量子異常ホール抵抗標準の現状と展望
――強磁場を用いない量子抵抗標準への挑戦

岡崎雄馬 〈産業技術総合研究所 yuma.okazaki@aist.go.jp〉
川村 稔 〈理化学研究所 minoru@riken.jp〉
吉見龍太郎 〈東京大学大学院新領域創成科学研究科 r-yoshimi@edu.k.u-tokyo.ac.jp〉

科学計測では多くの場合，測定対象となる物理量を電圧や電流などの電気量に変換し電気測定によってデータ収録する．そのため，精確な電気計測技術は科学研究の信頼性・再現性を支える根幹である．市販の電気計測器の中には，事前に校正された電圧源や抵抗器が内蔵されており，それを計測の基準として測定値を決定している．では，そのような基準値はどのようにして決定されるのだろうか？

現在，電気抵抗［単位Ω］は，半導体2次元電子系に強磁場を印加した際にホール抵抗が $h/e^2 \simeq 25.8\ \mathrm{k\Omega}$ を整数で割った値に量子化する**量子ホール効果**を計測の基準（抵抗標準）として精密に決定される（プランク定数 h，電気素量 e）．量子ホール効果は，素子の形状や材料に依存しない普遍的な現象であり，例えば異なる材料で作製されたホール素子間で，量子ホール抵抗値を比較すると，10桁以上の精度で値が一致することが確認されている．このような普遍的な量子現象を利用することによって，異なる国や地域においても常に同じ抵抗値を参照することができ，国家間で整合のとれた電気計測の体系が構築されている．

一方，量子ホール効果は強磁場下の物理現象であり，測定には10 T程度の磁場印加が必要である．そのため，通常は超伝導電磁石と呼ばれる磁場発生装置が使用される．超伝導電磁石は大型で高価な装置であり，また周囲への漏れ磁場の影響が大きいなどの問題があり，強磁場を用いない量子抵抗標準の実現は長年の研究課題であった．これまで，グラフェンなどの新材料を用いた抵抗標準の開発により弱磁場化が試みられてきたが，依然として数T以上の強磁場が必要である．

近年，バンド構造のトポロジーに着目した物性研究の進展にともなって，**磁性トポロジカル絶縁体**において**量子異常ホール効果**が発見された．量子ホール効果は，外部磁場から受けたローレンツ力による伝導電子のサイクロトロン運動が量子化して発現する．一方，量子異常ホール効果は，磁性体で観測される異常ホール効果の量子版と言えるもので，磁性体の局在磁気モーメントと伝導電子の交換相互作用によってホール抵抗が h/e^2 に量子化する現象であり，外部磁場がなくても量子化したホール抵抗が観測される．量子異常ホール効果を利用した抵抗標準が開発されれば，強磁場発生装置が不要になるなど大幅な利便性向上が期待されている．しかし，実験でこれまでに観測された量子異常ホール効果は，抵抗測定のためにわずかな電流を流すだけで量子化抵抗値から値がずれるなどの課題があり，標準に使用できる性能ではなかった．また，量子異常ホール効果のホール抵抗値が厳密に h/e^2 となることはあくまでも理論的な結論に過ぎず，実際の物質でどの程度 h/e^2 に一致するのか，精密測定による実験的検証が待たれていた．

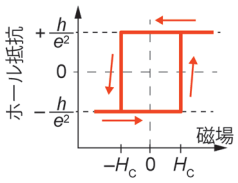
著者らは，まず磁性トポロジカル絶縁体の結晶品質の向上を試み，1 μA程度の電流を流しても量子化が維持できるホール素子を実現した．このホール素子と永久磁石を組み合わせた抵抗標準のプロトタイプを開発し，精密抵抗測定によって性能評価を行い，8桁の量子化精度を有していることを確認した．この精度は，電気抵抗の国家標準で必要とされる水準に達しており，量子異常ホール抵抗標準の基礎原理を検証できたことを示す重要な成果である．

―用語解説―

量子ホール効果：
電子の運動が2次元平面に制限された半導体2次元電子系に面直磁場を印加した際に，ホール抵抗値が $h/\nu e^2$ に量子化される現象（ν は整数）．量子化された抵抗値は，時間変化しない普遍的なものであり抵抗標準として多くの国で採用されている．

磁性トポロジカル絶縁体：
内部が絶縁体，表面が伝導体となるバンド構造を持った物質相をトポロジカル絶縁体と呼ぶ．特に磁性元素の導入によって強磁性を持たせたものを磁性トポロジカル絶縁体と呼ぶ．

量子異常ホール効果：
強磁性体の局在磁気モーメントと伝導電子スピンの交換相互作用に起因して生じ，異常ホール抵抗が量子化値 $\pm h/e^2$ をとる現象．下図は量子異常ホール効果で測定される典型的なホール抵抗の磁場依存性である．矢印のように上下に磁場を掃引すると磁場 $\pm H_C$ で起こる磁化反転に伴ってヒステリシス曲線が測定され，ゼロ磁場を含む弱磁場でホール抵抗が量子化される．



©2025 日本物理学会