

異方的高温超伝導体の量子効果と新電磁波機能発現

研究代表者 東京工業大学大学院理工学研究科 井口家成

Quantum Effects of Anisotropic Superconductors and Evolution of Novel Electromagnetic Wave Functions

Ienari Iguchi, *Research Director of CREST*

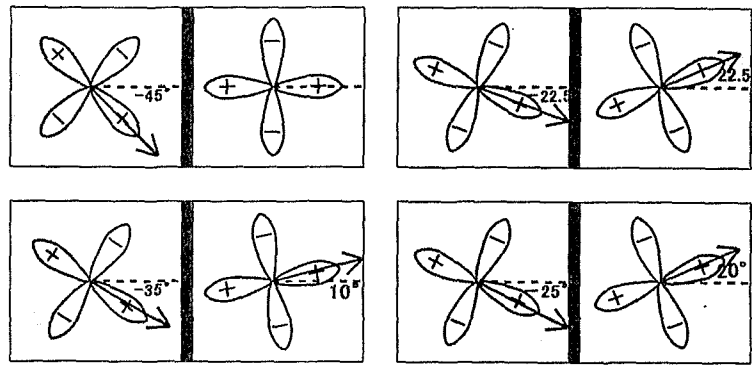
Department of Physics, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

酸化物高温超伝導体のペア波動関数が、4回対称の異方的 d 波対称性をもつことは多くの実験によりすでに研究者の間で広く認められている。このような対称性は、通常の等方的 BCS s 波超伝導体あるいは半導体の電子波動関数では全く見られない特異なものである。ペアリング波動関数が異方的であると、ジョセフソン電流は電極結晶の方向と接合界面のなす角度に依存する(図 1 参照)。すなわちいろいろ接合のジオメトリーを考えた場合、全く新しいコンセプトをもつデバイスの構成も可能となる。このジョセフソン電流、トンネル電流の接合角依存性については、理論的に膨大な計算があるものの実験的にはほとんど検証されていない。本研究の 1 つの目標は、はじめに d 波ジョセフソン電流、トンネル電流の接合ジオメトリー依存性を検証することである。そしてまたその量子効果の特異性について追究することである。d 波超伝導体のふるまいを目に見える形で捉えるために、最近走査 SQUID 顕微鏡を用いる新しい方法により研究を進めている。

もう 1 つの目標は、最近高温超伝導体におけるジョセフソンプラズマ振動の研究が発展しているが、準粒子注入によりジョセフソンプラズマを励起することにより、高温超伝導体が新たなマイクロ波、テラヘルツ波の電磁波源になるというものである。特に 1~10THz のテラヘルツ波については、適当な発振器、検出器が存在しないのが現状である。

高温超伝導体はギャップエネルギーが大きいので、ジョセフソン接合を用いると、テラヘルツ領域までのスペクトロスコーピックな測定が可能となることである。また準粒子注入ジョセフソンプラズマ発振現象をコヒーレントにすることによって、超伝導レーザーの実現も夢ではないといえよう。



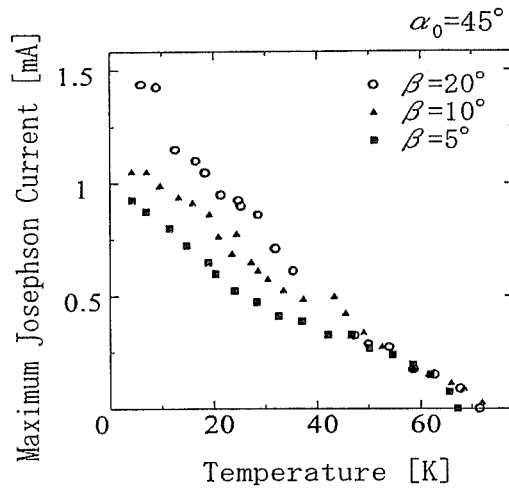
<図 1 種々のジオメトリーをもつ d 波ジョセフソン接合>

2. 研究の現状と成果

○ 異方的 d 波ジョセフソン電流の研究

d 波ジョセフソン接合は、四葉のクローバーのようなペアリング波動関数をもっているため、そのジョセフソントンネリングの様子が電極結晶軸 (a 軸または b 軸) と接合界面の法線とのなす角により大きく異なってくる (図 1)。s 波超伝導体との違いは、特にジョセフソン最大電流の温度依存性、またマイクロ波照射誘起シャピロステップの様子に現れてくる。昨年度 YBCO/Au トンネル接合によりゼロバイアス異常 (ZBCP) の角度依存性を実証してきた。今年度は主に角度の異なるジオメトリーをもったジョセフソン接合を作製し、そのジョセフソン最大電流の温度依存性を調べてきた。そしてその様子は通常の Ambegaokar-Baratoff 理論とは明らかに異なることを報告してきた。角度ジオメトリーの差異による特性を調べるために、同じ基板上に複数

