

学位審査報告書

（ふりがな） 氏 名	きったか しゅんいちろう 橋高 俊一郎
学位（専攻分野）	博 士 （ 理 学 ）
学位記番号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
（学位論文題目） Superconductivity of Sr ₂ RuO ₄ and its eutectic systems (Sr ₂ RuO ₄ とその共晶体の超伝導)	
論文調査委員	（主査） 前野 悦輝 教授 石田 憲二 教授 松田 祐司 教授

理 学 研 究 科

京都大学	博士 (理 学)	氏名	橋高 俊一郎
論文題目	Superconductivity of Sr_2RuO_4 and its eutectic systems		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、スピン三重項超伝導体であることが確実視されている Sr_2RuO_4 (超伝導転移温度 $T_c = 1.5 \text{ K}$) とその共晶体にみられる特異な超伝導状態について、一軸性圧力効果や磁場方位・磁場強度・温度依存性の精密測定から新たな知見を得るとともに、長年の未解決問題についても議論を深めた結果をまとめたものである。</p> <p>本論文の「第一章：序章」では、Sr_2RuO_4 やその共晶体について、単結晶の育成方法も含めて完結にまとめ、これらの系における未解決問題についても簡単に触れている。</p> <p>「第二章：実験」では、ベクトルマグネット装置や一軸性圧力印加方法、交流磁化率測定方法などの実験方法について記述している。</p> <p>「第三章：Sr_2RuO_4 の上部臨界磁場の角度依存性」では、面内方向の上部臨界磁場 H_{c2} が低温で強く抑制される問題に着目し、精密磁場制御下における交流磁化率の測定結果とその解釈をまとめている。本研究により H_{c2} の温度・磁場方向依存性の詳細が明らかになり、H_{c2} の抑制が起きる条件を明確にすることに成功した。</p> <p>「第四章：Sr_2RuO_4-Ru 共晶体の超伝導の空間発達」では、オンセット T_c が 3 K に上昇する Sr_2RuO_4-Ru 共晶体に対する、磁化率の磁場方向・強度依存性の研究成果をまとめている。3-K 超伝導による磁場遮蔽率が特異な磁場依存性を示すことを初めて見出し、低磁場では Sr_2RuO_4 の T_c 以上の温度域でも非常に大きな値を示すことを明らかにした。これらより、異なる Ru の周りで生じた 3-K 超伝導が、近接効果によりネットワークを形成し、広範囲で弱い超伝導領域を作り出している可能性が高いことを示した。</p> <p>「第五章：Sr_2RuO_4-Ru 共晶体の一軸性圧力効果」と「第六章：Sr_2RuO_4 の一軸性圧力効果」は本論文の中心となる章であり、Sr_2RuO_4-Ru 共晶体において常圧での T_c が 3 K に上昇する起源の解明を目指して行った一軸性圧力実験の研究成果を記述している。Sr_2RuO_4-Ru 共晶体では、3-K 超伝導の体積分率が一軸性圧力下で大きく上昇することを明らかにし、また純粋な Sr_2RuO_4 では非常に小さな一軸性圧力下で $T_c \sim 3 \text{ K}$ の超伝導が発現することを見出した。さらに、一軸性圧力下で発現する 3-K 超伝導は界面 3-K 超伝導とは定性的に異なる性質を持つことを示し、ネットワークの生成とは全く異質の超伝導が発達していることを指摘した。また、得られた T_c の一軸性圧力効果は弾性的な結晶歪みによる一軸性圧力効果では説明できないことを指摘し、Sr_2RuO_4 が異方的結晶歪みの有無により $T_c = 1.5 \text{ K}$ と $T_c \sim 3 \text{ K}$ という 2 つの超伝導相を元来有している可能性を実験的に初めて提示した。</p> <p>「第七章：$\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$-$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 共晶体の超伝導」では、$\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$-$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 共晶体中の $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ だけの領域で複数の超伝導転移が起きていることを見出し、それらの超伝導特性について調べた結果を示している。また、共晶体中の $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 領域で起きる超伝導の起源について議論を行い、積層欠陥として $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ 領域中に混入した薄い Sr_2RuO_4 層がその厚みによって異なる T_c を示すというシナリオが有力であると結論づけている。</p> <p>「第八章：結論」では、上記の結果と議論を総括してまとめるとともに、今後の研究の展望についても言及している。</p> <p>「付録」では、本研究において重要な理論などを簡単にまとめている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文の対象となるルテニウム酸化物の超伝導体 Sr_2RuO_4 は、銅酸化物の高温超伝導体と同じ結晶構造で 3d 遷移金属の銅の代わりに 4d 遷移金属のルテニウムを用いたものである。過去 15 年間の世界的な研究努力とデータ集積の結果、まだどの物質においても完全に確立されたとはいえない「スピン三重項」の電子対が担う超伝導体であることが確実視されている。しかしながら、スピン三重項超伝導状態の詳細を矛盾なく説明し尽くすには、いまだに未解決の現象がいくつかある。それらは長期の研究の末にまだ未解決であるので、一筋縄では解決しない問題であるが、橘高氏はこのような問題のいくつかに挑み、これまでにない精度・確度を持つ信頼できる実験事実を提供するとともに、新たな現象も見出し、この超伝導体の研究の深化に貢献した。

