

「量子効果等の物理現象」  
平成9年度採択研究代表者

井口 家成

(東京工業大学大学院理工学研究科 教授)

## 「異方的超伝導体の量子効果と新電磁波機能発現」

### 1. 研究実施の概要

本研究の目標は、異方的d波高温超伝導体の量子効果を明らかにし、これを利用する新しいデバイスの開発をすること、また高温超伝導体で観測された新しい電磁波発振の機構解明とその機能研究にある。前者においては、接合角度をマイクロなレベルで制御したジョセフソン接合の作製が必要であり、マイクロレベルでの困難な技術をクリアすることにより異方性を反映するトンネル接合、ジョセフソン接合をはじめ得ることができた。今後は接合角度が異なるいくつかのジョセフソン接合を組み合わせた接合系のデバイス応用について調べていく。また高温超伝導トンネル接合への電流注入による特有なジョセフソンプラズマ発振現象について、高温超伝導ジョセフソン素子を検出器とし、放射源と検出器をオンチップ上に構成することによりTHz領域にわたる電磁波スペクトル情報をはじめ得ることができた。今後は、発振電磁波強度が増大する条件を調べていく予定である。

### 2. 研究実施内容

異方的d波超伝導体の特質が顕著に現れるのがトンネル効果であり、ジョセフソン効果である。トンネル効果では、超伝導のオーダパラメータが異方的なために、準粒子の感じるポテンシャルが異なってくる。特に超伝導体のa b面内結晶方向と界面が45°をなす場合は、準粒子の反射の前後でその感じるポテンシャルの符号が変化し、この2つの波が干渉することでアンドレーフ束縛状態というものが生じる。こ

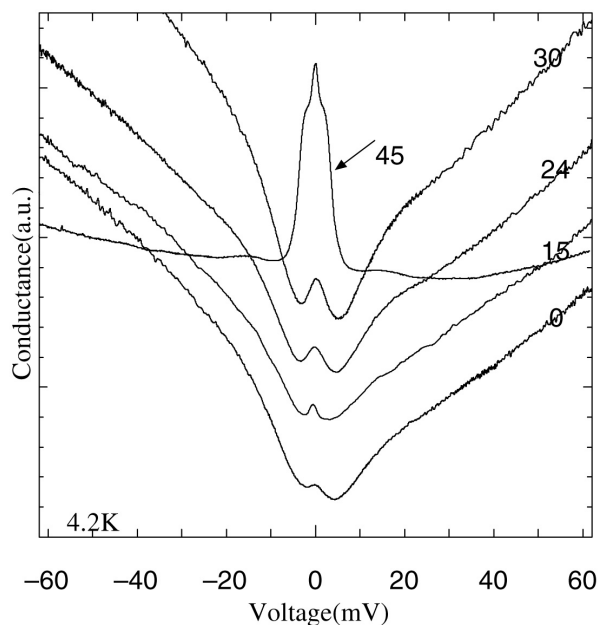


図1.種々の接合角におけるトンネルの特徴

の状態は、トンネルコンダクタンス特性で、ゼロ電圧のところにピークをもついわゆるゼロバイアスピーク（ZBCP）となって現れる。

この効果は接合界面と電極結晶角とのなす角度が45°だけでなく0°以外の有限の角度でも必ず存在する。ピークの高さは角度が大きくなっていくにしたがい、増大する。これまでの実験では試料に単結晶、積層トンネル接合を用いて行われていたため、このZBCP効果の有無は0°、45°、90°のみでしか確かめられなかった。

われわれは、ランプエッジ接合作製技術を用い、接合界面と電極結晶方向の角度を任意に調節できる接合の作製に成功し、1つの基板上に角度の異なる6つのYBCO//Ag接合をin situ技術で形成した。その結果得られたトンネルコンダクタンス特性を図1に示す。角度を0°から15°、24°、30°、45°と大きくしていくと、ZBCPの高さが連続的に増えて行く。この見事な変化は理論と定性的にあっており、はじめて異方的d波超伝導体のトンネル角度依存性を実証したものである。またこのZBCPの角度依存性は、YBCO高温超伝導体が $d_{xy}$ ではなく $d_{x^2-y^2}$ ペアリング対称性をもつことを示している。

