

〔研究〕

高温超電導体と走査トンネル分光

High Temperature Superconductors and Scanning Tunneling Spectroscopy

柏谷 聡 小柳 正男
S. KASHIWAYA M. KOYANAGI

We have developed the low temperature scanning microscope (LT-STM) under the high magnetic field for spectroscopic study of the high temperature superconductors. The performance of the LT-STM were evaluated through observation of BCS state density and Abrikosov vortex lattice in NbN thin films. We have elucidated theoretically that the various spectra reported in HTS such as U-shape, V-shape and Zero-Bias-Conductance-Peak (ZBCP) are attributable to the d-wave symmetry of the superconducting order parameter. Along this theory, we observed the spatially continuous and uniform ZBCP's in YBaCuO(110) surface. We also studied the bulk NdCeCuO, but did not observe ZBCP's in any direction suggesting (extended) s-wave symmetry. The Josephson effect between d-wave superconductors are studied theoretically.

§ 1 はじめに

超電導現象が今世紀の最初に発見されて以来、多くの超電導体では、電子-格子相互作用を媒介とする引力が、電子間のクーロン相互作用の斥力にうちかって電子対(クーパー対)を形成し、電子対がボーズ凝縮する事により超電導が実現していると考えられてきた。このような場合は、クーパー対の波動関数が原点で最大の振幅を持ち、かつ電子対の相対運動の波数に依存しない、等方的なs波の超電導状態が実現されている。ところが、電子間の相互作用が強くなると、電子間の斥力ポテンシャルを小さくするために、s波ではなくて、何らかの異方的な超電導体が発現される可能性が高くなる。酸化物超電導体は絶縁体にホールをドーブしたCu-O面で超電導が発現していることから、理論的にはかなり初期の段階からd波対称性の可能性が示唆されていた。d波状態は5つのタイプの対称性が考えられるが、高温超電導体では $d_{x^2-y^2}$ 波の対が実現している可能性が高い。この対称性の性質は、ペアポテンシャルの振幅がa軸およびb軸方向で最大となり、これと45度をなす4つの方向ではノードとなっていること、およびペアポテンシャルの位相がa軸方向とb軸方向で異なる、という2点である。この性質をうまく利用した位相検知型の実験により、ペアポテンシャルの内的位相の存在が実験的に

確認されるにいたり、酸化物超電導体がd波対称性を持つことがコンセンサスとなってきた。それでは準粒子トンネル効果を用いる走査型顕微鏡の観察により、d波の超電導体ではどのような新しい現象が期待されるのであろうか。またそのような現象はデバイス物理にどのような効果をおよぼすのであろうか？そういう観点から理論的および実験的なアプローチを行った。

§ 2 低温STMの作製と金属超電導体のトンネル分光

この研究は低温STMを独自開発し、その計測能力を実際に確認することから始まった。性能の確認には性質の分かっていない酸化物超電導体よりも、表面がより安定で素性の良く分かった金属超電導体を用いる事が望ましい。また T_c も装置の測定温度4.2Kより十分高い必要がある。その観点からNbN薄膜を用いたトンネル分光の測定を行った。

Fig.1には4.2Kで観察した超電導ギャップおよびBCS理論にフェルミ分布によるぼけの効果を入れた理論曲線を示す²⁾。両者の一致が非常に良いことが分かる。この結果は、装置自体の分光測定の分解能の高さを示すと共に、BCS理論がミクロな観点から実証されたことを意味する。

KEY WORDS : 高温超伝導体, 低温走査トンネル分光, d-波超伝導, 異方性超伝導トンネル効果, ジョセフソン効果

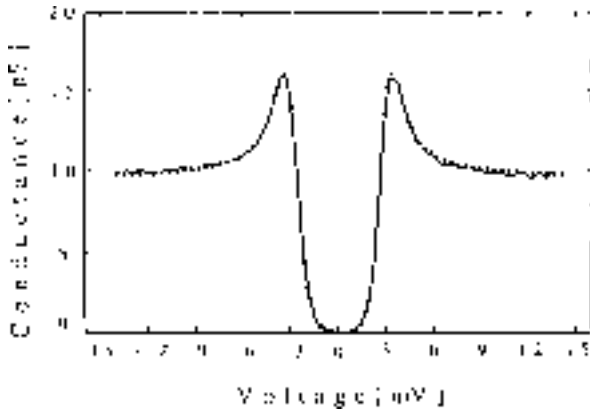


Fig.1 Comparison between tunneling spectrum of NbN (solid line) and the BCS curve ²⁾.

