

*d* 波超伝導体のトンネル効果と Josephson 効果

Tunneling effect and Josephson effect in *d*-wave superconductors

新潟大学大学院自然科学研究科

名古屋大学大学院工学研究科

田中 由喜夫

Graduate school of science and technology Niigata University

Graduate school of technology, Department of Applied Physics, Nagoya University

The tunneling effect and Josephson effect in *d*-wave superconductors are studied from various aspect. The influence of the spatial dependence of the pair potential on the tunneling conductance in normal metal / insulator / anisotropic superconductor junction and Josephson effect in anisotropic superconductors are clarified. Anomalous temperature dependence of the Josephson current in *d*-wave superconductor / insulator / *d*-wave superconductor junction is significantly influenced by the existence of the broken time reversal state and the roughness of the surface. Beyond quasiclassical approximations, energy spectrum of the quasiparticle are obtained by extended Hubbard model and  $t - J$  model.

目的

高温超伝導体の登場により、異方的なクーパーペアの持つ超伝導の研究は、今日きわめて重要である。*d* 波超伝導体のような異方的な超伝導体においては、準粒子の運動する方向によって準粒子が感じるペアポテンシャルが異なるために、複雑な位相干渉効果が期待される。異方的超伝導体の著しい特徴は、従来の BCS 超伝導体とは異なって、準粒子の励起がフェルミ面いたるところでエネルギーギャップを持つのではなくて、フェルミ面上で線状の零点を持ち、さらに準粒子の感じるペアポテンシャルの符号が変化をするということである。その結果、従来の BCS 超伝導体では予想もされなかった面白い効果があらわれてくる。我々は高温超伝導体のトンネル効果の実験でしばしば観測されているゼロバイアスコンダクタンスのピークの起源を世界に先駆けて解明し、またいかにこの効果が *d* 波超伝導体において本質的なのかも明確にしてきた。一方、*d* 波超伝導体のジョセフソン効果において従来のジョセフソン接合では見られなかった新しい干渉効果が現れる。

この研究はこれまでの実績をより発展させることを目的とする。まず第一に界面の原子尺度でのラフネスが *d* 波超伝導体のトンネル接合そしてジョセフソン接合においていかなる影響を与えるのかを調べる。そのためにこれまでの自由電子モデルに基づく計算だけでなく、電子相関の効果の入った  $t - J$  モデルに基づいた計算へと発展させる。一方時間に依存した計算、すなわち ac-Josephson 効果に関しては *d* 波超伝導体のような異方的な超伝導体ではマイクロなレベルからの計算は存在しない。界面における準粒子の位相干渉効果すなわちアンドレーフ反射の効果をきちんととりいれて、ac-Josephson 効果を解明する。

これまで *d* 波超伝導体の界面状態を議論した仕事はいくつかあったが、準粒子状態をふまえてマイクロな立場から議論した仕事はほとんどなかった。特にジョセフソン電流に関してはマイクロな電子状態を考慮にいれた仕事は皆無であった。こうした問題を解明することは基礎研究という

視点のみだけではなくて高温超伝導体のデバイスへの応用という点からも重要である。

### 研究経過

これまでの研究を発展させるために以下のような研究計画をたてた。

#### (1) $d$ 波超伝導におけるトンネル効果

我々は高温超伝導体を  $d$  波の超伝導体という視点から考察して、トンネル効果におけるゼロバイアスピークの起源を調べてきた。その結果錯綜している高温超伝導体のトンネル効果の整理に大きく貢献することができた。またトンネルバリアーが高いときには、トンネルコンダクタンスには超伝導体表面の状態密度の性質が反映されることが明かになった。従って界面の状態密度をより詳細に検討することは非常に重要な問題でもある。

[1] 界面が乱れた効果がいかに表面の状態密度に影響を与えるのかを明確にする。この研究に関してはいくつかのアプローチが他のグループでも始められているが、乱れの具合が原子尺度の時にいかなる影響が及ぶのかを研究する。

[2] これまでのトンネル効果の理論は自由電子モデルに基づいてきたがここでは電子相関の効果のはいった  $t-J$  モデル用いる。高温超伝導体でのバンド構造酸素の含有量がゼロバイアスコンダクタンスのピークにいかなる影響を与えるのかを明確にする。

