

トポロジカル絶縁体

(久留米高専 機械工学科¹、久留米高専 材料システム工学科²、
久留米高専 一般科目 (理科系)³)

○副島央登¹・佐藤美菜²・益田光²・酒井道宏³

キーワード：トポロジカル絶縁体、トポロジカルナンバー、バンド構造

1. 緒言

本研究は、「如何にして学習者を深い学びに導けるか?」という問いに対して、知的好奇心の喚起とALの2つの手法を組み合わせることで実証を試みる。知的好奇心の喚起は、STEAM教育における工学分野(E)と数学(M)の関連性に着目した学習活動によって実践する。ALは、ゼミ形式の4年次学科横断科目「リベラルアーツ特論」で実践する。トポロジーの応用として、トポロジカル絶縁体をテーマに扱い、その調査結果を報告する。

2. トポロジカル絶縁体について

まず、通常の絶縁体とトポロジカル絶縁体の違いについて説明する。通常の絶縁体はほとんど電気や熱を通しにくい物質であり、例としては、プラスチックやガラスなどが挙げられる。一方のトポロジカル絶縁体は、物質の表面は金属(導体)の性質を示し、電気や熱を通すが、物質の表面以外には絶縁体の性質を示すため、電気や熱を通しにくい性質を持っている。そのため、トポロジカル絶縁体は従来の絶縁体、半導体、不導体という分類の枠に当てはまらない。

[表1. それぞれの物質が熱と電気を通すか]

	絶縁体	トポロジカル絶縁体	金属
物質表面	不可	可	可
表面以外	不可	不可	可

トポロジカル絶縁体は2005年に提唱され、2007年に存在は確認されており、将来的にはAIチップやより大きなデータを扱って省エネなメモリの開発への利用が期待されている。

3. トポロジカルナンバー

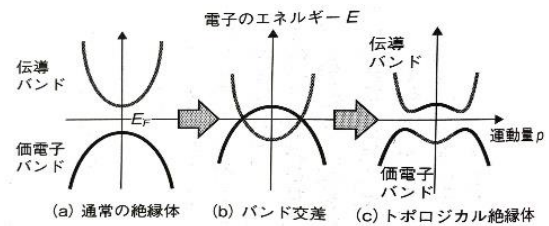
トポロジカル絶縁体と通常の絶縁体を見分ける方法の一つに、トポロジカルナンバーによる方法がある。トポロジカル絶縁体と通常の絶縁体の大きな違いは価電子帯にひねりがあるかどうかである。そのひねりがトポロジカルナンバーとして表れる。ひねりがない通常の絶縁体のトポロジカルナンバーは0、ひねりがあるトポロジカル絶縁体は1となる。トポロジカルナンバーは波動関数から定義することができる。

4. トポロジカル絶縁体のバンド構造

絶縁体の場合は伝導バンドと価電子バンドの間に隙間がある状態であり、導体の場合はその隙間がなく、電子が動ける状態である。トポロジカル絶縁体の場合はスピン軌道相互作用によりバンドが交差し、バンドの上下が入れ替わるバンド反転が起こっている。(図1(b))

この結果、一種の「ひねられた」バンドに変質している。このことは象徴的にメビウスの輪で表現されることがある。メビウスの輪を単純な輪に戻せないように、トポロジカル絶縁体も、温度の上下や光の照射、磁場をかけても、通常の絶縁体に戻すことはできないし、その逆もできない。

次にトポロジカル絶縁体と絶縁体(真空)の接触面でのバンド構造を考える。これはメビウスの輪と単純な輪をどうすれば上手く接続できるかと言い換えることができる。メビウスの輪を単純な輪に戻す方法は、一度輪を切って繋ぎなおすしかない。同じようにトポロジカル絶縁体と絶縁体の接触面では「輪を切って繋ぎなおす」という操作に相当する現象が起こっている。具体的には、図1のトポロジカル絶縁体(c)の状態から(b)の状態を経て絶縁体(a)の状態に戻るため、接触面や表面では(b)の状態になっている。よって、前項2で表記したように、トポロジカル絶縁体の物質表面ではバンドギャップのない状態、つまり金属状態ができています。



[図1. バンド構造の違い]

