

論文内容の要旨

論文題目：固有ジョセフソン接合系における テラヘルツ波発振の理論

(Theory on Terahertz Electromagnetic Wave Emission
from Intrinsic Josephson Junctions)

氏名 福屋 翔太

序論

銅酸化物高温超伝導体は超伝導層と絶縁層が ab 面に垂直な c 軸方向に交互に積層した構造を持ち、ジョセフソン接合列としての性質を示すことから、固有ジョセフソン接合系と呼ばれている。固有ジョセフソン接合系の特徴は、超伝導層と絶縁層が原子スケールで積層しているため接合同士の相互作用が強く、無視出来ないことである。接合間の相互作用によってジョセフソンプラズマと呼ばれる集団励起が現れることが知られており、固有ジョセフソン接合系の興味深い現象の一つである。さらに2007年のオジュージャーらによる高強度なテラヘルツ領域の電磁波発振の成功を契機に、固有ジョセフソン接合系の電磁波発振に関する研究も広がっている。この様に、強い相互作用を持つ固有ジョセフソン接合系は基礎研究の視点から興味深いだけでなく、テラヘルツ波の光源開発という応用研究の視点からも注目されている。

一様系における発振

この様な研究背景の下、本研究では固有ジョセフソン接合系の電磁波発振に関する理論研究を行った。図 1(a) は電磁波発振実験のセットアップの模式図である。メサと呼ばれる直方体状の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ に対して、 c 軸方向のバイアス電流を加えることで電磁波発振が観測されている。この実験的背景を考慮し、固有ジョセフソン接合系の現象論的モデルとして図 1(b) の様な直方体状の一様な接合モデルを考え、バイアス電流によって励起されたジョセフソンプラズマのキャビティ共鳴モードを計算した。このモデルに基づく先行研究では、静的 π -キルクと呼ばれる超伝導位相差のパターンによって実現される電磁波発振解が得られており、静的 π -キルクが無い場合には電磁波発振を伴う解は存在しないことが指摘されていた。本研究では、 π -キルク解は超伝導秩序パラメータの振幅を減少し超伝導の凝集エネルギーを減少させるためエネルギー的に不利であり、実際、エネルギーが低くより安定な π -キルクが存在しないキャビティ共鳴モードが存在することを

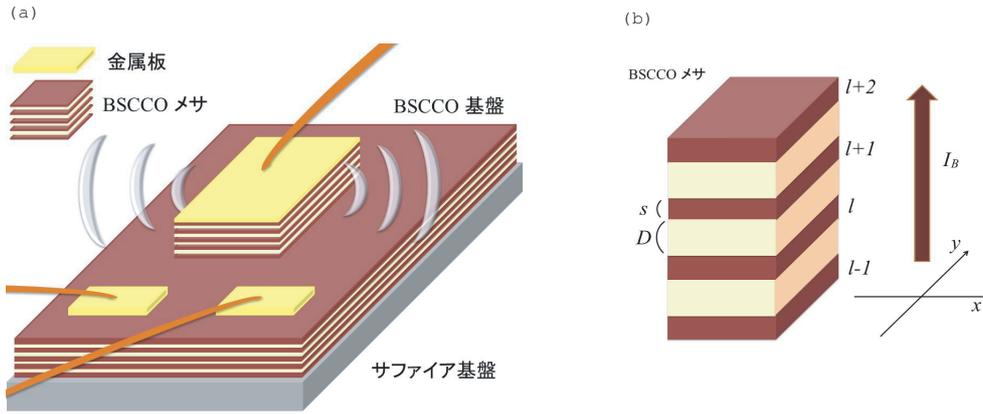


図 1 (a) 高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ を用いたテラヘルツ電磁波発振実験のセットアップの模式図。(b) モデル化された BSCCO メサ。

明らかにした。また、試料の側面から真空中に染み出す磁場のエネルギーが、キャビティモードの共鳴方向の決定に重要な役割を果たしていることも指摘した。これらの考察にもとづいて電流電圧特性、発振強度、振動電磁場のモード、発振が誘発する電圧の試料形状依存性等を解析した。図 2 は π -キルクが存在しない状態の電流電圧特性と発振強度の計算結果である。図 2 から、電流電圧特性に特徴的なステップが現れる領域で発振出力が大幅に増大されていることが分かる。そしてこの高強度な発振状態の発振周波数は、メサの長さの逆数に比例していることを示した。これらの解析結果から、この電磁波発振解がキャビティの効果によって励起された非線形性振動であることを明らかにした。この結果はキャビティ効果が発振出力の増大に効果的であることを示したものである。オジュージャーらの実験においてもキャビティ効果によって従来の [pW] から [μ W] へ発振出力を飛躍的に増大させることに成功しており、キャビティ効果が発振出力を効果的に増大させている点では一様系の解析結果は実験と一致する結果となった。しかしその一方で、解析結果の発振出力は数 [mW] のオーダーとなり、オジュージャーらによる実験結果実験結果の $0.5[\mu\text{W}]$ よりも過大に評価した結果となった。さらに、電流電圧特性の特徴的なステップは実験では観測されていない現象である。

非一様系における集団同期現象

一様な系の解析から得られたキャビティ共鳴モードの発振出力は数 [mW] のオーダーであり、実験結果の $0.5[\mu\text{W}]$ と比較して発振出力を過大に評価してしまった。この原因として、現実に存在する系の非一様性の効果を見逃しているため c 軸方向のコヒーレンスの実現が容易になっている可能性がある。非一様性がある場合の固有ジョセフソン接合系の先行研究は少なく、詳しく調べる必要がある。そこで本研究の後半では系に非一様性がある場合に、ジョセフソン縦プラズマが c 軸方向のコヒーレンスに与える影響を調べた。解析から、非一様性の影響でランダムに分布していた周波数が、集団同期現象によって揃うことを見出した。図 3 はコンダクタンスの乱れが正規分布で分布している場合における、各接合に加わる電場の時間平均値 $\langle E_{z;l+1,l} \rangle$ を示した図である。面間結合定数の増加に従って、各接合の電場がクラスターを組みながら揃っていく様子が分かる。これらの数値計算結果を下に、固有ジョセフソン接合系のモデルと集団同期現象を示すことで知られている局所蔵本モデルとの対応関係を示した。この結果は、非一様な固有ジョセフソン接合系において

