

## 論文の内容の要旨

### Exploration of novel quantum transport phenomena in magnetic Dirac materials with Bi square net

(ビスマス正方格子をもつ磁性ディラック電子系における  
新奇的な量子輸送現象の開拓)

氏名

増田 英俊

#### 研究の背景と目的

ディラック電子系における特異な輸送特性が近年注目を集めている。さらに最近では、磁性トポロジカル絶縁体における量子化異常ホール効果など、磁気秩序とディラック電子が共存する磁性ディラック電子系における新奇的な輸送特性が盛んに研究されている。しかし、バルクの磁性ディラック電子系は $\text{Mn}_3\text{Sn}$ などいくつか知られているのみであり、開拓はほとんど進んでいない。

このような背景のもと、本研究ではBi正方格子を含む多層ディラック電子系 $AM\text{Bi}_2$  ( $A$  = アルカリ土類・希土類金属,  $M$  = 遷移金属) に着目した。絶縁層の $A$ ,  $M$ サイトに対して元素置換を行なっても、Bi正方格子に由来するディラック電子状態は保たれると期待される。従ってこの系では、絶縁層の元素置換によって磁気秩序を示す系を含む多彩なディラック電子系を開拓する恰好の舞台となりうる。本研究では磁性ディラック電子系 $AM\text{Bi}_2$ における、磁気秩序とディラック電子のカップリングに起因した新奇的な輸送現象の開拓を目的とした。

## 1. 磁性ディラック電子系EuMnBi<sub>2</sub>における新奇な磁気輸送特性の発見

上記の背景のもと、本研究ではまずSrMnBi<sub>2</sub>に対してさまざまな元素置換を試み、AMBi<sub>2</sub> (A = Sr, Ba, Eu, M = Mn, Zn, Cd)の単結晶育成に成功した。これらの基礎物性測定を行った結果、Eu(Mn, Zn, Cd)Bi<sub>2</sub>ではEuスピンの約20 K以下で反強磁性秩序を示すこと、特にEuMnBi<sub>2</sub>においてEuスピンの磁性が伝導特性に強い影響を及ぼすことを見出した。

EuMnBi<sub>2</sub>に対して強磁場下の詳細な磁化・輸送特性を行った。Euスピンは22 K以下で反強磁性秩序を、さらに*c*軸方向の~5.4 Tの磁場によりスピントロップ転移を示す。スピントロップ相では層間抵抗率が約10倍に及ぶ急激な増大を示し、伝導の2次元性が非常に強くなっていることを見出した。さらにスピントロップ相において面内・層間抵抗率の巨大な量子振動やホール抵抗率の量子化を観測し、これらの現象がBi正方格子上的ディラック電子によるバルク多層量子ホール状態の実現を反映していることを示した。これらの結果は磁性ディラック電子系EuMnBi<sub>2</sub>において、外部磁場により磁気構造を変化させることで、ディラック電子の量子伝導特性を制御できることを示す[H. Masuda et al., *Sci. Adv.* **2**, e1501117 (2016)].

## 2. EuMnBi<sub>2</sub>における磁気秩序とディラック電子の結合

本章では4章で示したEuMnBi<sub>2</sub>の特異な磁気輸送特性について、微視的な磁気構造、電子構造の観点から調べた。

### 2.1. EuMnBi<sub>2</sub>における反強磁性磁気構造の解明

EuMnBi<sub>2</sub>に対して共鳴X線磁気回折、単結晶中性子回折の測定を行い、ゼロ磁場、磁場中における磁気構造を明らかにすることを試みた。その結果反強磁性相において、Mnスピンはチェッカーボード型の反強磁性秩序を、Euスピンは*ab*面内で強磁性的に揃い*c*軸方向に反強磁性的にスタックした異方的な反強磁性秩序を示すことが明らかになった。さらに磁場中スピントロップ相においては、Euスピンの*a*軸または*b*軸に平行な方向に再配列していること、Mnスピンの磁気構造はAFM相から実験精度の範囲で変化していないことを示した[H. Masuda et al., *Sci. Adv.* **2**, e1501117 (2016); H. Masuda et al., in preparation].