5. 参考文献

長谷川修司(2021)「トポロジカル物質とは何か」講談社

お問い合わせ先
氏名：酒井道宏
E-mail：sakai@kurume-nct.ac.jp

トポロジカル絶縁体

久留米高専機械工学科¹、材料システム工学科²、一般科目理科系³
副島央登¹、佐藤美菜²、益田光²、酒井道宏³

1. 通常の絶縁体とトポロジカル絶縁体の違い

• 通常の絶縁体はほとんど電気や熱を通しにくい物質をもつ。
例：プラスチックやガラスなど

• トポロジカル絶縁体は物質の表面は金属(導体)の性質を示し、電気や熱を通すが、物質の表面以外は絶縁体の性質を示すため、電気や熱を通しにくい性質をもつ。

→トポロジカル絶縁体は従来の絶縁体、半導体、不導体という分類の枠に当てはまらない。

表1 それぞれの物質が熱と電気を通すか

	絶縁体	トポロジカル絶縁体	金属
物質表面	X	○	○
表面以外	X	X	○

- トポロジカル絶縁体は2005年に提唱され、2007年に存在が確認されている。
- 将来的にはAIチップやより大きなデータを扱って、省エネなメモリの開発への利用が期待されている。
- 確認方法は様々あるけれど、1つは物質のs軌道バンドとp軌道バンドのそれぞれのエネルギーを調べることでその大小関係からトポロジカル絶縁体かどうか確認することができる。

例

- 銅 Cu
Z=29
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1 3d^{10}$
- アルミニウム Al
Z=13
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
- チタン Ti
Z=22
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^2$

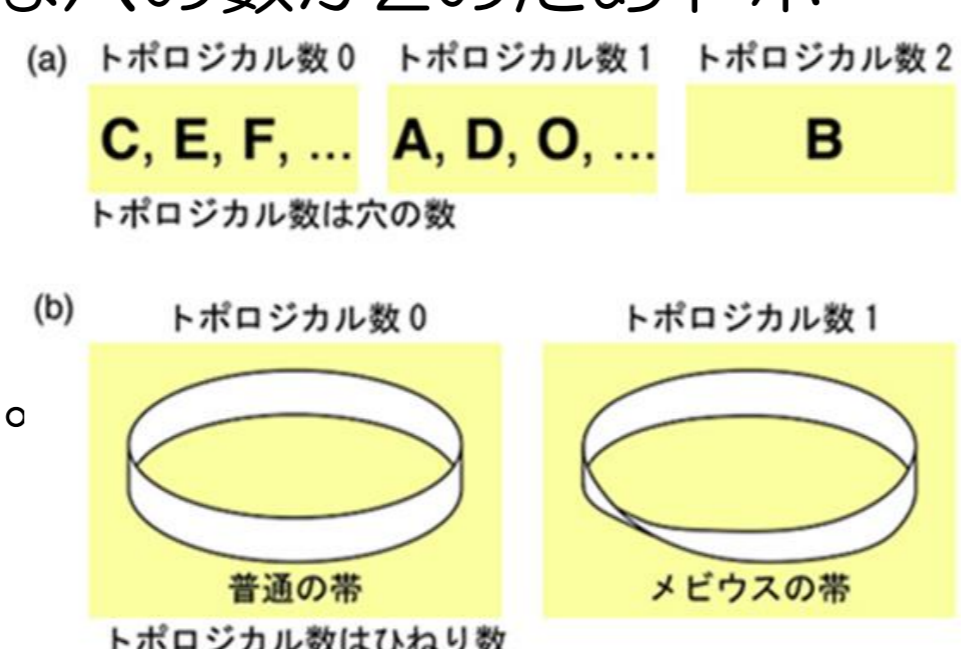
S軌道、p軌道とは化学で習った上記のように示した時の軌道である

2. トポロジカルナンバー

トポロジーでは、図形それぞれにトポロジカルナンバーを定義することができる。トポロジカルナンバーは離散的な値をとる不変量である。トポロジカルナンバーの代表的な例に穴の数やひねりの数がある。

例えば、アルファベットのC、E、Fは穴の数が0のためトポロジカルナンバーは0、A、D、Oは穴の数が1のためトポロジカルナンバーは1、Bは穴の数が2のためトポロジカルナンバーは2となる。