[3] 磁性不純物、磁性界面、磁場の効果が状態密度にいかなる影響を与えるのかを検討する。

#### (2) $d$ 波超伝導におけるジョセフソン効果

一方  $d$  波超伝導体のジョセフソン効果の研究では、 $d$  波と  $d$  波の超伝導接合系を流れるジョセフソン電流が結晶軸の方向にいかに依存するのかを調べてきた。特に  $d$  波/ $d$  波接合系では、温度の低下にともなって超伝導電流が減少するような従来のジョセフソン効果ではみられない奇妙な効果も存在することが明らかになった。この現象は界面に形成される準粒子状態と密接に関係している。

[1] 界面でのペアポテンシャルの空間変化、時間反転対称性の破れがいかにジョセフソン電流に影響を与えるのか明確にする。また界面が乱れている場合にどのような影響がジョセフソン電流に及ぶのかも検討する。

[2] これまでのジョセフソン効果は直流に限られていたが、交流も取り扱えるように理論の拡張を行う。

以上の当初立てた研究目標は、ほぼ全面的に達成された。

### 研究成果

異方的超伝導体では準粒子が運動する方向に依存して異なるペアポテンシャルを感じるという顕著な効果が現れている。このような効果は界面、表面に関連した現象すなわちトンネル効果、ジョセフソン効果において顕著に現れる。我々は数年前に異方的超伝導体に対して適用可能なトンネルスペクトロスコーピーの理論を提唱して、酸化物超伝導体のトンネル効果 (STS、常伝導・超伝導接合系) の実験で頻繁に現れるゼロバイアスコンダクタンスの起源を解明した。異

方的な超伝導体のトンネル効果の実験では単にペアポテンシャルの振幅が観測されるのではなくて位相の効果が現れていることが明らかになった。現在では実験技術も進歩して良質な薄膜を用いた実験では理論予測と一致したゼロバイアスピークの存在が確認されている。このゼロバイアスピークの研究の波及効果は広く多くの派生的問題が掘り起こされることとなった。理論的な取り扱いで分けるのであれば準古典近似の範囲でまず調べてみるべき問題そして強相関の性質をより真剣に取り入れた方法( $t-J$ モデル)で議論する問題にわかれる。

#### (1) 酸化物超伝導体のジョセフソン効果と準粒子電流

異方的超伝導体のジョセフソン効果は Wollman の実験でもしられているようにペアポテンシャルの持っている対称性を決定する時に非常に重要であった。一方異方的超伝導体のジョセフソン効果の研究をよりマイクロな視点から理論的に進める上でアンドレーフ反射の性質を解明することは不可欠である。この点を念頭におきながら我々は  $d$  波超伝導体のジョセフソン効果の基礎的性質をこれまで解明してきた。

1. クーパーペアの入射方向に依存してジョセフソン電流の符号が決定されること

2. 界面(表面)に形成される共鳴状態(ゼロエネルギー状態、トンネル効果において重大な影響を与える)が低温において深刻な影響を与えること

が明らかになってきた。そのために BCS 型超伝導体では予測不可能な異常な温度依存性が存在する。一方  $d$  波超伝導体では結晶軸と界面の法線ベクトルのなす角度に依存して表面でペアポテンシャルの大きさが小さくなったり界面近傍では  $s$  波の成分が誘起されることも知られている。そこで我々は最近ペアポテンシャルの空間変化と  $s$  波の成分がいかに関与してジョセフソン電流に影響を与えるのかを解明した。さらに表面の乱れの効果がいかに低温で増大される異常な温度依存性を抑制するのかも解明した。また超伝導体絶縁体超伝導体接合系での準粒子の電流の効果も研究した。そこでは接合の形状に依存して負性抵抗が現れることが解明された。さらに交流ジョセフソン電流と共に統一的に理解することを目指している。

#### (2) $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ の超伝導状態とトンネル効果

最近の研究によれば  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導状態は異方的特に奇パリティの非ユニタリー状態の可能性が Sigrist らによって指摘されている。そこでこのような場合にトンネル効果でどのようなことが起こるのかを調べた。ゼロエネルギーでのピークがどのような方位で観測されるのかを整理することは  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  の超伝導状態の対称性を決定する上でやはり重要な役割を果たす。このような分類の仕方は  $\text{UPt}_3$  の超伝導状態を解明する場合にも不可欠であるまた  $s$  波超伝導体/ $p$  波超伝導体/ $s$  波超伝導体接合系におけるジョセフソン電流において異常な温度依存性が現れることがあきらかになった。

