

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 土屋 良重

序

本論文は6章からなり、第1章は研究背景の概説、第2章は用いた試料の性質と実験方法および実験装置の説明にあてられている。第3章では、高温超伝導体における磁束コアの電子状態の研究に関する実験結果とそれに対する考察、第4章では高温超伝導体における磁束格子の相転移と電子状態の相関に関する研究の実験結果と考察が詳述されている。第5章は高温超伝導体での副次的な秩序パラメーターが混ざった超伝導状態の検証に関する記述がなされ、第6章は結論が述べられ、全体の総括がなされているという構成である。

この論文は、非常に興味深い研究対象である銅酸化物高温超伝導体の混合状態の物理に対して、高周波電磁応答の磁場依存性の測定により、その磁束のダイナミクスを通じて、混合状態の電子状態を研究した結果をまとめたものである。

第1章は、研究の背景についての記述であるが、これまでの銅酸化物高温超伝導体の混合状態の電子状態に関する研究結果が非常に良くまとめられている。とくに、混合状態における高周波電磁応答に関する既存の測定データの問題点を指摘し、複素量としての表面インピーダンスの磁場、周波数依存性を、混合状態の広い領域で行うことの動機付けが明確になされている。また、銅酸化物高温超伝導体の混合状態における磁束の多体系の振る舞いと電子状態の関連性についての研究に関する実験データがほとんど存在しないことを指摘し、この相関の研究を行うに至った経緯が記述されている。

第2章の実験方法に関する記述では、用いた試料の特性、マイクロ波表面インピーダンスの測定原理および測定装置に関して具体的に述べられている。とくに、低温高磁場領域での測定用インサートを自らの手により作製したことは評価できる点である。また、空洞共振器部の製作の際に測定精度を高める工夫を行うなど、実験技術として未開拓な要素も含むマイクロ波物性測定法の確立という課題に対しても貢献している。

第3章がこの論文の中心的な部分で、高温超伝導体の磁束ダイナミクスを通じて、磁束コア近傍の電子状態の関する性質を解明ための測定結果およびその考察がなされている章である。本論文では、代表的な銅酸化物高温超伝導体である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶試料の複素表面インピーダンスの測定を、ミリ波マイクロ波領域の異なる3つの周波数で行っている。とくに、31.7GHzの測定では、新たな測定システムの構築により、15 Tの高磁場までの測定を世界で初めて行うことで、混合状態の広い領域での振る舞いを探索することに成功している。また、ピングの比較的強い高温超伝導体においては、磁束コアのダイナミクスを評価するためには、複素量として表面インピーダンスを知ることが本質的であることを明確に意識し、測定を行っている。測定結果の解析は、既存の混合状態における交流応答の理論計算のモデルを用いて行っているが、その解析の際に、

表面インピーダンスの実部を縦軸、虚部を横軸とするインピーダンス平面プロットを導入し、複雑な理論式をより理解しやすい形式に解釈しなおすというような新たな工夫を行っている。

これらの、実験的、解析的な改良を及ぼすことにより、表面インピーダンスの温度、磁場、周波数依存性から得られている結果としては、まず、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の低温での表面インピーダンスの振る舞いは、磁束に対して働く力が、変位に比例したピンング力と速度に比例した粘性力であるという仮定の下に計算された磁束ダイナミクスの理論と非常によく一致しているという点、また、それに伴って観測されている複素抵抗率の磁場に比例した振る舞いは、高温超伝導体で予測されている d 波の対称性から考えられる理論と矛盾しないという点である。

解析結果から評価された $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の粘性係数は 10 K で $4 - 5 \times 10^{-7} \text{ Ns/m}^2$ 程度の値であり、この値から、磁束コアの散逸機構の目安を表すパラメーターである $\omega_0\tau$ (ただし ω_0 はコア内の準粒子離散準位の間隔をあらわす周波数、 τ はコア内の準粒子の散乱時間)は 0.3-0.5 程度の値が得られている。これは、これまで測定方法や解析方法のばらつきにより様々な値が報告されていた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の $\omega_0\tau$ の値に対して、マイクロ波領域の多くの測定パラメーターから、この値を決定した結果として評価できるものである。この $\omega_0\tau$ の値は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ のコアがほぼクリーンな領域にあるということを明確に示したものであり、今後の高温超伝導体の磁束コアの研究に 1 つの方針を提示するものであると言える。また、論文中には、同じ銅酸化物高温超伝導体である $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ や、従来超伝導体である NbSe_2 系、 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 系の測定結果も示されており、2 次元性の強い $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ での理論と合致しない異常な振る舞いや、従来超伝導体との比較によってわかる高温超伝導体の磁束コアの特殊性についても論じられている。

第 4 章では、磁束格子の相転移と電子状態の相関に関する研究結果についてまとめられている。この章では、研究の初期段階において観測された、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 磁束格子の 1 次相転移に伴う超流体密度の減少を示唆する実験結果に基づき、同じ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ のキャリア濃度の異なる試料や同様に磁束格子の 1 次相転移が観測されている $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ での相転移線をまたいだ表面インピーダンスの測定により、これまでほとんど議論されていない、高温超伝導体の電子状態と磁束格子 1 次相転移の関連性の解明を試みている。得られている結果としては、1 次相転移に伴う表面インピーダンスの虚部に観測される異常は、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 試料ではキャリア濃度によらず普遍的であり、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ では観測されないということである。これは、新たに観測された相転移付近の異常な現象に対して、2 次元的な磁束系において特徴的であるということを明らかにしたという点において評価できるものである。

第 5 章では、高温超伝導体の磁場下での電子状態に関連して議論されている、副次的な秩序パラメーターの混合した状態の実現可能性ということに対して、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ および $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の測定結果をもとに議論している。結果は、この実現可能性は低いというものであるが、新しい理論的提案に対して、実験的な解明を試みるというフロンティア精神は非常に評価できる点である。

第 6 章の総括においては、この論文のテーマである、高温超伝導体の混合状態における電子状態に解明ということに対して、高周波電磁応答をプローブとして明らかにしたこととして、3 章の磁束コアの電子状態、4 章の磁束格子 1 次相転移と電子状態の相関、5 章の副次的な秩序パラメー

ターが混合した状態の検証という各項について簡潔にまとめられている。各章に関する記述においても述べてきたように、高温超伝導体の混合状態の物理に関して、新たに明らかになったことがいくつか含まれており、評価できる内容である。

結び

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、北野晴久氏、岩谷克也氏、木下健太郎氏、本学大学院新領域創成科学研究科の花栗哲郎氏、高木啓史氏、東北大学金属材料研究所の小林典男氏、西寄照和氏、柴田憲治氏、電力中央研究所の安藤陽一氏、竹谷純一氏、中村啓氏との共同研究であるが、論文の提出者が主体となって分析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって、本論文は博士(学術)の学位請求論文として合格と認められる。