

Title	電子の磁石としての性質が生み出す、スピンの流れを解明する： スピン流を制御する物理基盤を築き、次世代電子技術を切り拓く
Sub Title	
Author	田井中, 麻都佳(Tainaka, Madoka)
Publisher	慶應義塾大学工学部
Publication year	2015
Jtitle	新版 窮理図解 No.21 (2015. 12) ,p.2- 3
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	研究紹介
Genre	Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO50001002-00000021-0002

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

電子の磁石としての性質が生み出す、 スピンの流れを解明する

スピン流を制御する物理基盤を築き、次世代電子技術を切り拓く

スピントロニクスとは、スピンという電子のもつ量子力学的自由度が生み出す新しい物理現象を探索し、電子技術への応用を目指す分野である。安藤和也さんは、電流と変換可能で、エネルギーをほとんど損失することなく情報を伝達できるとして注目されるスピン流を理論的に解き明かすことで、スピントロニクスの発展に役立てようと研究に取り組んでいる。

スピンとは 電子の磁石としての性質

安藤さんが手がけるのは、電子がもつ「スピン」と呼ばれる自由度が生み出す物理現象を解明する、スピントロニクス分野の研究である。

「スピンというと自転と訳されることが多いのですが、むしろ磁石のことなのです。電子が電荷をもつと同様に、電子は磁石としての性質を備えています。ところが、量子の世界ではスピンは上向き／下向きのどちらか2つの状態しかとることができません。たとえば、鉄は強磁性の物質ですが、それは、上向きのスピンと下向きのスピンをもつ電子の量が違う、すなわち不均衡だからです。一方、金や銀は、上向きも下向きも同量のスピンをもつ電子が存在することから、磁石にくっつかないのです」と、安藤さんは説明する。

通常、物質に外から電圧をかけると、上下2つのスピンをもつ電子が同じ方

向へ動くため、スピンの流れは全体として相殺され、電荷のみが動くことで電流が生じる。ところが、2つの電子を逆方向に運動させると、逆に電荷の流れが打ち消されて、スピンの流れだけが現れる。この電子スピンの流れが、スピン流である。

「スピン流の研究における大きな成果としては、2007年にノーベル物理学賞を受賞したフェール（Albert Fert）とグリュンベルク（Peter Grünberg）らが1980年代に発見した、『巨大磁気抵抗効果』があります。これは、強磁性膜と非磁性膜を重ねた多層膜において、スピン流の影響により金属の電気抵抗が大きく変化する現象のこと。この発見により、ハードディスクなど記録媒体の記録容量が劇的に向上しました。この現象は電流に付随したスピン流（スピン偏極電流）により発現するものですが、2000年頃からスピンのみの流れを作り出せるようになり、電荷の流れを伴わないスピン流の研究が盛

んに行われるようになったのです」。

スピン流の最大の利点は、電流で起こる熱によるエネルギー損失がないことだ。つまり、電子の電荷の代わりにスピン流をうまく制御できれば、ほとんどエネルギーを損失することなく、量子情報が伝送できるようになる。この点がスピントロニクスが次世代電子技術として期待される最大の理由である。

スピン流と電流は変換可能

そのスピン流の研究の中で安藤さんが手がけるのが、スピン流の制御に役立つ基礎的な物理現象の解明である。「そのひとつが、『逆スピンホール効果』と呼ばれる現象です。これは、スピン流が流れているときにスピン流と直交する方向に電圧が現れるというもので、2006年から2007年にかけて、金属系において初めて観測されました。

この現象は、アインシュタインが発表したことで知られる特殊相対論から理解できます。特殊相対論では、『動いている物体の長さは縮んで見える』とか、『動いている時計の時間はゆっくり進む』といった不思議な現象が説明されますが、この理論を使うと、動いているスピンの一部は電気分極へと変換されます。このような相対論的現象が物質中で現れているのが逆スピンホール効果です。簡単に言えば、逆向きのスピンをもつ2つの電子が同じ方向に散乱され、電子がたまることで電圧が現れるんですね。

同様に、逆の現象も起こります。つまり、電流を流すことで2つの電子が逆方向に散乱されて、垂直方向にスピン流が発生する。これが、2004年に複

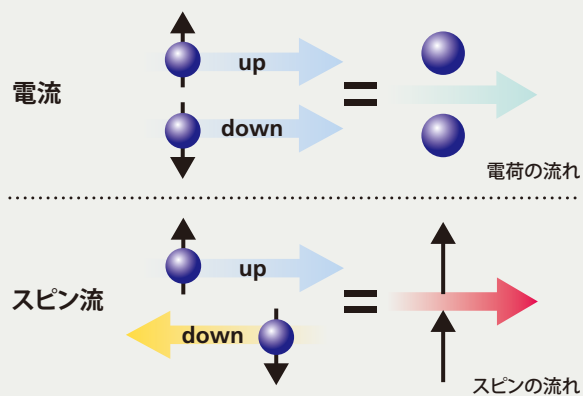


図1 「スピン」の流れ

上向きスピンを持った電子と下向きスピンを持った電子が同じ方向に運動していると、電荷の流れが現れる。これを電流と呼んでいる。一方で、もしこの2種類の電子が互いに逆方向に運動していると、スピンの流れが現れる。このような電子スピンの流れがスピン流である。

