

有機導体で見られたヘリカル表面状態を伴う新しい量子ホール状態

層状有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ はグラフェンに続く第2の固体中ディラック電子系であり、ここでは電子は相対論的な運動法則に従う。この物質の強磁場下の層間電気伝導の異常な振舞いを説明するモデルとして、ディラック電子系特有の磁場中ゼロエネルギー準位のスピン分裂に起因する「量子ホール強磁性」状態の可能性について考察した。具体的には、この状態特有の試料側面に形成される「ヘリカル表面状態」の伝導特性を理論的に調べ、実験との整合性を確認した。これはグラフェンにおける「量子ホール絶縁体」状態とは対照的な、新しいトポロジカル電子状態である。

グラフェン（原子1個の厚さの炭素の2次元結晶）の研究は、2005年の発見以来、基礎と応用の両面で爆発的に進展し、2010年には発見者である英国のガイム、ノボセロフ両博士にノーベル物理学賞が授与された。グラフェンの特異な性質は、グラフェン内の電子が相対性理論と同様な運動法則に従うことに由来する。このような電子を固体中ディラック電子と呼ぶ。固体中ディラック電子の顕著な性質の1つとして、磁場をかけても周回軌道運動を行わない特異なゼロエネルギー状態($n = 0$ ランダウ準位)の存在があげられる。十分な強磁場ではすべての電子がゼロエネルギー状態に落ち込むが、これが複数のエネルギー状態に分裂すると、分裂の仕方により異なる性質を持つ占有数ゼロの量子ホール状態が現れる。この分裂様式と量子ホール状態は多くの研究者の興味を集め、グラフェンの場合、占有数ゼロの量子ホール状態はバレー分裂に起因する「量子ホール絶縁体」状態という非磁性の状態であることが明らかになっている。

有機分子からなる層状の導電性結晶 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ は1980年代から知られていたが、高圧を加えて低温で起こる絶縁体転移を抑えると、固体中ディラック電子系が実現する。この事実は2006年に名古屋大学の小林・鈴木らのグループにより理論的に指摘され、その後、実験的に確認された。この第2の固体中ディラック電子系において、どのような占有数ゼロの量子ホール状態が現れるかは、興味深い問題である。

最近、東京大学物性研究所の研究グループは、層状有機伝導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の積層方向の電気抵抗が強磁場の下で指数関数的に増加した後に飽和する傾向があることに注目し、これを説明するために「結晶表面に金属的な状態ができるような占有数ゼロの量子ホール状態が実現し、抵抗増大に歯止めをかけている」という仮説を立てた。この量子ホール状態は「量子ホール強磁性」状態と呼ばれるもので、ゼロエネルギー状態のスピン分裂に起因するスピン偏極状態で、結晶側面に「ヘリカル表面状態」という導電性領域が現れるという著しい特徴を持つ。この仮説に基づいて伝導特性を理論的に考察したところ、種々の実験結果をよく説明することがわかり、仮説の正当性が確認された。ヘリカル表面状態を伴う占有数ゼロの量子ホール強磁性状態は、この物質で初めて実証された新しいトポロジカルな電子状態である。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2015年5月号に掲載された。

一般に絶縁体状態、すなわち電子が詰まった準位と空の準位がエネルギーギャップによって隔てられた電子状態は、トポロジカル数という整数によって分類できる。トポロジカル数の異なる絶縁体同志は、連続的に移り変わることができない。従ってトポロジカル数が変化する絶縁体の境界には、絶縁体ではない状態、すなわち金属状態が形成されることになる。従来の量子ホール状態はトポロジカルに非自明な絶縁体状態の典型例であり、いくつかのエネルギー準位に電子が詰まっている

かを表す占有数がトポロジカル数（チャーン数という）になっている。このとき自明な絶縁体である外部との境界である試料端には、金属的なエッジ状態が現れることはよく知られている。しかし固体中ディラック電子系の占有数ゼロの量子ホール状態は、チャーン数がゼロなので、一般には自明な絶縁体状態となる。一方、本論文で考察している「量子ホール強磁性」状態では、チャーン数とは別のスピンチャーン数というトポロジカル数が有限になるので、トポロジカルに非自明な状態となり、試料側面に金属的な「ヘリカル表面状態」が現れる（図1）。このヘリカルエッジ状態では、スピンの向きに応じて電子の運動方向が決まるため、永久スピン流が流れている。こうした性質は、近年盛んに研究されている「 Z_2 トポロジカル絶縁体」とよく似ている。

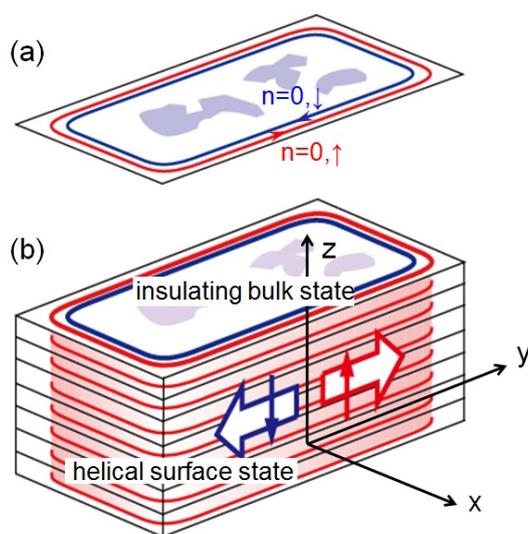


図1. 量子ホール強磁性状態において結晶を取り巻くヘリカル表面状態

有機分子性結晶である α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ で固体中ディラック電子系が実現していること自体興味深い、そこでグラフェンでは見られなかった新しいトポロジカル電子状態が実現していることはさらに興味深い事実である。この状態を特徴づける「ヘリカルエッジ状態」による表面伝導に関して、今後、実験的研究が進展することが期待される。

原論文

[Surface Transport in the \$\nu=0\$ Quantum Hall Ferromagnetic State in the Organic Dirac Fermion System](#)
Toshihito Osada: *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 053704 (2015)

問合せ先：長田 俊人（東京大学物性研究所）