次に異方的超伝導体のジョセフソン効果の研究では、d波の効果はジョセフソン最大電流の温度変化に顕著に現れることが理論計算によって示されている。すなわち通常のs波対称性の場合のAmbegaokar-Baratoff（AB）の特性と大きく異なってくる。しかも接合界面と電極結晶方向の角度によりふるまいも異なってくる。また接合に電磁波を照射したとき生じるシャピロステップは、通常のs波対称性では $V = n \cdot 0 f$ （ $n$ : 整数、 $f$ : 照射電磁波周波数）の電圧のところに現れるが、d波対称性では接合角によっては $n$ が半整数のところに顕著に現れるのが特徴的である。

アルゴンイオンミリングおよびフォトリソグラフィ技術により、いろいろな接合角をもつYBCO/PBCO/YBCOランプエッジ接合を作製した。2つのYBCO電極結晶は、 $CeO_2$ バッファ層を用いることによりa b面内で互いに45°回転したものに

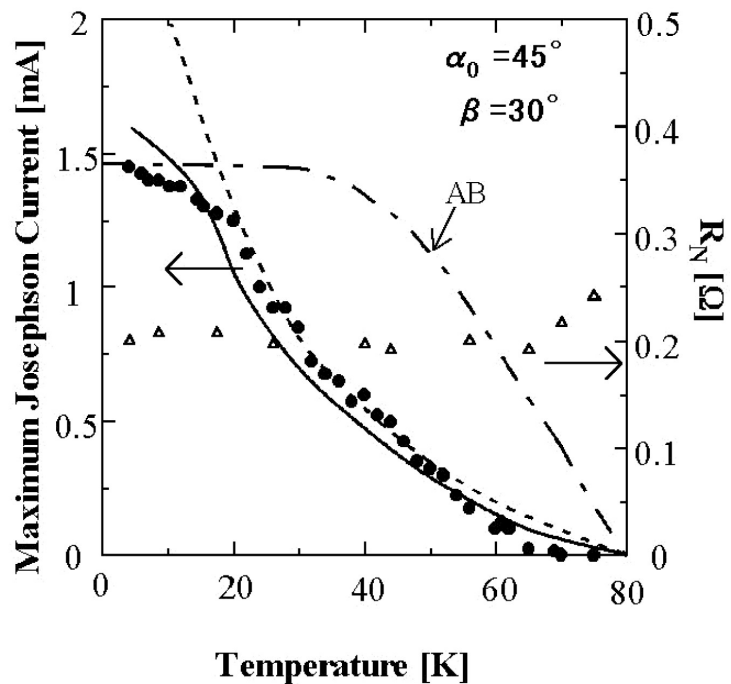


図2.ジョセフソン最大電流の温度依存性

なっている。このようなd/I/d接合は、研究しているグループがほとんどなく、また高温プロセスを多く含むため再現性のある良質な接合を作製することは一般に困難であったが、条件を詰めていくことにより妥当な結果を得ることが出来るようになった。図2に観測されたジョセフソン最大電流の温度依存性の1例を示す。

A B 曲線はAB理論によるものであり、実験点はこの曲線から大きくずれている。点線、破線は研究分担者である田仲、柏谷によるd波理論の計算結果であり、その定性的な一致は良い。他の接合角の試料のふるまいもd波理論の結果と良く合っている。実際1つのチップにいくつかの角度の異なる接合を作製したときのジョセフソン最大電流の角度依存性は、理論から予想されるふるまいとやはり合致している。またシャピロステップについては、非対称性が一番大きいと考えられる接合において、明瞭な半整数のみの電流ステップをもつシャピロステップが観測された。

以上高温超伝導体YBCOのトンネル効果、ジョセフソン効果にd波特有な角度依存性が現れることが実際確認された。このような有限の角度を変えての実験は世界的にもまだ例がなく、その意義は大きいものと思われる。d波特有な位相の干渉効果を用いると、通常の半導体あるいはs波超伝導体では実現できないような新しいデバイスの誕生が期待される。

一方、新電磁波機能グループでは、トンネル接合を用いて高温超伝導体に準粒子注入を行ったとき放射される電磁波のスペクトル全体像を捉えることに成功した。準粒子注入による電磁波放射については、これまでスーパーヘテロダイナミックミキサ技術を用いてある特定のマイクロ波周波数(11.6GHz, 36GHz, 47GHz)を高感度で捉えていたが、ジョセフソンプラズマ放射という現象を本質的に把握するためにはスペクトルの全体像が必要である。しかもスペクトルはテラヘルツ帯にまで延びていると予想されたが、一般にテラヘルツ帯の検出は困難である。本実験では、検出器として高温超伝導YBCOジョセフソン素子を用い、これを電磁波放射源(Au/I/YBCOトンネル接合)とともに1つの基板上に構成するという方法で見事に解決した。図3は、オンチップ基板上に構成した試料の概念図である。放射源と検出接合は直流回路的には完全に切り離されており、その距離はわ

