

「トポロジカル絶縁体」と「普通の絶縁体」の中間の新しい絶縁体の発見

1. 発表者：渡邊 悠樹（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 講師）

2. 発表のポイント：

- ◆これまで、全ての絶縁体は「普通の絶縁体」か「トポロジカル絶縁体」（注1）のどちらかに分類できると考えられてきた。
- ◆本研究により、両者の中間的な絶縁体が理論上存在することが世界で初めて明らかになった。
- ◆物質のトポロジー（注2）についての理解が進み、これを応用した新デバイス・量子コンピューターの開発などに将来的に役立つと期待される。

3. 発表概要：

物質のトポロジーに関する研究は、今世紀以降、世界中で積極的に行われてきたが、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てから、一層活発化している。

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻の渡邊講師は、米ハーバード大学の Vishwanath 教授、マサチューセッツ工科大学の Po 研究員との国際共同研究で、近年注目されている「トポロジカル絶縁体」に関する新理論を提案した。これまで、全ての絶縁体は「普通の絶縁体」か「トポロジカル絶縁体」かのどちらかに分類できると考えられてきたが、今回の研究で、新たに両者の中間的な絶縁体（「脆弱なトポロジカル絶縁体 (fragile topological insulator)」図1）が存在することが理論的に解明された。

本研究で見つかった絶縁体は、それ自体はトポロジカル絶縁体のように振る舞うが、普通の絶縁体と重ねるだけでトポロジカルな性質を失ってしまうという点が、これまで知られていたどのトポロジカル絶縁体とも異なる。

物質の実現しうる新しい可能性を見出すことは、近年の物性物理学の大目標の一つである「トポロジカル相の完全な分類」の達成へ向けて、基礎科学を大きく前進させる意義がある。本研究の成果は、物質のトポロジーを利用した新デバイスの発明、スピントロニクス技術の発展、量子コンピューターの開発などに将来的に結びつくことが期待される。

本研究成果は *Physical Review Letters* 誌のオンライン版に9月18日掲載され、Editor's suggestion にも選ばれている。

4. 発表内容：

従来、身の回りの物質は伝導性や磁性といった性質に着目することで分類されてきた。しかし今世紀に入り、これまで見過ごされてきた「トポロジー」の違いによっても物質の性質が大きく変わることが明らかになり、物質のトポロジカルな性質は世界中で盛んに研究されるようになった。例えばトポロジカル相の代表例である「トポロジカル絶縁体」は、物質内部は絶縁体であるにもかかわらず物質表面は金属になるという興味深い性質を示す。この表面金属状態は、例えばスピントロニクス分野に应用されており、低消費電力もしくは高速な次世代のデバイスや量子コンピューターなどの開発につながるものが期待されている。

近年の物性物理学においては、この「トポロジカル絶縁体」の候補物質を探す応用的な研究の他に、「互いに異なるトポロジカル絶縁体は一体どれだけの種類があるのか」という分類を

完成させる研究が一大目標になっており、世界中で多くの理論物理学者が取り組んでいる。本研究の成果は、「脆弱なトポロジカル絶縁体」というこれまで知られていなかったタイプのトポロジカル絶縁体が存在するという事実を、世界に先駆けて見出したことである。

具体的には、本研究で見つかった絶縁体は、それ自体はトポロジカル絶縁体のように振る舞うが、普通の絶縁体と重ねるだけでトポロジカルな性質を失ってしまうという点が新しい。通常のトポロジカル絶縁体は「チャーン数（注3）」や「 Z_2 トポロジカル数（注4）」のような「巻きつき数 W （注5）」によって守られているために、このようなことは起こり得ない（図2参照）。本研究で見つかった例は、トポロジカル絶縁体にはこれまで我々が考えていた以上に豊富な種類があることを意味している。

関連して、米プリンストン大学の研究グループは英科学誌ネイチャーに「トポロジカル量子化学（Topological Quantum Chemistry）」という理論を昨年発表し、注目を集めた（参照1）。本研究で発見された絶縁体は、この理論の主要な定理に対する「反例」（注6）になっており、この点においても基礎理論の進展に重要な意義を持っている。

さらに、本研究で発見された絶縁体は、最近発見され話題となっている「ずらして重ねられた二層グラフェン」（注7）の性質にも深く関わっていることが指摘されており（参照2）、今後のさらなる研究が期待される。

（参照1） B. Bradlyn et al., Nature 547, 298 (2017)

（参照2） L. Zou et al, arXiv:1806.07873

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Physical Review Letters (Editor's suggestion)」

論文タイトル：Fragile topology and Wannier obstructions

著者：Hoi Chun Po, Haruki Watanabe, Ashvin Vishwanath

アブストラクト URL：

<https://journals.aps.org/prl/accepted/f807aY17W0217d588895376138a53bf65ddca4d22>

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻

講師 渡辺 悠樹（わたなべ はるき）

7. 用語解説：

（注1）トポロジカル絶縁体：物質内部が絶縁体であり、物質表面が金属であるような興味深い性質を示す絶縁体のこと。これらの性質は電子の波動関数が非自明なトポロジーを持つことに起因する。

（注2）トポロジー：滑らかな変形に対して不変に保たれる性質を対象とする数学の分野の一つ。例として、「ドーナツ」と「コーヒーカップ」はどちらも穴が一つ（ドーナツでは中心の穴、コーヒーカップではとっての部分の穴）という点でトポロジカルに同じである、と言われる。

