

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 藤代 有絵子

近年の物性科学では、トポロジカル不変量によって分類される量子相が注目を集めており、磁気構造・電子構造の幾何学的性質に由来した「創発磁場」の物性探索が、基礎・応用の両観点から盛んに行われている。例えば、ナノスケールの磁気渦構造であるスキルミオンやヘッジホッグは、各々の磁気構造のトポロジーを反映した特徴的な電磁気応答を示すことが知られており、また次世代デバイスの情報担体としても注目されている。一方で、波数空間の創発磁場の制御は非散逸伝導の観点から重要であり、中でも量子異常ホール効果の高温化は最重要課題のひとつとなっている。上記の背景のもと、本論文では、磁気構造・電子構造のトポロジカル相転移に焦点を当てることで、未解決の課題であった3次元トポロジカル磁気構造（ヘッジホッグ格子）の形成起源や消失過程に関連した基礎学理、また高温量子異常ホール効果にむけた新たな物質系の構築を行った。その結果、未開拓のトポロジカル磁気相や量子輸送現象の発見に成功した。本論文は6章から構成されており、以下にその概要を述べる。

第1章では、本研究の背景として、トポロジカル磁気相・電子相についての先行研究をまとめている。トポロジカル不変量との関係から、各量子相の特徴的な創発輸送現象を記述し、本論文の研究動機となる課題も明確に示している。

第2章では、本研究で用いた実験手法について記述している。

第3章では、2次元スキルミオン格子(MnSi)と3次元ヘッジホッグ格子(MnGe)間のトポロジカル磁気相転移について報告している。その舞台として、新規固溶系 $\text{MnSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ を合成し、中性子回折実験による磁気構造同定や、電気伝導測定の系統的な測定を行った。その結果、中間組成領域 ($x=0.4-0.6$) において、4本の波数ベクトルで記述される新規3次元トポロジカル磁気構造 (tetrahedral-4q hedgehog lattice) を発見し、そのホール効果の測定から創発磁場の変化を考察した。加えて、化学圧力制御という視点から一連の磁気相転移の起源について考察を行った。特に、3次元短周期トポロジカル磁気構造の形成機構について、遍歴電子によって媒介される交換相互作用が重要である可能性を提唱している。また、中性子スピンエコー実験により、ヘッジホッグ格子の高温領域におけるトポロジカルホール効果の符号変化の起源として、スピン揺らぎ (スカラスピンカイラリティの乱れ) が関係することを明らかにした。これにより、トポロジカル磁気構造の電気伝導特性における、短距離スピン相関の重要性を示した。

第4章では、MnGeのヘッジホッグ格子の強磁性転移に着目し、巨大な磁気電荷輸送応答を議論している。ひとつには、多結晶試料において磁場誘起の巨大な

磁気ゼーベック効果を報告している。まず、光電子分光・バンド構造計算・比熱測定により、電子構造やマグノンドラッグ等の従来機構では定量的に説明できないことを示した。そこで、主な寄与が電子散乱機構にあるという仮説のもと、強磁場下で熱電効果の測定を行った。その結果、低温・強磁場極限においてゼーベック効果が抑制されることを見出し、磁気揺らぎが主な起源であることを実証した。もうひとつには、単結晶薄膜試料の強磁性転移近傍において、巨大な異常ホール効果を報告している。観測されたホール伝導度とホール角の大きさは、既存の内因的・外因的機構では説明ができないことを明らかにした。そこで、近年理論的に提唱された非共面スピン集団による巨大スキュー散乱機構に着目し、その関連性を探るべく、膜厚による磁気異方性の制御を行い、異常ホール効果の温度・磁場依存性を精査した。その結果、上記のスカラスピンカイラリティ励起の描像と矛盾しないことを見出した。以上の結果は、高密度トポロジカル磁気構造の消失に伴う非自明な磁気揺らぎと電子散乱の存在を示しており、それらが既存の枠組みを超えた新しい輸送現象をもたらす可能性を示している。

第5章では、磁性ワイル半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の薄片試料作製と電荷輸送特性を報告している。 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ は次元性の制御により、3次元ワイル半金属から量子異常ホール絶縁体への相転移が期待されている物質である。まず、化学輸送法によって高品質な薄片試料を得られたことを報告している。続いて、バルク結晶と比較し、保磁力・電子移動度・異常ホール効果が増大することを見出した。特に、得られた電子移動度は磁性トポロジカル半金属の中でも最大値であった。加えて、輸送特性の結果と化学組成分析・第一原理計算から、実効的なホールドープが起きている可能性を定量的に議論した。以上の成果は、創発磁場の制御による高温量子異常ホール効果の実現にむけた重要な一歩であり、また磁性ワイル半金属の磁壁・表面に由来した伝導現象の探索という観点からも、更なる発展が見込まれるものである。

第6章では、本研究によって得られた成果についての総括を記述している。

以上をまとめると本論文では、磁気構造・電子構造のトポロジー制御を通して、新奇なトポロジカル磁気相と量子輸送現象の開拓に成功した。これらの成果は、様々なトポロジカル量子相の相境界において、質的に新しい物性・機能性が発現する可能性を示唆するものであり、巨大創発磁場・非散逸伝導の設計指針という観点から、物性科学・物理工学の発展に大きく寄与すると期待される。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。