

共同利用研究ハイライト

三層系銅酸化物高温超伝導体における特殊な電子状態「ノード金属」と最高超伝導転移温度の起源

出田 真一郎 広島大学 放射光科学研究所 准教授

強相関電子物性は、物性物理学の分野で多くの研究者を魅了し、世界中で盛んに研究が進められている。その中で液体窒素よりも高い温度で超伝導を示す銅酸化物高温超伝導体は、その高い超伝導転移温度 (T_c) の起源を解明すべく研究が盛んに進められている。銅酸化物高温超伝導体は、BCS理論で単純には理解できない100 K以上の T_c を示し、現在では常圧下で150 K程度の高温で超伝導を示すまでに上昇した。超伝導は医療診断装置、脳波や地磁気を精密に測定する磁束計、リニアモーターカーなどに応用されており、さらにエネルギー損失がない送電ケーブルや電力貯蔵装置の研究開発が進められている。

銅酸化物高温超伝導体の母物質は、本来は電気を流さない反強磁性モット絶縁体である。銅と酸素からなる CuO_2 面に、電子やホールを元素置換や酸素アニールなどによりキャリアとして供給することで金属的な性質が現れ、低温で超伝導を示すようになる。 T_c はキャリア濃度に強く依存し、最適なキャリア濃度で最も高い T_c を示す。さらに、単位胞あたりの CuO_2 面の枚数が増加すると T_c が増加していく傾向が知られている^[1]。この振る舞いは、様々な銅酸化物高温超伝導体において共通の振る舞いであり、 CuO_2 面が3枚のときに最も高い T_c を示す。この三層系銅酸化物高温超伝導体の最も高い T_c を示す微視的起源が解明されれば、より高い T_c を示す超伝導物質の設計指針が得られるようになり、幅広い

分野における実社会への応用にも期待がもたれる。

筆者らは、三層系銅酸化物 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ ($\text{Bi}2223$) の110 Kにまで達する高い T_c を示す超伝導の微視的機構を解明するために角度分解光電子分光 (ARPES) と呼ばれる実験手法で研究を続けている^[2, 4, 6]。ARPESは物質内の電子状態をエネルギーと運動量の関係として直接得ることができる実験手法である。日本には物質の表面だけでなく比較的深い位置 (バルク) での電子状態も観測できるバルク敏感な低励起光エネルギー ARPES ビームラインが2本存在している。そのうちの1つが分子科学研究所 UVSOR にある BL7U であり、バルク敏感な真空紫外領域の放射光ビームラインはエネルギー分解能および波数分解能が高いという特徴をもち世界的にも希少である。今回のハイライトは主に UVSOR

の BL7U を利用した研究成果を記す。

三層系銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}2223$ は、単位胞が BiO のブロック層と超伝導の舞台となる3枚の CuO_2 面が層状に積み重なり構成されている (図1(a))。ブロック層に近い外側 CuO_2 面 (OP) は、ブロック層からのホールキャリアが十分に供給される一方で、ブロック層から遠い内側 CuO_2 面 (IP) はホールキャリアが少ない状況となる。このキャリア濃度の差を反映した電子構造が OP と IP 由来の電子構造として別々に観測される (図1(b))^[2-6]。このとき、キャリア濃度を減少させていくとどうなるだろうか？ OP、IP のキャリア濃度は徐々に減少していき、最終的には IP のキャリア濃度はゼロとなり反強磁性秩序を示すモット絶縁体となるのだろうか。図2(a) に不足ドーパ $\text{Bi}2223$ ($T_c \sim 64$ K) で得られたフェルミ面を示す。フェル

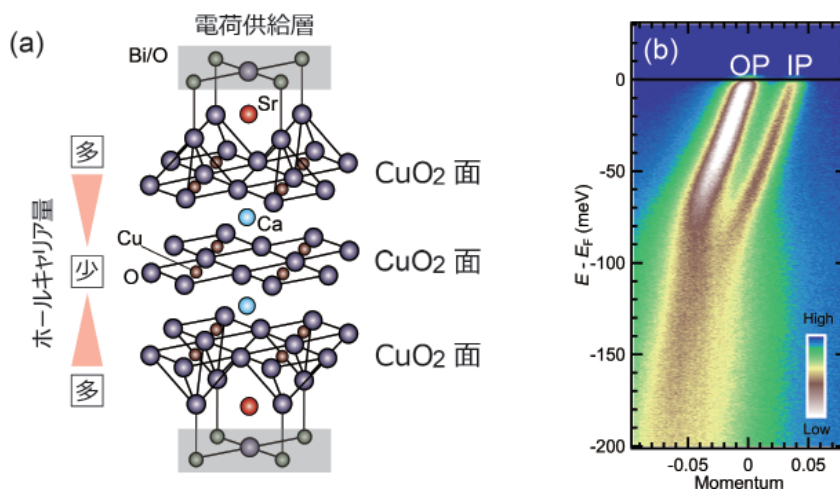


図1 (a)三層系銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}2223$ の結晶構造。(b) ノード方向の ARPES スペクトル。OP、IP はそれぞれ外側、内側 CuO_2 面由来の電子構造である。

