

# 磁気秩序と極性構造歪みを併せ持つトポロジカル半金属における超伝導の発見

## [1] 要旨

BCS 理論で記述される従来型の超伝導は、時空間反転対称性の破れを伴う磁気秩序や極性構造歪みとは一般に相容れない。このため、磁性と極性の両者を伴う系における超伝導は非従来型であることが期待される一方で、実験的報告は限られていたが、本研究において層状の極性構造を持つ磁性半金属  $\text{EuAuBi}$  が、試料表面に敏感な超伝導を示すことを見いだされた。さらに、この超伝導が面直磁場に対してパウリ極限を超える臨界磁場を示すことから、ラシュバ型スピン分裂に起因した非従来型の超伝導状態が実現している可能性が示唆された。

## [2] 本文

BCS 理論で記述される従来型の s 波超伝導においては、フォノンを媒介として超伝導電子対（クーパー対）が形成されており、この電子対は時間反転対称性と空間反転対称性を持つ。このため、これらの対称性を破る磁性や極性は、一般に s 波超伝導と相容れない関係にある。一方で、時空間反転対称性が破れた物質で実現する超伝導は非従来型となることが期待される。特に空間反転対称性が破れた系では、シングレットとトリプレットが混成した超伝導電子対の存在が提案されている。また近年では、バンド構造に非自明な幾何学的性質を有するトポロジカル物質において、その特異な表面状態に起因した表面超伝導の可能性も指摘され、トポロジカル物質における超伝導探索が精力的に行われている。

最近、大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻のメンバーを中心とした研究グループは、磁性を担う  $\text{Eu}$  層と電子伝導を担う  $\text{Au-Bi}$  層が積層した層状構造を持つトポロジカル半金属  $\text{EuAuBi}$  の単結晶合成に成功し、4K での反強磁性転移と 2.4K での超伝導転移を観測した(図 1)。この物質の極性構造は、ハニカム格子を形成する  $\text{Au}$  と  $\text{Bi}$  イオンが面間方向に交互に変位することで実現しており、極性構造を持ちながらも磁気秩序と超伝導を示す珍しい系である。この成果は、JPSJ の 2023 年 1 月号に掲載された。

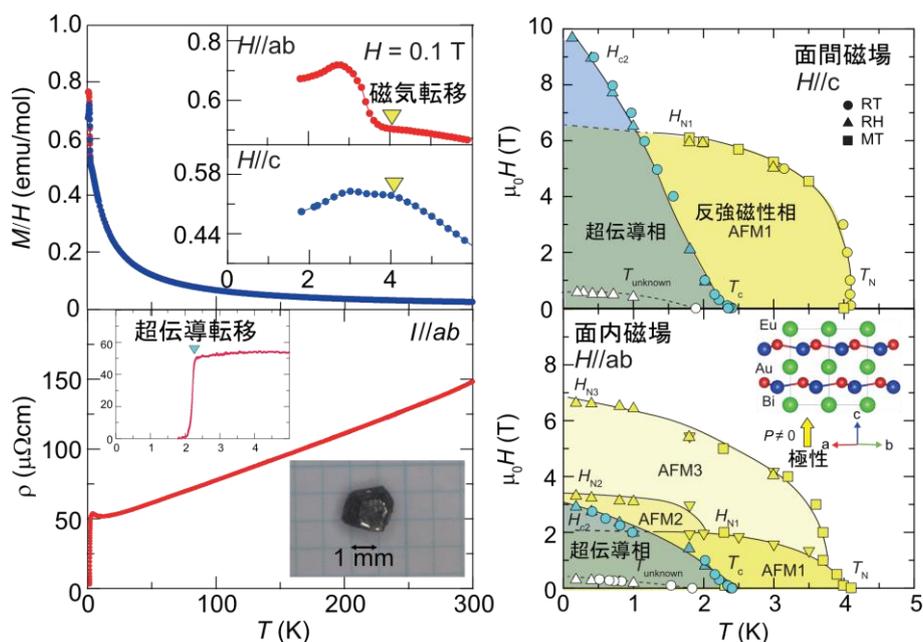


図 1 磁性トポロジカル半金属  $\text{EuAuBi}$  の磁化（左上）と電気抵抗率（左下）の温度依存性と、面間磁場（右上）および面内磁場（右下）中の磁気・超伝導相図。

