

氏名(本籍)	菅原 恵美子 (神奈川県)		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第2886号		
学位授与年月日	平成14年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	工学研究科		
学位論文題目	磁束線格子融解現象の角度依存性とスケーリング則の破れに関する研究— Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O _{8+x} の場合		
主査	筑波大学教授	理学博士	門脇和男
副査	筑波大学教授	工学博士	滝田宏樹
副査	筑波大学教授	工学博士	吉崎亮造
副査	筑波大学教授	理学博士	植寛素
副査	物質・材料研究機構特別研究員	理学博士	立木昌

論文の内容の要旨

高温超伝導体は、発見当初から磁束状態が異常であるといわれてきた。その理由は、応用上、きわめて重要な物理量である上部臨界磁場 H_{c2} が、通常の金属系の超伝導体では明確に決めることができるにもかかわらず、明確に定めることができないという問題があった。これまでの考え方によれば、このような状況は、あたかも磁束のピン止め効果が消失したために起こる現象であり、超伝導状態の本質的な問題ではないとする立場が一般的であった。ただし、ピン止め効果が消失すること自体、従来の考え方においても奇妙な現象であった。しかしながら、大多数の研究者は実験結果をそう解釈していたし、現在でもそう考えている研究者は少なくない。

このような考え方が正しくない事を我々は高温超伝導体における磁束状態の研究の初期の段階から、主に電気抵抗や、磁化の精密測定によって様々な角度から実証してきた。特に、これまでの研究で、高温超伝導体の磁場中での振る舞いは、超伝導揺らぎが顕著であり、上部臨界磁場 H_{c2} は存在せず、変わって、超伝導と正常状態を区別する相境界は磁束格子融解線、または、磁束ガラス転移線であることを明らかにしてきた。菅原恵美子さんの本博士論文は、この磁束線格子融解線の外部磁場と結晶軸との関係が、Blatter等によって従来から主張されてきた異方的3次元ギンツブルグ・ランダウ理論(GL理論と略す)から導出されるスケーリング則に従わず、特異な角度依存性を示すことを実験的に見だし、それが最近、Koshelevによって主張された磁束線格子とジョセフソン磁束の交叉磁束状態の理論でよく説明できることを明らかにしたものである。磁束線格子融解現象の角度依存性の測定は、良質単結晶であるBi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}の電気抵抗を測定することで求めた。この系の場合、電気抵抗は表面ピン止め効果により、試料端を流れ、超伝導体の真の電気抵抗は測定できないとされていた。事実、通常の4端子法によって電気抵抗を測定すると磁束線格子融解転移に伴う電気抵抗の飛びは小さく、極端な場合はほとんど観測されない。また、角度変化においても同様に磁束線格子融解曲線の角度依存性の測定はできない。これを改善する方法として、円盤状試料を用いたCorbino法があり、菅原さんはこの方法を本実験に適用した。その結果、全角度領域においてきわめて明瞭な磁束線格子融解転移に伴う電気抵抗の飛びを観測することができた。また、この方法を使うことによって磁束液体状態ではこれまでの測定結果とは異なって、電気抵抗の非線形性は無いことがわかった。

菅原さんはこの博士論文において、磁束線格子融解線を全角度領域で丹念に測定し、相図を確立した。これが

菅原さんの本論文の中心的業績である。すなわち、磁束線格子融解現象は1次の相転移であることから、電気抵抗はそれに対応した温度と磁場で飛びを示す。磁場の角度が超伝導2次元面（結晶の ab 面）に近づくと、この1次転移がきわめて狭い角度範囲で突然消失し、連続転移へと変化することを発見した。この連続的な変化は磁束のロック・イン転移が起こり、磁束はすべてジョセフソン磁束となり、超伝導層間に入り込み、そのような状況では相転移が2次転移へ移行することを強く示唆している。また、この磁束線格子融解点の角度依存性は大変奇妙な階段状を示し、異方的3次元GL理論から予想される楕円関数的な依存性から大きくはずれることを見いだした。すなわち、3次元異方的GL理論のスケーリング則が破綻していることを明らかにした。

このような現象は超伝導転移温度 T_c から十分離れた低温で起こる。温度を T_c 近傍へ移すと磁束線格子融解転移に伴う電気抵抗の飛びは全角度領域で観測され、2次転移的な領域は消失している事を見いだした。これは T_c 近傍ではジョセフソン磁束を規定している物理パラメータ λ （磁場侵入長）や ξ （コヒーレンス長）が発散的に大きくなることからもはや層状性が失われてしまい、連続的と見なせるようになることを示唆している。この事実は、最近、Hu等のコンピューターシミュレーションによっても再現されている。

Corbino法を用いることで、磁束状態における真の電気抵抗が測定できることがわかったので、磁束状態の電気抵抗の温度依存性を、再度、精密に測定し、磁束のパンケーキの熱揺らぎによって発生する電気抵抗の理論（門脇・Yuanモデル）と比較検討した。その結果、磁束格子融解転移が起こる磁場・温度領域を除いては門脇・Yuanモデルと大変よく一致することがわかった。なお、測定結果は磁場中でのKosterlitz-Thouless理論でも比較的よく一致することがわかった。このことは、Kosterlitz-Thouless理論では位相の揺らぎが電気抵抗の本質であることから、この磁束液体領域の電気抵抗は本質的に超伝導の位相の熱揺らぎが原因であることによるものと思われる。

審査の結果の要旨

このように、本論文は、高温超伝導体、特に、典型的な酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ の高品質単結晶を用いたCorbino法による磁場中での電気抵抗の研究によって多くの新しい事実を見だし、磁束状態の物理的な理解に大きく貢献した。磁束線格子融解曲線の外部磁場に対する特異な階段状の角度依存性や1次転移から2次転移への移行現象、また、このような角度依存性が温度領域によって異なること、すなわち、 T_c 近傍においては全角度領域が1次転移的であること、このような磁束線格子融解現象の特異な角度依存性が、最近提唱されたKoshelevの理論、または、それを改良したSavel'ev等の理論で大変よく記述できること、などを明らかにした。さらに、磁場中の電気抵抗の温度依存性が磁束パンケーキの揺らぎを考慮した現象論的な関係式（門脇・Yuan理論）で、磁束線格子融解領域を除いてはよく説明できることを明らかにした。

このように、本博士論文は高温超伝導体の磁束状態の理解に様々な新たな知見をもたらし、磁束分野の理解に多大な貢献をした。この業績はすでにいくつかの物理学関連の学術雑誌（Physical Review, Physical Review Letters, Physica Cなど）に公表され、国内外で高く評価されている。

よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。