

学位論文題名

銅酸化物超伝導体 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ 薄膜における
超伝導-絶縁体転移

学位論文内容の要旨

常磁性体が強磁性体になったり金属が低温で超伝導状態になったりする種々の相転移が、自然界に存在する。物質に内在する乱れが相転移現象にどのように関与しているかについては、最近まであまりよく理解されていなかった。このような典型例として、超伝導-絶縁体転移が知られている。これは電気抵抗が無限大からゼロになる転移であり、この相転移に対して乱れがどのように関わっているか、大変興味もたれている。特に銅酸化物高温超伝導体の場合は、その特異な次元性から、新しい物理現象の発現が期待されている。本研究は銅酸化物超伝導体を用いて超伝導-絶縁体転移を調べたものである。

電子系における金属-絶縁体転移の問題は、1980年代から実験・理論両側面から広く研究されてきた。電子(フェルミ粒子)は、乱れの度合いが強くなると空間的に局在し絶縁体となり(フェルミ・ガラス)、乱れの弱い場合金属的な伝導を示す。乱れによる金属-絶縁体転移に関する臨界的挙動はスケール理論によって明らかにされてきた。特に2次元電子系では、量子ホール効果において、電子局在が次元性と共に重要な役割を担っていることが明らかになっている。さらに弱局在の起源が電子波の干渉効果であることが明らかにされた。それに伴い光波や音波等の古典的波動の干渉効果による局在に関する研究も活発に行われている。

ボース粒子系の場合のこれに対応する相転移(超伝導-絶縁体転移)の問題は、極めて重要である。ボース粒子系は、絶対零度で乱れない場合において超流動状態になることはよく知られている。乱れの度合いを強くしていくと、ボース粒子系においても絶対零度で絶縁体状態(ボース・ガラス相)が実現され、超流動(超伝導)-絶縁体転移が生ずる。しかしその転移の型及び臨界指数等はこれまで明らかにされていなかった。本論文では、膜厚を変えることなく乱れを制御できる系として、銅酸化物超伝導体を採用し超伝導-絶縁体転移に関する実験を行い、その結果について理論的考察を与えた。

銅酸化物系は2次元ドープ型超伝導体という新しい側面を持っており、MBE(Molecular Beam Epitaxy)法で作製した $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 単結晶薄膜を用い、ボース・グラス相の存在、臨界面抵抗、磁場中の超伝導-絶縁体転移を調べた。

本論文の構成は、以下のようになっている。

第1章では、これまでの研究の背景と本論文の目的が述べられている。

第2章で、乱れによる金属-絶縁体転移のスケーリング理論について述べ、そのスケーリング関数(β 関数)の特性について述べる。また、弱局在領域に対する微視的理論から導出されるコンダクタンスの温度依存性、負の磁気抵抗の理論式について述べる。

第3、4章では、本研究の主題である超伝導-絶縁体転移の臨界点近傍の電気伝導度の振舞いについて、スケーリング理論の立場から、実験解析に用いるスケーリング形式の導出について言及する。さらに臨界面普遍面抵抗に関して、その背景となる単一ジョセフソン結合における巨視的量子トンネリングと散逸の効果について述べ、渦糸が重要な役割を果たしていることを述べる。

第5章では、分子線エピタキシー法による $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 高温超伝導薄膜の作製、そしてフラックス法による $\text{Nd}_2\text{CuO}_{4-x}\text{F}_x$ 単結晶の作製について述べる。さらに、電気伝導度、磁気抵抗の測定方法について述べる。

第6章では、 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の電気伝導度の温度依存性、負の磁気抵抗、磁気抵抗の異方性の測定結果について述べる。超伝導-絶縁体転移近傍で、この転移を分ける境目の臨界面抵抗が $8\text{-}9\text{k}\Omega$ の値を示し、量子抵抗($h/4e^2$)の値に極めて近いことを明らかにする。転移点直上(絶縁体側)での抵抗の温度依存性から、この伝導が可変領域ホッピング(VRH)型であることを示し、フェルミオンの弱局在では説明できないことを明らかにする。

第7章では、超伝導体側からのアプローチとして、磁場変調型の超伝導-絶縁体転移を調べた結果について述べる。第4章で議論したスケーリング理論を用いてデータ解析を行った結果、スケーリング形式に全て一致することを示す。求められたその動的臨界指数の値が理論から予想される値と矛盾がないことから、本研究の主題である超伝導-絶縁体転移がボースグラス-超伝導転移であることを証明する。

第8章では、 $\text{Nd}_2\text{CuO}_{4-x}\text{F}_x$ 単結晶の場合において、超伝導-絶縁体転移から離れた絶縁体側における弱局在及び強局在に関する実験結果について述べる。第2章で述べたスケーリング理論を適用した結果、ベータ関数に全てスケールされることがわかり、この系が正規対称性を有していることを示す。

第9章では、本論文で得られた結果を総括し、今後の課題について言及している。

学位論文審査の要旨

主 査 - 教 授 中 山 恒 義
副 査 教 授 丸 川 健 三 郎
副 査 教 授 阿 部 寛
副 査 教 授 三 本 木 孝 (理学研究科)

