

別紙 4

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 磁性トポロジカル絶縁体表面における

スピントロニクス現象の微視的理論

氏 名 今井悠介

論 文 内 容 の 要 旨

トポロジカル物質は、近年発見された秩序相とは異なる物質相であり、そのバルクのトポロジカルな性質によって生じる表面状態は興味深い物理現象を引き起こす。時間反転対称性によって保護された三次元のトポロジカル絶縁体はビスマス化合物などで実験的な観測も行われており、その表面に存在する2次元ディラック電子は高効率にスピントロニクス現象を生成することからスピントロニクスの舞台として注目されている。

この表面電子は通常、線形分散をもつ2次元ディラック電子モデルで記述され、面直磁化と結合した場合には異常ホール伝導度が量子化するなど興味深い現象が報告されているが、一方でこのモデルは、電気伝導とスピン応答が等しく振る舞う、強磁性磁化の効果に対してゲージ不変性が課される（例えば、一様な面内磁化による異方性は生じない、磁化の空間微分を含むトルクとして限られた形のみが許される）、など特異な性質を持つことが知られている。実際の物質では、フェルミ面に六回対称な歪みを引き起こす波数の三次の項や、粒子・正孔対称性の破れを引き起こす波数の二次の項が存在することが指摘されているため、これらの効果によって、より多彩な物理現象が生じることが期待される。そこで申請者は、波数の高次項の効果を検討した2次元ディラックモデルに基づいて、電気伝導、および磁化へ与える影響であるスピントルク（電流誘起スピン分極）について調べた。

波数の三次の項の効果に関しては、面内磁化による異常量子ホール効果、電気伝導度とスピントルクの面内異方性など面内磁化の効果が主に調べられており、面直磁化の効果に関しては、波数の三次の項の効果を取動的に取り入れ、磁化の空間微分を伴うトルクとして新しいものが生じることが報告されている。申請者は、波数の三次の項を非摂動的に取り扱い、表面電子の面直磁化との結合を考慮して、スピン応答と電気伝導を線形応答理論によって微視的に調べた。まず、線形モデルで成り立っていたスピン応答と電気伝導の等価性が波数の三次の項によって成り立たなくなること、さらに高ドープ領域では、速度に対する波数の高次の寄与によって電気伝導度が大幅に増大すること、絶

縁体領域において量子ホール伝導度と一致していたスピントルクが量子化値からずれる（異常ホール伝導と等価でなくなる）ことなどを明らかにした。さらに、空間変化する磁化に作用するスピントルクは非常に多くの種類のものが生じるが、申請者は、対称性の観点に加えてそれらの代数的構造に着目して整理することにより、各トルクがスピン波の分散関係や電流による磁壁移動などの現象にどのような物理的効果をもたらすかを明らかにした。また、波数の三次の項の効果を非摂動的に取り入れたことによって、高ドーピング領域において磁壁駆動の非断熱性スピントルクが大幅に増大することが明らかになった。さらに、回転対称性が三回対称性に低下したことによって、磁化構造にねじれを与える反対称交換相互作用（ジャロシンスキー・守谷相互作用）が電流によって誘起される効果が対称性から許されることを見出し、微視的な計算を行うことによって、その効果が、波数の三次の項の係数の一次を最低次として現れることを明らかにした。

次に申請者は、波数の二次の項を考慮して、一様磁化と結合したディラック電子モデルを調べた。このモデルは、空間反転対称性を破るスピン軌道相互作用の効果をとり入れた伝導電子のモデルとしてより広く調べられているラシュバモデルと類似している（ラシュバモデルでは一般に2枚のフェルミ面が生じるが、内側のフェルミ面のみを考慮することでディラックモデルとなる）ため、これら2つのモデルに対して電気伝導度とスピントルクの解析を行なった。ラシュバモデルはこれまで、ディラックモデルの伝導帯に対応する領域について主に調べられており、自己エネルギーの磁化依存性の消失、梯子型バーテックス補正の効果による電気伝導度とスピントルクの磁化依存性の消失など興味深い性質が指摘されている。申請者はラシュバモデルとディラックモデルとの比較を行うため、ディラックモデルの価電子帯とギャップに対応する領域も合わせて調べた。波数の二次の項によってディラック電子の粒子・正孔対称性は破れるため、伝導帯と価電子帯で物理量は異なった性質を示すようになるが、特に、価電子帯では伝導帯よりも物理量に大きな面内異方性が現れることを見出した。また、電気伝導の異方性については化学ポテンシャルの関数として定符号であるが、スピントルクの異方性についてはディラック点で符号変化するという対照的な特徴を明らかにした。また、ディラックモデルでは化学ポテンシャルの関数として物理量に不連続性は生じないが、ラシュバモデルの場合には様々な不連続性が生じることを明らかにした。この不連続性の多くはフェルミ面の枚数の変化に由来するものであるが、磁化が面内の場合の面直スピン分極のディラック点における不連続性については、ディラック点でのラシュバモデルの性質の変化に由来するものである。このような不連続性は、本研究においてディラックモデルの価電子帯に対応する領域までラシュバモデルを調べたことによって見出された結果である。