

知っておきたいキーワード

トポロジカル絶縁体

柏谷 聡[†]

[†] 国立研究開発法人産業技術総合研究所 電子光技術研究部門

"Topological Insulator" by Satoshi Kashiwaya (Electronics and Photonics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba)

キーワード：トポロジカル物質、トポロジ、ディラックコーン、スピン流、トポロジカル量子計算

まえがき

トポロジカル絶縁体とは、内部は電気を流さない絶縁体で、表面は電気を流す金属的性質を有する物質であり（図1）、HgTe量子井戸やBi₂Se₃などが知られている。トポロジカル絶縁体以外にも、トポロジカル超伝導体やワイル半金属といった一連のトポロジカル物質の存在が明らかにされており、共通の性質として、電子の波動関数が特殊なトポロジを有していることが挙げられる。トポロジカル物質では、非トポロジカル物質では存在しない特異な新電子現象が出現し、実用においてはメモリー、トランジスタ、量子計算などへの応用が期待されている。

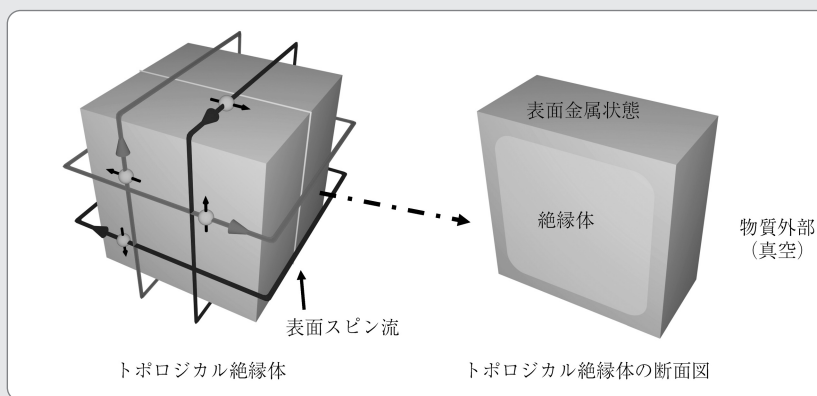


図1 トポロジカル絶縁体の電子状態

サイコロ状のトポロジカル絶縁体のある断面（白線部）を模式的に描くと、物質内部が絶縁体であるのに対して、物質外部（真空）への接続部分である表面は金属状態になっている。この表面状態は図3に示すディラックコーンという電子状態を持ち、高い移動度を有する。表面には上向きスピンと下向きスピンの逆向きの方向のスピン流が自発的に発生するが、各スピン流の大きさは同じで向きは反対になっているため、上下スピンを合わせた全電流としてはゼロになる。

トポロジとは？

トポロジとは、連続変形により保たれる何らかの性質に基づき分類を行うことを指し、連続変形で保たれる性質（量）を位相不変量と呼ぶ。よく知ら

れる例では、コーヒーカップとドーナツはともに穴が一つの構造を有するため、連続的に変形することで移り変わることが可能であり、トポロジカルに同じものとして分類される。その変形の際には穴の数は不変であり、位相不

変量は穴の数になる。一方で、位相不変量が変化する場合には何らかの不連続な操作が必要となる。例えば、1枚の帯を円環上に丸めた輪は、表と裏の二つの面を有し、表と裏は明確に区別することができる。一方、

☞ メビウスの輪は、一つの面をたどることで全表面に行きつくことができるため、表と裏の区別がつかず、一つの面しか有しないとみなせる。そのため、円環状の輪とメビウスの輪は、面の数をトポロジカル不変量として、トポロジカルに異なる状態として分類される。円環状の輪からメビウスの輪に移る変形を行うためには、一度輪を「切断して、ねじって、つなぐ」という不連続を伴う変形が必須であり、連続的には移り変わることはできない(図2)。