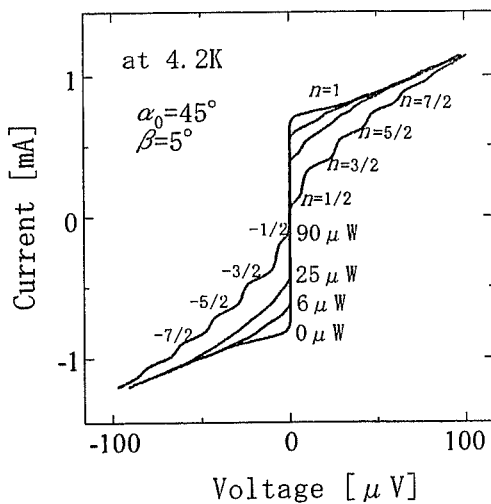
個の YBCO/PBCO/YBCO ジョセフソンランプエッジ接合を作製した。図2は2つの電極の ab 面が相対的に 45° 回転している接合で、界面の角度 (パラメータ: β) を変えた場合の結果である。角度による温度特性のはっきりとした差異が見られ、この結果は田仲一柏谷理論の結果と定性的によく一致している。



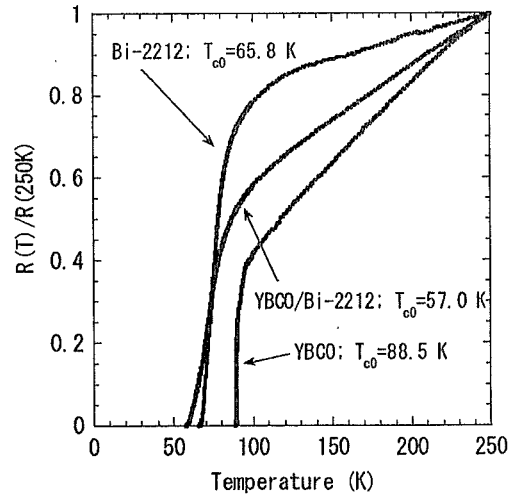
<図2 異なる角度ジオメトリをもつジョセフソン接合の温度依存性>

○ 異方的 d 波ジョセフソン接合のマイクロ波応答

高温超伝導体が d 波ジョセフソン接合である場合、理論的にはマイクロ波照射によるシャピロステップの出現の様子が異なってくることが期待される。d_{x2-y2} 波超伝導体でも $\beta = \pi/8$ に近い対称的なジョセフソン接合では、その電流一位相関係は通常の $\sin \phi$ (ϕ : 接合の位相差) にほとんど近い形となり、シャピロステップは電圧 $V = nhf/2e$ (n : 整数) に現れる。実際 $\beta = 20^\circ$ の接合では、ステップが主として n が整数 0, ± 1 , ± 2 , $\pm 3 \dots$ のところに出現した。ところが $\beta = 0^\circ$ ではジョセフソン接合は非対称となり、 $\sin 2\phi$ の項が支配的になり、ステップは n が $\pm 1/2$, $\pm 3/2$, $\pm 5/2 \dots$ の半整数のところ強く出現する。また n が整数のところにも出現する。図3は $\beta = 5^\circ$ の接合で観測されたシャピロステップの例である。マイクロ波の強度が大きくなると、半整数のステップのみが観測される。この結果は s 波超伝導体では観測されない大変奇妙な特性で、d 波超伝導体から期待される結果と詳細は異なるが矛盾しない。



<図3 非対称ジョセフソン接合のマイクロ波照射シャピロステップ>



<図4 YBCO/BSCCO 積層膜および単層膜の抵抗-温度特性>

○ YBCO/BSCCO 積層薄膜の作製

異なった酸化物 d 波超伝導体のジョセフソントンネリングは、ペアリング波動関数の d 波対称性を考えると極めて興味深いトピックスである。しかしジョセフソン接合はおろか、異なった d 波超伝導体薄膜を組み合わせる技術も現在のところその報告はない。なぜなら2つの薄膜成長条件が異なるからである。我々のグループはごく最近レーザ蒸着により YBCO/BSCCO 積層膜のエピタキシャル成長に成功した。得られた積層膜はともに c 軸配向である。図4は積層膜の抵抗-温度特性でともに超伝導転移を示していることがわかる。現在このような接合のジョセフソン電流がどうなるか接合作製に取り組んでいる。

