

氏名	町田昌彦	
授与学位	博士(工学)	
学位授与年月日	平成12年7月12日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項	
最終学歴	平成2年3月28日 東北大学大学院理学研究科物理学専攻前期課程 修了	
学位論文題目	固有ジョセフソン効果と超伝導位相の ダイナミクスに関する研究	
論文審査委員	主査 東北大学教授 山下 努 東北大学教授 中島 康治 東北大学助教授 中島 健介	東北大学教授 海老澤 丕道 東北大学教授 庭野 道夫

論文内容要旨

高温超伝導体が発見されて以来、約10年以上の月日が経過したが、この間に行われた高温超伝導体を示す奇妙で多様な超伝導状態に対する数多くの研究は、超伝導現象に対する我々の理解を確実に深めてきたと言える。本論文は、この高温超伝導体を示す特異な超伝導現象の中でも、特に最近、多くの注目を引く固有ジョセフソン効果を理論的に研究し、その結果をまとめたものである。一般に高温超伝導体の単結晶は、超伝導を担う CuO_2 層とその層間に位置するブロック層とから構成され、物質によってブロック層の特性が変化することが知られている。中でも、特に $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ (Bi-2212)に代表される物質群では、ブロック層は絶縁体的性質を示すため、隣接超伝導層はジョセフソン結合し自然なSIS型の積層型接合アレイとなっていることが実験的に確かめられてきた。本論文では、こうした高温超伝導体単結晶が固有に示すジョセフソン効果(固有ジョセフソン効果と呼ばれる)を理論及び数値シミュレーション手法を用いて研究し、固有ジョセフソン接合特有の現象の解明と新しい現象の予測を主眼としている。その際、全ての章において、接合のスケールが原子サイズであるという特徴を強調し、それが固有ジョセフソン効果特有の現象を与える起源であるとの主張を与える。以下に本論の構成とその要旨を第1章から順に記す。

第1章、序論では、高温超伝導体の特性を簡単に説明し、固有ジョセフソン効果に対する実験及び理論の現状を概説する。まず、 T_c 以下で、隣接超伝導層間の結合が極めて弱い場合に現れるジョセフソン結合がどのように超伝導状態に影響を与えるかを磁場中の磁束構造の変化の例を挙げ議論する。次に従来型の典型的ジョセフソン効果とは異なった新しいタイプの超伝導位相のダイナミクスが現れる可能性を考察し、接合スケールが原子サイズである場合には、 c 軸方向に伝播する電荷揺らぎのモード(縦プラズマ)が現れ、これが固有ジョセフソン接合で特異的に観察されるマイクロ波共鳴吸収の起源であるとの議論が与えられる。また、固有ジョセフソン接合系で現れる電流・電圧特性の多重ブランチ構造や磁場中での磁束フローとそれによる電磁波発振など極めて興味深い最新の実験結果が紹介され、これらも同じく接合の原子スケール性という立場から説明が可能であるかどうか議論される。これらの特徴的な実験事実と序論で提出された多くの議論については、第2章以降で、具体的計算例や理論的帰結を基に詳しい説明が