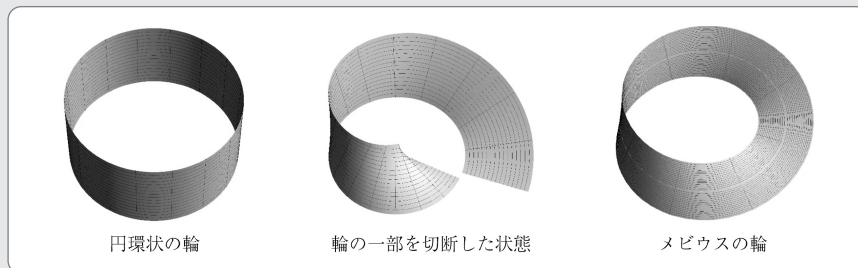


図2 円環状の輪とメビウスの輪

円環状の輪は表裏の面の区別がつかぐが、メビウスの輪は表と裏の面の区別がつかないため、これら2種類の輪はトポロジーの異なる形状として分類される。円環状の輪からメビウスの輪に移る変形を行うためには、輪を一度「切断して、ねじって、つなぐ」という不連続を伴う変形が必須であり、連続的に移り変わることはできない。

トポロジカル絶縁体とは？

トポロジカル絶縁体の性質を理解するために、金属や、非トポロジカル物質であるバンド絶縁体の電子状態を見てみよう。電子は、物質中の状態のうち、エネルギーの低い状態から順に占有していく。占有された最も高いエネルギーをフェルミエネルギーという。金属の場合、フェルミエネルギーはバンドの中途に存在し、電気伝導を担うフェルミエネルギー付近の電子が多数に存在し、電気を流すことができる。これに対して、バンド絶縁体では、伝導帯と価電子帯の間にエネルギーギャップが存在し、フェルミエネルギーはエネルギーギャップ内に位置する。そのため、フェルミエネルギー付近には電子が存在せず、電気を流すことができない(図3)。トポロジカル絶縁体も物質の内部の状態は絶縁体であり、エネルギーギャップの起源は別としても、バンド構造のみを見る限りバンド絶縁体に類似している。その一方で物質表面の状態はまったく異なる。バンド絶縁体においては表面も内部同様に絶縁体である。これに対して、トポロジカル絶縁体では、物質内部が絶縁体であるにも関わらず、表面にはエネルギーギャップ内に金属状態が形成され、あたかも金属的な「皮」に包まれているような状態となる(図1)。重要なのは、表面状態の形成が、物質の化学組成の変化等に起因するのではなく、純粋に電子の波動関数のトポロジ

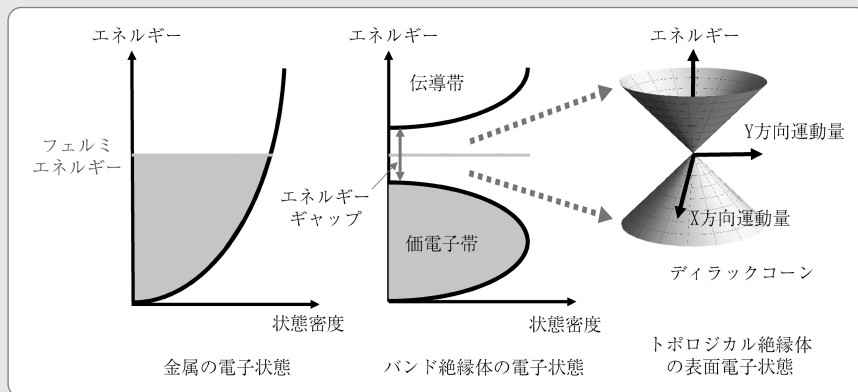


図3 金属、絶縁体、トポロジカル絶縁体の電子状態

一般的金属の電子状態は、電子はバンドの中途まで占有された構造を有し、フェルミエネルギー付近に電子が多数存在するため、電気を流すことができる。非トポロジカルな絶縁体であるバンド絶縁体では、伝導帯と価電子帯の間にエネルギーギャップが存在し、フェルミエネルギー付近には電子が存在せず、電気を流すことができない。トポロジカル絶縁体では、物質内部ではバンド絶縁体と類似のバンド構造を有し、電気を流すことができない。一方、物質表面は、エネルギーギャップの領域に新たな表面状態が形成され、電気を流すことのできる金属状態となる。表面金属状態は、エネルギーと運動量の大きさが比例関係にある、ディラックコーンと呼ばれる電子状態を有する。

カルな性質(価電子帯の波動関数のねじれ)に起因することである。

この現象の背後にある物理を理解するために、円環状の輪とメビウスの輪の例を用いよう。トポロジカルな観点から類似性を言えば、バンド絶縁体内部や物質外部(真空)は円環状の輪の状態、トポロジカル絶縁体内部はメビウスの輪のようなねじれた状態に対応する。表面は、物質内部から物質外部へつなぐ接続部分とみなすことができる。バンド絶縁体の場合には、物質内部と物質外部はトポロジカルに等しい状態とみなせるので、連続的に繋がることができ、接続部にあたる表面においても不連続性が存在せず、絶縁体の

