

## 審査の結果の要旨

学位申請者氏名 井手上 敏也

固体中の量子ベリー一位相は、創発的な輸送現象の背景にある本質的概念としてその重要性が認識されてきており、近年精力的に研究がなされている。ベリー一位相が誘起する量子輸送現象の解明は、固体中のスピンなどの自由度の制御等に必須であり、固体物理学における基礎学理構築の観点から重要であるだけでなく、将来技術への応用の観点からも注目を集めている。固体中のベリー一位相の研究は、遍歴電子系における磁性由来の輸送現象に対して盛んに研究が行われてきたが、絶縁体や空間反転対称性の破れた電子系における理解はまだ途上段階にある。本研究では磁性絶縁体中の素励起に付随するベリー一位相や極性半導体における結晶の反転対称性の破れを反映した電子バンドのベリー一位相が誘起する量子輸送現象の研究を行っている。これにより磁性絶縁体における熱ホール効果や極性半導体における特徴的な量子輸送現象を見出し、その機構解明に成功している。本論文は5章から構成されており、以下にその概要を述べる。

第1章・第2章では、本研究の背景、すなわちベリー一位相を起源とする量子輸送現象に関する先行研究と、本研究で用いた実験手法について、それぞれ述べている。

第3章では磁性絶縁体におけるベリー一位相誘起ホール効果について詳細に調べている。パイロクロア強磁性体、ペロフスカイト強磁性体、極性磁性体の3種類の磁性体について、熱ホール効果測定によって絶縁体中における磁性秩序由来のホール効果を初めて観測すると同時に、その詳細な機構を明らかにしている。

パイロクロア構造及びペロフスカイト構造を持った強磁性絶縁体では、結晶の局所的な反転対称性の破れを反映したマグノンのベリー曲率を起源とする熱ホール効果の発見を報告している。パイロクロア構造を持つ強磁性絶縁体  $\text{Lu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Ho}_2\text{V}_2\text{O}_7$ ,  $\text{In}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$  において普遍的に観測された熱ホール効果、およびペロフスカイト構造を持つ強磁性絶縁体  $\text{BiMnO}_3$ ,  $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ ,  $\text{YTiO}_3$  における熱ホール効果の有無は、局所的な Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用を起源とするマグノンのホール効果として説明が可能であり、マグノンホール効果が DM 相互作用の符号や大きさを見積もる手段にもなりうることが示されている。

極性構造を持つ磁性体  $(\text{Zn}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  では、 $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  や  $(\text{Zn}_{0.125}\text{Fe}_{0.875})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  のフェリ磁性相における巨大な熱ホール効果を報告している。観測された熱ホール効果は DM 機構によるマグノンのホール効果では説明できず、スピン・格子相互作用を起源とする新しい機構のホール効果の存在が議論されている。結晶の反転対称性の破れやスピン・格子相互作用を利用することで、磁性絶縁体中で巨大な応答が得られる可能性を指摘している。

第4章では、極性半導体  $\text{BiTeI}$  における量子輸送現象について調べている。バンド構造に由来するベリー一位相の影響を受けた特異な量子振動の観測を主たる手段とし、圧力効果および熱電効果について研究した結果についてまとめられている。

前半では、ラシュバ型スピン分裂バンドにおいて、ベリー一位相を反映した Shubnikov-de Haas (SdH) 振動の圧力依存性を調べている。スピン分裂に由来する内側フェルミ面 (IFS) と外側フェ

ルミ面 (OFS) の SdH 振動が異なる圧力依存性を示すことを明らかにした。これは、圧力によるラシュバ型バンド構造の変形を直接反映しており、圧力依存性を第一原理計算の結果と比較することによって、圧力下で存在が期待できるトポロジカル相転移に関する知見も述べている。

後半では熱電効果の研究を行っており、ゼーベック効果の磁場依存性やネルンスト効果の符号がディラック点上下で変化することを見出した。さらに、熱電効果における量子振動を初めて観測し、ディラック点上下での位相反転や振動成分の非対称な振る舞いを観察している。これらディラック点上下での輸送特性の変化は、フェルミ面トポロジーの変化およびそれに伴う 3 次元状態密度変化を反映しており、熱電効果測定によって、ラシュバ系特有のフェルミ面トポロジーの変化の測定に成功している。

第 5 章では、本研究によって得られた成果についての総括をおこなっている。

以上をまとめると、本論文では、磁性絶縁体および極性半導体において、固体中のベリー位相が誘起する量子輸送現象の解明を行った。結晶の対称性の破れを反映したベリー位相が、磁性絶縁体中のマグノンやフォノンなどの素励起による熱ホール効果や極性半導体における特異な量子輸送現象として観測されることを明らかにし、その機構を解明した。本研究の結果は、固体中のベリー位相及びベリー位相誘起量子輸送現象の研究に新たな知見を与えるものであり、スピントロニクスなどの将来技術への応用の観点からも顕著な成果である。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。