与えられる。

第2章では、固有ジョセフソン接合の微視的BCS理論を経路積分法により示し、通常の単一ジョセフソン接合や従来の積層型SIS接合系で観測されることのない新しい超伝導位相のダイナミクスについて微視的解釈を与える。また、第2章では、固有ジョセフソン接合に対する微視的理論の枠組を与えることに加え、固有ジョセフソン効果を記述する適切な現象論的モデル方程式を微視的理論から導出する。導出したモデル方程式は、実際に、第3章及び第4章において、固有ジョセフソン接合が示す幾つかの代表的な実験事実を説明するための基礎方程式として用いられる。さて、出発点となる微視的理論モデルだが、これは超伝導BCS理論に基づき、有限の厚さを持つ超伝導層が隣接超伝導層とトンネル効果により弱く結合しているとするモデルをとる。その際、超伝導層は、原子スケールであるため厚さは持つが、厚さ方向に超伝導位相やベクトル・ポテンシャル等は変化しないと仮定する。尚、上記モデルに対する理論的取り扱いの方法として、本論文では特に経路積分法を用いていることを注意する。これは、経路積分法が巨視的自由度、即ち、超伝導位相や電磁場と言った古典的に振舞う自由度に対する有効作用を与え、その有効作用から、オイラー・ラグランジュ方程式、即ち、系の運動方程式が自然に導出できるという便利さを持つからである。また、経路積分法を用いることにより、従来のジョセフソン接合系で精度良く成立すると考えられてきたジョセフソン関係式は、実際は、高々、平均場解であり、それからの揺らぎ(ズレ)が固有ジョセフソン接合において無視できなくなっていることが理論的に明確に示される。これは、固有ジョセフソン接合では、超伝導層の厚さが電荷遮蔽長程度と極端に薄くなるため、電荷の遮蔽は実際、超伝導層一層では不完全になり、超伝導層全体が容易に帯電してしまうからである。そして、このジョセフソン関係式の補正の存在は、 c 軸方向に伝播する縦集団プラズマ励起モード(電荷のモード)の起源となっていることも理論的に導かれる。一方、経路積分により得られた有効作用からは、超伝導位相及びゲージ場に対する各オイラー・ラグランジュ方程式が導出され、それを基にゲージ不変な超伝導位相差と電荷密度に対する一般の運動方程式が導かれる。導出された方程式は、電子状態との密接な関係を保ち複雑な表式で表現されているため、妥当な微視的解釈の下、単純化が進められ、特に実験条件を適当に考慮するという近似の下(超伝導面に沿って平行方向に位相差の空間変化が無視できずに磁場誘導型結合が支配的な場合とその空間変化が無視できるために、電荷誘導型結合が支配的になる場合)、運動方程式は、既に現象論的に導出されている結合サイン・ゴルドン方程式と小山・立木モデルに帰着できることが示される。これらの現象論的方程式は、これまでに固有ジョセフソン効果を説明するための最も有効な運動方程式と考えられてきたが、本研究により、理論的な適用限界等が明らかにされ、かつ、より一般化された方程式系も導出されたことは、今後のより詳細な研究を進める上での重要な足掛かりになると考えられる。以下、第3章及び4章では、微視的基礎を与えた小山・立木モデルと結合サインゴルドン方程式を理論的及び数値的に詳しく研究し、固有ジョセフソン効果の代表的な実験事実が如何にして、それらにより説明できるかを明らかにする。

第3章では、第2章で導出した有効作用を基に、原子スケールの超伝導層の帯電効果に着目し、固有ジョセフソン効果に特有な二つの実験結果、即ち、マイクロ波共鳴吸収と電流・電圧特性における多重ブランチ構造についての説明を与

