

# 審査の結果の要旨

氏名 竹中 崇了

本論文「異方的ギャップを有する超伝導体における低エネルギー励起に関する研究」では、3つの超伝導体において、超伝導体の最も基礎的な物理量である磁場侵入長を極低温領域まで精密測定することで、超伝導準粒子の低エネルギー励起構造の観測、さらには超伝導ギャップ構造の決定を行った一連の研究について論じている。

論文は7つの章から構成されており、第1章で序論として超伝導研究の歴史と本論文の構成が簡単に述べられた後、第2章で研究背景として本研究で取り扱う異方的超伝導体における超伝導対称性およびギャップ構造と準粒子励起について解説されている。第3章では実験手法として本研究で測定した磁場侵入長の測定方法について詳細が記述されている。3つの超伝導体に対する研究の背景と測定結果については、それぞれ第4章、第5章、第6章で以下のように述べられている。

第4章では、トポロジカル超伝導候補物質  $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$  の超伝導対称性について論じられている。この物質は約 3 K で超伝導転移を示し、母物質  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  と同じくディラック型の分散構造を持つ表面状態を有することからトポロジカル超伝導の候補物質と期待されている。また最近では、バルクにおいて超伝導状態で各種熱力学量や伝導特性の面内磁場角度依存性が 2 回対称性を示すことが報告され、超伝導ギャップ関数の回転対称性が結晶の回転対称性を破る「ネマティック超伝導」として注目されている。本研究では、この系の単結晶試料において極低温領域までの磁場侵入長の温度依存性の測定を行い、ギャップ構造が異方的である場合に期待される振舞いを観測した。また、キャリア数の異なる試料の比較や電子線照射による結果から、フェルミ面が 3 次元から 2 次元に変化しても、ギャップ構造があまり変化しないことから、この系の結晶構造から許される超伝導対称性のうち、 $E_u$  の規約表現に属する対称性と最も整合することが結論されている。これは 2 回対称性を持つネマティック超伝導と矛盾しないものであり、トポロジカル超伝導の条件を満たすという重要な結論である。

第5章では、最近発見された配位高分子  $[\text{Cu}_3\text{C}_6\text{S}_6]_n$  における超伝導の研究について述べられている。この系は 2 次元的に連続したナノシート構造が積層した構造を取り、Cu 原子がカゴメ格子の頂点に位置しており、伝導性を持つ金属有機構造体としても、幾何学的スピンプラストラクションを持つ可能性という観点でも非常に興味深い超伝導体である。一方で、物性物理学の観点からはあまり研究がされていなかった。本研究では、磁場侵入長の温度依存性が従来型超伝導体とは異なり低温で温度のべき乗に従うこと、超伝導転移温度と光学反射率測定から見積もったフェルミ温度との比が従来型超伝導体に比べけた違いに大きく、高温超伝導体や重い電子系超伝導体で議論されている Uemura 則にほぼ従うことを明らかにした。この結果は、この配位高分子超伝導体が強相関電子による非従来型超伝導体であることを示唆する結果であり、この新しい超伝導体の今後の研究展開において重要な基礎データを提供するものであると考えられる。

第6章では、重い電子系超伝導体  $\text{URu}_2\text{Si}_2$  における精密磁場侵入長測定の結果について論じて

いる。URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>は17.5 Kで「隠れた秩序」とよばれる起源不明の秩序相への二次相転移を示し、さらに低温の1.4 Kで超伝導転移を示す。この超伝導状態は時間反転対称性の破れたカイラル超伝導が実現している可能性が議論されており、その超伝導ギャップは比熱測定と熱伝導率測定から $k_z(k_x \pm ik_y)$ の形の対称性が候補となっている。一方で超伝導電子密度を直接反映する磁場侵入長の結果は未だ報告されておらず、超伝導ギャップ関数の最終決定に向けて磁場侵入長の精密測定が求められていた。本研究では低エネルギー準粒子励起構造に異方性があり、超伝導ギャップが $k_z(k_x \pm ik_y)$ の形に対応するものであること、超伝導転移温度が低く散乱の効果が強いと考えられる試料では低エネルギー励起構造の概形が変化することを磁場侵入長測定から見出した。これらの実験結果は、この系がカイラル*d*波の対称性を持つ異方的非従来型超伝導であることを支持する結果である。

以上のように、本論文は、3つの超伝導体において、極低温における磁場侵入長の温度依存性測定から、発現機構を考えるうえで重要な超伝導ギャップ構造の決定を報告するものである。なお、本研究は、東京大学の石原滉大学院生、Miao Yijie 元大学院生、水上雄太助教、橋本顕一郎准教授、芝内孝禎教授、東京工業大学の笹川崇男准教授のグループ、中国科学院の Daoben Zhu 教授のグループ、日本原子力研究開発機構の芳賀芳範研究員のグループ、Ecole Polytechnique の Marcin Konczykowski 博士らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験、解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上1981字