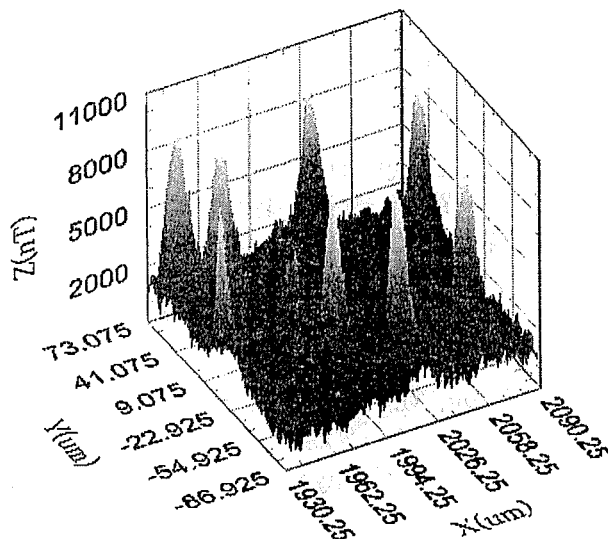
○ 走査 SQUID 顕微鏡 (SSM) を用いた超伝導電流分布の観測

走査 SQUID 顕微鏡は、磁束量子 Φ_0 程度以下の微小磁束を捉える有用なプローブである。SQUID ピックアップコイルにより捉えられる情報は、走査方向に垂直な方向の磁束であり、昨年度は通常の金属超伝導体の量子磁束観測の報告を行った。その後検出技術が発展し、明瞭な酸化物高温超伝導体 YBCO、BSCCO、NCCO の量子磁束像を捉えることができるようになった。超伝導体内の量子磁束を創出しているのは、超伝導電流である。磁気情報から超伝導電流分布の情報を得るために、ビオサバル法則に基づく逆変換を行うことにより超伝導電流分布の可視化に成功した。これにより外部より薄膜ストリップに供給される輸送電流と量子磁束の作る環状電流がはっきり区別でき、その相互の関係が明らかにできるようになった。(予稿集 3-5-1)

○ 走査 SQUID 顕微鏡を用いた量子磁束の観測とペアリング対称性の研究

超伝導体内の磁束が量子化磁束 Φ_0 の単位で侵入することは以前から知られているが、それが 1 本 1 本が Φ_0 の大きさになっていることを実証したのは、最近開発された SSM によってである。等方的 s 波超伝導体では、超伝導体内部に存在する磁束は Φ_0 あるいはその整数倍の値が報告されている。ところが異方的 d 波超伝導体の場合、トリクリスタル基板を用い、1 つの π ジャンクションを含む 3 接合ジオメトリの構造を作り出すと、トリクリスタル 3 つの接合界面の接点に半整数の量子磁束 $\Phi_0/2$ が自発的に生じることが理論的に予測される。これまでにこの量子効果を実証できたのは世界でも米国 IBM 研究所だけである。

我々はごく最近、SSM に工夫を凝らすことにより半整数の $\Phi_0/2$ の量子磁束の観測に成功した。図 5 はトリクリスタル基板上的 YBCO 薄膜で観測された磁束像であるが、大きい磁束はすべて Φ_0 であるが、1 つだけ $\Phi_0/2$ の半整数量子磁束が存在しているのがわかる。この半整数磁束の温度依存性であるが T_c まで安定に存在し、 T_c 以上で消えているのがわかる。これらの結果は、YBCO の $d_{x^2-y^2}$ 対称性を如実に反映している。



