

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 井口 敏

強相関電子科学における重要な課題のひとつは、電荷-スピン自由度の結合による様々な物理現象の探求と量子論に基づく理解、そしてその理解に根ざした電子技術応用である。本論文ではパイロクロア型モリブデン酸化物をそのような研究の対象としている。この物質系は、特徴的なフラストレーション格子を形成し、強磁性金属-スピンガラス絶縁体転移、非平面配置をもつスピン構造（スピンカイラリティ）とそれに伴う特徴的な異常ホール効果を示すなど、上記のような新しい物理現象の探求の場として興味深い重要な対象である。この系におけるフラストレーションの存在下での金属-絶縁体転移、ベリー位相による異常ホール効果についての研究をまとめたものが本論文であり、全7章と付録A1章から構成される。

第1章では研究背景として、一般的なフラストレーション効果、モット絶縁体、および異常ホール効果の概念を簡潔に説明した後、パイロクロア型モリブデン酸化物におけるそれらの特徴が説明され、その問題点と課題を抽出している。

第2章では実験に用いた単結晶試料の合成、評価法とともに、基本的物性測定、圧力下物性測定、光学測定の手法について述べている。

第3章では、パイロクロア型モリブデン酸化物 $R_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ ($R = \text{Nd} \sim \text{Dy}$) における16 GP級の高静水圧力下での新奇電子相の探求を述べており、圧力誘起の常磁性金属相転移の発見と、その発現機構についての議論をおこなっている。この常磁性金属相は常圧下での金属-絶縁体転移点に収束しており、その相では Ioffe-Regel 限界を超える散逸的かつ温度依存性のほとんどない抵抗率を示す。この散逸的常磁性金属相の起源と本質について、強磁性的な2重交換相互作用とフラストレーション効果を受けた反強磁性相互作用との競合を考え、その結果として誘起される非フェルミ液体状態の可能性を議論している。

第4章では、スピンカイラリティを有する $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ において、Nb置換による電子散乱率の増加を利用して異常ホール伝導度と縦伝導度のスケーリング則について調べた結果を述べている。ホール抵抗率の磁場依存性からスピンカイラリティ、スピン-軌道相互作用による寄与が分離可能であり、それぞれが縦伝導度の1.5-1.6乗の冪乗則で表されることを見出した。これはバンド間共鳴効果を考慮したベリー位相理論の結果と良く一致しており、スピン-軌道相互作用だけでなくスピンカイラリティによる異常ホール効果もバンド間共鳴による内因的機構で生じていることを強く示唆している。

第5章では、前章の結果を踏まえ、内因的異常ホール効果の起源であるバンド間共鳴効果を、赤外光域の磁気光学カー分光を用いて直接的に観測した結果を述べている。中

赤外領域の光学的ホール伝導度において、dc のホール伝導度への収束性と同時に、明確な共鳴（ピーク）構造の観測に成功しており、そのフィリング変化等も含め、バンド構造モデルによる理論的アプローチも援用することで、バンド間共鳴機構を実証した。これは、異常ホール効果の電子論的機構をスペクトロスコーピーで明らかにした最初の研究例であり、高く評価される。

第 6 章では、第 5 章の結果から推測される異常ホール効果の共鳴による異常を、電子フィリングを変化させることによって、dc 領域においても観測に成功した結果について述べている。特にスピнкаイラリティーではなく、スピナー軌道相互作用のみによる異常ホール効果を示す $\text{Gd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ 系を用いることによって、より一般的にバンド間共鳴による異常ホール伝導度の増大もしくは制御が可能であることを明らかにした。

第 7 章では本研究によって得られた結果を、付録 A1 章も含めてまとめている。

付録 A1 章では、スピнкаイラリティーによる異常ホール効果を化学置換効果によって効率的に制御することに成功した実験結果を述べている。

以上をまとめると、本博士論文はパイロクロア型モリブデン酸化物を舞台とした金属-絶縁体転移と異常ホール効果についての多くの新しい知見を含む研究成果を纏めたものである。フラストレーション系における金属-絶縁体転移点近傍には未解明の電子相（電荷-スピン結合状態）が存在し得る可能性を提示し、また、異常ホール効果におけるベリー位相理論を、スケーリング則、光周波数域および dc でのホール伝導度における共鳴効果、スピнкаイラリティーの制御などによって実証したものである。ここで得られた知見は基礎物性とスピントロニクス原理の理解に貢献し、また物理現象の新しい観測、制御方法の開拓も含めて物理工学の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。