#### (3) $t-J$ モデルに基づいた酸化物超伝導体界面の研究

準古典近似に基づいた理論はトンネル分光の基本的な考え方に対する指針を与えているが、実際の接合系ではたとえば表面での原子尺度でのラフネスの効果が存在しているし、また酸化物超伝導体ではコヒーレンス長が原子尺度に比べて十分長くはない。準古典近似では取り扱えない効果を拡張型ハバードモデルの平均場の計算で行った。この計算ではこうしたペアの持つ非局所性が自然に取り入れられている点で意義がある。準粒子の状態密度は表面の幾何学的構造、フェルミ面の形状に鋭敏に依存することが明らかにされた。さらに見かけ上  $[110]$  構造をしている表面でもゼロエネルギー状態が消滅したり見かけ上  $[100]$  構造をしている表面でも場所によってはゼロエネルギー状態が存在することを示した。さらに酸化物超伝導体のより現実的なモデルであ

る  $t$ - $J$ モデルを用いることで同様の結果を得た。また現実的なパラメータ領域で界面に  $s$  波のペアポテンシャルが誘起されることがあることも解明された。

#### 研究の成果その後

本研究は  $d$  波超伝導の持つ特徴を界面現象を通して明らかにするものであり、それ自体新しく低温物理、固体物理として重要な問題である。また高温超伝導体を用いたジョセフソン接合を作ることは、実用化の上で不可欠ではあるがそうした問題に際しても重要な貢献ができるものと確信している。超伝導の界面の物理はバルクの物理に比べておこなわれているが最近ようやくアンドレーフ反射のはたす役割が従来の BCS 超伝導体の量子ポイントコンタクトなどによって明らかにされつつある。しかし異方的な超伝導体の界面現象の研究はまだ不十分である。我々がこれまで発展させさらにここでめざしている研究は新分野の開拓であり、量子力学固有の干渉効果を解明するものでもある。さらに強相関伝導系のトンネル効果といった大きな分野も本研究のさらなる発展として控えている。特に超伝導体界面などにおける反強磁性状態との共存は非常に興味ある問題である。

#### 発表論文リスト

- [1] Theory of Josephson effects in anisotropic superconductors  
Y. Tanaka and S. Kashiwaya.  
Phys. Rev. B, 56, 892-912, 1997
- [2] Theory of Josephson effect in superconductor/ Ferromagnetic insulator / superconductor junction  
Physica C Vol. 274, Nos. 3,4, pp.357-363, 1997  
Y. Tanaka and S. Kashiwaya.
- [3] Spatially continuous zero bias conductance peak on (110)  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  surface  
Phys. Rev. B, Vol. 55, No. 22, pp.14757-14760, 1997  
L. Alff, H. Takashima, S. Kashiwaya, N. Terada, Y. Tanaka, M. Koyanagi and K. Kajimura.
- [4] Theory of local density of states in  $d$ -wave superconductor with rough interface  
Advances in superconductivity, Vol. 9, pp.307-310, 1997  
Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Yamashiro, and S. Kashiwaya
- [5] Theory of quasiparticle properties in grain boundary  $d$ -wave superconductor  
Advances in superconductivity, Vol. 9, pp.311-314, 1997  
Y. Tanaka, and S. Kashiwaya
- [6] Tunneling spectroscopy of (100) (110) and (001) oriented  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  and  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$  surfaces  
Advances in superconductivity, Vol. 9, pp.49-52, 1997

