

論文審査の結果の要旨

氏名 福屋 翔太

高温超伝導体の発見以降、高温超伝導体物質を利用した様々な応用研究が活発に行われてきている。そのなかでも重要な応用の一つとして、大きい超伝導ギャップを利用したテラヘルツ領域の光源開発が長年研究されてきた。特に最近になって、ビスマス酸化物高温超伝導体を用いた高強度テラヘルツ発振器が作成されるようになり、応用が強く期待されている。一方でテラヘルツ発振を記述する理論として、多くの模型が考えられてきた。高温超伝導体は2次元の超伝導層と絶縁体が交互に積層した構造をしており、有効模型として各超伝導層が互いに固有ジョセフソン結合によって結合している模型が広く用いられている。これらの理論研究はジョセフソンプラズマモードなどの低エネルギー励起をよく説明する一方、発振現象のような強い非線形現象が生じる場合には取扱が難しくなり、しばしば定性的なレベルですら実験との不一致を示す。本学位請求論文では、固有ジョセフソン結合に基づく有効模型を用いて、テラヘルツ発振に関して非線形ダイナミクスの観点から理論研究が行われた。

本論文は日本語で5章よりなる。まず第1章では、テラヘルツ発振に関するこれまでの実験・理論研究についてまとめられた。さらにそれを踏まえて、本論文の目的と結果の概要が述べられた。引き続き第2章では、超伝導層間の電磁相互作用をとりこんだ固有ジョセフソン接合系の模型について詳しく述べられた。

第3章では、ビスマス酸化物超伝導体のテラヘルツ発振に着目し、高強度発振のメカニズムについて考察された。これまでこの系の発振では、静的 π キルクと呼ばれる超伝導位相差パターンが考えられていたが、これは超伝導秩序パラメータを減少させるためエネルギー的に不安定である可能性が指摘された。次に固有ジョセフソン接合系の模型における非線形ダイナミクスが、数値計算によって取り扱われた。その結果、もっともエネルギーの低い振動状態として新しい共鳴状態が見いだされた。この共鳴状態に対応して電流電圧特性にステップ構造が見られ、同時にテラヘルツ発振が生じることが示された。この共鳴状態は、超伝導位相が積層方向に一様で伝導面内で変動する新しいタイプの共鳴であり、伝導面の短手方向の大きさによって共鳴周波数が増減する。これらの特徴から、この共鳴状態がビスマス酸化物のテラヘルツ発振状態で実現されている可能性が議論された。その一方で、実験では電流電圧特性にステップが見られず、出力強度も理論の評価値（ミリワット程度）にくらべて桁違いに小さい（マイクロワット程度）ことが指摘された。

第4章では第3章での結果を受け、テラヘルツ発振強度を抑制する効果の一つとして、

積層方向のジョセフソン結合の非一様性が考察された。この場合、系全体がコヒーレントに振動するためには十分な面間の電磁結合が必要となる。まずこの現象は、非線形現象の一つである集団同期現象と同じ問題となることが指摘された。一不純物に対する系の応答を数値計算によって評価したところ、面間電磁結合が小さいと位相同期が起こらないが、面間の電磁結合がある臨界値を超えると不純物部分が他の接合と完全な位相同期を起こすことが示された。この現象を集団同期現象と対応させるために、固有ジョセフソンモデルを粗視化によって局所蔵本モデルへマップした。さらに得られた局所蔵本モデルの数値計算結果は、ジョセフソン接合系の数値計算結果とよく一致することが確かめられた。最後に非一様性が系全体に存在するときの数値計算結果が示され、電磁結合が弱い場合には積層方向に周波数の異なるクラスターが複数生成されることが明らかにされた。この結果、発振出力は大きく抑制されることが議論された。

最後の第 5 章では得られた結果がまとめられた。

以上、各章の紹介と共に本論文で得られた知見を解説した。本論文では高温超伝導体のテラヘルツ発振という重要な課題に対し、非線形ダイナミクスの視点から取り組んだ研究として意義あるものと認められる。特に第 4 章で議論された集団同期現象との対応の指摘、およびその応用については、十分なオリジナリティが認められる。本研究では、モデルの妥当性やモデルパラメータの評価など、実験との比較について多くの課題が残されている。しかし現段階で広く使われているモデルに立脚し、その範囲内で非線形現象の解析を行うことは、当該分野の基礎研究として意義あるものである。従って審査員全員が学位論文として十分なレベルにあり、博士(理学)の学位を授与できると判断した。

なお、第 3 章の内容は *Physical Review Letter* 誌で公表されている。この論文は、論文提出者が主体となって計算および結果の解釈を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断される。またこの件に関して、共同研究者の立木昌氏、小山富男氏から同意承諾書が提出されている。