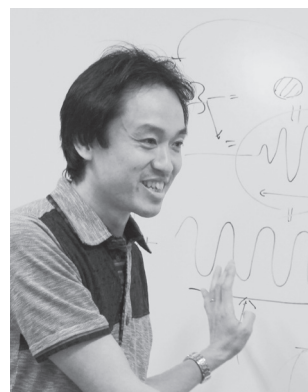


紙と鉛筆で現象を予言する

物性物理学専攻 村上 修一 研究室

村上 修一 教授 1970年大阪府生まれ。東京大学大学院理学系研究科博士課程中退。1996年、東京大学大学院工学系研究科助手。1999年、博士（理学）を取得。2007年、東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻准教授。2012年より、同専攻教授、および東京工業大学元素戦略研究センター教授。



現在、スピントロニクスという分野の研究が活発に行なわれている。この分野の研究は、村上先生が電子のスピンホール効果を2003年に提唱し、この現象が実験的に観測されてからよりいっそう活発になった。本稿では、先生が提唱した電子のスピンホール効果と、現在先生が研究しているトポロジカル絶縁体という物質を取り上げる。

物質の数学的な構造

すべての物質の性質には電子が深く関わっている。例えば、金属が金属光沢や延性をもつのは、金属中に存在している自由電子が特有の振る舞いをするからだ。このようなことが、金属以外の物質でも同様に言える。

物質の性質は電子によって決まると述べたが、より詳しく言えば、物質中の電子によって物質の数学的な構造が決まり、その数学的な構造により物質の性質が決定されるのだ。この構造は物質によってさまざまであり、数学的な構造が異なれば物質のもつ性質も異なる。

村上研究室では物質の数学的な構造に着目した研究をし、電子のスピンホール効果を2003年に、光のスピンホール効果を2004年に予言した。では、物質の数学的な構造を決めている電子の性質を見ていくとともに、村上先生の予言したスピンホール効果とはどのようなものなのかを見ていこう。

スピンホール効果

電子には主に2つの性質がある。1つは負の電荷をもつという性質。もう1つは、自転しているという性質である。この自転をスピンという（図1）。スピンの種類にはアップスピンとダウンスピンの2種類がある。電子が動くと電荷の流れのみならずスピンの流れができる。この流れをスピン流と呼び、アップスピンの電子の流れとダウンスピンの電子の流れの差によって定義される。

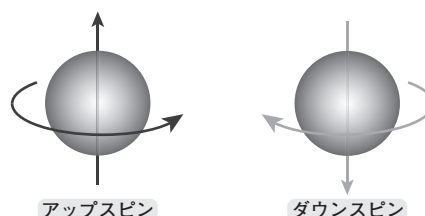


図1 電子のスピン

上下方向の矢印は、各電子の自転の向きを右ねじの法則にしたがって表している。

まず、アップスピンの電子とダウンスピンの電子が互いに逆向きに移動している状況を考えよう。このとき、両方の向きに等しい数の電子が移動しているとすると、電荷の流れは打ち消され電流は全体として0となり、スピンのみが流れる。この電流を伴わないスピンのみの流れを純スピン流と呼ぶ（図2）。

純スピン流が流れる現象の一例として電子のスピンのホール効果がある。電子のスピンのホール効果は純スピン流と電流が互いに垂直に流れる現象である。この現象はアップスピンの電子とダウンスピンの電子の数が等しい金属に電圧をかけると起こる。このとき、アップスピンの電子とダウンスピンの電子は電流と垂直な方向で互いに逆向きに動く（図3）。このようにアップスピンの電子とダウンスピンの電子が左右対称に動くため、電流と垂直な方向の電荷の流れは打ち消され、純スピン流が流れる。

電子のスピンのホール効果は、波数空間を導入することにより、数学的に記述される。波数とは、単位長さあたりに含まれる波の数のことを指す。波数を用いて電子のスピンのホール効果を記述できるのは、電子が波動性をもっていることに起因する。電子は波、正確には波束として数学的に記述できる。波束は、異なる波が合わさってできた塊のようなものであり、異なる波数の波に分けられる。このように電子の波動性が、電子のスピンのホール効果の波数空間における記述を容易にしている。

波数空間における現象を実空間における現象と比較しながら説明しよう。磁場のある実空間において荷電粒子が移動している状況を考える。すると、粒子は電荷をもつことにより磁場の影響を受け、運動が変化する。似た現象が波数空間におい