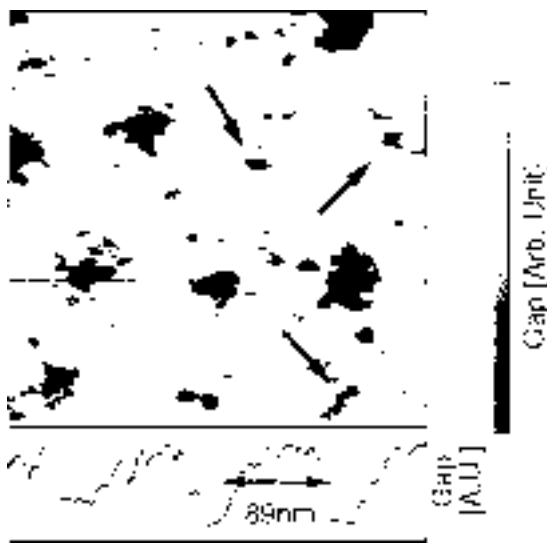


Fig.2 Spatial distribution of superconducting gap in the NbN thin film under the magnetic field ⁷⁾. Small gap regions correspond to the positions of vortex quantum.

さらにNbN薄膜上にAuを蒸着し、超電導近接効果によりAu薄膜中に誘起された超電導ギャップの存在を確認した¹⁶⁾。このギャップ構造はNbNとAuのフェルミ波長の違いを考慮した理論計算と非常に良く一致することが示された。STMのもう一つの重要な能力は空間走査能力である。この点に関しては、低温(4.2K)においてグラファイトの原子像を観察し、NbN薄膜の超電導ギャップ空間依存性を観察する事により、空間分解能を持った分光、すなわち scanning tunneling spectroscopy (STS)としての動作を確認した。Fig.2は0.3Tの磁場を印可することにより観察された超電導ギャップの空間依存性である。局所的にギャップが小さくなっている領域が存在し、NbN薄膜に侵入した磁束量子構造を反映している⁷⁾。

§ 3 異方的トンネル効果の理論

超電導を特徴付ける最も重要な物理量であるオーダパラメータ(ペアポテンシャル)は、超電導体中で準粒子の感じるポテンシャルと見なすことができる。一般にペアポテンシャルは、 $\Delta(x, x')$ という形で2つの座標の関数として表される。一様な超電導体においては、並進対称性を仮定することにより相対座標 $x-x'$ のみの関数となりさらに、相対座標に関してフーリエ変換した関数 $\Delta(k)$ は一般に波数ベクトル k に依存する。この k 依存性がない場合が従来BCS理論で議論されてきたs波の超電導体に対応する。それに対して、 $d_{x^2-y^2}$ 波対称性のペアポテンシャルは、正方格子上では、 $\Delta(k)=\cos kx - \cos ky$ と表せる。ペアポテンシャルは、フェルミ面上で符号変化して4カ所(2次元では4本の線上)でゼロになる特徴がある。簡単のためにフェルミ面が丸く、クーパー対はフェルミ面近傍の電子から作られているとすれば、ペアポテンシャルは $\Delta(k)=\Delta_0 \cos 2Q$ と表せる。ここで Q は電子の持つ波数ベクトル k と結晶の a 軸方向のなす角である。

我々はs波超電導体について確立された表式であるBTK表式を2次元に拡張し、ペアポテンシャルの異方性を導入することにより異方的超電導体のコンダクタンスの理論を導いた^{19,21,23,28,30)}。まず常電導体側から絶縁体への入射電子を考えると、その電子のたどる過程は、4種類ある。

1. ホールとして反射される(Andreev反射),
2. 電子として反射される(ノーマル反射),
3. 電子の準粒子(ELQ)として超電導側に通り抜ける,
4. ホールの準粒子(HLQ)として超電導側に通り抜ける。