本論文は、さまざまな環境下におかれた Sr_2RuO_4 の超伝導の振る舞い、という視点を軸に、スピン三重項の超伝導に対する理解を深めている。まず磁場中の振る舞いについて、低温での上部臨界磁場が通常の電子対の軌道破壊効果での予想よりも顕著に抑制されていることが、本研究室の以前の研究等から明らかになっていた。スピン三重項電子対の場合、スピン対破壊は起こらないと予想される磁場方位での現象のため、その抑制原因をめぐってさまざまな議論が展開されてきた。橘高氏はこの現象の基礎データを提供すべく、精密な磁場方位制御が可能なベクトルマグネット装置を駆使して、広範な温度領域を網羅した決定版となるデータをはじめて収集した。この研究によって特異な抑制効果が現れる条件は明確になったものの、その結果の解釈は既存の理論では不十分であるので、本論文の情報をもとに、最終決着に向けた今後の理論研究の発展を待つ必要がある。

次に Ru 金属との共晶体の超伝導による磁場遮蔽率が、微小磁場のもとでは共晶界面の占める体積に比べてずっと大きな値を示すことを明らかにした。また、 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ との共晶体では、見かけ上 $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ のみからなる領域でも弱磁場では顕著な超伝導性が現れることを明らかにした。そして、磁場振幅や周波数の依存性を磁束ピン止めに対する臨界状態モデルに基づくシミュレーションと比較することで、前者が共晶析出した Ru 薄片の間を結ぶジョゼフソン・ネットワークによるもの、後者は Sr_2RuO_4 の薄い層が積層欠陥として混入することで、それぞれ説明できることを示した。

本研究の目立った成果のひとつは、一軸性圧力による超伝導性の変化についての、 Sr_2RuO_4 -Ru 共晶系と Sr_2RuO_4 純粋系単体の比較研究から生まれた。両系で超伝導の体積分率が飛躍的に高まり、特に純粋系でもオンセット温度が 3.2 K にまで倍増する。さらに両系での圧力依存性から、常圧での共晶系での超伝導ネットワーク生成とは異なる性質の超伝導性が、純粋系で現れることも新たに見出した。これは長年 1.5 K とされてきた純粋な Sr_2RuO_4 の超伝導転移温度が、実は 3.2 K 程度にまで上昇可能であることをはじめて明らかにしたもので、超伝導機構をより明確にするための重要な情報を含んでいる可能性があり、高く評価される成果といえる。今後は、本論文で推論されている非等方的な結晶歪の実体を直接観測する研究につながっていくだろう。

橘高氏はこれらの研究を遂行するために、試料単結晶の育成、ベクトルマグネット装置を駆使した精密交流磁化測定、また一軸性圧力のもとでの低温実験技術などをすべて高いレベルにまで習熟した上での研究を展開しており、実験物理学の研究を遂行する上でのバランスの取れた優れた能力を実証した。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 12 月 22 日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。