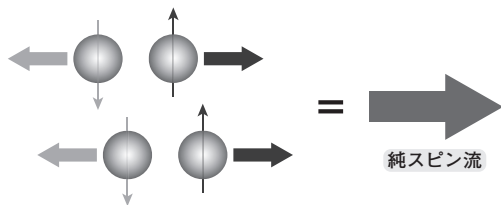


図2 純スピン流

左右に等しい数の電子が動くため、電荷の流れは打ち消され、純スピン流のみが流れる。

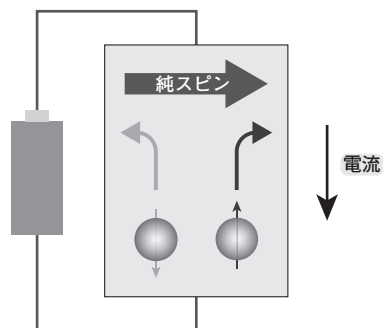


図3 電子のスピンのホール効果

アップスピンの電子とダウンスピンの電子は電流と逆向きに移動しながら、左右に動く。

でも起こる。波数空間において磁場の役割を果たすのがベリー曲率である。ベリー曲率は波が伝播する際の位相のずれを記述している。波数が異なるとベリー曲率の値も変わり、ベリー曲率が波に与える影響も変わる。

ベリー曲率は電子のスピンのホール効果を起こす要因となっているが、ベリー曲率のみでは電子のスピンのホール効果は起きない。もうひとつの要因があることにより、電子のスピンのホール効果が起こるのだ。

もう1つの要因とは、スピン軌道相互作用である。スピン軌道相互作用とは、スピンの向きが電子の動き方に影響を及ぼす作用である。前述の通り、電子にはアップスピンの電子とダウンスピンの電子がある。アップスピンの電子とダウンスピンの電子では対応する波数空間が異なる。空間が異なることにより、アップスピンの電子とダウンスピンの電子の移動に違いが生じる。このスピンの向きによる空間の違いをもたらしているのがスピン軌道相互作用である。

スピン軌道相互作用は、電子の動く速さが光速に近くなるほど大きくなる。原子量が大きくなると、電子が原子核の周りを回る速さが光速に近くなるため、その分スピン軌道相互作用の影響が大きくなる。

電子のスピンのホール効果はベリー曲率とスピン軌道相互作用という2つの要因が強く関わり合うことにより起こる。最後に、これらの要因を交えながら現象を見ていこう。

ベリー曲率は電子が波動性をもっていることに

より生じる。前述の通り、ベリー曲率は波が伝播する際の位相のずれを表している。電子は波としての性質をもつので、金属中を伝播する際に、ベリー曲率による位相のずれを受ける。この状況は、実空間において磁場が荷電粒子に影響を与えるときと同じような数学的記述ができる。さらに、スピン軌道相互作用によりスピンの向きが逆になると位相のずれる向きは逆になる。この2つの要因により、電圧を原子量の大きい金属に加えた際に、アップスピンの電子とダウンスピンの電子は正反対に動き電子のスピンのホール効果が起こる。

ベリー曲率が電子のスピンのホール効果に影響していることからわかるように、スピンのホール効果では注目しているものが波の性質、つまり波動性をもつことが重要である。波動性をもっているものは電子以外にもある。そこで、村上先生は電子以外のものによるスピンのホール効果もあると考えた。そして、村上先生は光のスピンのホール効果を予言した。

光のスピンのホール効果は光が物質に入射したときに、界面と直交する入射光を含む面に対し、反射光と屈折光が垂直方向にずれるという現象である(図4)。この現象には電子のスピンのホール効果と対応する部分がある。電子のスピンのホール効果に対応するものは円偏光であり、電場に対応するものは界面における屈折率の差である。円偏光においては電場が円を描きながら振動している。また、円偏光にも右円偏光、左円偏光の2種類があり、電子のアップスピン、ダウンスピンに対応していることが知られている(図5)。

これまで電子のスピンのホール効果と光のスピンのホール効果を紹介してきた。現在、村上研究室では電子のスピンのホール効果による特異な性質を示すトポロジカル絶縁体を研究している。次に、その研究を見ていこう。

トポロジカル絶縁体

一般的な物質には、導体かつ絶縁体であるものはない。しかし、トポロジカル絶縁体は、導体と絶縁体の性質を兼ね備えている。トポロジカル絶縁体の内部では電子が動けないが、表面において

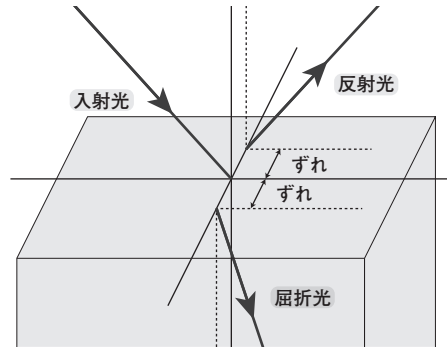


図4 光のスピンのホール効果
入射光に対し屈折光は手前に、反射光は奥にずれる。

は電子が自由に動けるのだ。このような状態をトポロジカル絶縁体がつとることにより、純スピン流が試料のへりや表面においてのみ流れる(図6)。では、なぜこのような現象が起こるのだろうか。これには2つの理由がある。