- L. Alff, H. Takashima, S. Kashiwaya, N. Terada, T. Ito, K. Oka, M. Koyanagi, and Y. Tanaka
- [7] Quasi-Particle tunneling in  $d/I/d$  junctions  
 Physica C, Vol. 282-287, pp.2405-2406, 1997  
 S. Kashiwaya, Y. Tanaka, S. Ueno, M. Koyanagi and K. Kajimura
- [8] Effect of atomic scale roughness at the surface of  $d_{x^2-y^2}$ -wave superconductor  
 Physica C, Vol. 282-287, pp.1857-1858, 1997  
 Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Yamashiro and S. Kashiwaya
- [9] Theory of d.c. Josephson effect in  $d$ -wave superconductor/normal metal/ $d$ -wave superconductor junction  
 Physica C, Vol. 282-287, pp.1855-1856, 1997  
Y. Tanaka and S. Kashiwaya
- [10] Tunneling spectroscopy and symmetries in YBCO and NCCO, Materials and  
 Physica C, Vol. 282-287, pp.1477-1478, 1997  
 S. Kashiwaya, Y. Tanaka, M. Koyanagi, L. Alff, H. Takashima, N. Terada, T. Ito, K. Oka, S. Ueno and K. Kajimura
- [11] Theory of the quasiparticle spectra around a vortex in the two-dimensional  $t - J$  model  
 Physica C, Vol. 282-287, pp.1521-1522, 1997  
 A. Himeta, M. Ogata, Y. Tanaka and S. Kashiwaya
- [12] Orientation dependence of tunneling spectra in YBCO and NCCO  
 Physica C, Vol. 282-287, pp.1485-1486, 1997  
 L. Alff, H. Takashima, S. Kashiwaya, T. Ito, K. Oka, Y. Tanaka and M. Koyanagi.
- [13] Theory of tunneling spectroscopy in superconducting  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$   
 Phys. Rev. B, Vol. 56, pp.7847-7850, 1997  
 M. Yamashiro, Y. Tanaka, and S. Kashiwaya
- [14] Theory of quasiparticle properties around the vortex core in the  $t - J$  model  
 Journal of Physical Society of Japan, Vol. 66, pp.3367-3370, 1997.  
 A. Himeta, M. Ogata, Y. Tanaka and S. Kashiwaya
- [15] Theory of tunneling conductance of STS around magnetic impurity in superconductor,  
 Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 47, pp.1043-1045, 1997.  
Y. Tanaka, S. Kashiwaya
- [16] Theory of Josephson effect and current carrying quasiparticle states in  $d$ -wave superconductors  
 Physica C, Vol. 293, pp.101-104, 1997  
Y. Tanaka and S. Kashiwaya,
- [17] Theory of tunneling conductance for normal metal/ insulator/ triplet superconductor junction  
 Physica C, Vol. 293, pp.239-243, 1997  
 M. Yamashiro, Y. Tanaka, Y. Tanuma and S. Kashiwaya
- [18] Theory of local Density of states in  $d$ -wave superconductors around rough surfaces  
 Physica C, Vol. 293, pp.234-238, 1997

- Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Yamashiro, and S. Kashiwaya
- [19] Local density of states of the quasiparticles of  $d_{x^2-y^2}$ -wave superconductor around the rough surfaces  
Physical Review B, Vol. 57, No. 13, 7997-8008, 1998  
Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Yamashiro and S. Kashiwaya
- [20] Theory of Josephson effect in  $d$ -wave superconductor junctions  
Physics and Applications of Mesoscopic Josephson Junctions, ed. by H. Ohta and C. Ishii  
Universal Academy Press, Inc, Tokyo, 1997  
Y. Tanaka and S. Kashiwaya
- [21] Tunneling spectroscopy of superconducting  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$   
Physical Review B, Vol. 57, No. 14, pp.8680-8686, 1998  
S. Kashiwaya, T. Ito, K. Oka, S. Ueno, H. Takashima, M. Koyanagi, K. Kajimura, and Y. Tanaka
- [22] Theory of quasiparticle tunneling at the interface of the normal metal/ insulator / triplet superconductor junction  
J. Phys.Soc. Jpn. Vol. 67, No. 9, pp.3224-3233, 1998  
M. Yamashiro, Y. Tanaka, Y. Tanuma and S. Kashiwaya
- [23] Theory of local density of states of  $d_{x^2-y^2}$ -wave superconducting state near the surfaces of  $t - J$  model  
J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 67, No. 4, pp.1118-1121, 1998  
Y. Tanauma, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya.
- [24] Influences the broken time-reversal symmetry on d.c. Josephson effects in  $d$ -wave superconductors  
Physical Review B Vol. 58, No.6, pp. R2948-R2951, 1998  
Y. Tanaka and S. Kashiwaya