審査の結果の要旨

論文提出者氏名　　田縁　俊光

2008 年に発見された鉄系超伝導体は、銅酸化物高温超伝導体に次ぐ高い超伝導転移温度（T_c）を持つ物質系であり、その T_c の最大値は 58 K に達する。また、銅酸化物高温超伝導体と同様に、磁気秩序を持つ母物質に元素置換をすることにより、磁気秩序が抑制され超伝導が発現する。このことから、“磁気的揺らぎ”が超伝導発現機構の有力な候補と考えられている。一方、銅酸化物が銅の単一のバンドから発現していたのとは対照的に、鉄の５つのバンド全てが寄与していることから、“軌道揺らぎ”の重要性も指摘されており、超伝導発現機構に関し盛んな議論が行われている。一方、上部臨界磁場も 50 T 以上と大きく、電磁気的異方性が銅酸化物高温超伝導体よりもはるかに小さいことから、高磁場下での応用を念頭においた線材等への応用研究が世界的規模で展開されている。こうした背景から、鉄系超伝導体における臨界電流密度（J_c）に密接に関係する磁束のピン止め機構・ダイナミクスの理解と J_c の増大法の開発が求められている。

鉄系超伝導体における上記２つの課題は、一般には全く異なるアプローチにより研究されている。例えば、超伝導発現機構に依存する超伝導秩序変数の符号変化の有無は、位相敏感なプローブである磁場下での STM や中性子回折等により調べられている。一方、J_c を支配する磁束のピン止め機構の研究は、様々な条件下における J_c 測定や微細構造観察により行われている。本論文での研究の特徴は、これら２つの課題を粒子線照射と言う共通の手段に明らかにしようとする点に有る。すなわち、超伝導体に散乱中心を導入することにより、秩序変数の平均化を促し、符号変化の有無を探る。また、同時にこれらの散乱中心は、磁束に対する“ピン止め中心”としても作用するため、ピン止め・ダイナミクス機構の研究を行うことができる。

本論文は英語で書かれており、全８章より構成されている。第１章は導入であり、本研究の背景と研究目的・内容が簡潔に紹介されている。第２章では、鉄系超伝導体の紹介が、様々な観点から展開されている。結晶構造・各種物性の紹介、提案されている超伝導機構とそれらを支持する各種実験結果の現状がまとめられている。また、元素置換及び粒子線照射により散乱中心を導入した場合の鉄系超伝導体のこれまでの研究が詳細に比較されている。第３章では、超伝導体における電磁気現象の基礎を、磁束の構造、臨界状態モデルから始め、集団的ピン止め理論及び集団的クリープ理論についても詳細な説明がなされている。さらに、粒子線照射により柱状欠陥を導入した系における“ボースグラス相”と、そこで観測される現象が銅酸化物高温超伝導体における例を用いて詳述されている。第４章では、本研究で用いた鉄系超伝導体の結晶成長法および粒子線照射法、さらには粒子線照射と電気抵抗測定を組み合わせた手法、その他の実験手法が説明されている。

第５章- 第７章が実験結果であり、第５章では $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ における対破壊効果を、プロトンの逐次照射後の精密な電気抵抗測定により報告している。まず、不足・最適・過剰キャリアドープ領域の３種類の高品質な $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$ 単結晶において残留抵抗が大変小さいことから、プロトン照射により導入された欠陥による散乱率の見積もりが正しく測定できることを示している。その後、$1\times10^{17}/cm^2$ 程度までのプロトン照射量において、照射量の関数として残留抵抗と T_c の関係を正確に評価している。この結果

を基に、5バンドモデルによる第一原理計算と磁場侵入長を用いて散乱レートを評価することにより、T_cがゼロとなる臨界散乱レートを見積もった。その結果、磁気揺らぎにより引き起こされるフェルミ面間で秩序変数の符号の異なる $s_{\pm}$波超伝導で予想される臨界値よりもはるかに大きな散乱レートで T_cがゼロとなることを見いだした。このことから、$Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$における超伝導発現機構は $s_{\pm}$波超伝導とは相容れないとの結論を導いた。

第6章では、$Ba(Fe,Co)_2As_2$および $Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$における磁束ピン止め機構と、これらにプロトン照射することにより導入された点欠陥が磁束のピン止め・ダイナミクスに及ぼす影響について報告している。まず、$Ba(Fe,Co)_2As_2$における磁束状態の評価の為に、集団クリープ理論および拡張Maley法を用いた解析を行い、磁束のダイナミクスを特徴付ける臨界指数μが1.0程度であることを見いだした。また、$1x10^{16}$ cm^{-2}程度のプロトン照射ではμはほとんど変化せず、主な変化はピン止めポテンシャルの40 Kから90 Kへの増大であることを示した。また、磁気緩和が起こる以前の真のJ_cの温度依存性を評価し、この系では“δT_cピン止め”と“$\delta \ell$ピン止め”とが有効に働いていることを示した。また、最適ドープの$Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$においてもプロトン照射によるJ_cおよび磁束ピン止め機構への影響を詳細に調べている。その結果、$1x10^{17}$ cm^{-2}程度プロトンを照射することにより、J_c=$1x10^7$ A/cm^2（4.2 K、自己磁場）まで増大することを示した。この値は、これまで鉄系超伝導体で報告された値の中で最大のものである。また、このときJ_cの温度依存性も大変弱くなり、$Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$が将来の線材応用を見据えた場合に大変有望な超伝導体であることを示している。また、未照射の$Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$では、磁束に対する弱い集団ピン止め機構の寄与が少ない為に、規格化磁気緩和率Sの中温域でのプラトーが見られないが、照射をすることにより集団ピン止め機構の寄与が増大し、集団クリープ理論で予想される典型的な温度依存性に変化することを示した。

第7章では、$Ba(Fe,Co)_2As_2$における重イオン照射効果について報告している。結晶のc軸に平行にエネルギーの異なるAuイオンを照射し柱状欠陥を導入した場合の遮蔽電流Jおよび規格化磁気緩和率Sの温度依存性を詳細に調べた。その結果、柱状欠陥を導入した$Ba(Fe,Co)_2As_2$では、$YBa_2Cu_3O_7$のボースグラス相で観測された磁束の可変領域ホッピングによると考えられる$J(T)$および$S(T)$の異常が見られないことを示した。このことから、ボースグラス相が実現されているのか疑われるが、印加磁場方向を柱状欠陥方向から傾けた場合に磁化が変化しない角度領域が有ることを見いだした。これは、磁束がある角度領域で柱状欠陥にトラップされると考えることにより理解でき、鉄系超伝導体においけるボースグラス相の証拠であると考えられる。

第8章は総括および結論であり、本研究で明らかにされた鉄系超伝導体$Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$における点欠陥の弱い対破壊効果が $s_{\pm}$波超伝導と相容れないこと、$Ba_{0.6}K_{0.4}Fe_2As_2$および$Ba(Fe,Co)_2As_2$における集団ピン止め・集団クリープに関する知見、さらには柱状欠陥を導入した$Ba(Fe,Co)_2As_2$における磁束ダイナミクスの特徴とボースグラス相の証拠と考えられる現象がまとめられている。

以上要約すると、本論文は、粒子線照射を用いて鉄系超伝導体における２つの大きな課題である超伝導対称性および磁束ピン止め機構・ダイナミクスを詳細に調べ、鉄系超伝導体の基礎および応用に関する貴重な知見を与えたものであり、物理工学の発展に寄与するところは大きい。よって本論文は博士（工学）学位請求論文として合格であると認められる。