上部臨界磁場と次元性が相関する異方的超伝導状態

強相関電子系物質における異方的超伝導の発現機構の理解には，超伝導ギャップ構造の解明が不可欠である。この論文では，有機超伝導体β-(BDA-TTP)$_2$SbF$_6$の上部臨界磁場 H_{c2} の温度・磁場・磁場方位依存性の測定により，(i)温度の低下に伴って超伝導状態が 3 次元から 2 次元へクロスオーバーすること，(ii)それに伴って，H_{c2} の面内異方性がフェルミ面の異方性を反映した二回対称性から d 波超伝導ギャップ構造に由来する四回対称性へ変化することを報告しており，H_{c2} の異方性に基づいたギャップ構造の議論では次元性にも注意を要することが示唆されている。

超伝導は最も魅力的な物理現象の一つであり，その発現機構を理解することは現代物性物理学の中心的な研究課題である。超伝導はフェルミ面上の二つの電子の間に引力が働きクーパー対をつくることによって生じる。従来型の超伝導体（BCS 超伝導体）では，この引力は格子振動を媒介として生じ，超伝導ギャップが運動量空間で等方的に開く。これに対して，銅酸化物超伝導体や有機超伝導体などの強相関電子系超伝導体では，電子間の強い斥力相互作用により超伝導ギャップがゼロになる部分，つまり「ノード」が存在する。このようなギャップ構造はクーパー対の発現機構と密接に関係しているため，ギャップ構造の実験的解明は超伝導の発現機構を知る上で重要な情報を与える。強相関電子系である有機超伝導体には，単純なフェルミ面を有するため難しい「電子相関」の問題を理論的に扱うことができるという特徴があり，異方的超伝導の本質を理解する上で有機超伝導体は好都合な物質である。しかし，有機超伝導体の単結晶は概して小さいので，ギャップ構造を決定するための実験は困難を極めていた。

最近，広島工業大学，筑波大学，物質・材料研究機構，兵庫県立大学の共同研究グループは，有機超伝導体β-(BDA-TTP)$_2$SbF$_6$の超伝導ギャップ構造を決定するため，二軸回転プローブと超伝導マグネットを組み合わせた装置を用いて，上部臨界磁場 H_{c2} の面内異方性と温度依存性を精密に測定した。その結果，H_{c2} の面内異方性が超伝導ギャップ構造だけでなく，超伝導状態の次元性とも密接に関連していることを見出した。この成果は，日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) 2017 年 8 月号に掲載された。

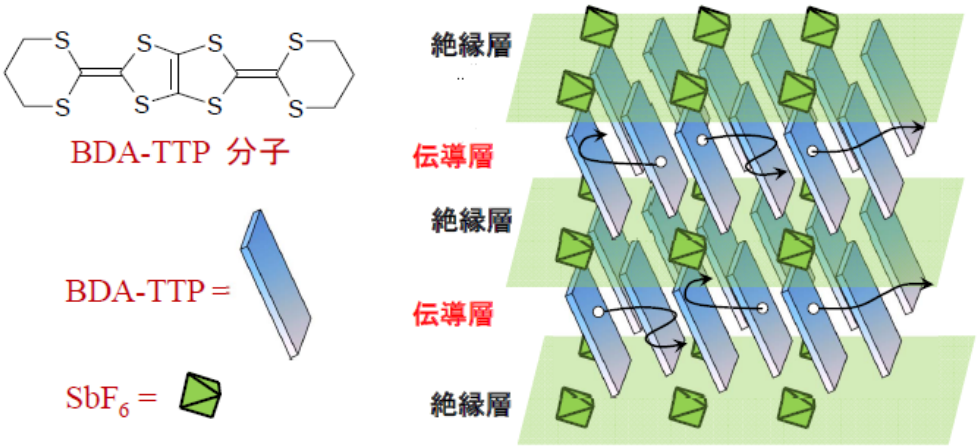

図 1.　β-(BDA-TTP)$_2$SbF$_6$の結晶構造

この研究の測定対象であるβ-(BDA-TTP)$_2$SbF$_6$については，比較的大きな単結晶を育成することが可能であり，かつ，その超伝導転移温度（T_c = 7.5 K）も比較的高い。また，量子振動実験から決定されたこの物質のサイクロトロン有効質量（自由電子質量の 12 倍以上）は有機超伝導体の中で最も重く，強相関電子系であることが示唆されている。この物質の結晶構造を図 1 に示す。SbF$_6$アニオン分子からなる層は絶縁層と考えて良く，BDA-TTP 分子が形成する層が伝導面となっている。しかし，超伝導状態ではジョセフソン結合した層状二次元超伝導体として振る舞うのか，あるいは異方的な三次元超伝導体として振る舞うのか未解決であった。さらに，比熱や STM による実験やいくつかの理論研究は d 波対称性を示唆しており，この物質のギャップ構造の詳細に興味がもたれていた。

