

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名： 上田 健太郎

金属絶縁体転移は固体物理学における中心的な研究課題である。特に、電子間の斥力相互作用によるモット転移近傍においては、電荷自由度の局在化だけでなくスピンや軌道自由度も絡んだ様々な秩序相が現れるため、精力的に研究されている。一方、近年のトポロジカル絶縁体発見以来、固体中の相対論的スピン軌道相互作用の重要性が再認識されてきた。重い元素を含む  $5d$  電子系酸化物は、現代の物性物理学におけるこれら二大潮流の交差点に位置付けられ、電子相関とスピン軌道相互作用の協奏が非従来の電子・磁気基底状態を発現させる舞台として注目を集めている。特に、パイロクロア型イリジウム酸化物  $R_2\text{Ir}_2\text{O}_7$  ( $R$ : 希土類イオン) においては、磁性と結合した新奇なトポロジカル電子相の発現が期待されているが、金属絶縁体転移近傍における電子状態について不明な点が多く残されている。本論文では、電子相関や磁気構造の変化に伴う金属絶縁体転移の観測に成功し、それぞれのパラメータ領域で実現する多彩な磁気・電子状態を明らかにしている。本論文は七章から構成されており、以下にその概要を述べる。

第一章では、本研究の背景として金属絶縁体転移と本研究の対象物質についての先行研究、第二章では、本研究で用いた実験手法についてそれぞれ記述している。

第三章では、金属絶縁体近傍にある  $R=\text{Nd}$  における化学置換効果について調べている。 $4d$  電子系である Rh のドーピングによる絶縁体金属転移を観測している。電荷輸送測定や光学測定を用い、観測された転移が  $5d$  軌道と  $4d$  軌道の混成による実効的なスピン軌道相互作用の変調に起因すると結論している。

第四章では、反強磁性絶縁体のバルクとは対照的な金属状態が磁氣的界面に実現していることを発見している。電荷輸送特性だけでなく、テラヘルツ時間分解分光法や最先端のマイクロ波インピーダンス顕微鏡による研究を行っている。その結果、金属的磁壁の電荷ダイナミクスから、実空間観測による磁壁の形状やシート抵抗までの幅広い情報を得ることに成功している。以上の研究は、基礎学理だけでなく、磁気メモリデバイスなどの応用面でも重要な発見であるといえる。

第五章では、希土類イオン置換と外部圧力を組み合わせたバンド幅制御型金属絶縁体転移について報告している。希土類イオン半径の小さい物質においては電子間相互作用によって電荷ギャップが開く一方、イオン半径の大きな物質では反強磁性秩序化が電子担体の局在化に本質的であることを見出している。その中間組成において常磁性絶縁体から金属へのクロスオーバーを観測し、モット臨界点が付近に存在する可能性を指摘している。さらに、量子臨界近傍において特徴的な光学伝導度スペクトルを観測し、現存の理論計算では説明できない新奇なトポロジカル電子相の発現可能性が議論されている。以上の結果から、精密な磁気・電子相図を作成し、電子相関と強いスピン軌道相互作用が生み出す磁性と電子状態の非従来の関係性を明らかにしている。また、磁壁における電子状態の、金属絶縁体クロスオーバーに伴う電荷ダイナミクスを調べている。その結果、従来のモット転移近傍における振舞とは異なる特異な電子状態が磁壁に実現している可能性を議論している。

第六章では、単結晶試料を用いて、様々な磁場方向での磁気輸送特性について調べている。磁場の大きさや方向によって磁気構造を制御することで、特徴的な巨大磁気抵抗効果を発見している。平均場近似を用いた理論計算により、観測された効果が新奇なトポロジカル電子状態の発現に由来する可能性を議論している。さらに、化学置換と外部圧力により実効的に電子相関を小さくすると、反強磁性絶縁体相が抑制されていき、複数のトポロジカル電子相が量子臨界点に向かって収束していく振る舞いを明ら

かにした。以上は、トポロジカルに非自明なバンド構造を内包する新奇な量子臨界現象として興味深い。第七章では、本研究で得られた成果についての総括を記述している。

以上をまとめると、巨大なスピン軌道相互作用を有する強相関電子系物質パイロクロア型イリジウム酸化物を舞台に、電子相関、磁気構造の精密な制御により生じる金属絶縁体転移について輸送測定と光学測定を組み合わせた多角的な研究を行い、多岐にわたる磁気・電子相の実現とそれぞれの電子状態を明らかにしている。本研究の結果は、磁性と電子状態が密接に関係した新奇なトポロジカル量子状態について基礎科学として重要な知見を与えている。さらに、本研究で発見された反強磁性磁壁における異常な金属状態は、応用の観点からも重要な結果であると考えられる。今回得られた成果は、物性科学・物理工学の発展に大きく寄与すると期待され、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。