### 2.2. ディラック電子状態に対する反強磁性秩序の影響の解明

層間抵抗率におけるSdH振動の詳細な解析と、第一原理計算の結果に基づき、反強磁性相とスピントロップ相におけるディラック電子のバンド構造やランダウ準位の構造の違いを明らかにすることを試みた。Euの反強磁性秩序に伴うバンドの折り返しにより、2つのディラック電子バンドが形成される。反強磁性相では最高価電子バンドだけが擬2次元的なフェルミ面を形成していることが、第一原理計算とSdH振動の比較により明らかになった。スピントロップ相においては、対称性の低下に伴って2つのディラック電子バンド間の混成反発が

増大することで最高ホールバンドの面間方向の分散が弱くなることが示唆され、これがスピ  
ンフロップ相における高い2次元性の起源である可能性を提案した。スピ  
ンフロップ相では2次元性の増大により、最高ホールバンドが形成する1次元ランダウサブバンドの幅が減少す  
る。その結果ランダウサブバンド間に量子ホールギャップが誘起され、バルク多層量子ホ  
ール状態が実現していることを示した。

### 3. $\text{EuMnBi}_2$ における磁気構造に依存したランダウ準位分裂の観測

$\text{EuMnBi}_2$ において~35 T以下の傾斜磁場下の層間抵抗率の測定を行い、擬2次元的なディラ  
ック電子に由来するランダウ準位がスピン分裂を示すことを見出した。磁場の傾斜角ととも  
に磁場角度とともにゼーマン-サイクロトロンエネルギー比が変化することを反映し、層間抵  
抗率におけるSdH振動の振幅が強い角度依存性を示す。SdH振動が位相反転を示す角度から  
有効 $g$ 因子が見積もられる。この有効 $g$ 因子の大きさが、反強磁性相とスピ  
ンフロップ相において50%程度異なることを見出した。この振る舞いはEuスピンとの相互作用による交換分裂  
に由来することを、第一原理計算の結果に基づいて提案した[H. Masuda et al., *Physical  
Review B* **98**, 161108(R) (2018)]。

### 4. $\text{AMBi}_2$ ( $A = \text{Eu, Sr, Ba}$ , $M = \text{Zn, Cd}$ ) の研究

$\text{Eu}(\text{Zn,Cd})\text{Bi}_2$ ではEuスピ  
ンが $T_N \sim 20$  Kで反強磁性転移を示す。このとき $\text{EuMnBi}_2$ とは異  
なり、Euスピンは $c$ 軸に垂直に揃うことが分かった。 $\text{EuMnBi}_2$ ではMnスピンとEuスピ  
ンの間の相互作用が重要な役割を果たしていると考えられる。 $(\text{Sr,Eu})(\text{Zn,Cd})\text{Bi}_2$ の抵抗率の温度  
依存性は金属的であり、抵抗率の異方性は10倍から100倍程度と比較的小さい。 $\text{Sr}(\text{Zn,Cd})\text{Bi}_2$   
に対する第一原理計算を行った結果、これらの系では擬2次元的なディラック電子のフェル  
ミ面に加えて3次元的なフェルミ面が存在することが明らかになり、そのために系の2次元性  
が弱くなっていることを明らかにした。

### 5. まとめと展望

4, 5章では $\text{EuMnBi}_2$ におけるディラック電子の量子伝導が外部磁場による磁気構造の変化  
によって制御できることを示した。またその機構として、反強磁性秩序によるディラック電  
子バンドの折り返しと、磁気構造の変化による対称性の変化が重要である可能性を提案した。  
このような機構による磁性と伝導のカップリングは、交換分裂が重要な役割を果たす他の磁

性ディラック電子系とは対照的なものである。

またEuMnBi<sub>2</sub>が磁性ディラック電子系としては例外的に高い移動度をもつことを示した。この原因として、磁性を担うEuサイトとディラック電子を担うBiサイトが空間的に分離していること、Biの*p*軌道に由来する共有結合性のバンドがディラック電子を形成していること、の2点が重要であると提案した。

本研究のもっとも重要な結果は、磁性ディラック電子系EuMnBi<sub>2</sub>における新奇な磁気輸送特性を明らかにしたことである。この系の最大の特徴は、ディラック電子系の最大の特徴である高い移動度と、磁気構造を通じたディラック電子状態の制御性を同時に実現したことであり、近年の磁性ディラック電子系研究の潮流において非常に重要な位置を占めるものである。