

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 岡田達典

近年発見された鉄系超伝導体に代表される多バンド超伝導体においては、単一バンド物質では起き得ない新奇物性の出現が期待される。磁束量子に関しても、複数の超伝導秩序の寄与があることを反映した特異な振舞いが理論提案されているが、その理論的な取り扱いが確立されていない。また、磁束量子に関する実験的なアプローチも多バンド系では殆ど例がなく、多バンド超伝導体における磁束量子の描像（運動や電子状態）は未解明な問題の一つである。

本論文は、多バンド超伝導体における磁束量子の運動や渦糸コア内電子状態を実験的に解明することを目標として行なった、幾つかの多バンド超伝導体に対する体系的な磁場中表面インピーダンス測定の結果を報告している。

本論文は10章から成る。

第1章は、研究の背景に関する記述である。特に、本論文の主な研究対象である鉄系超伝導体における結晶構造や超伝導ギャップ構造に関して概説されている。また、磁束量子に関連して、渦糸コア内束縛準位や磁束フローに関する既存の研究がまとめられている。

第2章は、測定および解析の方法に関する記述である。ゼロ磁場極限および有限の磁場下での表面インピーダンス測定に用いた空洞共振器摂動法と、磁束量子に関する情報を得るために用いた Coffey-Clem モデルについての仔細が記されている。

第3章は、第1章・第2章を踏まえた本論文の目的についての記述である。

第4章から第6章は、鉄系超伝導体の単結晶に対する測定結果についての記述である。

第4章では、111系物質の $\text{LiFeAs}_{1-x}\text{P}_x$ ($x = 0, 0.03$) および $\text{NaFe}_{0.97}\text{Co}_{0.03}\text{As}$ に対する測定結果が報告されている。超流体密度の温度依存性から $\text{LiFeAs}_{1-x}\text{P}_x$ はノードレスギャップ、 $\text{NaFe}_{0.97}\text{Co}_{0.03}\text{As}$ はギャップレス（電子状態の分布は等方的）を持つと報告された。磁束フロー抵抗率の磁場依存性からは、超伝導ギャップの符号変化は本質的な寄与をしないことや、ギャップ異方性が初期勾配を支配している可能性が指摘された。また、渦糸コア内電子状態の指標が見積もられ、これらの物質は **moderately clean** なコアであると結論された。特に LiFeAs では、準粒子緩和時間が見積もられ、渦糸コア内準粒子の運動が強

く抑制されていることが報告された。

第5章は、122系物質の $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ ($x = 0.3, 0.45$) および $\text{SrFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$ に対する測定結果である。超流体密度の温度変化から、線状ノーダルなギャップと変調の大きなノードレスギャップという非常に異方的なギャップ構造をもつと考察された。磁束フロー抵抗率の初期勾配は、銅酸化物超伝導体の値よりも大きく、非常に異方的なギャップ構造を持つと考察された。渦糸コア内電子状態は111系と同様 *moderately clean* なコアであると報告された。

第6章は、11系物質の FeSe および $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ に対する測定結果である。純良な FeSe では、超流体密度の凡そ線形な温度依存性・磁束フロー抵抗率の大きな初期勾配が観測され、いずれも線状ノーダルなギャップを含む異方的ギャップ構造によって理解できることが報告された。一方、 $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ の磁束フロー抵抗率には特異的な振舞いが観測されたが、この物質が *disorder* を多く含むことに着目し、渦糸近傍での超流体の逆流（バックフロー）現象が原因であると考察された。また、同じく *disorder* が強いと考えられる $\text{NaFe}_{0.97}\text{Co}_{0.03}\text{As}$ の磁束フロー抵抗率（第4章）について再考され、初期勾配の違いは不純物の種類・量の違いにより理解できることが報告された。

第7章では、鉄系超伝導体の測定結果（第4章から第6章）に対する総合的な考察についての記述である。磁束の動きにくさの指標となるクロスオーバー周波数は、幾つか鉄系において銅酸化物超伝導体に匹敵する程の大きな値となることが示された。また、渦糸コア内電子状態に関しては、いずれの鉄系超伝導体においても *moderately clean* なものであると結論された。磁束フロー抵抗率に関しては、残留電気抵抗率の大きさや超流体密度の温度依存性から整理された。純良な物質（ $\text{LiFeAs}_{1-x}\text{P}_x$, $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$, $\text{SrFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$, FeSe ）においては、超伝導ギャップ異方性と磁束フローの初期勾配との間に、単一バンド超伝導体で知られる *Kopnin-Volovik* の関係が定性的に成り立つことが報告された。一方、結晶中に比較的 *disorder* の多い物質（ $\text{NaFe}_{0.97}\text{Co}_{0.03}\text{As}$, $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ ）では、磁束フロー抵抗率の磁場依存性がバックフロー現象によって強く支配されることが強調された。

第8章は、第7章での考察を踏まえて構築された2バンドモデルによる超伝導ギャップ構造の定量的評価法についての記述である。超流体密度と磁束フロー抵抗率に関する既存の理論モデルを拡張した2バンドモデルが提案された。 LiFeAs および $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の測定データに対するフィットの結果、 LiFeAs の測定データは「適度に異方的なノードレスギャップ（電子面・ホール面）」で良く再現され、 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の測定データは「ループ型の線状ノーダルなギャップ（電子面）および非常に異方的なノードレスギャップ（ホール面）」により再現されることが示された。フィットの精度や既報のギャップ構造との比

較が考察され、磁束フロー抵抗率および超流体密度を組み合わせたアプローチによるギャップ異方性評価法の有用性が報告された。

第9章は、非鉄系超伝導体である β -PdBi₂ 単結晶における測定結果の記述である。複素電気伝導度の温度依存性に見られた特異なピーク構造について、MgB₂ 薄膜での報告を踏まえた考察が行なわれ、大きさの異なる複数の超伝導ギャップを持つ可能性が報告された。また、磁束フロー抵抗率には FeSe_{0.4}Te_{0.6} の結果に類似した小さな初期勾配での増大が観測されたが、disorder の影響ではなく、小さな GL パラメータが主な要因となってバックフロー現象が顕著になったと考察された。

第10章は、本論文の総括と今後の展望に関する記述である。

以上をまとめると、鉄系超伝導体を主軸とする多バンド超伝導体を測定対象とし、体系的な磁場中表面インピーダンス測定を通じて、これらの物質における磁束量子の性質（磁束フローと超伝導ギャップ構造の関係、渦糸コア内電子状態と準粒子緩和時間、クロスオーバー周波数）に関する多くの知見を得ることに本論文は成功している。鉄系超伝導体の磁束量子に対する体系的研究は他に例がなく、また、超伝導ギャップ構造の新たな定量的評価法を提案するなど、関連分野の今後の進展に大きな貢献があると評価できる。

なお、本論文における研究結果は、本学大学院総合文化研究科の前田京剛氏、今井良宗氏、高橋英幸氏、鍋島冬樹氏、本学物性研究所の瀧川仁氏、上床美也氏、松林和幸氏、北川健太郎氏、産業技術総合研究所・超伝導エレクトロニクスグループの永崎洋氏、伊豫彰氏、中島正道氏、東北大学理学研究科の谷垣勝巳氏、田邊洋一氏、浦田隆広氏との共同研究であるが、論文の提出者が主体となって遂行したもので、論文提出者の寄与が十分であると判断できる。

したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。