

注目の新材料「トポロジカル絶縁体・超伝導体」

大阪大学 産業科学研究所 安藤陽一

【はじめに】私は物理学の研究をしています。物理学とは、この自然界がどのような仕組みで成り立っているのかを理解することを目的とする学問です。たとえば、

- 我々がいる宇宙はどのようにしてでき、この後どうなるのか？
- 物質は究極的には何からできていて、どのような法則が支配しているのか？
- 物質が違くと性質が違う理由は？

など、物理学が答えを与える問題は多岐にわたります。もし高校生の皆さんが「物理とは公式を覚えて計算する科目だ」と思っているとしたら、それはとても残念なことです。物理学を研究する楽しさは、先人の業績を踏まえて、自然界に対する理解をさらに一步先に進める、その未知のワクワク感にあります。

現代の物理学は研究対象が大きく広がっているので、対象ごとに専門分化しています。素粒子物理学、宇宙物理学、物性物理学、生物物理学、といった具合です。このうち、物質の性質を理解することを目的とするのが物性物理学で、これが私の専門です。物性物理学は応用に近く、世の中の役に立ち易いのが特長です。今日お話をする「トポロジカル絶縁体・超伝導体」は、物性物理学における最先端のトピックです。

物性物理学においては、物質は「金属」と「絶縁体」のどちらかに分類される、というのが長年の常識でした。金属とは電気を流す物質で、絶縁体は電気を流さないものです。しかし今から約10年前、2005年に、中身（バルク）は絶縁体なのに切った表面が必ず金属になるという、このどちらにも分類できない物質が存在することが理論的に発見されました。この奇妙な性質はその後3年の間に実験でも確認され、物性物理学における新しい原理として確立しました。この新原理は、物質の状態を量子力学的に記述する波動関数^註に、トポロジーという数学的な概念を適用することで理解されます。そのため、この新しい種類の物質は「トポロジカル絶縁体」と呼ばれるようになりました。そしてこのトポロジカル絶縁体の発見は、波動関数が持つトポロジーに起因する物質の新奇な性質を探求しようという、物性物理学の新しい潮流を生み出しました。私はこの新しい潮流を推し進めている研究者の1人です。

【トポロジーと量子力学】トポロジーとは、形（かたち）を分類する学問です。数学の関数にはそれに対応する「形」を考えることができます。例えば1次関数には直線、2次関数には放物線、というように。直線や放物線の場合、その「形」は二次元座標空間という「空間」の中で定義されます。これと同じく、量子力学の波動関数の場合もヒルベルト空間^註という抽象的な空間の中でその「形」を考えることができます。その形が例えばメビウスの輪のようになっているとすると、どのようにそれを連続的に変形しても、普通の輪にすることはできません（普通の輪にするには、いったん切

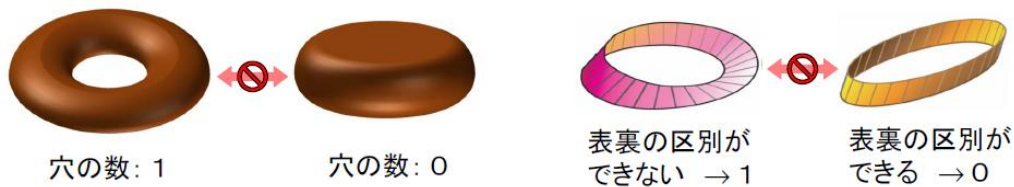


図1：トポロジカルな分類とトポロジカル不変量

って繋ぎ直す、つまり輪ではなくなる過程を経る必要があります)。そのため、通常の絶縁体の電子状態を記述する波動関数が普通の輪に対応するとしたら、メビウスの輪のような電子状態を記述する波動関数を持った絶縁体は、トポロジカルに異なる種類の絶縁体、と考えることができます。これが、トポロジカル絶縁体が「トポロジカル」と呼ばれる理由です。