反射、透過に際してホールの準粒子が現れることが、超電導を含む接合系の最大の特徴である。各過程の確率の保存があるために、これらの過程のうち、Andreev反射の確率振幅 $|a(E,Q)|^2$ と通常反射の確率振幅 $|b(E,Q)|^2$ を各入射角度ごとに計算することで実効電流を求められる。Andreev反射はホールの流れであるために実効電流を増加させるのに対して、通常反射は減少させる特徴がある。BTK表式によれば、十分低温の微分コンダクタンスは $\sigma(E)=1+|a(E,Q)|^2-|b(E,Q)|^2$ で与えられる。ここで $a(E,Q)$, $b(E,Q)$ はボゴリューボフ方程式を解くことによって求められる。注意すべき事はELQとHLQが異なる波数を持つことである。ペアポテンシャルが異方的であることの効果はこれらの準粒子が感じる実効ペアポテンシャル Δ_+ と Δ_- が異なることにより導入される。その結果正規化された微分コンダクタンスは、コンダクタンスが位相を含む形で記述

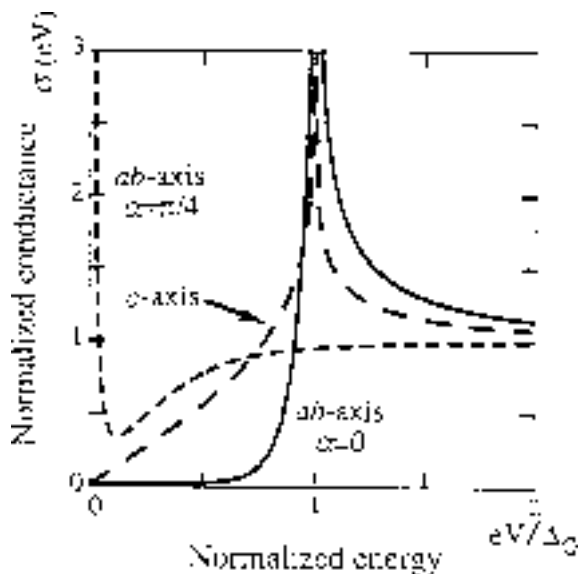


Fig.3 Theoretical angle dependence of the tunneling spectra in d-wave superconductors¹⁹⁾.

されている。すなわち、コンダクタンスの形は Δ_+ と Δ_- の振幅だけではなく、位相にも依存する。特にd波の場合で、a軸が界面に対して45度傾いているような場合、 Δ_+ と Δ_- はあらゆる角度の入射に対して π だけ位相が異なる状態となる。この場合、位相の効果はゼロバイアス異常という形で観測されることがわかる。このゼロバイアスレベルのピークは表面にゼロエネルギー状態が形成されたことを反映しており、その状態を介して電流量が増加することにより現れる。実際、バリアーの高い極限で、状態密度とコンダクタンススペクトルが一致することは解析的に証明できる。d波超電導体について計算されたトンネルスペクトルをFig.3に示す。方位によりゼロバイアス異常が観測されることが分かる。これらの理論はトリプレット超電導体にも拡張され、やはりトンネルスペクトルが強い方位依存性を示すことが証明されている⁴⁹⁾。

一方現実の表面には必ず乱れが存在する。この乱れは表面での乱反射を誘起し、理想的な表面とは異なる準粒子状態を作り上げる。準古典グリーン関数を用いた最近の計算では、表面でのdiffusiveな散乱(乱反射)は、準粒子の干渉効果を乱すためにZESの形成を抑制することを示している。しかしこの計算は高温超電導体において特に顕著に現れる原子尺度のラフネスと電子相関の効果を考慮していない。これらを取り扱うためにはハバードモデルやt-Jモデルといったラティスマデルでの扱いが望ましい。実際これらのモデルを用いて計算を行った結果は、やはり界面の方向によりゼロエネルギー状態が形成されるという結果を得ている^{39,51,52)}。さらに原子オーダー量子干渉効果の存在も確認され、その結果、凹凸によりしかも原子オーダーで局所状態密度が変化するという結果を得る。

