

層状ビスマスカルコゲナイドの超伝導状態において 特異な異方性を発見

～ネマティック超伝導との関連に期待～

首都大学東京、理学研究科物理学専攻の星和久大学院生、水口佳一准教授、東北大学金属材料研究所磁気物理学研究部門の木俣基准教授らの研究グループは、ビスマスカルコゲナイド系 (BiCh_2 系) 層状超伝導体の単結晶を用い、強磁場中での超伝導特性評価を行った結果、結晶構造の回転対称性を破った特異な異方性を示すことを発見しました。

BiCh_2 系層状超伝導体は2012年に水口佳一准教授らが発見した新しい層状超伝導体であり、非従来型の機構による超伝導発現が予想されています。今回研究に用いた $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiSSe}$ 単結晶は正方晶構造であり4回回転対称性を有しますが、超伝導状態での磁気抵抗率測定からは結晶の回転対称性を破った2回回転対称性が観測されました。超伝導状態での結晶回転対称性の破れは、鉄系超伝導体やトポロジカル超伝導体などで提案されているネマティック超伝導状態の特徴と共通するものであり、 BiCh_2 系超伝導体とネマティック超伝導状態が関連している可能性があります。今後、今回観測した現象を詳細に解明することで、新しい機構による超伝導体の設計指針が見出されると期待されます。

【研究成果のポイント】

- BiCh_2 系超伝導体において強磁場中抵抗率の面内異方性を測定
- BiCh_2 系超伝導において結晶回転対称性を破った異方性を観測
- 最近注目を集めるネマティック超伝導との関連

研究の背景と経緯

層状超伝導体⁽¹⁾は、二次元的な層状(シート状)の結晶構造を持つ超伝導体であり、超伝導状態が発現する層(伝導層)と絶縁体の層(ブロック層)の積層構造から構成されます。よって、異なる種類の層を積層させることで、様々な新超伝導体をデザインすることが可能です。また、電子が二次元的な伝導層に閉じ込められるため、特異な超伝導特性が期待できます。典型例として、銅酸化物系超伝導体⁽²⁾や鉄系超伝導体⁽³⁾が挙げられ、これらの物質では高温超伝導⁽⁴⁾が観測され、その発現機構は従来型の格子振動を媒介としたものでなく、非従来型機構⁽⁵⁾によるものであると考えられています。2012年に水口准教授らはビスマスカルコゲナイド系(BiCh_2 系)層状超伝導体を発見しました。その典型物質である $\text{La}(\text{O},\text{F})\text{BiCh}_2$ は、伝導層である BiCh_2 層とブロック層である $\text{La}(\text{O},\text{F})$ 層が交互積層しており、銅酸化物系や鉄系高温超伝導体と非常によく似ています。そのため、高温超伝導や非従来型機構の発現が期待されています。最近の理論研究および実験研究では、 BiCh_2 系超伝導体における非従来型超伝導機構の可能性が示されています。

本研究は、 BiCh_2 系超伝導体において従来型超伝導体とは異なる特異な超伝導特性の観測を目的とし

て行いました。なお、この研究開発は、東北大学金属材料研究所の共同利用助成（17H0074、18H0006）及び（独）日本学術振興会の科学研究費補助金（挑戦的研究（萌芽）、基盤研究（B）、新学術領域 J-Physics）の助成を受けて行いました。

研究の内容

本研究では、BiCh₂系超伝導体の中で最も良質な超伝導試料が得られるLaO_{0.5}F_{0.5}BiSSe（ChサイトをSとSeが半分ずつ占有）の単結晶試料を用いて行いました。金属材料研究所、強磁場センターの超伝導マグネットおよび2軸ローテータプローブを利用し、単結晶を2軸で回転させながら強磁場中電気抵抗率測定を行い、超伝導特性の異方性を測定しました。