<図 5 SSM によるトリクリスタル基板上的 YBCO 薄膜の量子磁束分布>

○ ジョセフソンプラズマスペクトロスコピーの研究

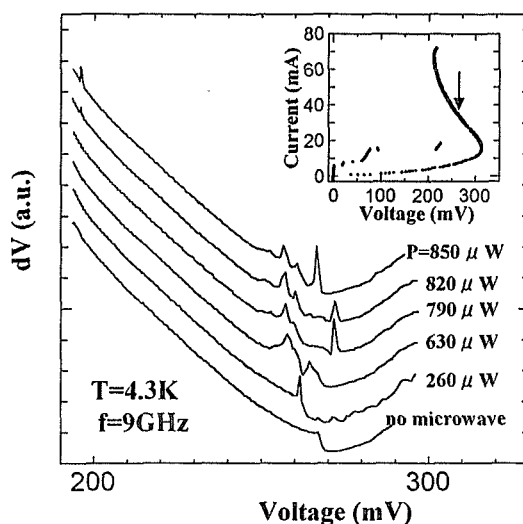
準粒子注入高温超伝導体からの電磁波発振および高温超伝導ジョセフソン接合による検出について研究を進めている。これまでにジョセフソン接合がテラヘルツ波に至る高感度のスペクトロメータとなることを、発振器、検出器のオンチップ作製技術により実証してきた。観測されたスペクトルはしかしながら大変ブロードであり、現在熱効果の影響も含めその原因を探っている。また電磁波伝播の経路についても基板中および空間が考えられるが、最近の測定では少なくとも 1 部が空間を伝わっていることが判明している。

○ ジョセフソンプラズマ誘起電流ステップの観測

これまでにギャップ端で負性抵抗特性をもつ BSCCO イントリンシックジャンクションから、準粒子の自己注入により鋭いマイクロ波発振がスーパーヘテロダインミキサ技術による検出方法で、観測されることを報告してきた。このマイクロ波発振がジョセフソンプラズマの励起によるものであることは、検出電磁波の受信周波数特性および非平衡超伝導状態の議論から結論されてきた。したがってもし本当に高周波のジョセフソンプラズマ電流がイントリンシック接合に

流れていると考えると、この接合に外部からマイクロ波を照射すれば、通常のジョセフソン効果のシャピロステップのように、2つの高周波電流のビートが負性抵抗領域の電流—電圧特性にステップとして出現することが期待される。実験は外部からマイクロ波照射の有無により、イントリンシックジャンクションの微分抵抗を測定すると、マイクロ波照射がある場合、実際鋭いピークが生じることがわかった。これは電流—電圧特性では電流ステップの出現に対応する。

図6は測定の一例である。照射によりピークが出現し、またマイクロ波強度の増大とともに顕著になってくる。ピークの出現する電流は、これまでプラズマ発振ピークを観測した電流値とほぼ近い。しかしピークの出現の様子は、通常のシャピロステップと明らかに異なっている。以上をまとめるとマイクロ波照射により準粒子注入によるジョセフソンプラズマ発振が実際に起こっていることが実証されたといえる。



<図6 マイクロ波照射 BSCCO イントリンシックジャンクションの dV/dI 微分特性>

3. 今後の研究の進め方

基礎的には、最近の走査 SQUID 顕微鏡技術の進展により超伝導体で起こる量子効果が目に見えるようになったので、異方的量子効果の詳細を調べるほか、d波超伝導体を用いた新しいデバイスの可能性を引き続き探索していく。また電磁波機能については、放射出力を増大させることに主に焦点を当て研究を進めて行く。

主な発表論文

- (1) I. Iguchi, W. Wang, M. Yamazaki, Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B62, R6131 (2000).
- (2) H. Arie, K. Yasuda, H. Kobayashi, I. Iguchi, Y. Tanaka and S. Kashiwaya, Phys. Rev. B62, 11864 (2000).
- (3) A. Sugimoto, T. Yamaguchi and I. Iguchi, Appl. Phys. Lett. 77, 3069 (2000).
- (4) I. Iguchi, E. Kume and H. Takahashi, Phys. Rev. B62, 5370 (2000).
- (5) K. Lee, W. Wang, I. Iguchi, M. Tachiki, K. Hirata and T. Mochiku, Phys. Rev. B60, 4272 (2000).
- (6) I. Iguchi, K. Lee and E. Kume, T. Ishibashi and K. Sato, Phys. Rev. B61, 689 (2000).
- (7) I. Iguchi, Supercond. Sci. Technol. 13, 93 (2000).
- (8) E. Kume, I. Iguchi and H. Takahashi, Appl. Phys. Lett. 75, 2809 (1999).
- (9) W. Wang, M. Yamazaki, K. Lee and I. Iguchi, Phys. Rev. B60, 4272 (1999).
- (10) K. Lee, H. Yamaguchi, W. Wang, E. Kume and I. Iguchi, Appl. Phys. Lett. 74, 2375 (1999).
- (11) K. Lee, W. Wang, I. Iguchi, B. Friedman, T. Ishibashi and K. Sato, Appl. Phys. Lett. 75, 1149 (1999).