トポロジカルな分類方法には様々なものがあります。例えばドーナツとアンパンの違いは、開いている穴の数で判断されます(図1左)。またメビウスの輪と普通の輪の違いは、表裏が区別できるか否かで判断されます(図1右)。このようなトポロジカルな分類において重要なのが、**トポロジカル不変量**という概念です。例えばドーナツのような形を記述する関数であれば、穴の数がトポロジカル不変量であり、メビウスの輪の場合は表裏が区別できるか否かを表す指数(区別できるなら0、出来ないなら1)がトポロジカル不変量です。トポロジカルな性質を持つ量子状態に対しても、トポロジカル不変量を考えることができます。これは波動関数を連続的に変形させても変わらない何らかの整数値であり、トポロジカル絶縁体の場合は、波動関数が空間反転に対して符号を変えるか否かに対応する0か1の指数がトポロジカル不変量です。

【金属と絶縁体】量子力学の基本原理の一つに、固体中の電子は**固有状態**と呼ばれる飛び飛びのエネルギー状態しか取ることができない、というものがあります。物質に電圧をかけて電流を流すということは、中の電子を電場で加速して、より高いエネルギー状態に励起することに対応します。物質中の電子の固有状態が飛び飛びながらほぼ連続的に存在していて、電子が簡単により高いエネルギーの固有状態に移れるなら、電流が流れます。これが金属の場合です。これに対して、電子の固有状態にギャップが開いていて、より高いエネルギー状態に移るために大きなエネルギーが必要であると、電子は電場で簡単には加速されず、電流も流れません。これが絶縁体の状態です。

【絶縁体とトポロジー】もし固有状態にギャップが開いている絶縁体がトポロジカルな量子状態にあると、その表面ではギャップが消失し、その表面を使って電流を流すことが出来ます。これがトポロジカル絶縁体の発見によって確立した新しい基本原理ですが、これは次のようなトポロジカルな議論で理解できます。

絶縁体のトポロジカル不変量 ν はエネルギーギャップの存在によって守られているため、ギャップを保ったまま波動関数を連続的に変形させても、トポロジカル不変量は変化しません。真空は励起エネルギーにギャップを持った絶縁体と考えることがで

きるの、その ν は 0 です。一方、トポロジカル絶縁体は $\nu=1$ となるトポロジカルな量子状態を持っています。このためトポロジカル絶縁体が真空と接しているとき、その境界でトポロジカル不変量 ν が 1 から 0 に変化するためには、必ず一旦、ギャップが閉じなければなりません（これはメビウスの輪を普通の輪に変形するとき、必ず一旦、切って繋ぎ直す、つまり輪ではなくなる過程を経る必要があるのと同様です）。この議論から、トポロジカルな量子状態を持つ物質の表面には必ずギャップレスの伝導状態が現れることが結論できます。

【トポロジカル絶縁体の特徴】 このトポロジカル絶縁体の境界に必然的に現れる伝導状態は、2つの重要な特徴を持っています。一つは、その中の電子が持つスピン^{注)}の向きが常に運動方向に対して垂直になるように固定されていることです（図2左）。これをヘリカルスピン偏極と呼びます。このとき平衡状態では電子には平均としての動きはないので、スピン偏極も外からは見えません。しかしひとたび電流を流して特定の方向に動く電子の数を増やすと、それに応じてスピン偏極が現れます。このためトポロジカル絶縁体を用いると、新しい原理で簡単にスピンの制御ができるスピントロニクス・デバイス^{注)}が実現できると期待されています。

もう一つの重要な特徴は、境界における伝導状態のエネルギー分散が円錐型になっていることです（図2右）。量子力学では、電子の運動は波動方程式に従います。与えられた波動方程式の解として固有状態が得られますが、これが電子の運動量 \vec{k} に対して変化する様子がエネルギー分散です。量子力学では図2右のような円錐形のエネルギー分散を持つ電子のことをディラック

粒子と呼ぶので、トポロジカル絶縁体の表面にはヘリカルスピン偏極を持ったディラック粒子が存在することになります。このディラック粒子としての性質を利用すると、従来よりも高速で動作するトランジスタなどが実現でき、コンピュータや通信の高速化に役立ちます。

