



Title	Unconventional transport phenomena coupled with magnetism and lattice polarization in layered topological materials
Author(s)	近藤, 雅起
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/92157
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (近藤 雅起)

論文題名

Unconventional transport phenomena coupled with magnetism and lattice polarization in layered topological materials

(層状トポロジカル物質における磁性・極性と結合した非従来型輸送現象)

論文内容の要旨

近年、電子状態のトポロジーの観点から、様々な新しい電子状態が見出されている。その典型例であるトポロジカル絶縁体では、表面のスピンの偏極ディラック電子状態に起因して様々な興味深い輸送現象が発現する。しかし、これらの輸送現象の発現にはフェルミ準位の精密な調整が必須なため、研究舞台は主に電界制御が利用可能な薄膜試料が中心であり、測定環境や手法が限られていた。そのため、元素置換や圧力・一軸応力印加を用いた電子状態制御によって様々な状況が実現可能なバルクのスピンの偏極ディラック電子系の開発が急務であった。

本研究では、層状構造の持つ元素置換の簡便さに注目し、2つの層状トポロジカル物質 BaMnX_2 ($X=\text{Sb, Bi}$)系と EuMg_2Bi_2 に着目した。前者はMnを中心としたモット絶縁体層とディラック電子バンドを形成するX原子層が交互に積層し、更に面内でわずかに歪んだ極性構造を示す(図1左)。このためゼーマン型のスピン軌道相互作用により、擬2次元ディラック電子パレーのスピンは完全に偏極する。このスピン・パレー結合状態では、単一物質中の整流効果(非相反伝導)等、興味深い輸送現象が期待できる。後者では、MgBi層が3次元的ディラック電子状態を持つ半導体バンドを形成しており、Eu層の磁性で時間反転対称性が破れることで、巨大な異常ホール効果などが期待できるワイル電子状態の実現が予想される(図1右)。本研究では、これらの系を用いることで、擬2次元及び3次元のバルクのスピンの偏極ディラック電子系における新奇輸送現象の開拓を目指した。

BaMnX_2 系において、 $X=\text{Bi}$ は極性構造でないことが粉末X線回折を用いた先行研究で報告されていたが、本研究では単結晶X線回折測定により $X=\text{Bi}$ が極性構造であることを明らかにした。さらに格子歪が $X=\text{Sb}$ の1/10程度に小さいことに起因し、 $X=\text{Sb}$ とは異なるスピン・パレー結合状態を示すことを、第一原理計算とパルス強磁場による量子振動測定によって理論・実験の両面から明らかにした。この結果は、 BaMnX_2 の擬2次元スピン・パレー結合状態が元素置換で制御可能であることを示している。これを受けて本研究ではさらに非相反伝導の制御を試みた。微細加工デバイスによる測定から、 $X=\text{Sb, Bi}$ 両方ともで非相反伝導の観測に成功した。両方で大きく異なる温度依存性は、非相反伝導がスピン・パレー結合状態に強く依存することを示唆している。

EuMg_2Bi_2 においてはワイル電子状態の実現が期待される一方で、先行研究例はほとんどなく電子状態や磁気状態の詳細は不明であった。そこで本研究は高品質な単結晶を合成し、放射光による磁気構造解析と、量子振動と第一原理計算の比較による電子状態の精密解析を行った。得られた磁気構造に基づいた第一原理計算によって、基底状態のA型反強磁性相から強制強磁性相へと転移する過程でバンドがスピン分裂し、ワイル点が生成されることが明らかになった。さらに、量子振動から決定されたフェルミ準位との比較により、強制強磁性相ではフェルミ準位のごく近傍にワイル点が形成されることも分かった。このワイル点は EuMg_2Bi_2 の輸送現象に大きな影響を与えており、実際に観測された巨大な異常ホール効果はワイル点のベリー曲率による内因性機構で定量的に説明可能であった。この成果により、単純な電子状態を持つワイル磁性体の新たな物質設計指針が提示された。

以上の結果は、スピンの偏極ディラック電子状態の研究舞台をバルク物質へと拡張するものであり、薄膜試料では実現困難な物性開拓が可能になることを示唆する重要な成果である。