また、普通の帯はひねられていないため0、メビウスの帯は1回ひねられているため1となる。



3. トポロジカルナンバーとトポロジカル絶縁体

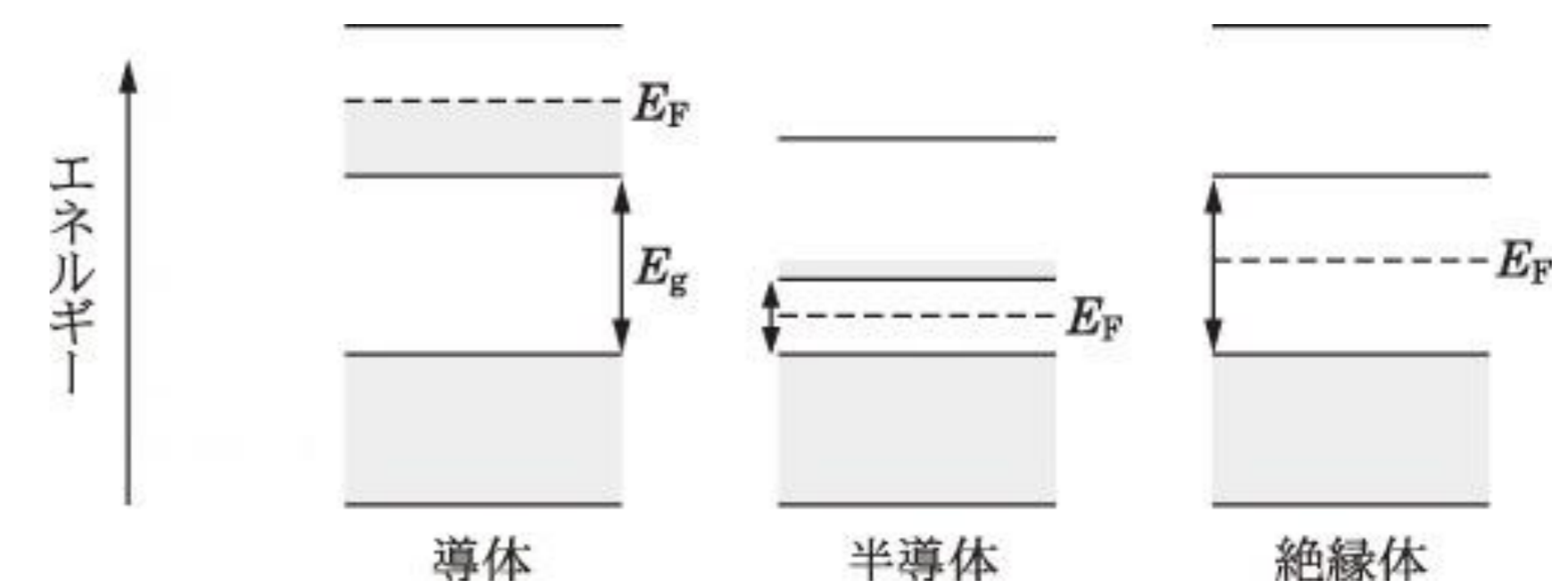
通常の絶縁体と違い、トポロジカル絶縁体の価電子帯にはひねりがある。そのひねりがトポロジカルナンバーとして表れる。

