

識別番号 P 1 2  
研究課題 トポロジカル絶縁体と超伝導体  
研究代表者 大槻東巳（理工学部機能創造理工学科）  
共同研究者 後藤貴行（理工学部機能創造理工学科）  
Summary From electrical transport properties, condensed matters are classified onto insulator, metal and superconductor. Resistivity is infinite in ordinary insulators while it is zero in superconductors. Recently, many interesting features have been discovered and rediscovered in relation to topological insulators where the surface states (or the edge states in two dimensions) have peculiar properties, leading to various interesting transport phenomena. In this project, we study what will happen when we attach the two extreme phases, topological insulator and superconductor.

電気伝導度特性により、物質は大きく分けて三つに分類される。絶対零度の極限で電気抵抗が無限大になるのが絶縁体、電気抵抗が有限にとどまるものは金属、抵抗がゼロになるのが超伝導体である。これらは物質の種類だけでなく、物質の組成比、ドーピング量、ランダムネスなどに依存する。事実、物質中のランダムネスを変化させていくと、超伝導体が絶縁体に転移することが20年以上前から知られている。興味深いのは超伝導相が絶縁体相の付近に存在することである。例えば上記の超伝導-絶縁体転移において超伝導相は金属相を経ずにいきなり絶縁体へと転移する。

絶縁体相は電気を流さないことからその伝導特性は通常あまり注目されなかったが、この事情は量子ホール効果の発見により一変した。量子ホール効果ではバルクは絶縁体であるが、試料の端にエッジ状態が現れ、これによりホール伝導度や2端子コンダクタンスが $e^2/h$  ( $e$  は素電荷,  $h$  はプランク定数)の整数倍に量子化されるのである[1]。こうしたエッジ状態は強い磁場をかけたときにのみ現れ一般的ではないと思われていたが、近年、磁場をかけなくてもHgTe (2次元量子井戸) [2], BiSe[3,4]などの化合物で興味深いエッジ状態、表面状態がみつき、これらの伝導特性が注目を集めている。

代表者らはこうしたトポロジカル絶縁体におけるエッジ状態の性質を詳しく調べてきた。特に不純物（ランダムネス）により並進対称性が破れた系を研究し、ランダムネスがどのような効果をエッジ状態にもたらすかを詳細に検討した[5]。その際に、通常ハミルトニアンによるアプローチを取らず、量子ネットワークモデルにより問題に取り組んだ。量子ネットワークモデルとは試料における電流の流れを、波動関数としてとらえるのではなくネットワークとしてとらえるものである。これは電流を表すリンクと散乱を表すノードからなる。概念図を図1に示す。このモデルにより、通常の絶縁体相（左図）、金属相（中央図）、トポロジカル絶縁体相（右図）を解析することができる。右図のように、トポロジカル絶縁体相では系の端に電流を運ぶ状態が現れる。

本研究では、このトポロジカル絶縁体が超伝導状態にどのような効果をもたらすかを調べる。薄い絶縁体を二つの超伝導体ではさむとジョセフソン接合ができるが、二つの超伝導体の間にトポロジカル絶縁体が存在する場合、その特異な表面状態が超伝導体によってどのように変化を受けるか、また超伝導体の間の電流がトポロジカル絶縁体によってどのように変化するかを、理論と実験の双方から調べる。

そのため、まずは 3 次元体のトポロジカル絶縁体相における表面状態、特にランダムネスの効果について詳細に検討する（代表者がこれまで行ってきた研究[5]は 2 次元のトポロジカル絶縁相に関してである）。もし系にランダムネスがない場合、バンド計算により 3 次元トポロジカル絶縁体に現れる表面状態はエネルギー分散  $E(k)$  が波数  $k$  の 2 乗に比例するのではなく  $k$  に比例することがすでに知られている[3]。このことが、ランダムネスを加えても表面状態が広がっている理由とされており注目されている。こうした興味深い表面状態と超伝導体との関係を明らかにする。

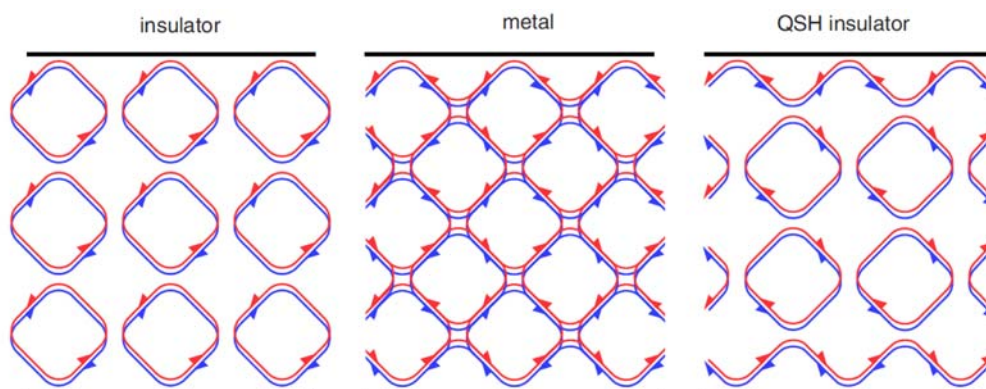


図 1：ネットワークモデルで記述した絶縁体相，金属相，量子スピンホール相（トポロジカル絶縁体の一種）。電子のスピンにより電流の向きが異なるとしたモデル[6]。

#### 参考文献

- [1] K. v. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980).
- [2] M. Konig *et al.*, Science **318**, 766 (2007).
- [3] H. Zhang *et al.*, Nature Physics **5**, 438 (2009).
- [4] Y. Xia *et al.*, Nature Physics **5**, 398 (2009).
- [5] K. Kobayashi *et al.*, Phys. Rev. B **82**, 165301 (2010).
- [6] H. Obuse *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 115301 (2008).

(私立大学戦略的研究基盤形成支援事業)