単結晶構造解析および低温での粉末X線回折の結果から、LaO_{0.5}F_{0.5}BiSSeは正方晶構造を持つことが確認されました。正方晶構造では伝導層内のBiCh面（超伝導状態が発現するシート）が4回回転対称性を持ちます（図1.(a)）。よって、超伝導特性も4回回転対称の異方性を示すことが予想されます。しかし、磁場をBiCh面内で回転させたところ、強磁場中電気抵抗率は、2回回転対称性を示しました（図2）。この測定から超伝導状態での上部臨界磁場^⑥の面内異方性が議論できるため、図1.(b)に示すように上部臨界磁場は結晶の回転対称性を破り、2回回転対称を示していると考えられます。最近、超伝導状態に関する類似の現象が鉄系超伝導体やトポロジカル超伝導体Cu_xBi₂Se₃⁽⁷⁾などで観測されています。その起源はネマティック超伝導状態^⑧にあると提案されており、新しい非従来型超伝導状態として注目を集めています。今回得られたLaO_{0.5}F_{0.5}BiSSeの超伝導状態における特異な異方性は、ネマティック超伝導との関連が期待できます。

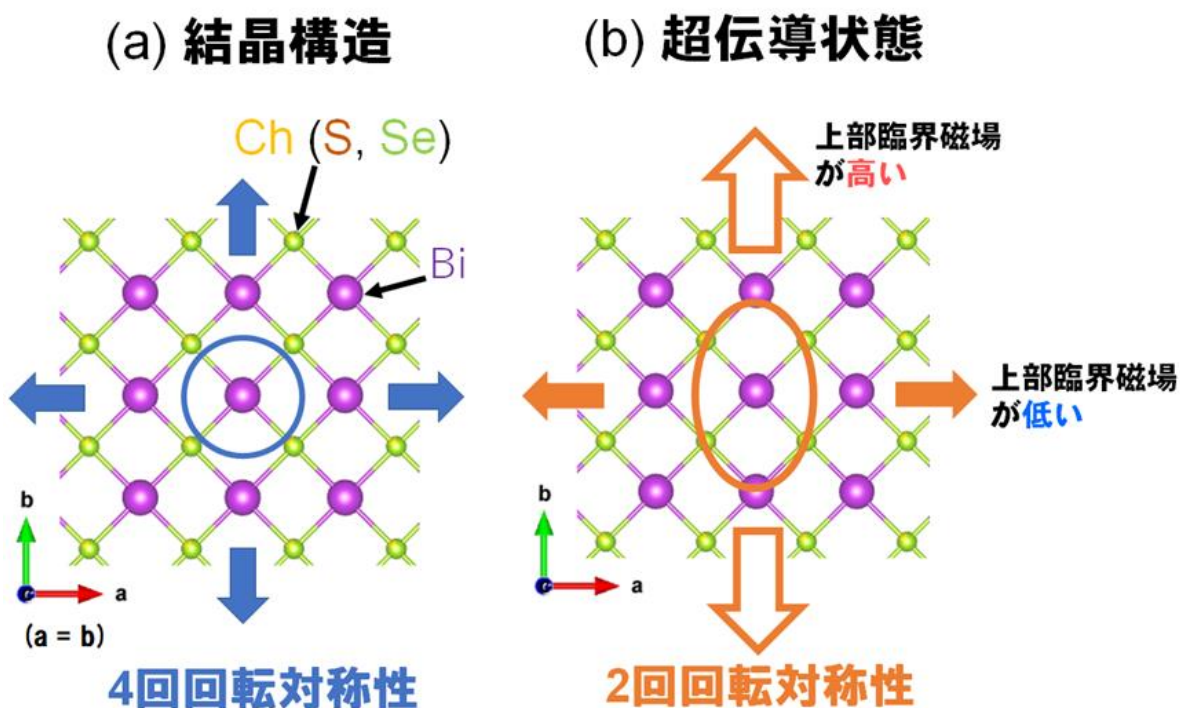


図 1. BiCh₂ 超伝導体の結晶構造と超伝導状態の異方性

- (a) 正方晶構造での結晶構造（BiCh 伝導面）の 4 回回転対称性。
- (b) 強磁場中電気抵抗率測定の結果から得られた超伝導状態の異方性（上部臨界磁場の強弱を示している）。