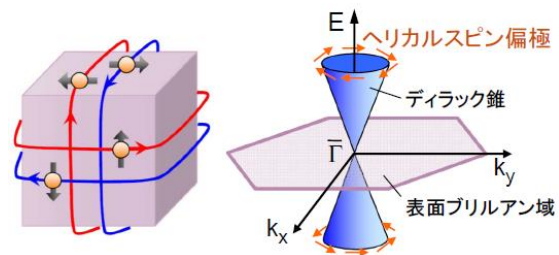


図2：トポロジカル絶縁体の表面状態

【トポロジカル超伝導体】 超伝導状態とは、抵抗ゼロで電流を流すことのできる物質の状態のことで、ある種の金属を冷やしていくと極低温で現れます。この超伝導状態を示す物質を超伝導体と呼びます。実は超伝導体には絶縁体と似たところがあります。それは、どちらも電子の固有状態にギャップが開いていることです。絶縁体ではこのギャップの存在のために電流が流れませんが、超伝導体では逆に、ギャップの存在によって電流が守られています。そしてこのギャップのおかげで、超伝導体にもトポロジーの概念を適用することができるのです。つまり、バルクの波動関数には超伝導状態に特有のギャップが開いているのに、表面にギャップレスの電子状態が現れるのがトポロジカル超伝導体です。トポロジカル超伝導体で特に注目を集めているのが、表

面にマヨラナ粒子^注の出現を伴うタイプのものです。マヨラナ粒子はまだ仮想的な存在ですが、もしマヨラナ粒子をトポロジカル超伝導体で実現できれば、4個以上のマヨラナ粒子を一定の順番で交換する「組み紐操作」をおこなうことによって、ノイズに強い実用的量子コンピュータ^注が実現できると期待されています。

【受賞業績】私は上記のようなトポロジカル絶縁体・超伝導体の草創期（といってもまだ数年前ですが）の頃からこの新材料に興味を持って研究を始めました。これまでに数々のトポロジカル絶縁体の新物質を発見し、新現象を解明してきました。

私の業績の一端を紹介すると、例えば当初発見されたトポロジカル絶縁体はバルクが本当の絶縁体になっておらず、電気を流すと表面よりも中の方に流れてしまうという欠点を持っており、その特長を調べるのが困難でした。阪大の私のグループでは世界に先駆けてバルク絶縁性の高いトポロジカル絶縁体物質を開発し、この問題を解決しました。また「トポロジカル結晶絶縁体」という、新しいトポロジーで規定されるトポロジカル絶縁体の存在を初めて実証し、トポロジカル物質の概念を大きく広げました。さらにトポロジカル絶縁体由来の超伝導体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の表面に新奇なマヨラナ粒子が現れている可能性を示す証拠を初めて捉え、トポロジカル超伝導体の研究を大きく進展させるきっかけを作りました。これらの成果は、将来的にトポロジカル物質の応用を通して情報処理技術の革新に貢献することが期待されています。

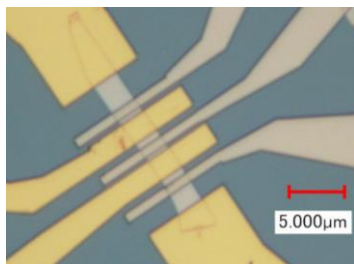


図3：阪大で開発された、世界最高の特性を示すトポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ の大型単結晶の写真（左）と、それを薄く劈開した試料を微細加工して試作したスピン検出・制御デバイスの写真（右）。

（専門用語に関する注）

波動関数：量子力学では電子を「波」と考え、その運動は、波動方程式の解として得られる波動関数の時間発展として扱う。箱の中に閉じ込められた波が「定在波」と呼ばれる飛び飛びの波長しか取れないのと同じく、物質の中に閉じ込められた電子は飛び飛びのエネルギー状態しか取れない。

ヒルベルト空間：波動関数は数学的には「ベクトル」と見なすことができる。この波動関数のベクトルが張る抽象的な空間がヒルベルト空間であり、多くの場合、それは無限次元空間である。

スピン：電子が持っている磁石のような性質のこと。磁場はスピンの向きを揃える働きをする。

スピントロニクス・デバイス：普通のトランジスタのような演算デバイスは電子が持つマイナスの電荷を情報の単位として利用する。この電荷の代わりにスピンを情報の単位として利用しようというのが「スピントロニクス」のコンセプトであり、スピントロニクス・デバイスはその実現形。

マヨラナ粒子：粒子がそれ自身の反粒子でもあるという特殊な粒子で、まだ発見されていない。

量子コンピュータ：量子力学的に独立な2つの固有状態が同じエネルギーにあることを「縮退」というが、量子コンピュータは、縮退した固有状態の重ね合わせを用いて、通常のコンピュータで行うと膨大な時間がかかる演算を一瞬で行ってしまう。