える。即ち、両者の起源を探索する。具体的に述べると、マイクロ波共鳴吸収に対しては、有効作用に対して線形近似の範囲で系の固有モードを求め、それとマイクロ波との共鳴現象であるとした説明を与える一方、ゼロ磁場下電流・電圧特性で一般的に観察される多重ブランチ構造については、有効作用から導出される非線形運動方程式(小山・立木モデル)を数値シミュレーションし、多重ブランチを再現できることでその起源が超伝導層の帯電効果であると結論づける。さて、以下に具体的にそれらの方法を説明する。まず、マイクロ波共鳴吸収に対してだが、これは、固有モードとして縦集団プラズマ・モードの存在とマイクロ波電場がそれと共鳴することを二つの方法を用いて理論的に明らかにする。一つ目の方法では、有効作用を線形化し、外部電場への応答を記述する誘電関数を求め、その誘電関数がゼロ点を持ち、系がそのゼロ点で(プラズマとの)共鳴を起こすことを示す。二番目の方法では、固有ジョセフソン接合内での電場の運動方程式を有効作用から導出し、電場の固有振動伝播解の振動数と波数の分散関係式が一番目の方法で求めたプラズマ共鳴振動数の分散関係式と一致することを示す。こうして、 c 軸に振動方向を偏局させた外部電場を系に照射した場合、その振動数が系のプラズマ振動数と一致する時、外部電場は系内を伝播できることが理解される。次は、電流・電圧特性だが、これは、同じ有効作用から導出される非線形運動方程式に一定の印加輸送電流と準粒子電流の寄与を現象論的に加えた運動方程式(小山・立木モデルに一致)を数値シミュレーションすることで調べられる。シミュレーションの結果、電流値の上げ下げを注意深く繰り返すことで、電流・電圧特性の多重ブランチ構造がほぼ完全に再現できることが示され、そのブランチングの様子は実験条件とも良く類似していることから超伝導層の帯電効果を考慮した方程式は、電流・電圧特性の多重ブランチ構造を与える解軌道を持つと結論づけられる。また、なぜその方程式が多重ブランチ構造を与えるような軌道を安定に持ち得るのかについては、次のような理論的考察が与えられる。超伝導層の帯電効果による接合間の非線形結合は運動の振幅が大きくなった場合、局在運動モードへ変化するため、あたかも、各接合は独立して運動するかのようには振舞うと考えられる。こうして、第3章では、固有ジョセフソン接合の重要な特徴である原子スケールの超伝導層の帯電効果によって、固有ジョセフソン効果の特徴的二つの実験結果が統一的に解釈できると結論づけられる。

第4章では、超伝導層に平行な磁場下でのジョセフソン磁束のダイナミクスが結合サインゴルドン方程式の直接的な数値シミュレーションにより調べられ、集団的な磁束ダイナミクスが横ジョセフソン・プラズマモードとの結合を通して幾つかの磁束格子構造の変化など、バラエティーに富む物理現象を示すことが明らかにされる。また、特に、工学的に非常に有用であると考えられる、位相が全ての接合に渡って揃うような交流電磁場の超放射状態が現れるかどうか探索され、その出現条件が議論される。シミュレーションでは、磁場は、超伝導層に平行に、電流は、 c 軸方向に各々、印加され、現実的なサンプルの大きさをシミュレーションサイズとする大規模な数値シミュレーションが実行される。電流値は、ゼロから臨界電流の2.2倍程度まで上昇させられる一方、磁場は、2Tに固定され、サンプル内の各接合に多数の磁束がまんべんなく侵入し、それらの集団的フローが起こる状態がシミュレーションされる。数値シミュレーションの結果、電流・電圧特性は、3つのはっきりしたステップ状の構造を示し、そこでは、磁束フロー格子状態の格子構造の変化が起こることが磁束フロー状態を直接、リアルタイムで

モニターすることにより確認される。ジョセフソン磁束フロー状態は、この3つのステップ(格子構造の転移)間では、磁束配置等に殆んど変化が見られないことから、4つの領域に分割され(電流値の低い方から順に領域(I)、(II)、(III)、(IV)と呼ばれる)、各々の状態で磁束の典型的な配置がモニターされると同時に、サンプル表面での振動電場に対するパワースペクトルが測定される。パワースペクトルは電流・電圧特性上のステップ構造(格子構造の転移)を境に全く違ったスペクトル構造を示し、領域間の変化は非常に大きい。4つの領域の中で最も興味深いスペクトル構造は、低電流側から3番目に位置する領域(III)で現れる。この領域では全ての接合に渡って位相が揃っている矩形ジョセフソン格子フロー状態が実現されているため、振動電場のパワースペクトラムは非常にシャープで、かつそのピーク位置でのパワーも格段に他の領域と比べて大きい。これは、サンプル全体が一つのモードをコヒーレントに励起する状態と考えられ、この領域では、正に磁束フローによる電磁波の超放射が起こることが予測できる。こうして、固有ジョセフソン接合を電磁波発振源として見た場合、この領域(III)の磁束フロー状態の実現は、最も重要であると結論できる。以上がシミュレーション結果の特筆すべき点であるが、これらの数値シミュレーション結果を理論的に解釈し物理的理解をさらに深めるために、方程式の固有モード解析により横ジョセフソンプラズマ振動モードと磁束フローとの共鳴点(電圧値)を求めた。その結果、磁束格子の構造転移が起こる点(電圧値)はジョセフソン磁束フロー状態と幾つかの固有横モードとの共鳴する点に相当し、横モードとの共鳴が磁束格子フロー状態を不安定化させステップ構造を生成させることが分かった。また、この固有モード解析とシミュレーションとの比較からは、分割された領域(III)の電圧幅が、絶縁層及び超伝導層の両方の厚さがab面における磁場侵入長に対し薄ければ薄いほど、存在領域(領域(III)の)の幅は広がるという帰結が与えられる。従って、明らかに固有ジョセフソン接合は超放射状態を観測したり工学的に利用するには、最も有望な物質であると言えることができる(絶縁層及び超伝導層の厚さは原子スケールだからである)。言い替えると、固有ジョセフソン接合の超放射条件の実現領域は他の人工的積層ジョセフソン接合と比べて格段に広いことが推察される。以上、原子スケールの積層ジョセフソン接合アレイである固有ジョセフソン接合は、多くの横伝播固有モードを持つためジョセフソン磁束の集団運動は非常に豊かなバラエティーを示す一方、工学的に非常に有用な、全ての接合が同期する超放射磁束フロー状態の存在幅は固有ジョセフソン接合では、十分に広く、高機能のサブミリ波発振子として大いに期待できることが結論づけられた。