ミ面から見積もられるホールキャリア濃度はOPで約10%、IPで約0%となるが、反強磁性秩序に伴うフェルミ面の折り返しは確認されず、大きなホールフェルミ面が観測された^[5,6]。つまり、IPはキャリアがほとんどないにも関わらず、モット絶縁体にならず、金属的な電子状態を保っていた。

超伝導の特徴についてIPのエネルギーギャップの波数依存性を調べたところ、超伝導転移温度 T_c を越えた常伝導状態においても、 d 波超伝導に特徴的な節構造が保たれていることが分かった(図2(b))。この特徴は T_c の約1.5～2倍に至る高温領域まで続いていた。このように、超伝導状態ではないにも関わらず、 d 波超伝導に由来する電子構造を保った金属的な状態を「ノード金属」状態と呼ぶことができる。この結果は、IPでは T_c を大きく超える温度から超伝導電子対の形成が始まっていることを示唆している。さらに、外側 CuO_2 面(OP)の超伝導状態がしみ出した「近接効果」が内側 CuO_2 面(IP)の超伝導を安定化させていると考えられる。つまり三層構造では、OPとIPが互いに異なる役割を担いながら協調す

ることで、超伝導状態が高温まで安定に保たれている^[6]。このことが、三層系銅酸化物高温超伝導体で最も高い T_c を実現する重要な要因であると考えられる。この成果は、高温超伝導の発現機構の理解を前進させるとともに、より高い T_c をもつ物質の設計や応用研究、さらには室温超伝導の実現に向けた重要な指針になると期待される。

UVSORは、2027年度よりAI-for-Scienceに向けた加速器や周辺機器のアップグレードが行われることがユーザーに通知されている。近年、学生の減少等の理由から少人数で実験を行う

ことが増えている。そこで、AIをビームラインやエンドステーションに組み込んだ場合、どこまで実験が自動化され簡便に遂行できるようになるのかは今後の重要な要素となると考える。そのため、このアップグレードでどのような展開が起きるのか楽しみにしている。

本稿を締めるにあたり、本研究の実施にご協力いただきました全ての共同研究者の皆様、特に、田中清尚准教授、吉田鉄平教授、藤森淳名誉教授に深く感謝申し上げます。

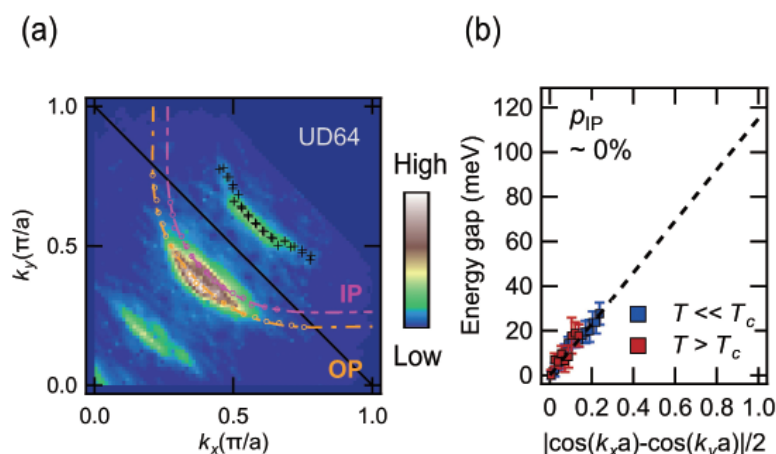


図2 (a) 不足ドーパBi2223 ($T_c \sim 64$ K)でのフェルミ面。(b) IPにおける超伝導($T < T_c$)および常伝導状態($T > T_c$)におけるエネルギーギャップ異方性。

参考文献

- [1] A. Iyo et al., *J. Phys. Soc. Jpn.* **76**, 094711 (2006).
- [2] S. Ideta et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 227001 (2010).
- [3] S. Kunisada et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 217001 (2017).
- [4] S. Ideta et al., *Phys. Rev. Lett.* **127**, 217004 (2021).
- [5] S. Kurokawa et al., *Nat. Commun.* **14**, 4064 (2022).
- [6] S. Ideta et al., *Nat. Commun.* **16**, 9470 (2025)



いわた・しんいちろう

2012年に東京大学大学院理学系研究科物理学専攻で博士号(理学)を取得。2012年4月より東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻・日本学術振興会特別研究員、マックスプランク研究所・客員研究員、東京理科大学理工学部物理学科・助教を経て、分子科学研究所極端紫外光研究施設・助教。2021年4月より現職。