1つ目は、試料のへりや表面において電場が外向きにかかっている状態にあるということだ。絶縁体の電子は動きにくい状態にある。しかし、へりや表面において電場が外向きにかかっているような状態が存在しているため、へりや表面では電子が動くことができる。このようになるのは、トポロジカル絶縁体の外側において、原子の結合が切れているからである。このため、へりや表面における電位と内部における電位には差が生じる。結果として電場ができ、電子のスピンのホール効果がへりや表面において起こる。

2つ目は、電子がスピンをもっていることである。電子の動き方はスピンの向きによって変化する

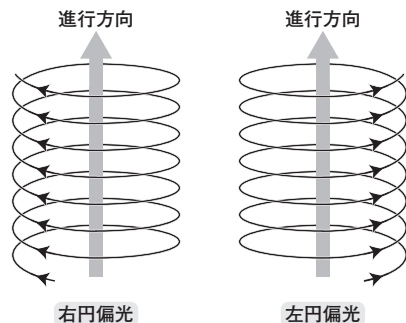


図5 円偏光
右円偏光は右回り、左円偏光は左回りで電場が円を描きながら伝播する。

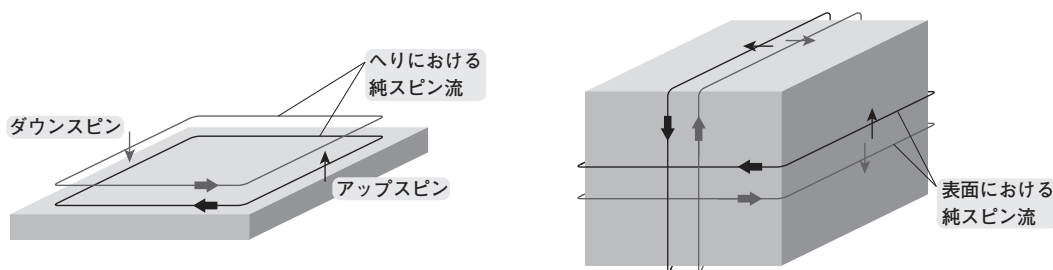


図6 トポロジカル絶縁体

物体のヘリや表面において、純スピンの流が流れる。上矢印はアップスピンを、下矢印はダウンスピンを表す。

る。スピンの向きが異なると、電子のヘリや表面に沿った運動の向きが逆になる。このことに加え、トポロジカル絶縁体においてはアップスピンの電子とダウンスピンの電子が等しい数存在している。そのため、電子がヘリや表面を周る際の電荷全体の流れは打ち消され、純スピンの流のみが物質のヘリや表面に流れる。

しかし、これら2つの要因を満たす物質すべてがトポロジカル絶縁体となるわけではない。そこで、村上研究室ではトポロジカル絶縁体となる物質の探索をしている。トポロジカル絶縁体は数学的に記述できるため、問題の物質がトポロジカル絶縁体になるのか計算して求めることができる。この判別にはベリー曲率を用いる。ベリー曲率によって物質表面を電子が回るかどうか判別でき、その物質がトポロジカル絶縁体かどうか分かる。

また、村上研究室ではトポロジカル絶縁体の表面の物性現象に着目した研究もしている。普通の物質では、物質内に不純物があると電子の運動が阻害される。しかし、トポロジカル絶縁体の表面では、不純物があっても電子の運動は阻害されにくい。この特性はトポロジカル絶縁体はその表面において熱を伝えやすいという特徴に関与していると考えられており、先生はそこに焦点を当てて研究している。

研究の楽しみとこれからの展望

先生にとってこの分野の研究の楽しみは、理論と実験が近いことにあるという。例えば、スピンに関する研究においては、理論的に予言した現象が比較的簡単な設備で実際に実験できる。そのた

め、実験データを受け取り、実際に手で計算したものと比較することが出来る。このような点に先生はやりがいを感じるという。

また、理論には制約がないことにも先生は楽しみを感じるそうだ。実験においてはもっている実験機器によって行える研究に限られるが、理論においてはそのような制約がなく、自分の頭を使えば研究ができる。そのようにして新しい現象を予言するとき、誰も知らない現象を自分が初めて発見したということに充実感を感じるという。

これからの村上研究室の課題は、電子や光以外の役者による新しい物性現象を予言するというものだ。物性現象には多くの役者が関わっている。例えば、電子や光、フォノンという振動のようなものや、磁性、磁気などがあり、物性現象はこれらが複雑に絡み合っ起きている。村上研究室ではこれらの役者が引き起こす未知の物性現象を紙と鉛筆だけで予言しようとしているのだ。

執筆者より

本稿の執筆にあたり、村上先生には電子のスピンホール効果やトポロジカル絶縁体に関するさまざまなお話を伺いました。先生のお話は非常に知的好奇心を刺激する内容であり、理論研究の魅力を感じる事ができました。

末筆になりますが、お忙しい中取材に快く応じてくださり、そのうえ貴重なお時間を割いて数多くの助言を下さいました村上先生に、厚く御礼申し上げます。村上先生をはじめ研究室の皆様のさらなるご活躍を心よりお祈りいたします。

(秋山 竣哉)