率的で革新的なエレクトロニクスの実現を目指しています。従来のエレクトロニクスでは主に電子の電荷が中心的な役割を果たしてきましたが、私たちはスピンという新たな自由度を電子と同じくらい自在に操れるようにすることを夢見ています。これは夢のような技術ですが、理論的な裏付けと実験の積み重ねによって一歩ずつ進めていきたいと考えています。もしこれが可能になれば、情報処理の効率が飛躍的に向上し、電子機器がもっと省エネで高性能になるかもしれません。また今後私たちは、当機構の持つ大型加速器設備を活用し、物質にビームを照射することで新たな機能を引き出す研究も進めていく予定です。これにより、既存の材料に新たな性質を目覚めさせ、デバイス開発につなげていきたいと考えています。

私たちのチームは2024年に立ち上がったばかりであり、まさに本格的な研究に着手したところです。今年の2月には、船戸博士という強力なチームメンバーも加入しました。船戸博士は理論物理学で博士号を取得し、企業での応用研究を経て基礎研究に戻ってきた研究者です。現在はバリバリ実験を進め、活躍しています。こうした多様な背景を持つメンバーと共に、実験と理論を融合させた研究を進め、新しい現象の発見や応用技術の開発を目指しています。

当チームでは、目に見えない世界の“しくみ”をイメージしながら探求し、未来の社会を支える技術を創り出す日々を楽しみつつ、このような未来志向の基礎研究を通じて、最先端の科学を開拓していきたいと考えています。

チームリーダーの自己紹介

1991年に生まれ、高校まで神奈川県で過ごしました。もともと宇宙や天文などの物理の世界に興味を抱いて東北大学に進学しましたが、学部生の時に出会った物性物理学の魅力に引き込まれていきました。特に3年生のときに受けた齊藤英治教授(当時当センターのグループリーダーも兼任)の授業をきっかけに、スピントロニクスという新しい物理・工学の分野に強く惹かれ、卒研時から齊藤研究室に所属して研究を始めました。それ以来、2018年の博士号の取得を経て、東北大学・東京大学齊藤研で助教として6年半にわたり研究・教育に従事してきました。そして2024年10月に現職に着任しました。これまで積み重ねてきた研究経験やスキルが私の原動力となっています。今後は原子力機構の研究者とより連携し、新たな科学技術の可能性を切り拓きたいと考えています。



(写真左から) 吉川貴史チームリーダー、船戸匠研究員