（注3）チャーン数：電子の波動関数を特徴付ける「巻きつき数」の一種。量子ホール効果の量子化に深く関係している。

(注4) Z_2 トポロジカル数：電子の波動関数を特徴付ける「巻きつき数」の一種。2次元の量子スピンホール絶縁体を特徴付ける。

(注5) 巻きつき数 W ：注2に出てくる「穴の数」のように、トポロジーを区別する整数の総称。

(注6) 反例：一般的に成り立ちそうな命題が、実は成立しない例のこと。その命題自体が修正なしには成立しないことを意味する。例えば、命題「全ての素数は奇数である」の反例は2である。

(注7) ずらして重ねられた二層グラフェン：2枚のグラフェンをずらして重ねると超伝導を含む様々な物性を示すことが話題となっている。

参考：ネイチャーダイジェスト「グラフェンをずらして重ねると 超伝導体に！」

<https://www.natureasia.com/ja-jp/ndigest/v15/n6>

8. 参考資料：

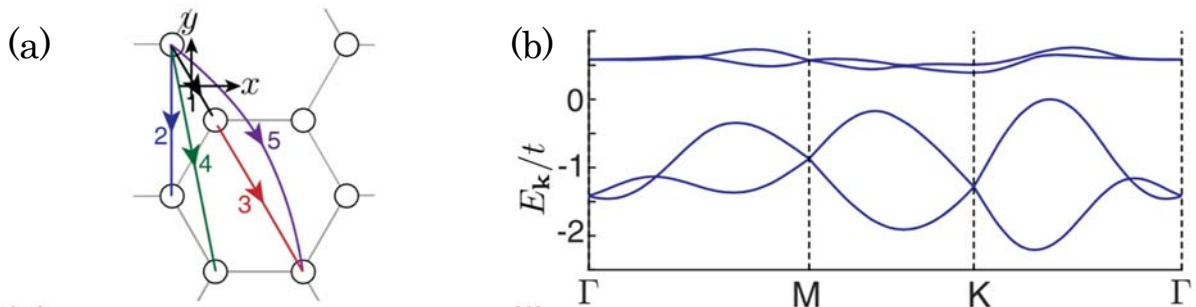
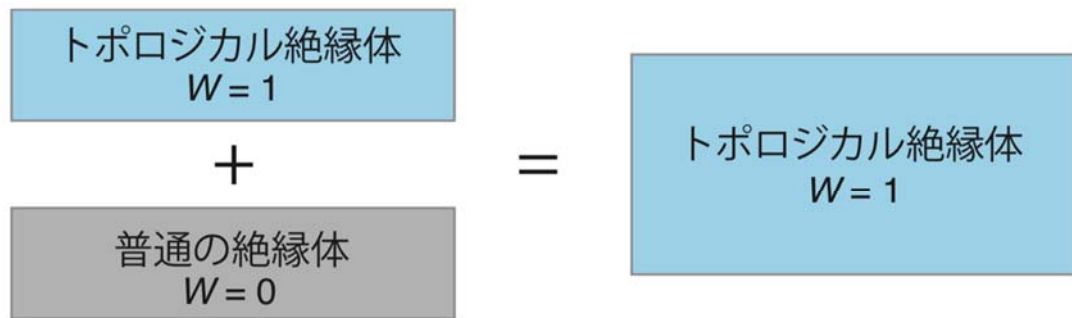


図1：脆弱なトポロジカル絶縁体の模型の概念図 (a)：「脆弱なトポロジカル絶縁体」の模型の概略図。(b)：「脆弱なトポロジカル絶縁体」のバンド構造。

(a) 既存の「トポロジカル絶縁体」の場合



(b) 今回見つかった「脆弱なトポロジカル絶縁体」の場合

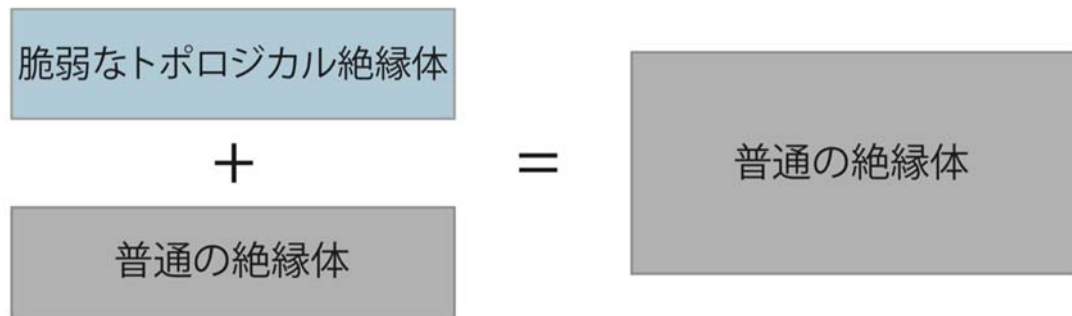


図2 : (a) 通常の巻きつき数 W によって分類できる場合には、トポロジカル絶縁体は W が 0でなく（ここでは1としている）、普通の絶縁体では $W = 0$ である。そのため、両者を合わせると $W = 1$ のトポロジカル絶縁体となる。(b) 今回見つかった脆弱なトポロジカル絶縁体の場合にはそのような巻きつき数は存在せず、普通の絶縁体と合わせるだけで普通の絶縁体になってしまう。