§ 4 酸化物超電導体の分光実験

酸化物超電導体の分光実験はかなり多くのグループで実験が行われ、様々なスペクトルが報告されている。おおよそ分類すると、BCS的なギャップ構造、d波的なV字型のギャップ、それからゼロバイアス異常である。問題はどのスペクトルが最も本質的であり、それを再現性良く得ることができるかという点であった。上記理論により、我々が着眼したのはゼロバイアス異常であり、実際これらのスペクトルが非常に広範にわたって観測できることは分かっていた。さらに酸化物超電導体での電子ドープとエレクトロンドープ系での対称性の違いを明らかにする必要がある。実際予備的な実験では、YBCO薄膜上でc軸方向ではゼロバイアス異常が見えないが、a軸方向では良く観測できること、またこのゼロバイアス異常が磁場応答する事などが分かってきた^{14,19)}。これらの実験の精度を向上させるため、高品質配向膜を用い、STM/STS以外に他の分析手法を組み合わせることにより、表面配向を正確に同定し、出きる限り異方性の効果を明確に抽出する実験を行った。サンプルはSrTiO₃の基板の上にスパッタ法により成長させたYBCO膜を使用し、4段階の手段を踏んで、配向評価を行っている

1. XRD(X線解析)で他の配向成分が存在しないことを確認。
2. RHEED(高速反射電子線回折)により表面平坦性と配向性を観察(XRD)により確認された配向成分が表面に出ていることを確認。
3. AFM(原子間力顕微鏡)により表面形状を確認(表面には段差はあるが、テラス状の平な部分が存在してその部分では確かに求める配向になっていることを確認)。
4. STMによりAFMとの対応を確認。(RHEEDにより配向のわかっているテラス部分をみていることを確認)。

これらのサンプル表面におけるSTS(走査トンネル分光)による分光結果は、[110]表面に対して表面の膜質を向上させることで、90%以上の領域でZBCPが再現性よく観測できることが明らかになった(Fig.4)。これに対して[100]表面では膜の条件が十分には絞込みせず、XRDで観測して高品質に見える膜でも、RHEEDでみると表面付近の配向が乱れている場合があることがわかった。そのために探針の移動させ、データを統計的に処理すると、ギャップ構造(40%)、ZBCP(30%)、半導体的スペクトル(30%)といったばらついた特性が観察される。この面でのZBCPは、表面の配向が[100]から少しでもずれば、あるいは

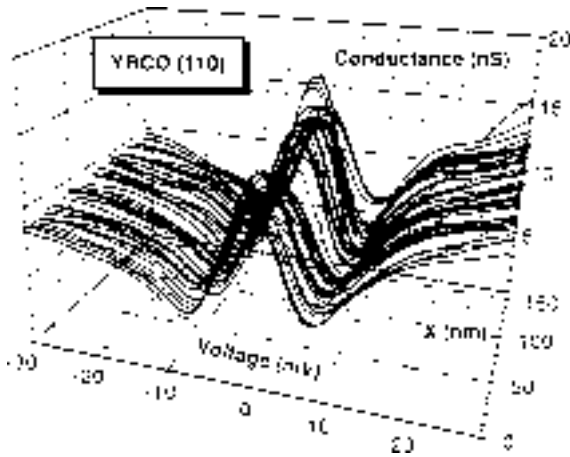


Fig.4 Tunneling spectra on the YBCO(110) surface: sequential 50 point data in space are shown. Zero Bias anomalies are observed uniformly in space⁴⁴⁾.

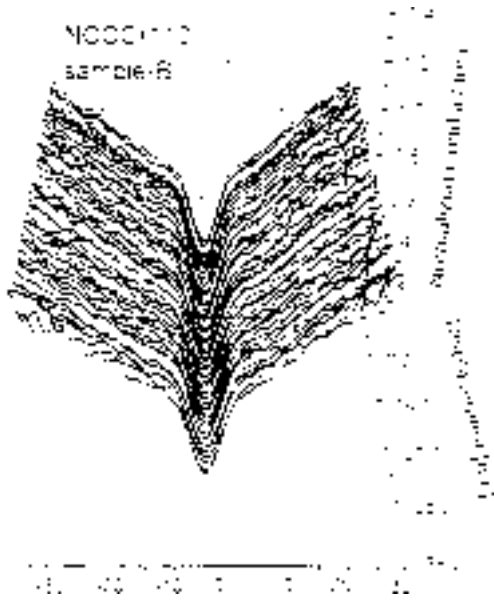


Fig.5 Tunneling spectra on the NCCO(110) surface. Gap structures are observed uniformly in space⁵⁵⁾.