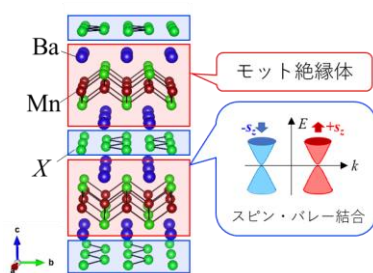
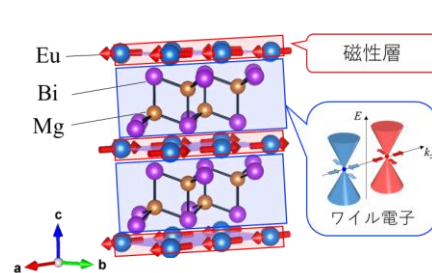
 BaMnX_2 ($X = \text{Sb, Bi}$) EuMg_2Bi_2 

図1: BaMnX_2 と EuMg_2Bi_2 の結晶構造。それぞれディラック(ワイル)電子状態を担う層(青色)と、異なる機能を有する層(赤色)が交互に積層する。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (近 藤 雅 起)			
論文審査担当者	(職)		氏 名
	主 査	教授	花咲 徳亮
	副 査	教授	黒木 和彦
	副 査	教授	新見 康洋
	副 査	准教授	酒井 英明
	副 査	助教	村川 寛

論文審査の結果の要旨

近年、電子状態のトポロジという観点から、トポロジカル絶縁体等の新しい電子状態が見出された。トポロジカル絶縁体の表面では、スピンの偏極したディラック電子状態が実現しており、スピンホール効果や整流効果（非相反伝導）等の興味深い輸送現象が発現する。しかしながら、表面状態へのアクセスには厳密なフェルミ準位調整が求められ、これまでは限られた薄膜試料での研究が主流であった。これらの輸送現象をさらに多彩に開拓するには、容易にアクセス可能で、かつ元素置換等で調整可能な程度に単純な電子構造を持った、バルクのスピン偏極ディラック電子状態の開発が急務であった。

近藤氏は、系の対称性の破れを用いて、そのようなバルク物質の開発を試みた。まず着目したのが、多層ディラック電子系 $AMnX_2$ (A : アルカリ土類金属、 X : Bi, Sb) である。これは絶縁層と擬 2 次元ディラック電子状態を形成する X 正方格子層が交互に積層した構造である。 $BaMnSb_2$ では、Sb 層がわずかに歪みジグザグ鎖を形成し、面内で空間反転対称性が破れた極性構造となる。ゼーマン型のスピン軌道相互作用により、ディラック電子バレーのスピンの完全偏極、スピン・バレー結合状態が実現する。これは遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)単層薄膜で見られ、非相反伝導等の要因となる。しかし、TMDC ではバレーがブリルアンゾーンの高対称点に固定されていた。本研究では、Sb から Bi への元素置換に伴う極性変化の結果、全く異なるスピン・バレー結合状態が実現することを実証した。また、微細加工デバイスを用いた実験では、両物質で全く異なる温度依存性を示す非相反伝導を観測し、スピン・バレー結合状態の変化による輸送現象への影響を明らかにした。

更に、近藤氏は 3 次元ワイル電子状態への拡張も試みた。特にワイル磁性体では、ワイル点のベリー曲率を反映した巨大異常ホール効果が発現するが、これまでのワイル磁性体は複雑で大きなフェルミ面を持つものが多く、化学置換等による系統的な電子状態の変化は困難であった。そうした研究を可能にする電子状態を持つ候補物質として、磁性半導体 $EuMg_2Bi_2$ に着目した。本物質は過去に光電子分光で小さなフェルミ面が観測されていたが詳細は明らかでなかった。そこで、放射光実験や輸送測定等の様々な物性測定と第一原理計算を組み合わせ、 $EuMg_2Bi_2$ の電子状態の解明を試みた。その結果、Eu の磁気状態に依存してバンドがスピン分裂し、ワイル点的形成されることが明らかになった。さらに強制強磁性状態ではワイル点がフェルミ準位のごく近傍に接近することがパルス強磁場下での量子振動測定により判明し、ワイル強磁性体に匹敵する巨大な異常ホール効果を生じさせることも実証した。

近藤氏は、 $BaMnX_2$, $EuMg_2Bi_2$ がそれぞれシンプルな 2 次元及び 3 次元スピン偏極ディラック電子系であることを実証した。前者では、極性との結合から外部応力制御の可能性が示唆され、また後者では、理論的に磁性トポロジカル絶縁体の実現が予想されているため、今後さらに多彩な輸送現象の開拓が期待される。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値があるものと認める。