最後に第5章では、本論文で示した研究結果に対するまとめと結論が述べられる他、固有ジョセフソン効果に対する将来の展望、及び今後の理論及び数値シミュレーションによる研究の方向性が議論される。

論文審査結果の要旨

異方性の高い高温超伝導体は、超伝導層と絶縁層が交互に積層した固有ジョセフソン接合構造で、最近、その工学的潜在能力が高く評価され注目を受けている。著者は、この系が示す固有ジョセフソン効果に焦点を当て、この効果に特有な新しい現象を理論及び数値シミュレーションにより解明し、幾つかの実験事実に対して統一的解釈を与えると共に、工学的に有用な強い電磁波発振の可能なことも示している。

本論文は、全文5章からなり、第1章、序論では、高温超伝導体の特性を簡単に説明し、固有ジョセフソン効果に対する実験及び理論の現状を概説している。

第2章では、固有ジョセフソン接合の微視的BCS理論を経路積分法により示し、通常の積層型SIS接合系で観測されることのない縦ジョセフソン・プラズマ振動に対する微視的解釈を与えている。さらに、経路積分法により得られた有効作用から、磁界及び電荷誘起型結合のどちらが支配的であるかの違いにより、結合サインゴルドン方程式と小山・立木モデルが導出できる事を明確に説明した。

第3章では、第2章で導出した有効作用を基に原子スケールの超伝導層の帯電効果に着目し、固有ジョセフソン効果に特有な二つの実験結果、即ち、マイクロ波共鳴吸収と電流・電圧特性における多重ブランチ構造を統一的に説明し得ることを明かにしているが、これは現象を理解する上で有用な成果である。

第4章では、超伝導層に平行な磁場下でのジョセフソン磁束量子のダイナミクスを結合サインゴルドン方程式の大規模数値シミュレーションにより調べ、集団的な磁束ダイナミクスが横ジョセフソンプラズマモードを励起するなど、バラエティーに富む物理現象を示すことを明らかにしている。さらに、高速な磁束運動により電磁波超放射が起こりうる条件を数値シミュレーション結果と理論的解析との比較により議論し、固有ジョセフソン接合がこの超放射条件を広い範囲で実現できると結論づけているが、これは工学的応用上の重要な成果である。

第5章では、本論文のまとめと結論が述べられ、固有ジョセフソン効果に対する将来の展望を議論している。

以上、要するに本論文は固有ジョセフソン接合特有の現象を理論的に説明することに成功しただけでなく、固有ジョセフソン接合が電磁波放射源として高い性能を持つことを理論的に初めて提案した論文であり、電子通信工学の発展に寄与する所が少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。