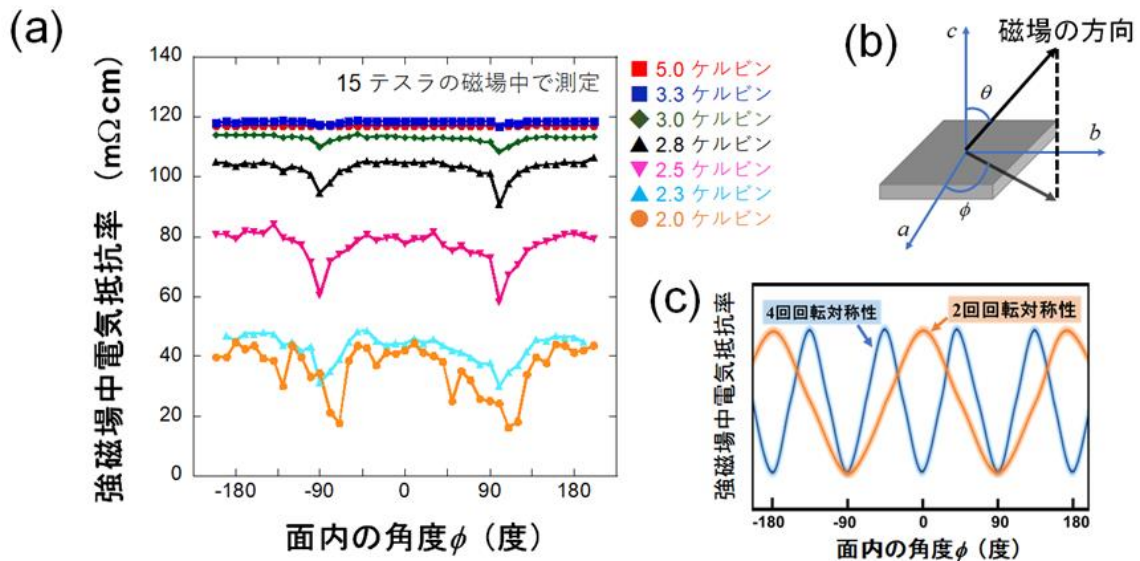


図 2. BiCh₂ 超伝導体の強磁場中電気抵抗率と異方性について

- (a) BiCh 伝導面を面内方向 (ϕ) に回転させながら測定した強磁場中電気抵抗率。面内の角度 ϕ に対して 180° 周期のシグナルが観測され、上部臨界磁場に 2 回回転対称性が現れていることを示している。(メインの 2 回回転対称成分と非常に小さい振幅を持った 4 回回転対称成分を足し合わせて解析)。
- (b) 結晶に対する磁場方向と角度の定義。本測定ではまず、 θ 方向に強磁場中電気抵抗率をスキャンして BiCh 面内に平行に磁場をセットした。その後、 ϕ 方向に結晶を回転させ、面内異方性の測定を行った。
- (c) 超伝導特性の異方性が 2 回回転対称を持つ場合と 4 回回転対称を持つ場合に期待される強磁場中電気抵抗率の面内角度依存性の概図。

【用語解説】

(1) 超伝導体

特定の金属を低温に冷却すると、ある温度（超伝導転移温度）以下で電気抵抗が消失します。これを超伝導転移と呼び、超伝導転移を示す物質を超伝導体と呼びます。

(2) 銅酸化物系超伝導体

1986 年に発見された層状超伝導体であり、現在最高の超伝導転移温度（常圧下）を示す物質系です。銅と酸素からなる CuO_2 面が伝導面です。

(3) 鉄系超伝導体

2008 年に日本で発見された層状超伝導体であり、銅酸化物系に次ぐ高い転移温度を示す物質系です。典型的な高温超伝導体は鉄とヒ素からなる FeAs 伝導層を有します。