前節に述べたようにラフネスによっても現れるため、現状の実験では避けがたい。このことを差し引けば、上記の結果はおよそ $d_{x^2-y^2}$ 波とコンシステントであると結論できる^{49,52)}。さらにエレクトロンドープ系のNCCOについて行われた同様の実験は、どの配向に関してもゼロバイアス異常が観察されず(Fig.5)、理論と照らし合わせて、ペアポテンシャルがノードレスであることが結論できる⁵⁵⁾。

§ 5 ジョセフソン効果

上記のようにd波超電導体界面に形成されるゼロエネルギー状態の存在は理論および実験的に明らかにされた。同様の状態はd波同士の接合界面にも存在すると考えられる

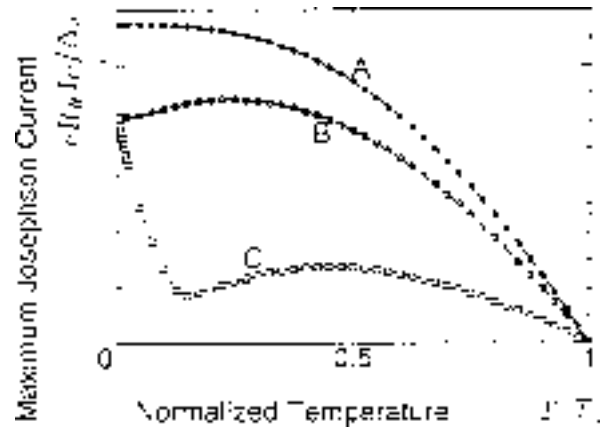


Fig.6 Theoretical temperature dependence of Josephson critical current in d-wave superconductors³³⁾.

ため、ジョセフソン効果にも多大な影響を与えることが予想される。その影響を理論的に予測するために、2つのシングレット(一重項)超電導体の接合系を流れるJosephson電流の一般式を、ペアポテンシャルの空間変化を無視した範囲内で導いた。用いた手法は、古崎、塚田の、1次元のBCS波超電導体に対して成功を収めたAndreev反射の係数による理論を、異方的超電導体(ここでは2次元を考える)に拡張した^{33,48)}。この理論にはこれまでのs波の超電導のJosephson効果の理論として提出された多くの表式がその極限として含まれ、1)多重Andreev反射の効果、2)入射角に依存するJosephson電流の符号の変化、3)界面にゼロエネルギー状態が形成される効果などが完全に取り入れられているのが特徴である。

得られた顕著な効果は、低温に行くにしたがい、Josephson電流が $1/T$ に比例して増加するという、従来のアンベカオカーバラトフ表式とは全く異なった温度依存性である。さらに接合の配向に依存して、Josephson電流が温度の低下とともに非単調なふるまいをすることもある事も示された(Fig.6)。これらの効果は、ゼロバイアス状態が界面に形成される場合、その状態を介したジョセフソン電流がs波で得られていた結果と全く異なる温度依存性を持つことによる。こうした成果は高温超電導体を用いたデバイスを作成する上で大変重要であり、現在実験データとの詳細な対応を現在検討している。

§ 6 まとめ

異方的な超電導体のトンネル効果は、単にs波超電導体にトンネル効果で得られたBCS状態密度の観察という概念を越え、様々な新しい物理が存在することが明らかになった。そこに介在するのは2つの対称性の破れである。

一つはペアポテンシャルの回転対称性の破れ,もう一つは表面の存在による空間並進対称性の破れである。この2つの効果が今まで全く知られていなかった量子干渉効果を生みだした。その周辺にはまだ明らかにされていない物理が多く存在し,今度さらに新しい発展が期待される。さらにこれらの効果をデバイスに応用していくことにより,新機能デバイスの実現が可能になると期待している。

謝 辞

本研究は多くの方々との共同研究により行われました。梶村皓二所長にはプロジェクトの立ち上げ時から全面的なご協力を頂きました。清水肇基礎部長にもひとかたならぬ御支援を受けました。田仲由喜夫名古屋大助教授および田仲研の学生達には理論面で包括的な協力を仰ぎました。試料は松田瑞史,寺田教男,伊藤利充,岡邦彦,東海林彰他の方々に提供していただきました。測定にあたっては,高島浩,上野滋弘,L. Alffらの協力を得ました。以上の方々(敬称略)に心から感謝いたします。