ままである。一方、トポロジカル絶縁体の場合には、物質内部には波動関数のねじりが存在し、物質外部とは連続的につなげることができない。そのため円環状の輪からメビウスの輪に移り変わるときのように、ねじりを解消するために「一度切断して、ねじって、つなぐ」という不連続な操作が必要である(図2)。この「切断した状態」に対応するのが、接続部分における表面金属状態であるといえる。つまり、トポロジカル絶縁体には、物質内部の波動関数のねじりを反映した、エネルギーギャップが消失した表面状態が出現する。

ディラックコーンとは？

トポロジカル絶縁体に形成された表面金属状態は、きわめて特異な性質を有する。通常の金属では電子のエネルギーはおおよそ運動量の2乗に比例するのに対して、トポロジカル絶縁体の表面ではエネルギーと運動量の大きさが比例関係となり（ディラックコーンと呼ばれる）、あたかも電子の質量が消失したかのような状態が出現する（図3）。これに付随して電子の運動には制限がかかり、結果として電子の運動量を変化させるような不純物散乱が強く抑制

される。このことは電子の運動にとっては障害の影響を受けづらくなることを意味し、結果として表面の電子は高い移動度を獲得する。不純物散乱を受けないという性質は、トポロジカル絶縁体の配線材料への応用可能性を示している。さらに、熱や電界などの印可により、トポロジカル絶縁体とバンド絶縁体への相転移が制御できれば、高い移動度を有する伝導チャネルのオンとオフをスイッチできることになり、メモリーやトランジスタへ応用できると期待されている。実際に、相変化を利用した抵抗変化メモリーは、動作速

度に優れたメモリーとして研究開発が精力的に進められている。さらに、電子の有する磁石としての性質であるスピンに関しても特異な性質を発現する。表面金属状態には、上向きスピンと下向きスピンの逆方向に流れるスピン流が自発的に発生する（図1）。ただし、逆方向のスピン流が等しい大きさで存在するため、全電流としてはゼロになる。スピンの性質をエレクトロニクスに応用するスピントロニクスの研究も、トポロジカル絶縁体では広く進められている。

トポロジカル量子計算とは？

超伝導状態には絶縁体に類似したエネルギーギャップが存在し、それが超伝導状態のゼロ抵抗やマイスナー効果といった性質の起源となっている。トポロジカル物質の一つであるトポロジ

カル超伝導体では、トポロジカル絶縁体と同様に、物質内部ではギャップが存在するが、表面でギャップの閉じた状態が形成される。それに加えて、粒子と反粒子が等しいというマヨラナフェルミオンが出現することが予言されている。ボゾンやフェルミオンは2度

電子を交換することで波動関数は元に戻るのに対して、マヨラナフェルミオンは2度交換しても元に戻らないという特異な性質を有する。これを利用することで、量子計算のエラー率を劇的に抑制する「トポロジカル量子計算」を実現する研究が進められている。

むすび

トポロジカル絶縁体は2007年以降に確立された新しい物質であるが、その後急速に研究が進められ、現在では多くのトポロジカル物質が確認されてい

る。さらには2016年にノーベル物理学賞がトポロジカル相の研究に授与され、物性研究分野では最も注目を浴びている分野の一つである。トポロジカル絶縁体の示す新奇物性の背後にはトポロジーという難解さが横たわってい

るが、エレクトロニクス材料としても高いポテンシャルを秘めており、物性研究とエレクトロニクス応用の両面にわたって、人類にとってますます重要な物質になっていくことは間違いない。

（2017年9月27日受付）

参考文献

- 1) 安藤陽一：“トポロジカル絶縁体入門”，講談社（2014）



かしわ かつひこ
柏谷 聡 東京大学大学院工学研究科数理工学修了後、1988年、電子技術総合研究所へ入所。現在、（国研）産業技術総合研究所電子光技術研究部門首席研究員。2000年、第14回日本IBM賞、2005年、第9回超伝導科学技術賞受賞。

キーワード募集中

この企画で解説して欲しいキーワードを会員の皆様から募集します。ホームページ（<http://www.ite.or.jp>）の会員の声より入力可能です。また電子メール（ite@ite.or.jp）、FAX（03-3432-4675）等でも受け付けますので、是非、編集部までお寄せください。（編集委員会）