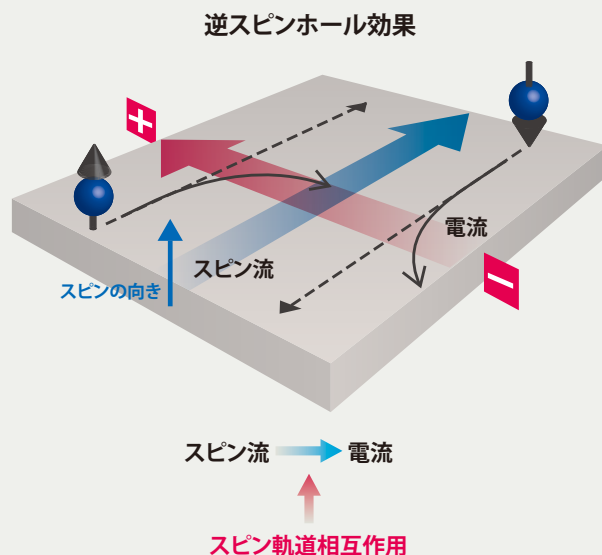
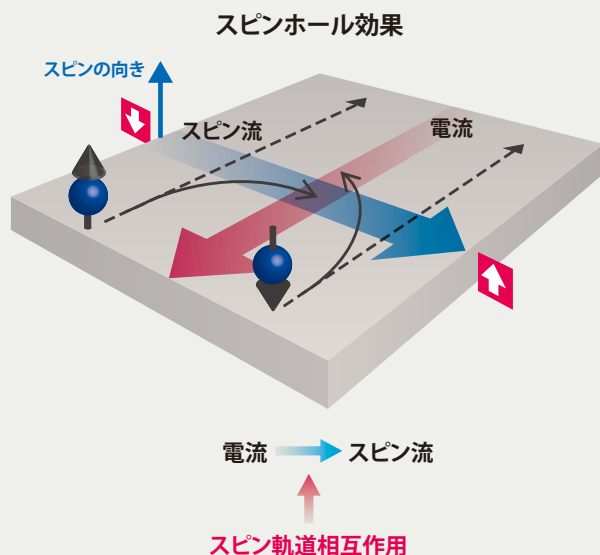


図2 スピンホール効果・逆スピンホール効果

数のグループでほぼ同時に実験的に観測された、スピンホール効果です」。

こうした物理現象を理論的に解き明かすことで、磁性体を使わずにスピン流をつくったり、スピン流と電流を変換したりできるようになり、スピン流の研究が一気に加速した。安藤さんはこうした知見に基づき、現状は数%というスピン流と電流の変換効率を上げる試みや、物質界面の相対論的效果の制御など、日進月歩で進展する研究テーマに取り組んでいるところだ。

さまざまな物質におけるスピン流

ここで安藤さんの研究で特筆すべきなのが、スピンの揺らぎがつくる「マグノン」と呼ばれる粒子の研究である。

「実はスピン流というのは、電荷が流れていなくても発生するんですね。つ

まり、絶縁体の中でもスピン流は流れる。この絶縁体中のスピンの流れを担うのが、スピンの揺らぎであるマグノンです。量子力学では、ゆらぎ（波）というのは、粒子と見なすことが可能で、スピンの波の粒子としての振る舞いがマグノンであり、この性質により絶縁体においても情報の伝送が可能になるのです」。

従来の電流による情報処理では、半導体などの電気伝導性をもつ物質が不可欠だったが、絶縁体で情報処理ができれば、材料として使える物質の幅が大きく広がることになる。

「しかも、電気伝導性をもつ物質ではスピン流はわずか数ナノメートルから数百ナノメートル程度で消えてしまうのですが、絶縁体中では数ミリメートルと桁違いの距離をスピン流は伝導する。また、金属と絶縁体の界面では、スピン流を運ぶキャリアが伝導電子からマグノンへと変換されるのですが、その際に、このマグノンの寿命が変換効率の鍵を握ることを最近、突きとめました」と、安藤さんは言う。この画

期的な発見は、2014年12月に『Nature Communications』に掲載された。

さらに、マグノンの分裂・結合が引き起こす非線形物理の解明にも挑む。

「マグノンというのは、いきなり2つに分裂したり、2つのマグノンが1つに結合したりと電子とは違う性質をもちます。そうした動きを、外から制御したり、スピントロニクス現象に与える影響を明らかにしようとしています。スピントロニクスに使える材料が広がったり、スピン流を自在に制御できたりするようになれば応用につながるわけですが、そのための基礎的な物理を解き明かすのが私の研究の目的です」。

さらに最近では、有機物におけるスピン流の研究も手がけている。有機物中における電流からスピン流への変換効率は低いが、スピン流の寿命はマイクロ秒と比較的長く、スピントロニクスにおける新たな材料としての可能性を探りたいと安藤さんは展望を語る。

「磁性の研究は日本が強い分野なのですが、次世代メモリとして注目されるホットな研究だけに、企業も含めてライバルが非常に多いのです。その中で、マグノンや有機材料など、未踏の分野を自らの手で切り拓いていきたいと思っています」。

(取材・構成 田井中麻都佳)

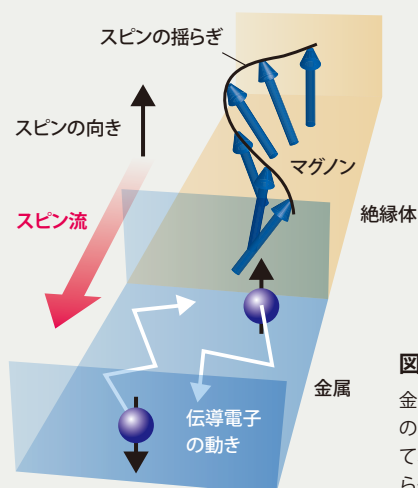


図3 固体中の非線形角運動量変換

金属と絶縁体の界面では、伝導電子とマグノン間でスピンの受け渡しが起こる。これによって、界面ではスピン流を運ぶ粒子がマグノンから伝導電子へと変換される。