

## 異なる巨視的量子状態の界面を繋ぐ電子

「超伝導」と「量子ホール効果」はともに、マクロな試料においても電子の波動性が顕著に現れる物理現象である。抵抗を生じない超伝導と、電極との界面でのみ抵抗を生じる量子ホール状態との接合で、どのような物理的状态が実現するかについて、まだ統一的には理解されていない。本論文では、酸化亜鉛ヘテロ界面の2次元電子系が低温・強磁場で示す量子ホール状態と超伝導体 MoGe との接合を作製し、伝導度の電圧スペクトルより界面の物理的状态に関する知見を得た。この知見は、量子ホール/超伝導界面で予測されている非可換なトポロジカル状態の実現に向けた重要な成果と言える。

2つの異なる性質を持つ物質の界面の物理的状态を予測することは、電子の電荷・スピン・軌道の自由度や格子の短距離から長距離に及ぶ広範囲な相互作用に関する深い洞察を必要とし、一般的には極めて難しい問題である。例えば、半導体/金属界面では電子と正孔の相互拡散により空乏層領域が形成され、電流の整流性が現れる。また、強磁性/常磁性/強磁性構造では、常磁性層の層厚を調整することで界面を介した交換相互作用によって強磁性層が反強磁性的に結合し、巨大磁気抵抗効果が観測される。このように界面の現象は、電子や格子の複雑な相互作用に基づく理解を構築することで、バルクの性質からは非自明な機能性として活用できる源泉ともなっている。

固体中の電子系に注目すると、「超伝導」と「量子ホール効果」はともにマクロな試料で観測される巨視的な量子現象であり、それらの接合界面には興味深い物理が内在していると期待できる。超伝導は電子同士が有効的な引力によってクーパー対を形成することで伝導電子が1つの量子状態に凝縮し、電気抵抗がゼロになる現象である。一方、量子ホール効果は、図1(a)に模式的に示すように、高移動度半導体中の2次元電子を低温・強磁場下に置くことにより実現するトポロジカル状態であり、試料端に形成される1次元状態（カイラルエッジモード）が伝導を担う。量子ホール状態のカイラルエッジモードは非散逸であり、電極から半導体に電子が入る界面のみで正確に量子抵抗 ( $h/e^2 \approx 25.8 \text{ k}\Omega$ ) の整数分の1に相当する散逸を生じる。電極が超伝導体である場合には、この量子化された界面抵抗値と超伝導体中のゼロ抵抗とが、一見すると矛盾するように思われ大変興味深い。

多くの場合、常伝導体（金属や半導体）と超伝導体の界面の電気伝導はアンドレーフ反射に基づいて理解される。常伝導体から入射する電子はそのままでは超伝導体に入ることができないため、もう1つの電子とクーパー対を作って超伝導体に入る（図1(b)）。その反作用として、常伝導体には電子の抜け跡として正孔が残り、電子の入射と逆向きに進むため、界面で伝導度が上昇する（アンドレーフ反射）。しかしながら、量子ホール状態では正孔も逆向きに進むことができないため、現実の物理系においてアンドレーフ反射と量子ホール状態がどのように折り合いをつけるか明らかとなっていない。この問題に実験的にアプローチするため、高移動度半導体と超伝導体の接合がこれまでも作製されてきたが、共有結合性の化合物半導体では表面準位の影響で金属との接合界面にショットキー障壁が生じてしまうために、良質な量子ホール状態と超伝導体の接合の研究は困難であった。

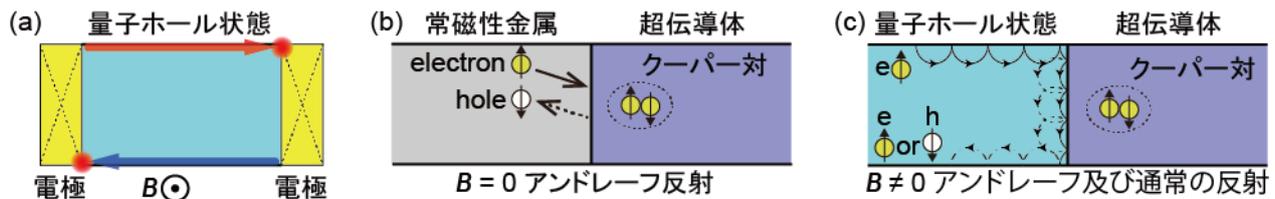


図 1. (a)量子ホール状態におけるエッジ電流（矢印）と電極界面での散逸。(b)常磁性金属/超伝導体におけるアンドレーフ反射。(c)量子ホール/超伝導体における多重アンドレーフ（点線）及び通常の反射（実線）。

最近、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻のメンバーを中心とする研究グループは、表面準位の影響が少ないイオン性結晶である酸化亜鉛のヘテロ界面 ( $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$ ,  $x \approx 0.015$ ) に形成される高移動度二次元電子系と超伝導体  $\text{MoGe}$  の接合を作製し、微分伝導度の測定から量子ホール状態と超伝導体の界面で実現する物理的状態の手がかりを得た。その結果、量子ホール状態の片方のエッジから入射した電子は、超伝導体との界面でアンドレーフ反射と通常の電子としての反射を繰り返しながら、他方のエッジから電子または正孔として出ていくことを示唆する結果を得た（図 1(c)）。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 2018 年 12 月号に掲載された。

量子ホール状態と超伝導体の界面は、基礎科学として興味深いだけでなく、非可換粒子であるマヨラナ粒子を準粒子として実現できることが理論的に指摘され、新たな注目を集めている。マヨラナ粒子はトポロジカルに縮退した状態を内在し、互いの位置を交換することによって縮退した状態がユニタリー変換に相当する変化を受けるため、外乱に強い量子ビットとして用いることができると期待されている。本論文ではマヨラナ準粒子が形成され得るかについて直接的な情報は得られていないものの、量子ホール状態と超伝導体のクーパ対が近接相互作用を及ぼし合うことが示され、マヨラナ準粒子を実現する上で重要な知見が得られている。

本研究で調べられた量子ホール/超伝導接合は、既に何報かの理論的な考察論文が報告されているが、実際に試料が作製されて界面伝導の測定が可能になったのは、ここ数年である。例えば、バンドギャップのないグラフェンや表面準位の影響が少ない  $\text{InAs}$  の 2 次元電子系に限られており、今回、酸化亜鉛での観測が新たに加わった。これらの多様な物質を用いて、量子ホール/超伝導接合の実験研究が様々な角度から行われることで、理論との整合性や修正を経て、一般的に妥当な帰結に至ると考えられる。将来的には、このような巨視的量子状態の接合系を用いた量子系が構築されることが期待される。

## 原論文

[Andreev Reflection at the Interface with an Oxide in the Quantum Hall Regime](#)

[Yusuke Kozuka, Atsushi Sakaguchi, Joseph Falson, Atsushi Tsukazaki, Masashi Kawasaki: J. Phys. Soc. Jpn. \*\*87\*\* \(2018\) 124712](#)

問合せ先：小塚 裕介（物質・材料研究機構磁性・スピントロニクス材料研究拠点）  
川崎 雅司（東京大学大学院工学系研究科）