(4) 高温超伝導

超伝導は低温で発現する現象であり、他の物質と比べて比較的高い温度で発現する超伝導を高温超伝導と呼びます。一般的に 40 ケルビン (-233°C) 程度以上で発現する超伝導は高温超伝導とみなされます。

(5) 非従来型超伝導機構

数多くの超伝導体では、格子振動を媒介として電子が対を形成することで超伝導状態が発現します。格子振動を媒介とした機構を従来型機構と呼び、磁気揺らぎや電子相関などを媒介として電子対を形成する場合の機構を非従来型機構と呼びます。

(6) 上部臨界磁場

超伝導状態は温度、磁場の強さ、電流密度の大きさによって常伝導状態に転移します。磁場に関して、超伝導状態が壊れる磁場を臨界磁場と呼びます。今回研究対象としている超伝導体は第二種超伝導体に分類され、超伝導状態が完全に消失する磁場を上部臨界磁場と呼びます。

(7) トポロジカル超伝導体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$

近年盛んに研究が進められている物性分野の一つがトポロジカル絶縁体（物質内部は絶縁体でありながら試料の表面やエッジに異常な金属状態が現れる物質）の分野です。トポロジカル絶縁体である Bi_2Se_3 は層間に Cu を挿入することで超伝導体になり、トポロジカル超伝導体として注目を集めています。（一般的に超伝導体は全体が超伝導状態になりますが、トポロジカル超伝導体では試料表面やエッジに超伝導ではない特異な金属状態が発現します。）

(8) ネマティック超伝導

ネマティック秩序は液晶分野が起源の概念ですが、近年、固体中の電子においてネマティック秩序と似た秩序状態（電子などの整列現象）が観測され、注目を集めています。超伝導状態におけるネマティック状態は超伝導特性における結晶回転対称性の破れとして観測されます。ネマティック超伝導はいくつかの高温超伝導体で観測されており、新しい高温超伝導体の設計指針確立に重要です。

今後の展開

$\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiSSe}$ 以外の組成をもった BiCh_2 系超伝導体単結晶においても同様の異方性測定を行い、今回観測した現象が BiCh_2 系超伝導に普遍的な性質であることを確かめます。また、超伝導ギャップに関する異方性測定を行うことでより詳細な情報が得られると期待します。 BiCh_2 系層状超伝導体は物質バリエーションが非常に豊富な系であるため、ネマティック超伝導状態を議論できる新たな系として多角的な研究が展開されることが期待されます。ネマティック超伝導は数年前に提案されたばかりの新しい概念であり、いくつかの系統でのみ実験的に確認されています。今回観測した BiCh_2 系超伝導における結晶回転対称性の破れは、ネマティック超伝導に新しい系統を加えるものである可能性があり、高温超伝導現象の解明や新超伝導体設計を加速することが期待されます。

2019年3月1日

日本物理学会刊行の英文誌「Journal of the Physical Society of Japan」（オンライン版）に掲載。

“Two-Fold-Symmetric Magnetoresistance in Single Crystals of Tetragonal BiCh_2 -Based Superconductor $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiSSe}$ ”

K. Hoshi, M. Kimata, Y. Goto, T. D. Matsuda, Y. Mizuguchi

J. Phys. Soc. Jpn. 88, 033704 (2019)

DOI: 10.7566/JPSJ.88.033704

研究に関するお問い合わせ先

首都大学東京 大学院理学研究科 物理学専攻 准教授 水口 佳一

〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

TEL : 042-677-2517

FAX : 042-677-2483

E-mail : mizugu@tmu.ac.jp