膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移とその量子現象

学位論文内容の要旨

系に内在する乱れが電子系の量子相転移現象にどのように関与しているか、最近多くの関心が集まっている。特に2次元系の超伝導-絶縁体転移は、抵抗が零から無限大へと変わるドラスティックな現象(実験においては抵抗で15桁の変化を観測)であること、強磁場中の2次元電子系でおこる量子ホール液体-絶縁体転移と関連していることなどより非常に注目を浴びている。P.W.Andersonが系の不規則さによって電子状態が変わることを提唱して以来、電子の局在状態について実験的にも理論的にも多くの研究がおこなわれてきた。一方、ボース粒子系において起こる系の乱れによる超伝導-絶縁体転移については、下部臨次元やその転移の型を表す臨界指数はまだ完全に決定されていない。スケーリング特性まで含めた2次元超伝導-絶縁体転移の理論的背景はM. P. A. Fisherによって与えられている。Fisherの提唱した2次元超伝導-絶縁体転移はクーパー対と超伝導体に入るボルクスの競合で超伝導-絶縁体転移が起きるというものである。このときの絶縁相をボースグラス相とよび、Fisherの提唱した超伝導-絶縁体転移をボースグラス-超伝導転移という。2次元超伝導-絶縁体転移のパラメタとして磁場をとった磁場変調型超伝導-絶縁体転移では、Fisherの提出したスケーリング関数を用いて実験結果が解析されており、多くの系でボースグラス-超伝導転移描像が支持されている。しかしながら、直接系の乱れをコントロールすると考えられる膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移ではこれまでスケーリングによるボースグラス-超伝導転移の実験的実証がなされてこなかった。それは、膜厚変調型超伝導-絶縁体転移では超伝導転移したあと抵抗が温度の下降とともに増大するリエントラント抵抗や、低温で抵抗値が温度に依らなくなるフラットテイル抵抗などが観測されているからである。これらの現象がなぜ起きるのかは現在理解されていない。

そこで、本研究においては膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移がボースグラス-超伝導転移描像で理解できるか、否か、また特にフラットテイル抵抗に注目しその領域で系になにが起きているのかを調べるために、極低温蒸着法により作成したPb超薄膜における膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移を観測した。

本論文の構成は以下の通りである。

1章において、本研究の背景と目的について説明した。

2章において、量子相転移について形式的な取り扱いを説明した。次に量子相転移におけるスケーリングを簡単に説明し、超流動-絶縁体転移における臨界指数を一般化されたジョセフソンハイパースケーリング則を用いて簡単に議論した。

3章において、金属-絶縁体転移について、電子間のクーロン力によるモット転移と系の乱れによるアンダーソン転移を説明した。系の乱れによる電子の局在をアンダーソン局在と

呼ぶ。アンダーソン局在におけるスケーリング理論の考え方について説明し、そのスケーリング関数であるベータ関数の性質を述べた。また2次元系における電気伝導について述べた。

4章において、本研究の主題である2次元超伝導-絶縁体転移について、Fisherのスケーリング理論を中心に述べ、実験解析に用いるスケーリング関数の導出について言及した。Fisherは系に始めからボソンがあると仮定し理論を展開した。その描像（ボースグラス-超伝導転移）によると2次元超伝導-絶縁体転移の相転移点は唯一点の金属相であり物質に依らないユニバーサルな値をとることが示唆されている。この臨界面抵抗についても言及した。ボースグラス-超伝導転移の描像が微粒子薄膜において成立しなくなる場合がKivelsonらによって指摘されているが、それについても言及した。また2次元超伝導-絶縁体転移とよく似た現象が観測されている量子ホール液体-絶縁体転移についても言及した。更に、Fisherのスケーリング理論の実験的実証である磁場変調型2次元超伝導-絶縁体転移と量子ホール液体-絶縁体転移の実験について紹介した。なお本研究の目的をここでもう一度述べた。

5章において、いまだFisherのスケーリング理論の実験的実証がない膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移についてその実験例を紹介し、リエントラント抵抗やフラットテイル抵抗について言及した。

6章において、超伝導-絶縁体転移の簡単なモデルであるジョセフソン接合について述べた。また接合に散逸を取り入れることで2次元超伝導-絶縁体転移を起こしたClarkeらによる実験および、その実験で観測されたリエントラント抵抗を説明したWagenblastらの論文についても簡単に言及している。

7章において本研究で用いた極低温蒸着法及び実験系について説明した。

8章において実験結果を説明し、考察を行った。極低温蒸着法により作成したPb薄膜の膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移の電気抵抗を測定することにより、電子の局在長とクーパー対のコヒーレンス長の関係を調べた。その結果、ボースグラス相の存在が示唆できた。また膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移において、ある温度範囲でボースグラス-超伝導転移の描像が適用でき、その臨界指数が磁場変調型2次元超伝導-絶縁体転移と同じであることを示した。さらにボースグラス-超伝導転移の描像が適用できる温度以下の温度領域（フラットテイル抵抗が観測される領域）では金属相が広がっている可能性のあることを電流-電圧特性の測定から示した。この領域において磁場の向き（試料に垂直に磁場をかけた場合の $\pm 180^\circ$ の向き）に対して反対称な磁気抵抗と反対称な磁気抵抗の振動を発見した。この現象は通常の金属では説明できないことから（通常はホール抵抗でないかぎり対称である）、この金属相が新しい金属相であることを強く示唆している。このことは、Fisherによって提出されたボースグラス-超伝導転移の描像が膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移では変更をうけることを示唆している。

