

博士論文 (要約)

Transport properties of Berry phase origin  
in magnetic insulators and polar semiconductors

(磁性絶縁体および極性半導体における  
ベリ一位相誘起輸送現象)

井手上 敏也

## 背景と目的

固体中の量子力学的素励起が持つ非自明な位相（ベリー位相）は、創発的輸送現象の背景にある本質的概念として、近年その重要性が認識されてきており、精力的に研究がなされている。特に、金属中の伝導電子に付随するベリー位相は、古くから研究が行われている遍歴磁性体における異常ホール効果に始まり、近年スピントロニクス分野で注目を集めているスピンホール効果や量子ホール効果等の量子輸送現象を統一的に説明する概念であることが明らかになってきている。一方で、絶縁体や半導体におけるベリー位相起源の輸送現象の研究はまだ発展段階にあり、新規輸送現象の観測および機構解明が望まれる。本博士論文では、磁性絶縁体と極性半導体において固体中のベリー位相が誘起する新規輸送現象の観測と機構解明を目的として研究を行った。

磁性絶縁体においては、磁性秩序に起因する素励起のベリー位相を起源とするホール効果の実験的検証を行った。パイロクロア構造、ペロフスカイト構造、および極性構造を持つ磁性体において、磁性秩序に由来する熱ホール効果を初めて観測すると同時に、微視的な機構の解明およびシグナルの巨大化を目指した。

また、極性構造を持つ半導体 **BiTeI** において、ラシュバ型スピン軌道相互作用に起因する量子輸送現象の研究を行った。特異なバンド構造によるベリー位相を反映した量子振動測定を主たる手段として、圧力印加によるスピン分裂変化を定量的に議論し、トポロジカル相転移に関する知見を得ると同時に、熱電効果の特異な振る舞いとその起源を明らかにすることを目指した。

## I. 磁性絶縁体におけるベリ一位相起源のホール効果

電荷の自由度が凍結されている磁性絶縁体においては、ローレンツ力による通常の電子のホール効果は起こらないが、熱輸送を担っているマグノンやフォノン等の素励起がベリ一位相起源のホール効果を起こす可能性がある。以下に示した磁性体において、熱ホール効果測定による素励起のホール効果を研究し、初めて磁性秩序由来のホール効果を観測すると同時に、その詳細な機構を明らかにした。

### I-I. パイロクロア強磁性絶縁体におけるマグノンホール効果

3種類のパイロクロア強磁性絶縁体  $\text{Lu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Ho}_2\text{V}_2\text{O}_7$ ,  $\text{In}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$  において強磁性転移温度  $T_C$  以下の温度領域で有限の熱ホール効果が生じることを明らかにした。シグナルは等方的であり、パイロクロア構造を持つ物質において普遍的に観測された。熱ホール効果のシグナルが、単純に磁化には比例せず、転移温度以上で速やかに消滅し、低温高磁場領域で減衰していく振る舞いを示すことから、観測された熱ホール効果がフォノンのホール効果では説明できず、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上手く説明でき、シグナルの符号が DM 相互作用の符号に対応していることが示唆された。

### I-II. ペロフスカイト強磁性絶縁体におけるマグノンホール効果

3種類のペロフスカイト強磁性絶縁体  $\text{BiMnO}_3$ ,  $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ ,  $\text{YTiO}_3$  において熱ホール効果測定を行い、DM 相互作用機構によるマグノンホール効果の理解を深めた。単位格子に16個の磁性サイトがあり、複雑な軌道秩序を持つ  $\text{BiMnO}_3$  においてはパイロクロア系と同様の熱ホール効果が観測されたが、単位格子に4個の磁性原子しか持たない  $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$  と  $\text{YTiO}_3$  においては同程度の大きさのシグナルは観測できなかった。シグナルの有無はDM相互作用機構の予測と一致し、DM相互作用機構が磁性絶縁体に広く適用可能であること、マグノンのベリ一位相が格子の形状という幾何学的な量と深く関係していることを明らかにした。

### I-III. 極性磁性絶縁体 $(\text{Zn}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ における熱ホール効果

極性構造を持つ磁性体  $(\text{Zn}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  において、巨大な熱ホール効果を観測した。 $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  におけるメタ磁性相や  $(\text{Zn}_{0.125}\text{Fe}_{0.875})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$  におけるフェリ磁性相において有限の熱ホール伝導度を観測し、本物質系での有限の磁化を持つ磁性相において普遍的に熱ホール効果が生じることを明らかにした。有限のシグナルは最近接スピンに対する DM 相互作用機構では説明できず、またシグナルの大きさがパイロクロア構造やペロフスカイト構造を持つ強磁性体の場合に比べて一桁以上大きいことから、系の大域的対称性が破れていることを本質的起源とする、新しい機構のホール効果が起きている可能性が示唆された。

## II. 極性半導体 BiTeI における輸送特性

ラシュバ型スピン軌道相互作用を持つ極性半導体 BiTeI において、特異なバンド構造を起源とするベリー一位相の影響を受けた量子振動・熱電測定を主たる手段とし、ラシュバ型スピン分裂の圧力効果やフェルミ準位位置と物性の関係性を明らかにした。

### II-I. BiTeI における圧力効果

BiTeI の圧力下輸送測定を行い、ラシュバ型スピン偏極バンドの Inner Fermi surface (IFS) および Outer Fermi surface (OFS) を起源とする Subnikov-de Haas (SdH)振動が常圧下で単純なラシュバ型相互作用モデルで記述できること、また IFS と OFS が異なった圧力依存性を示すことを明らかにした。圧力依存性は第一原理計算の結果とよく一致し、圧力下の振る舞いからトポロジカル相転移点に関する知見を得た。

### II-II. BiTeI における熱電効果

BiTeI の熱電効果測定を行い、ネルンスト効果の符号がバルクディラック点近傍で変化すること、熱電効果における IFS 量子振動の定性的振る舞いがバルクディラック点上下で変化することを明らかにした。IFS 量子振動の定性的振る舞いの変化は、IFS ランダウ準位がホールのか電子のかを強く反映しているものと考えられる。

## 結論

磁性絶縁体において、磁性秩序に起因する素励起のベリー一位相誘起ホール効果を初めて観測し、詳細な機構を解明した。パイロクロア構造、ペロフスカイト構造を持つ強磁性絶縁体における熱ホール効果はスピン軌道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でき、マグノンのベリー一位相が格子構造を反映していることを明らかにした。さらに極性構造を持つ磁性体において巨大な熱ホール効果を観測し、新たな機構のホール効果の可能性を見出した。

極性半導体 BiTeI の輸送特性研究では、量子振動や熱電効果の振る舞いが特異なラシュバ型バンド構造とそれに付随する電子ベリー一位相を強く反映しており、圧力効果やフェルミ準位位置と物性との関連性に対する知見を得た。

総じて、磁性絶縁体および極性半導体において、非自明な輸送特性の観測およびその機構解明を行い、素励起のベリー一位相が量子輸送現象に本質的役割を果たしていることを明らかにした。