

(論文内容の要旨)

申請者の明神清一氏の学位論文は、銅酸化物高温超伝導体や多くの有機超伝導体などの秩序パラメタの揺らぎの効果の強い超伝導体を対象に近年発展した磁場誘起渦糸系が示す状態変化（渦糸相図）の研究の一翼を担った内容からなり、一方向に相関をもった欠陥（線状欠陥）を不純物として多数含む超伝導体における渦糸相図の系統的な研究成果の報告となっている。線状欠陥を多数含む3次元系の渦糸相図の研究は、磁場と平行に走る高密度の線状欠陥が強い渦糸ピンング効果を生むため、超伝導の実用上の興味から盛んに研究されてきており、超伝導ガラス秩序化を意味する超伝導2次（連続）転移を示すことがわかっている。しかし、磁場と垂直に線状欠陥が走る系の理論的考察はこれまで全く行われてこなかった。相対的にピンング効果が弱い状況で、点状欠陥と類似の結果を期待する傾向にあったことがその理由だが、米国のグループで行われた極めて良質のイットリウム系銅酸化物超伝導体の単結晶を用いた精密な実験では、高密度線状欠陥に垂直な磁場下で異常に広い渦糸液体領域の存在が示された。点状欠陥のみを含む系よりも強い揺らぎ、かつ弱いピンング効果を示唆するこの実験事実は、上記の単純な期待を覆す注目すべきもので、基礎理論の題材として申請者が最初に取り組んだ題材である。申請者は、高磁場近似のギンツブルク・ランダウモデルの取り扱いを磁場に垂直な線状欠陥を多数含む状況に適用し、点状欠陥を含まず人工的に導入された線状欠陥のみを含む系では超伝導ガラス相は実現せず、観測された広い渦糸液体領域は（線状欠陥導入前では）点状欠陥が低密度の良質の系に固有に現れる現象であると結論した。

上記の研究を通して、線状欠陥を含む系の相図は従来の予想よりも非自明な様相を示すという感触を得て、申請者はその後磁場に平行な線状欠陥を含む状況下でも線状欠陥が十分低密度の場合の相図研究は未解明であることに着目し、研究対象を低密度の平行な線状欠陥を持つ系に移した。実験的にも、この場合に得られたイットリウム系、ビスマス系の銅酸化物高温超伝導体の実験的相図は概して、中間磁場域で超伝導ガラス転移が1次転移になっている。また、オーミックな電気抵抗がゼロのガラス相内でも、ごく最近の磁化測定などの実験は別の1次転移の存在を示していた。つまり、線状欠陥が十分低密度の場合には、3つの異なる渦糸状態（渦糸液体と2つの異なる渦糸ガラス相）を隔てる2つの1次転移が存在しうることになる。一方で、上記の3次元系の相図の問題は絶対零度近傍の乱れた2次元超伝導薄膜の量子極限の相図を考察することと等価である。この同定は量子超伝導揺らぎを伴う系の虚時間自由度を3次元系の磁場方向の座標と同一視すれば得られる。実際、超伝導・絶縁体転移の量子臨界現象を抵抗データを通して示す MoGe 薄膜の実験では、超伝導・絶縁体転移磁場より十分低磁場で不連続転移的な抵抗の急峻を示しており、絶対零度極限での超伝導ガラス相内の1次転移の存在を示唆する。この背景に基づき、上記2つの問題をともにカバーすることのできる準2次元層状系のギンツブルク・ランダウモデルを設定し、それに関する古典モンテカルロシミュレーションを行った。この場合、層の数が2次元量子系では温度の逆数に相当する。具体的には、8層までの系のシミュレーションに限られるので、2次元量子系を対象にするにしても有限温度の計算となる。その結果、十分に乱れが強い系では1次転移が失われるが、乱れを弱めると殊に低磁場側のガラス相間の1次転移は容易に残存でき、十分に弱い乱れでは高磁場側の渦糸液体への転移も1次転移になることが示された。つまり、超伝導・絶縁体量子臨界現象はこの場合、この1次転移の臨界終点をもたらす現象だと推測される。この結果により、磁場に平行な線状欠陥を含む3次元系の相図と乱れた2次元超伝導薄膜の量子極限の相図の双方について、実験と無矛盾な理論的知見が得られたことになる。

(論文審査の結果の要旨)

申請者の明神清一氏の学位論文は、超伝導揺らぎが強く、かつ乱れを含んだ超伝導体の磁場中相図の統計力学的側面の研究を主題にしており、具体的には(1)磁場に垂直な線状欠陥を含む超伝導体の渦糸相図の研究、(2)面に横たわった線状欠陥を含む超伝導薄膜における超伝導・絶縁体転移現象の研究、(3)磁場に平行な低密度の線状欠陥を含む3次元超伝導体と乱れた2次元量子超伝導体の渦糸相図の数値的研究、である。公聴会では申請者が最も重点を置いて取り組んだ(3)の研究に絞って発表が行われた。

学位論文の第1章で申請者は、この(1)－(3)からなる研究の背景の説明に多くの紙数を費やしており、その部分の記述と説明が十分かつ適当であるか否かをまず検討した。(1)、(3)の題材に関しては特に、第二種超伝導体の磁場中相図の統計力学的理論について、その問題の背景について説明するにはかなりの予備知識が要する。この点を慎重に検討し、申請者の第1章の解説は十分な問題背景の理解に基づいているものと判断された。第2章以後では、理論解析の細部についての解説は非常に詳しいものであった。第2章では(1)の題材について、超伝導グラス転移に関する基本的アイデアとともに、場の理論的手法を用いたグラス転移温度曲線や電気抵抗の異方的臨界現象の導出を、乱れた系の統計力学的手法であるレプリカ法を駆使して詳しく述べてある。第3章では前章での臨界現象に関する知見を2次元量子臨界現象に関する類似の題材に応用し、久保公式に基づいた電気伝導度の詳しい解析を展開している。記述は非常に明快であり、動的な物理量の導出が詳しく説明できている。

この学位論文の根幹をなしている題材(3)に関して、申請者はまず磁場に平行な線状欠陥からなる3次元系の有限温度の相図の問題が、絶対零度近傍の乱れた2次元系の量子相図を対象にすることと何故同等なのか、について明快な説明を与えることから始めている。また、計算の詳細とその意義を説明する前に、どんな実験事実をこの問題に関連して考慮に入れておくべきなのかを説明した上で申請者の行った数値シミュレーションに関する解説に移ることができている。申請者の研究の中で最も科学的に重要な結果は、超伝導グラス相への1次転移とグラス相内で起こる別の1次転移の存在を示し、最近の実験事実との整合性を指摘した点である。殊に、一つのモデルによる古典モンテカルロシミュレーションの結果が、線状欠陥を含む3次元高温超伝導体の相図とMoGe 金属薄膜での量子極限の相図という2つの問題に関係していることを指摘し、計算結果を残した点は、磁場中超伝導の物理分野への非常に大きな寄与と解釈できる。申請者の行ったシミュレーションは古典系に対するもので、一見平易な計算に思えるが、乱れた系の秩序相側で起こる1次転移を見出すために、平衡状態となるグラス状態を得るためには膨大な計算時間を必要とし、申請者の多大な労力が本研究成果につながった点は審査時に重要視された点である。

以上のことから、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、博士として十分な学識、能力があることを確認したため、合格と認めた。