学位論文題名

銅酸化物超伝導体 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ 薄膜における超伝導-絶縁体転移

本研究は高温超伝導体の一つである $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ 単結晶薄膜を用いて、超伝導-絶縁体 (電気抵抗が無限大からゼロになる) 転移の臨界的振舞いを実験的に明かにしたものである。

物質に内在する乱れが相転移現象にどの様に関与しているかについては、最近まであまりよく理解されていなかった。このような典型例として、超伝導-絶縁体転移が知られており、この相転移に対して乱れがどのように関わっているか、大変興味をもたれている。特に銅酸化物高温超伝導体の場合は、その特異な次元性から、新しい物理現象の発現が期待されている。本研究は銅酸化物超伝導体を用いて超伝導-絶縁体転移を調べたものである。

本論文では、膜厚を変えことなく乱れを制御できる系として、銅酸化物超伝導体を採用し超伝導-絶縁体転移に関する実験を行い、その結果について理論的考察を与えた。銅酸化物系は2次元ドープ型超伝導体という新しい側面を持っており、MBE(Molecular Beam Epitaxy)法で作製した $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ 単結晶薄膜を用い、ボース・グラス相の存在、臨界面抵抗、磁場中の超伝導-絶縁体転移を調べた。

第1章では、これまでの研究の背景と本論文の目的が述べられている。

第2章で、乱れによる金属-絶縁体転移のスケーリング理論について述べられ、そのスケーリング関数 (β 関数) の特性について述べられている。また、弱局在領域に対する微視的理論から導出されるコンダクタンスの温度依存性、負の磁気抵抗の理論式について述べられている。

第3、4章では、本研究の主題である超伝導-絶縁体転移の臨界点近傍の電気伝導度の振舞いについて、スケーリング理論の立場から、実験解析に用いるスケーリング形式の導出について言及されている。さらに臨界点普遍面抵抗に関して、その背景となる単一ジョセフソン結合における巨視的量子トンネリングと散逸の効果について述べられ、渦糸が重要な役割を果たしているこ

とが述べられている。

第5章では、分子線エピタキシー法による $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ 高温超伝導薄膜の作製、そしてフラックス法による $\text{Nd}_2\text{CuO}_{4-x-y}\text{F}_x$ 単結晶の作製について述べられている。さらに、電気伝導度、磁気抵抗の測定方法について述べられている。

第6章では、 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ 薄膜の電気伝導度の温度依存性、負の磁気抵抗、磁気抵抗の異方性の測定結果について述べられている。超伝導-絶縁体転移近傍で、この転移を分ける境目の臨界面抵抗が $8\text{-}9\text{k}\Omega$ の値を示し、量子抵抗 ($h/4e^2$) の値に極めて近いことが明らかにされている。転移点直上 (絶縁体側) での抵抗の温度依存性から、この伝導が可変領域ホッピング (VRH) 型であることを示し、フェルミオンの弱局在では説明できないことが明らかにされている。

第7章では、超伝導体側からのアプローチとして、磁場変調型の超伝導-絶縁体転移を調べた結果について述べられている。第4章で議論したスケーリング理論を用いてデータ解析を行った結果、スケーリング形式に全て一致することが示されている。求められたその動的臨界指数の値が理論から予想される値と矛盾がないことから、本研究の主題である超伝導-絶縁体転移がボースグラス-ポーテックグラス転移であることが証明されている。

第8章では、 $\text{Nd}_2\text{CuO}_{4-x-y}\text{F}_x$ 単結晶の場合において、超伝導-絶縁体転移から離れた絶縁体側における弱局在及び強局在に関する実験結果について述べられている。第2章で述べたスケーリング理論を適用した結果、ベータ関数に全てスケールされることがわかり、この系が正規対称性を有していることが示されている。

第9章では、本論文で得られた結果が総括されており、今後の課題について言及されている。

主要な成果は以下の点に要約される。

- (1) MBE 法により、良質の $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ 高温超伝導薄膜の作製を行った。
- (2) 超伝導-絶縁体転移近傍で、この転移を分ける境目の臨界面抵抗が $8\text{-}9\text{k}\Omega$ であることを示し、量子抵抗 ($h/4e^2$) の値に極めて近いことを明らかにした。
- (3) 転移点直上 (絶縁体側) での抵抗の温度依存性から、この伝導が可変領域ホッピング (VRH) 型であることを示し、フェルミオンの弱局在では説明できないことを明らかにした。
- (4) 超伝導体側から、磁場変調型の超伝導-絶縁体転移を調べた。スケーリング理論を用いてデータ解析を行った結果、スケーリング形式に全て一致することを明らかにした。求められたその動的臨界指数の値が、理論から予想される値と矛盾がないことから、本研究の主題である超伝導-絶縁体転移がボースグラス-ポーテックグラス転移であることを実証した。

以上のように本論文は、銅酸化物超伝導体 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ を用いて、超伝導-絶縁体転移についての詳細な実験を行い、多くの新知見を得ており、応用物理学の発展に貢献するところが大きい。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。