

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 関谷 毅

酸化物高温超伝導体において、「超伝導がどれ位の磁場で破れるのか？」そして「超伝導が破れた後の電子状態はどうなっているのか？」という問題は、基本的かつ重要な問題であるが、高温超伝導体の臨界磁場が高いが故に実験的研究が困難な問題でもあった。本論文は、「酸化物高温超伝導体の強磁場下常伝導特性と上部臨界磁場」と題し、必要なだけの強磁場を用いて「低温常伝導状態で見られる異常な輸送特性」と「最適ドーピング $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.6}$ の上部臨界磁場」を実験的に研究したものである。

超伝導を磁場で抑制して実現される「低温常伝導状態」の物性を理解することは、超伝導を起こす母体電子系自体の性質と超伝導発現機構を解明するために重要である。また酸化物超伝導体の低温での上部臨界磁場を実測し、超伝導磁気相図を全温度領域にわたって決定することは基礎物理学的興味に加えて、工学的応用の面からも極めて重要である。

第1章「序論」では、研究の背景、目的、構成について述べられている。

第2章「高温超伝導体の基礎物性と研究背景」では、高温超伝導体の結晶構造、磁気相図などの基礎物性と、ホールドーピング系および電子ドーピング系超伝導体の低温強磁場における常伝導輸送特性のこれまでの研究報告、最適ドーピング $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.6}$ の上部臨界磁場のこれまでの研究報告など、本研究の背景となる概念や報告が詳細に説明されている。

第3章「実験方法と測定技術」では、まず非破壊型ソレノイドコイルを用いた 50 T 級および 80 T 級長時間パルス磁場の発生技術と、一巻きコイル直接放電法による 200 T 級短パルス超強磁場および電磁濃縮法による 600 T 級短パルス超強磁場の発生技術について説明されている。続いて長時間パルス磁場における直流四端子法による磁気抵抗測定など本研究で用いられた測定技術について説明されている。特に本研究において新たに開発された非接触型高周波磁気透過測定技術(以下、RF 法と呼ぶ)について詳細に述べられている。これはパルス幅数マイクロ秒、放電電流数 MA という過酷な短パルス超強磁場環境下で上部臨界磁場の高精度測定を可能にした実験技術で、技術的側面における本研究の主要な成果である。ここで上部臨界磁場は、超伝導状態の透過強度が外部磁場により常伝導状態の値まで回復する磁場の値として定義されている。渦電流による発熱の有無や試料の角度精度などを、一巻きコイル法を用いて評価する方法についても詳細に説明されている。

第4章、第5章が本論文の中心をなす部分であり、各主題について行った実験結果とそれに対する考察が議論されている。

第4章「常伝導輸送特性」では、磁場により低温で超伝導を抑制した常伝導輸送特

性で見られる降温に伴う異常な抵抗率の増加、いわゆる upturn についての研究結果が述べられている。4. 1 節では 3 種類の電子ドーパ系超伝導体 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 、 $\text{Pr}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 、 $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の単結晶薄膜試料についての低温常伝導輸送特性の実験結果がまとめられている。特に upturn の磁場依存性を明瞭にするため、磁場のかわりにドーパ量を減らして超伝導を抑制した薄膜試料を準備して実験を行った点に特徴がある。4. 2 節では基板との格子定数の差を利用してエピタキシャル歪を導入した 2 種類（面内圧縮および伸張歪）のホールドーパ系超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 単結晶薄膜の低温常伝導輸送特性の実験結果がまとめられている。4. 3 節では以上の実験結果から、電子系超伝導体で見られる異常な upturn の起源について二次元弱局在、相分離とストライプ、近藤効果の可能性を比較・検討している。

本論文では、観測された upturn の振舞いが、従来から有力な仮説である二次元弱局在的というより、むしろ近藤効果的であると結論されている。そのために、この系で近藤効果が何故起こるのか、それは反強磁性相内でも起こり得るのかについて考察がなされている。結論として、電子系超伝導体の CuO_2 面上の残留頂点酸素が直下の Cu サイトに実効的な局在スピンを誘起し、この局在スピンのみにより伝導電子が近藤散乱を受けるシナリオが提案されている。一方、ホール系超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 単結晶薄膜にエピタキシャル歪を導入した実験では、upturn が歪に顕著に依存することを初めて見出しているが、upturn の振舞いは電子系のそれとは異なるため、近藤効果以外の機構が upturn に関与している可能性がある」と論じている。

第 5 章「最適ドーパ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の上部臨界磁場 ($B//\text{CuO}_2$)」では、超伝導転移温度が極めて高い最適ドーパ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の CuO_2 面に平行に磁場を加えた ($B//\text{CuO}_2$) 場合の上部臨界磁場を、3 種類のパルス強磁場発生装置と本研究で開発された RF 法を組み合わせ、500 T まで超強磁場領域で詳細に調べた結果について述べられている。すなわち最も代表的な高温超伝導体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の温度 - 上部臨界磁場 ($B//\text{CuO}_2$) の磁気相図を、過去例のない超強磁場領域まで拡張し、世界に先駆けてその全貌を明らかにしている。 $B//\text{CuO}_2$ の場合の 0 K における上部臨界磁場は 250 T 程度であることが確認されている。また磁場による超伝導の破壊機構についても考察しており、転移温度近傍では軌道効果が、低温ではスピンゼーマン効果が超伝導の破壊に主要な機構となることを示唆している。

第 6 章「本論文のまとめと総括」では、以上の研究の概要がまとめられている。

以上を要約すると、本研究は磁場中で見られる高温超伝導体の低温における常伝導輸送特性を扱い、これまで未解決とされてきた二つの問題に対して多くの新しい知見を見出したものであり、物性物理学、物理工学の発展に寄与するところがきわめて大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。