磁性トポロジカル絶縁体の磁壁に生じるカイラルエッジ伝導

安田憲司
東京大学大学院工学系研究科
yasuda@cmr.t.u-tokyo.ac.jp

塚﨑　敦
東北大学金属材料研究所
tsukazaki@imr.tohoku.ac.jp

十倉好紀
東京大学大学院工学系研究科
理化学研究所創発物性科学研究センター
tokura@riken.jp

磁性体や強誘電体，超伝導体といった対称性の破れを伴う秩序相に加え，物質中のバンド構造のトポロジーで分類されるトポロジカル相が物性物理学分野において近年注目を集めている．固体中のバンド構造が非自明なトポロジカル数を有する場合，その固体表面や界面にはバルクの状態と異なる特徴的なバンド分散を生じる．このような表面状態を観測する手法には，角度分解光電子分光や走査トンネル顕微分光法が主として用いられ，トポロジカル絶縁体，トポロジカル超伝導体，ディラック半金属，ワイル半金属などの新たな物質相の実験的検証が進められている．それに加えて近年では，カイラルアノマリーやワイル軌道など，特異なバンド構造に由来した新奇な輸送現象を観測して，外場などで制御しようとする取り組みが盛んになっている．

トポロジカル秩序に由来する輸送現象として最も研究されてきたのが量子ホール効果である．量子ホール効果は，2次元電子系に外部磁場を印加することで試料端に1次元のカイラルエッジ伝導を生じて，ホール抵抗の量子化が観測される現象である．この外部磁場を磁化に置き換えた量子異常ホール効果は，以前から理論的な提案がなされていたが，磁性元素Crを添加したトポロジカル絶縁体薄膜 $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$ において最近初めて実現された．量子異常ホール効果は，強磁場を要する量子ホール効果と異なり，零磁場でカイラルエッジ伝導を実現可能である上，磁気秩序変数によってトポロジカル数を制御できるという特徴を持っている．磁場や磁化の方向から一義的に決まる方向にしか運動できないカイラルエッジ伝導は，不純物や欠陥といった乱れによる電子散乱が禁制となるため，非散逸な1次元伝導を実現できる．そのため，カイラルエッジ伝導の次世代低消費電力素子への利用が期待されるが，試料端以外の場所に形成することが困難なため，制御性に乏しいという問題があった．この問題に対し量子異常ホール効果では，試料端のみならず磁壁においてもカイラルエッジ伝導を生じることから，磁区の制御によって伝導の方向のみならずその位置までも自在に制御可能になると期待される．我々は磁気力顕微鏡によって局所的に磁区を書き込む手法を確立し，デバイス試料内に一本だけ磁壁を有する状態を作り出した．この試料に対し，輸送特性のその場測定を行ったところ，単一磁区の状態と異なる特徴的な量子化抵抗値が観測され，磁壁でのカイラルエッジ伝導の発現が明らかになった．さらに，単一デバイス内に様々な磁区構造を形成して抵抗測定を行ったところ，いずれの磁区構造においても理論値との良い一致を示し，カイラルエッジ伝導からなる非散逸伝導回路を磁区の制御によって自在に設計できることが実証された．

—Keywords—

量子ホール効果・量子異常ホール効果：
2次元電子系に外部から面直磁場を印加することで，試料の端を一方向にのみ流れるカイラルエッジ伝導が発生する．その結果，ホール抵抗（電流を加えた方向と垂直方向に生じる電圧を，電流値で割ったもの）がプランク定数 h と電気素量 e で表される h/e^2（約25.8 kΩ）の整数分の1（このときの整数値はカイラルエッジ伝導の本数に対応する）の値に量子化する．この現象を（整数）量子ホール効果と呼ぶ．同様の現象は自発磁化によっても生じ，これを量子異常ホール効果と呼ぶ．1本のカイラルエッジ伝導が生じ，その流れる向きが上向きの磁化と下向きの磁化に対して逆向きとなる結果，ホール抵抗はそれぞれ $+h/e^2$，$-h/e^2$ となる．いずれの現象もトポロジカル秩序の一種であり，量子化値はチャーン数という整数値のトポロジカル数と関係づけられる．

トポロジカル絶縁体・磁性トポロジカル絶縁体：
トポロジカル絶縁体は，固体内部はギャップを有する絶縁体であるが，物質の境界にギャップレスな金属状態を有する．3次元トポロジカル絶縁体の場合，その表面のみに2次元の伝導が現れる．表面状態は相対論で現れるギャップレスなバンド分散を持ち，また電子の運動量あるいは運動方向に対して電子スピンが垂直に固定されたスピン運動量ロッキングが実現している．磁性元素を添加することによって，磁石としての性質を生じさせることもでき，これを磁性トポロジカル絶縁体と呼ぶ．トポロジカル表面状態と磁性が相互作用する結果として，磁性トポロジカル絶縁体薄膜では量子異常ホール効果が発現する．

©2018 日本物理学会