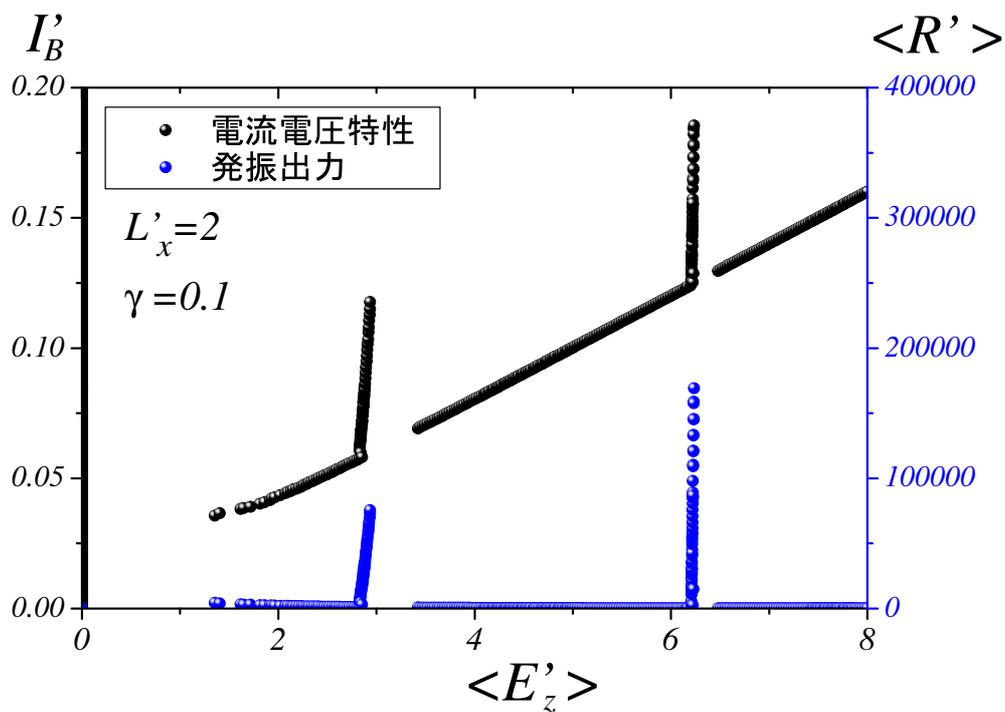


図2 キンクの無い定常振動状態における電流電圧特性と発振出力

集団同期現象が存在することを明らかにしたものである。さらに接合間の電場の時間相関関数から、周波数同期状態では振動の位相は系の非一様性の影響で乱されていることを示した。この結果は固有ジョセフソン接合系において周波数同期と位相同期は同時に起こるわけではないことを明らかにしたものであり、同期の機構に関する新しい知見を示した結果であると言える。このような集団同期現象は、より現実的なテラヘルツ波発振の機構に重大な影響を与えていると考えられるが、発振出力の定量的な評価のためには、さらに詳細な解析を進める必要がある。

$$\langle E'_{z:l+1,l} \rangle$$

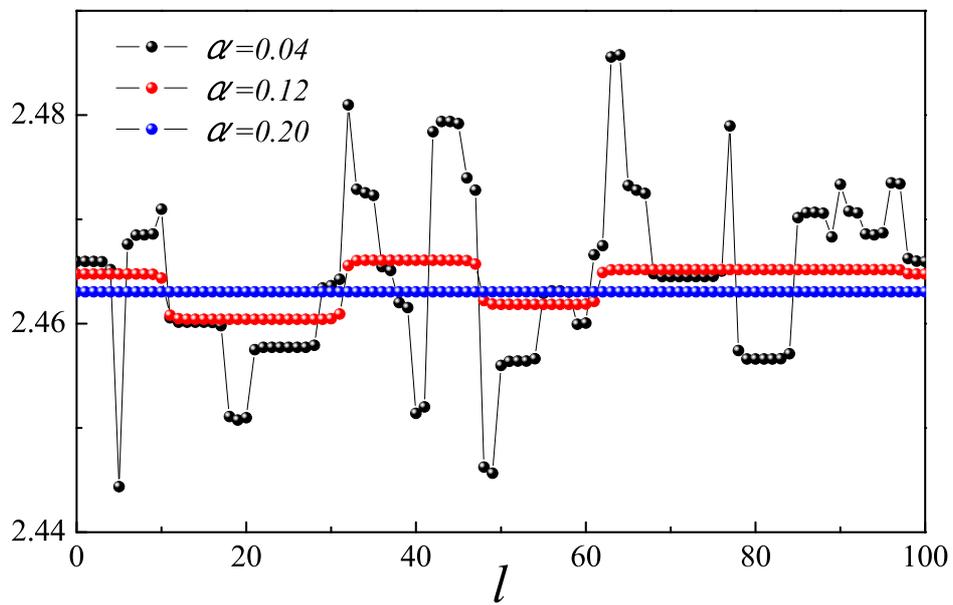


図3 非一様な系の集団同期現象。 $\langle E_{z:l+1,l} \rangle$ は各接合に加わる電場の時間平均を表し、 l は超伝導層のラベルである。 α は面間の結合定数を表している。