参考文献・論文発表

- 1) M.Tanaka, S.Takebayashi, K.Sawano, S.Kashiwaya, F.Hirayama, M.Koyanagi : "Scanning Tunneling Spectroscopic Studies of Quench and Melt Growth (QMG) YBaCuO Crystals at 4.2 K", Physica C 185-189 (1991) 1909.
- 2) S.Kashiwaya, M.Koyanagi, A.Shoji, M.Matsuda, H.Shibata : "Scanning Tunneling Spectroscopic Studies of Superconducting NbN Single Crystal Thin Films at 4.2 K", IEEE Trans. on Magn. MAG-27 (1991) 837.
- 3) S.Kashiwaya, M.Koyanagi, A.Shoji, M.Matsuda, H.Shibata, K.Kajimura : "Vortex-core-like structure observed on a surface of superconducting NbN thin film by LT-STM", Physica B169 (1991) 465-466.
- 4) M.Koyanagi, S.Kashiwaya, S.Kojiro, H.Akoh, A.Shoji, M.Matsuda, F.Hirayama, K.Kajimura : "Study of Superconductivity Using Low Temperature Scanning Tunneling Microscope", 「第10回新機能素子技術シンポジウム」, (1991) 67.
- 5) M.Koyanagi, S.Kashiwaya, S.Kojiro, H.Akoh, K.Kajimura : "Study of Y-Ba-Cu-O/Au Junction using LTSTS", Physica C 185-189 (1992) 2569.
- 6) S.Kashiwaya, M.Koyanagi, A.Shoji : "LT-STMによる近接効果の研究", 「信学技報」 SCE 92-33 (1992) 59-64.
- 7) S.Kashiwaya, M.Koyanagi, A.Shoji : "Low temperature scanning tunneling spectroscopic observation of vortex in a NbCN thin film", Appl. Phys. Lett. 61 (1992) 1847.
- 8) M.Koyanagi, S.Kashiwaya, S.Kojiro, H.Akoh, M.Matsuda, F.Hirayama, K.Kajimura : "Study of YBCO/Au surface using Low-Temperature Scanning tunneling spectroscopy", Jpn. J. Appl. Phys. 31 (1992) 3525.
- 9) M.Tanaka, S.Takebayashi, S.Kashiwaya, F.Hirayama, M.Koyanagi : Study of YBa₂Cu₃O₇ Superconductor by Low Temperature Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy, Jpn. J. Appl. Phys. 32, 35 (1993.1).
- 10) M.Koyanagi, S.Kashiwaya, A.Shoji, H.Akoh, S.Kojiro, M.Matsuda, F.Hirayama, K.Kajimura : "Study of Proximity Effect in Superconductor/Au by using Scanning Tunneling Spectroscopy", IEEE Trans. Appl. Superconductivity 3 (1993) 1298.
- 11) M.Koyanagi, S.Kashiwaya, M.Matsuda, A.Shoji, K.Kajimura : "Study of electronic properties of PrBa₂Cu₃O_x thin film on the a-axis oriented YBCO thin film", Program and Extenda Abstracts of ISEC, (1993) 208.
- 12) M.Koyanagi, S.Kashiwaya, M.Matsuda, K.Kajimura : "Possible origin of the long range proximity effect in YBa₂Cu₃O_x/PrBa₂Cu₃O_y junctions:Electronic properties of a-axis oriented PrBa₂Cu₃O_y films on YBa₂Cu₃O_x studied by STS", HTSED workshop '94 Co-sponsored by FED and NIST May 26-28, (1994 in Whistler, British Columbia, Canada).
- 13) M.Koyanagi, S.Kashiwaya, M.Matsuda, A.Shoji, K.Kajimura : "Study of electronic states in PBCO thin film on a-axis oriented YBCO film", Physica B 194-196 (1994) 2155.
- 14) S.Kashiwaya, M.Koyanagi, M.Matsuda, K.Kajimura : "Study of zero-bias conductance peak in YBCO films by LT-STM", Physica B 194-196 (1994) 2119.
- 15) S.Kashiwaya, M.Koyanagi, H.Takashima, M.Matsuda, K.Kajimura : "Magnetic Responses of Zero-bias Conductance Peaks by LT-STM", Advances in Superconductivity VI, [Springer-Verlag Tokyo, 1994], 73.
- 16) S.Kashiwaya, M.Koyanagi : "Proximity Effect in NbC_{0.3}N_{0.7}/Au Bilayers Observed by Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy", J.Phys. Soc. Jpn. 63