EuAuBi は、磁性イオン  $\text{Eu}^{2+}$  ( $S=7/2$ ) からなる三角格子と、Au-Bi からなる歪んだハニカム格子が交互に積層した結晶構造を持ち、 $c$  軸方向に極性を有する空間群  $P6_3mc$  に属する(図 1 右下)。この物質の超伝導特性を調べるべく、外部磁場を面内と面間方向に印可した場合での超伝導転移温度の変化を 0.1K 付近まで測定された。その結果、面間磁場においてパウリ極限を大きく超える 10T の臨界磁場が実現する一方で、面内磁場の場合にはそれが 3T 程度であり、臨界磁場に大きな異方性があることが明らかとなった。さらに第一原理計算から、Bi の  $p$  軌道由来の強いスピン軌道相互作用と極性構造を反映し、フェルミ準位近傍のバンド構造においてラシュバ型のスピン分裂が実現していることを見出された。また、Bi の  $p$  軌道と Au の  $s$  軌道の混成に起因したギャップ構造の存在から、トポロジカルなバンド構造の可能性も示唆された。そのため、パウリ極限を超える大きな臨界磁場とその異方性は、トポロジカル表面での超伝導の可能性や、強いスピン軌道相互作用に起因したラシュバ型のバンド構造を反映したものである可能性を示唆しており、EuAuBi は新しい非従来型超伝導を示す系であることが期待される。

本研究は、磁性と極性構造を併せ持つトポロジカル半金属 EuAuBi において、超伝導とその特異性を初めて明らかにした。この系における超伝導は大きな磁化を持つ  $\text{Eu}^{2+}$  と共存できるため、新しい外場応答を示すスピントロニクスとしての可能性を秘めている。この系の超伝導については、トポロジカル表面状態や極性構造による影響などの詳細が明らかになっておらず、今後の研究の進展が期待される。

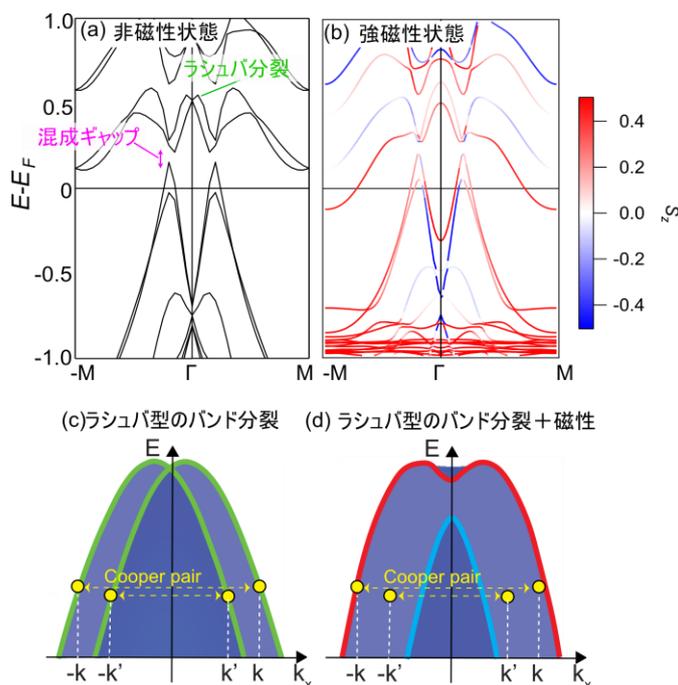


図 2 EuAuBi の磁性イオン  $\text{Eu}^{2+}$  が無い場合 (a,c) とある場合 (b,d) の  $\Gamma$  点まわりでのスピン軌道相互作用を含んだ場合でのバンド構造と、それぞれに対応したラシュバ型のバンド構造の模式図。

原論文 (2022 年 12 月 1 日公開済)

Superconductivity in a Magnetic Rashba Semimetal EuAuBi

H. Takahashi, K. Akiba, M. Takahashi, A. H. Mayo, M. Ochi, T. C. Kobayashi, and S. Ishiwata, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 013701 (2023)

<情報提供：高橋英史（大阪大学大学院基礎工学研究科）  
石渡晋太郎（大阪大学大学院基礎工学研究科）>