9章において本研究の総括を行った。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 谷 和 彦
副 査 教 授 徳 田 直 樹
副 査 教 授 武 藤 俊 一
副 査 助 教 授 丹 田 聡

学 位 論 文 題 名

膜厚変調型 2 次元超伝導 - 絶縁体転移とその量子現象

近年、系に内在する乱れが電子系の量子相転移現象にどのように関与しているか、多くの関心が集まっている。特に2次元系の超伝導-絶縁体転移は、抵抗が零から無限大へと変わるドラスティックな現象であること、強磁場中の2次元電子系でおこる量子ホール液体-絶縁体転移と関連していることなどより非常に注目を浴びている。スケーリング特性まで含めた2次元超伝導-絶縁体転移の理論的背景は M. P. A. Fisher によって与えられ、2次元超伝導-絶縁体転移はクーパー対と超伝導体に入るボルトックスの競合で起きることが提唱された。このときの絶縁相をボースグラス相とよび、Fisher の提唱した超伝導-絶縁体転移をボースグラス-超伝導転移と呼ばれている。2次元超伝導-絶縁体転移において磁場をパラメータとした磁場変調型超伝導-絶縁体転移では、Fisher の提出したスケーリング関数を用いて実験結果が解析され、多くの系でボースグラス-超伝導転移描像が支持されている。しかしながら、膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移では超伝導転移温度以下の低温で、抵抗が温度の下降とともに増大するリエントラント抵抗や、抵抗値が温度に依らなくなるフラットテイル抵抗などが観測されている。これらの現象がなぜ起きるか、現在理解されていない。

本論文はこのような背景のもとで、極低温蒸着法により Pb 超薄膜を作成し、膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移を観測し、この転移が Fisher の提唱したボースグラス-超伝導転移描像で理解できるかを検討したものであり、高温の温度領域では磁場変調型超伝導-絶縁体転移と同じく、Fisher の描像が適用できることを明らかにするとともに、フラットテイル抵抗が出現する低温領域では Fisher の描像が適用できず金属相系が広い領域で出現していることを発見し、その金属的性質が従来とは異なる新しい金属相であることを述べたものである。本論文は全9章からなり、その主要な成果は以下のように要約される。

第1章では、本研究の背景と目的について説明している。

第2章では、量子相転移について形式的な取り扱いを説明し、量子相転移におけるスケーリングを簡単に説明している。

第3章では、金属-絶縁体転移について述べ、系の乱れによる電子の局在（アンダーソン局在と呼ぶ）におけるスケーリング理論の考え方について説明している。

第4章では、本研究の主題である2次元超伝導-絶縁体転移について、Fisher のスケーリ

ング理論を中心に述べ、実験解析に用いるスケーリング関数の導出について述べている。Fisherの描像（ボースグラス-超伝導転移）では相転移点は唯一点の金属相であり物質に依らないユニバーサルな値をとる。Fisherのスケーリング理論の実験的実証である磁場変調型2次元超伝導-絶縁体転移を紹介し、再度本研究の目的を述べている。

第5章では、Fisherのスケーリング理論の実験的実証がされていない膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移についてその実験例を紹介し、リエントラント抵抗やフラットテイル抵抗について説明している。

第6章では、超伝導-絶縁体転移の簡単なモデルであるジョセフソン接合について説明している。

第7章では、本研究で用いた極低温蒸着法及び実験系について説明している。

第8章では、実験結果を述べ、考察を行っている。極低温蒸着法により作成したPb薄膜の膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移における電気抵抗の測定から、電子の局在長とクーパー対のコヒーレンス長の関係を調べた結果、ボースグラス相が存在することを明らかにしている。またこの相転移において、ある温度範囲ではボースグラス-超伝導転移の描像が適用でき、その臨界指数が磁場変調型2次元超伝導-絶縁体転移と同じであることを示している。さらに、フラットテイル抵抗が観測される領域ではボースグラス-超伝導転移の描像が適用できず、金属相が広がっていることを電流-電圧特性の測定から示している。この領域における抵抗の磁場特性は、この金属相が通常の金属状態では説明できない新しい金属相であることを示している。このことから、Fisherによって提出されたボースグラス-超伝導転移の描像が膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移では変更を受けることを指摘している。

第9章では、本研究の総括を行っている。

これを要するに、著者は極低温蒸着法により作成したPb薄膜の膜厚変調型2次元超伝導-絶縁体転移において、従来のスケーリング則の適応性を明確にするとともに、従来にならぬ新しい金属相を発見し、その量子現象において新知見を得たものであり、応用物理学および量子物理工学の進展に対して貢献するところ大なるものである。

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があるものと認める。