- (1994) 3098.
- 17) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, H.Takashima, K.Kajimura: "Evidence for d-wave symmetry in high-Tc superconductors based on tunneling theory and experiment", *Physica C*, 235-240 (1994) 1911.
 - 18) M.Koyanagi, S.Kashiwaya, M.Matsuda, H.Takashima, K.Kajimura : "Low-temperature scanning tunneling spectroscopy of a-Axis-Oriented PrBa₂Cu₃O_y films on YBa₂Cu₃O_x", *Jpn.J.Appl.Phys.vol.34* (1995) 89.
 - 19) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, H.Takashima, K.Kajimura : "Origin of Zero bias conductance peaks in high -Tc superconductors", *Phys. Rev.B51* (1995) 1350.
 - 20) 田仲由喜夫, 柏谷聡 : " d 波超電導体とトンネル効果 ", 「応用物理」, 64 巻 4 号 ,(1995) 344-348.
 - 21) Y.Tanaka, S.Kashiwaya : Theory of Tunneling Spectroscopy of d-Wave Superconductors, *Physical Review Letters*, vol.74, No.17 (1995) 3451-3454.
 - 22) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, H.Takashima, K.Kajimura: "Symmetry of pair potential observed by tunneling spectroscopy", *Advances in Superconductivity VII* (1995) 45-48.
 - 23) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, K.Kajimura : "Bound States in Superconductors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 34 (1995) 4555-4558.
 - 24) Y.Tanaka, S.Kashiwaya, H.Takayanagi : "Theory of Superconducting Quantum Dot under Magnetic Field", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 34 (1995) 4566-4568.
 - 25) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, K.Kajimura : "Tunneling Effect in d-wave superconductors", *Extended Abstracts of ISEC' 95* (1995) 503-504.
 - 26) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, K.Kajimura : "Tunneling Effect in d-wave superconductors", *Extended Abstracts of 14th Symposium on Future Electron Device*, (1995) 208-211.
 - 27) 柏谷聡, 田仲由喜夫, 小柳正男, 梶村皓二 : " 酸化物超電導体分光実験におけるゼロバイアス異常 (異方的超電導体のトンネル分光と表面状態) ", 「固体物理」, 30 巻 (1995) 1034-1041.
 - 28) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, K.Kajimura : "Tunneling spectroscopy of d-wave superconductors", *J. Phys. Chem. Solids*, 56, 12 (1995) 1721-1723.
 - 29) Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Josephson effect in dx₂-y₂-wave superconductors", *J. Phys. Chem. Solids*, 56, 12 (1995) 1761-1762.
 - 30) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, K.Kajimura : "Theory for tunneling spectroscopy of anisotropic superconductors", *Phys. Rev. B* 53, 5 (1996) 2667-2676.
 - 31) Y.Tanaka, S.Kashiwaya : "Local density of states of quasiparticles near the interface of nonuniform d-wave superconductors", *Phys. Rev. B* 53, 14 (1996) 9371-9381.
 - 32) Y.Tanaka, S.Kashiwaya : "Theory of tunneling effect in d-wave superconductors", *QUANTUM COHERENCE AND DECOHERENCE*, (1996)pp.183-186.
 - 33) Y.Tanaka, S.Kashiwaya : "Theory of the Josephson effect in d-wave superconductors", *Phys.Rev. B* 53, 18 (1996) 11957-11960.
 - 34) Y.Tanaka, S.Kashiwaya : "Josephson effect in dx₂-y₂-wave superconductors", *Advances in Superconductivity* 8 (1996) 259-262.
 - 35) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, K.Kajimura : "Tunneling spectroscopy of d-wave superconductors", *Advances in Superconductivity* 8 (1996) 263-266.
 - 36) M.Chihaya, K.Miyamoto, M.Kuroda, S.Kashiwaya, M.Koyanagi : "Oxygen Annealing Effect of YBCO thin film", *Advanced in Superconductivity* 7 (1996.8) 1063-1066.
 - 37) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, K.Kajimura : "Tunneling effects of d-wave superconductors International Symposium", *Frontiers of High TC superconductivity*, Morioka, October 27-29 1996. *Physica C* 262 (1996) 238-240, .
 - 38) Y.Tanaka, S.Kashiwaya : "Josephson effect and quasiparticle states in d-wave superconductors", *Spectroscopic studies of Superconductors*, part of SPIE's Photonics West, '96, Symposium, 29 January-1 February 1996, San Jose, US.N, Proceeding of the International Society for optical engineering, [Spectroscopic studies of superconductors], Vol. 2696, 468-476.
 - 39) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, K.Kajimura : "Tunneling spectroscopy of anisotropic superconductors", *Spectroscopic studies of Superconductors*, part of SPIE's Photonics West, '96, Symposium, 29 January-1 February 1996, San Jose, USA, Proceeding of the International Society for optical engineering, [Spectroscopic studies of superconductors], Vol. 2696, 477-485.
 - 40) Y.Tanaka, S.Kashiwaya : "Theory of Josephson effect