トポロジカル絶縁体 (ひねりがある) ⇒ 1

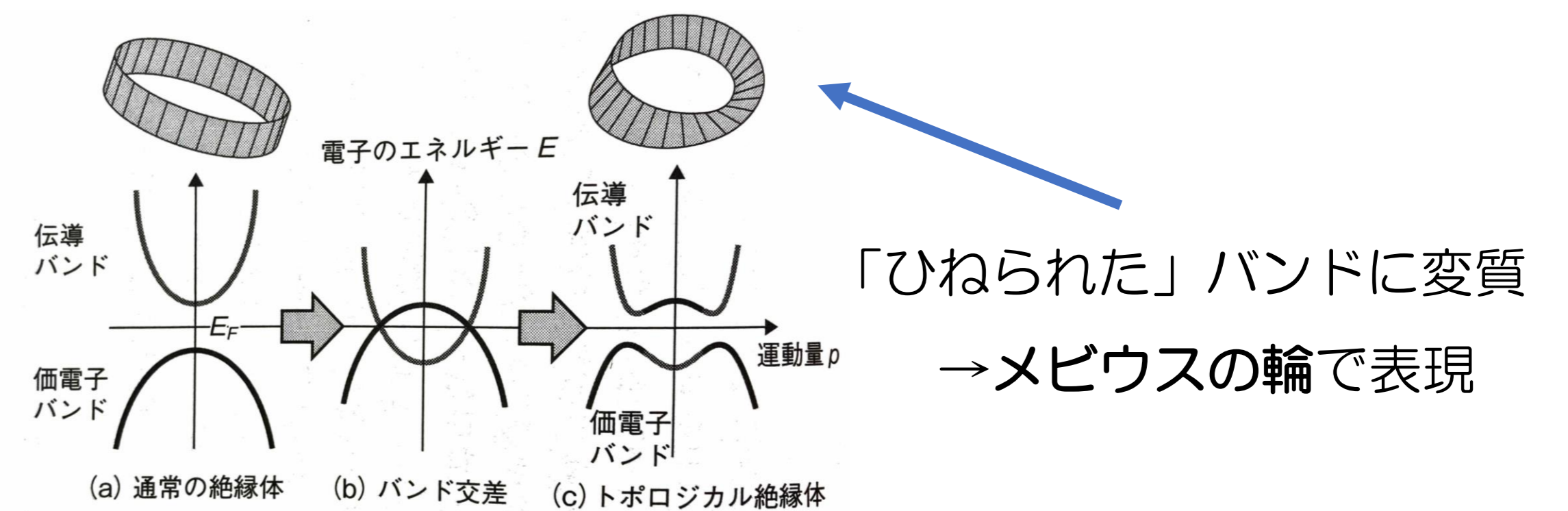
通常の絶縁体 (ひねりがない) ⇒ 0

4. トポロジカル絶縁体のバンド構造

絶縁体：伝導バンドと価電子バンドの間に隙間がある状態
導体：隙間がなく、電子が動ける状態



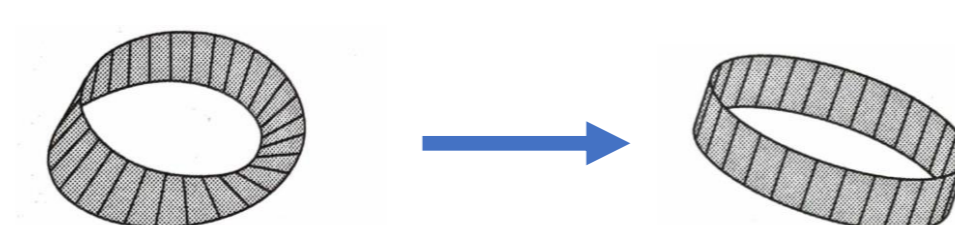
トポロジカル絶縁体：スピン軌道相互作用によりバンドが交差しバンドの上下が入れ替わるバンド反転が起こっている



次にトポロジカル絶縁体と絶縁体(真空)の接触面でのバンド構造を考える

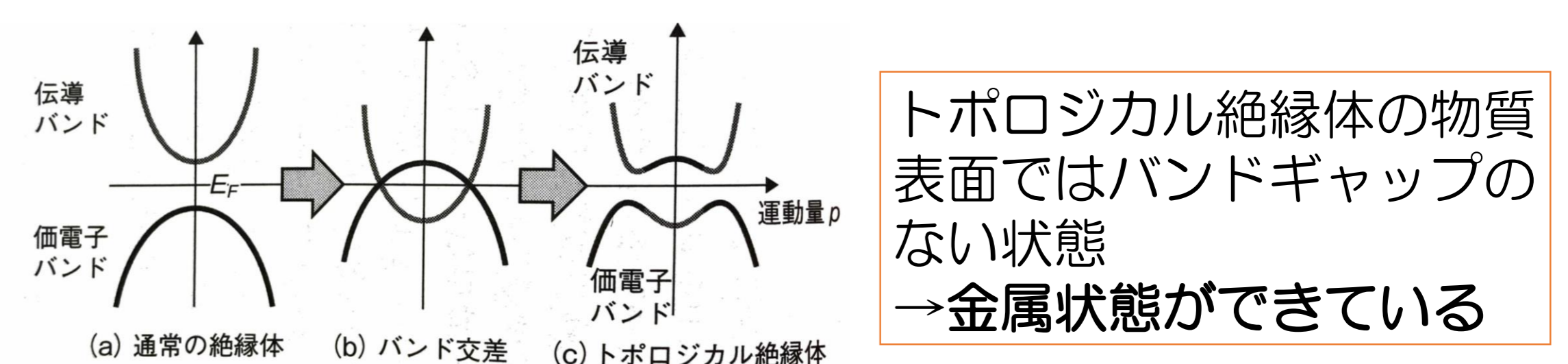
→言い換えると、「メビウスの輪と単純な輪をどうすれば上手く接続できるか」

→トポロジカル絶縁体と絶縁体の接触面でも「輪を切って繋ぎなおす」という操作に相当する現象が起こっている



具体的には下図のトポロジカル絶縁体(c)の状態
→(b)の状態
→絶縁体(a)の状態に戻る

→ 接触面や表面では(b)の状態になっている



まとめ

トポロジカルと専攻している学科の材料分野との関連から学習を進めた。
今回は物質表面や内部の状態、トポロジカルナンバー、バンド構造からトポロジカル絶縁体が絶縁体や半導体、絶縁体と比較してどのような性質をもっているのかを学んだ。
今後の課題として、トポロジカル絶縁体かどうかを判別できる式の存在を知れたので、まだ発見されていないトポロジカル絶縁体をその式から新しく見つけたい。

参考文献

- 長谷川修司(2021)「トポロジカル物質とは何か」講談社