

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 亀田 直人

液体窒素温度を超える超伝導転移温度をもつ高温超伝導体において、様々な新現象が発見されてきた。一方、従来型超伝導体で知られていた現象が、新しい舞台で再発見された例も少なくない。本論文の主題であるジョセフソン・プラズマ共鳴は後者に属し、従来型超伝導体のジョセフソン接合において初めて発見されたものである。高温超伝導体は銅・酸素からなる超伝導層とそれらを挟むブロッキング層からなる層状構造をもつ。この構造は別の見方をすると、多数のジョセフソン接合が直列にスタックしたものと考えることもできる。このような多重ジョセフソン接合系では、多くの接合に渡る超伝導電子の集団運動が可能となり、超伝導電子は接合方向の運動に対し特徴的プラズマ周波数を持つようになる。異方性の非常に大きな Bi 系高温超伝導体では、プラズマ振動数は 100 GHz 程度のミリ波帯にまで低下する。このエネルギースケールは超伝導ギャップに比べ十分小さいため、励起されたプラズマはほとんどダンピングを受けず、鋭い共鳴が観測される。また、プラズマ周波数を決める c 軸方向の臨界電流はゲージ不変な位相差で決定されるため、位相の特異点である量子化磁束の導入によりプラズマ周波数は大きな変化を示す。したがって、ジョセフソン・プラズマ共鳴は中性子小角散乱等と並び、磁束状態をプローブする優れた手法となる。

本研究に先立ち、異方性の大きな Bi 系高温超伝導体では、重イオン照射により導入された柱状欠陥の効果のため、c 軸方向の相関が大きく異なる 2 種類の磁束液体相が存在することが知られていた。この 2 種類の磁束液体相間の転移はリカップリングと呼ばれる。しかし、リカップリング現象は、柱状欠陥が c 軸方向に導入され、その密度が比較的高い場合のみが研究されてきた。本研究では、柱状欠陥密度とともにリカップリング現象がどのように変化するのが詳細に検討されている。また、柱状欠陥と磁場の方向をそれぞれ c 軸方向から傾けていった場合のリカップリング現象に関しても、ジョセフソン・プラズマ共鳴の詳細な角度依存性の測定により、重要な知見が得られている。さらに、ジョセフソン・プラズマ周波数を決定する位相コヒーレンスにマクロな空間変化がある場合のジョセフソン・プラズマ共鳴を初めて実験的に研究し、共鳴の様子をサイン・ゴールドン方程式により解析している。

本論文は全 7 章より構成されている。第 1 章では緒言として、本研究の背景、研究目的が簡潔に述べられている。第 2 章では、異方的高温超伝導体における磁束状態に関する基礎知識、本論文の主題であるジョセフソン・プラズマ共鳴、磁束系に対する

柱状欠陥の効果が予備知識としてまとめられている。第3章では、本研究で用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ 単結晶試料、重イオン照射による柱状欠陥の導入、試料の超伝導特性の評価が説明されている。第4章から第6章に研究結果とその考察が詳述されている。第4章では低密度の柱状欠陥を持つ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ におけるジョセフソン・プラズマ共鳴が調べられている。このような系でもリカップリング現象が普遍的に観測されること、また、リカップリング磁場が欠陥密度の低い極限で 100 Oe 程度の一定値になることを見いだしている。第5章では、柱状欠陥の磁束系に対する効果を、柱状欠陥と磁場の角度を様々に変化させながら研究している。第4章でも扱ったリカップリング現象が、柱状欠陥方向によらず、欠陥の面内密度のみで決定されることを見いだした。また、柱状欠陥方向が c 軸方向から大きく傾くにつれ、角度依存性に鋭いピークが観測されるようになるのは、柱状欠陥の面積増大による磁束ピン止め効果の変化ではなく、異方的超伝導体の角度スケーリングにより理解できることを明らかにした。さらに、この角度スケーリングから、柱状欠陥方向の異なる系における磁束の相関距離を比較し、柱状欠陥を傾けても相関距離がほとんど変化しないことを明らかにした。第6章では、試料中においてマクロなスケールで位相コヒーレンスに空間変化がある場合におけるジョセフソン・プラズマ共鳴を初めて扱った。位相コヒーレンスが異なる2つの部分からなる試料におけるジョセフソン・プラズマ共鳴を観測し、測定周波数に応じてそれぞれの部分に近い共鳴を示すことを明らかにし、これらを分けるクロスオーバー周波数の存在を見いだした。さらに、このような系におけるジョセフソン・プラズマ共鳴が位相変化を取り入れたサイン・ゴルドン方程式により非常に良く再現されることを、数値計算により示した。第7章では、本論文の総括が述べられている。

以上を要約すると、本論文は重イオン照射により導入された柱状欠陥が磁束系に与える影響を、ジョセフソン・プラズマ共鳴を手段として多角的かつ詳細に研究したものである。高温超伝導体における磁束系に関する多くの新たな知見を与えただけでなく、ジョセフソン・プラズマ共鳴現象自身に対する新たな側面をも明らかにしたものであり、物性物理学、超伝導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。