- in grain boundary d-wave superconductors", LT-21, Prague(Czech Republic), Czechoslovak Journal of Physics Vol .46 (1996) 1063.
- 41) S.Kashiwaya, L.Alf, H.Takashima, N.Terada, T.Ito, K.Oka, Y.Tanaka, M.Koyanagi, S.Ueno, K.Kajimura: "Tunneling spectroscopy and symmetries in YBCO and NCCO", Physica C 282-287 (1997) 1477.
- 42) S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi, S.Ueno, K.Kajimura: "Quasiparticle tunneling in d/I/d junctions", Physica C 282-287 (1997) 2405.
- 43) L.Alf, H.Takashima, S.Kashiwaya, N.Terada, T.Ito, K.Oka, Y.Tanaka, M.Koyanagi: "Orientation Dependence of Tunneling Spectra in YBCO and NCCO", Physica C 282-287 (1997) 1485.
- 44) L.Alf, H.Takashima, S.Kashiwaya, N.Terada, H.Ihara: "Spatially continuous zero-bias conductance peak on (110)YBCO surfaces", Phys.Rev., B 55, R14 (1997) 757.
- 45) Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Theory of Josephson effects in superconductor-ferromagnetic-insulator-superconductor junction", Physica C Vol.274 (1997) 357.
- 46) H.Ozawa, N.Terada, S.Kashiwaya, H.Takashima, M.Koyanagi, H.Ihara: "Development on Intrinsic Surfaces, and Their Electronic Structures and Stability of non-c-axis YBCO Epitaxial Films", IEEE Transactions on Applied Superconductivity Vol.7 no.2 (1997) 2161.
- 47) A.Himeda, M.Ogata, Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Theory of the quasi-particle spectra around a vortex in the two-dimension t-j model", Physica C 282-287 (1997) 1521.
- 48) Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Theory of Josephson effects in anisotropic superconductors", Phys.Rev., B 56, no.2 (1997) 892.
- 49) M.Yamasiro, Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Theory of spectroscopy in superconducting Sr_2RuO_4 ", Phys.Rev., B 56, no.13 (1997) 7847.
- 50) Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Theory of Josephson effects and current carrying quasiparticle states in d-wave superconductors", Physica C 293 (1997) 101.
- 51) Y.Tanuma, M.Yamasiro, Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Local density of states on rough surfaces of dx²-y²-wave superconductors", Phys.Rev., B 57, no.13 (1998.) 7997.
- 52) Y.Tanuma, M.Yamasiro, Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Theory of local density of states in d-wave superconductor with rough interface", Advances in superconductivity, vol.9 (1997) 307-310.
- 53) L.Alf, A.Beck, A.Marx, R.Gross, H.Takashima, S.Kashiwaya, Y.Tanaka, M.Koyanagi: "Tunneling Spectroscopy of HTC superconductor", ISEC97 Extended Abstracts in Berlin, Vol.2 (1997) 4.
- 54) Y.Tanuma, M.Yamasiro, Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Local density of states on rough surfaces of dx²-y²-wave superconductors", Phys. Rev., B 57, no.14 (1998) 7997-8008.
- 55) S.Kashiwaya, T.Ito, K.Oka, S.Ueno, Y.Tanaka, M.Koyanagi, K.Kajimura: "Tunneling spectroscopy of superconducting NCCO", Phys.Rev., B 57, no.14 (1998) 8680-8688.
- 56) Y.Tanaka, S.Kashiwaya: "Spatial dependence of the pair potential of the normal metal d-wave superconductor junction", Advances in Superconductivity X, (1998) 241-244.

(1999. 2.15 受付)