

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 趙 小如

本論文は、不純物を添加した Bi2212 系高温超伝導単結晶の磁気的な振る舞いを、マクロ及びミクロの2種類のプローブを用いて系統的に調べ、その実用化に当って不可欠な情報である強いピンニングサイトに関して考察し、新たなモデルを提案している。

論文は全4章からなる。

第1章では、高温超伝導体に関して現在までに提案されている磁気相図やピンニングサイトについて概観し、実用上重要となる第2ピークの起源とその理論的な背景がまとめられている。

第2章では、主に、Co 及び Zn を添加した Bi2212 単結晶膜の合成と、SQUID 磁束計を用いたマクロな磁気特性について述べられている。それぞれの試料の臨界電流密度(J_c)と不可逆磁場 (H_{irr}) を比較したところ、全く異なる振る舞いを示すことが明らかとなった。Co 添加系では、 J_c と H_{irr} とのクロスオーバー温度が一致し、また添加量の増加とともに、 $H_{irr}(T)$ は HT 相図上の下方に移動し、 J_c も系統的に減少することが示された。これに対し Zn 添加系では、 J_c 、 H_{irr} のクロスオーバー温度間には相関は見られず、さらに、極少量の Zn を添加することにより、超伝導転移温度(T_c)の大きな低下を招くことなく、 H_{irr} を増大できることを提示した。

第3章では、単結晶試料中に捕捉された磁束量子の走査型 SQUID 顕微鏡 (SSQM) 観測について述べられている。Bi2212 単結晶を弱磁場下で冷却し、SSQM を用いて局所磁場の空間分布を測定した結果、結晶中に多数の磁束量子が捕捉されている様子を可視化することに成功した。観測された磁気構造の多くは磁束量子 ϕ_0 の整数倍の磁束量を持っていたが、個々の磁場分布を精密に調べたところ、 μm 以下の領域に複数の磁束量子が集団として存在することが明らかとなった。不純物を添加していない試料では、磁束量子の集団はほぼランダムに分布していたが、磁場中冷却の際の外部磁場を大きくするにつれ、1次元的に配列する傾向が認められた。同様の傾向は、Co 添加試料でより顕著であり、10 mG レベルの弱磁場下でも、明確な1次元構造が観測された。また、同構造は結晶軸方位と相関があり、(100)、(010)あるいは(110)方向に沿って配列することを見出した。磁束量子の分布は Co 添加量にも依存し、添加量が増すに従い、1次元配列間の間隔が広がることを明らかにした。本研究により、少量の不純物添加により Bi2212 系に強いピン止めサイトが導入できるという、工業的に有用な知見が提示された。一方、比較のため行った La214 系の SSQM 観察からは、大きく異なる磁束量子の振る舞いが明らかとなった。La214 系の場合、観測された磁気構造

は全て ϕ_0 であり、集団的な挙動は見られなかった。さらに、最適ドープ試料では磁束量子の分布はランダムであるのに対し、過剰ドープ試料では、結晶軸に対し任意の方向に磁束量子が1次元配列する様子が観測された。また、温度依存性の測定からは、 T_c の異なる領域が存在することが確認され、その分布はボルテックス配列と相関していることが示された。

第4章では、単結晶試料のミクロな構造、組成分析が検討され、それらの結果を元に、磁束量子の1次元構造の起源について議論がなされた。Bi系単結晶の組成分析から、Cuを基準としてBi, Srの濃度が空間的に変調していることが示された。また、組成分析とSSQM像との比較より、Bi, Srの濃度が高い領域に磁束量子が捕捉されていることが初めて明らかとなった。一方、ピン止めサイトとしてもう一つの有力な候補である粒界の存在を確認するため、2次元X線回折測定が試みられた。その結果、Bi2212系では、少なくとも $10\ \mu\text{m}$ のレベルでは粒界が存在しないことが判明した。以上の結果より、Bi2212系における1次元磁束配列の起源として、組成変調が最有力であると結論した。これに対し、La214系では、結晶の成長方向であるa軸に沿って幾つかの小傾角粒界が観測されたが、同粒界と磁束量子の分布との間に特別な関係は見られず、従って、少なくともLa214系では小傾角粒界は強いピン止めサイトとして作用しないことが確認された。ただし、La214系については高精度の組成分析が困難であり、ピン止めサイトを特定するには至らなかった。

以上述べたように、本研究はBi2212系高温超伝導体の磁気構造について重要な知見を与えるものであり、特に同材料の実用化の見地から、この分野における今後の発展に寄与すると認められ、高く評価できる。

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。