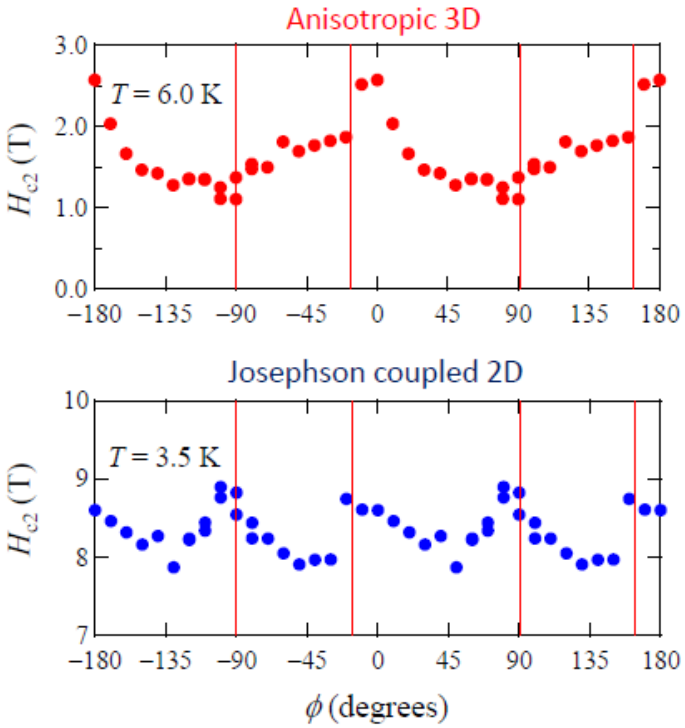

図 2.　β-(BDA-TTP)$_2$SbF$_6$の上部臨界磁場の面内異方性．グラフ中の赤い縦線は理論計算より得られた超伝導ギャップの反ノード方向を示す。

実験および解析の結果，β-(BDA-TTP)$_2$SbF$_6$は，T ＜ 6 K ではジョセフソン結合した二次元超伝導体，T ＞ 6 K では異方的な三次元超伝導体として振る舞うことがわかった。さらにH_{c2}の面内異方性を測定したところ（図 2），T = 6.0 K ではフェルミ面の異方性を反映した二回対称性を示した。一方，T = 3.5 K では四回対称性を示し，第一原理計算から予測される d 波超伝導ギャップの反ノード方向で極大を示した。T = 6.0 K では異方的な三次元超伝導体として振る舞うことから軌道効果が重要な役割を果たしており，T = 3.5 K ではジョセフソン結合した二次元超伝導体として振る舞うため軌道効果が抑制されて d 波超伝導ギャップ構造に由来する四回対称性を示すと考えられる。

このように，超伝導状態の次元性の変化によってH_{c2}の面内異方性が異なる振る舞いを示すことが明らかとなったので，H_{c2}の磁場方位依存性に基づいて異方的超伝導体のギャップ構造を議論する際は超伝導状態の次元性に注意を払う必要がある。この研究成果を踏まえて，強相関電子系における異方的超伝導に関する研究がさらに展開されることが期待される。

原論文

Dimensional Crossover and Its Interplay with In-Plane Anisotropy of Upper Critical Field in β-(BDA-TTP)$_2$SbF$_6$

Syuma Yasuzuka, Hiroaki Koga, Yasuhisa Yamamura, Kazuya Saito, Shinya Uji, Taichi Terashima, Hiroki Akutsu, and Jun-ichi Yamada: J. Phys. Soc. Jpn. 86 (2017) 084704

問合せ先：安塚　周磨（広島工業大学工学部）、齋藤　一弥（筑波大学数理物質系）、
宇治　進也（物質・材料研究機構）、山田　順一（兵庫県立大学大学院物質理学研究科）