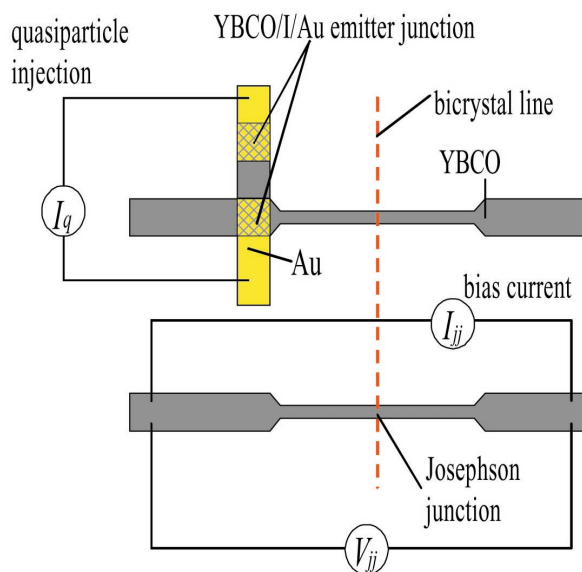


図3.電磁波放射源- 検出器のオンチップ構成図

ずか 1 mm 程度である。電磁波は空間より基板内を伝わって検出されると考えられる。図 4 は検出された信号をヒルベルト逆変換を施し、実際のスペクトル分布として求めた結果の 1 例である。低温ではスペクトル分布は 5 THz 近傍にピークをもつブロードな分布になっていることが判明した。ピーク周波数は最適ドーピングの YBCO で期待されるジョセフソンプラズマ周波数とよく合っている。

また一方、フェムト秒レーザーの高温超伝導 YBCO 薄膜への照射によるテラヘルツ電磁波発生については、

阪大の研究分担者グループのところで行われているが、フーリエ解析法により 0.6 THz 近傍にピークをもつスペクトルが得られている。この現象を利用し、超伝導電流分布、磁束の可視化に成功したほか、新たに発生するテラヘルツ電磁波を用いた単結晶基板の評価法を開発した。

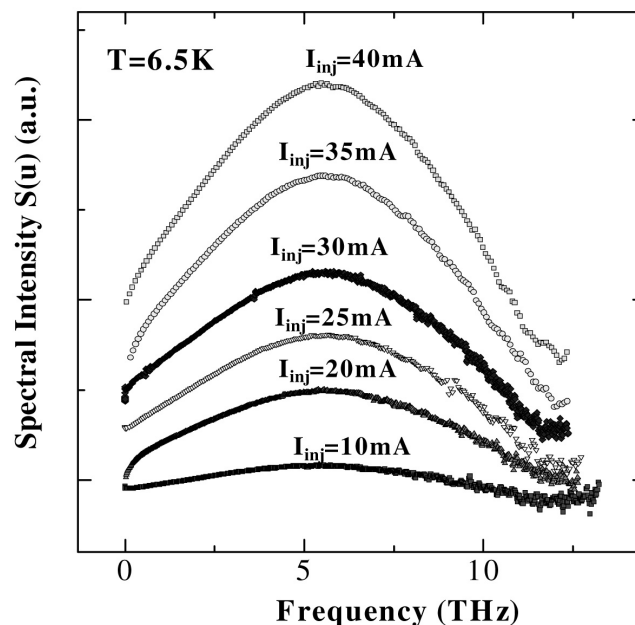


図4.観測されたYBCOジョセフソンプラズマスペクトル

### 3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

K. Lee, H. Yamaguchi, W. Wang, E. Kume and I. Iguchi, "Direction -Oriented Quasiparticle Injection and Microwave Emission in an  $\text{ErBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  Superconductor", Applied Physics Letters, Volume74, Number 16 (1999) p.2375-P/2377.

Wan Wang, Masashi Yamazaki, Kiejin Lee and Ienari Iguchi, "Observation of Quasiparticle Andreev bound states using  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  / Ag ramp-edge junctions with different interface geometries", Physical Review B, Volume60, Number6 (1999) 4272.

Kiejin Lee, Ienari Iguchi and Karen Y. Constantinian, "Tunable Detection of Radiation from HTSC Josephson Junction Arrays", Physica C 320 (1999) 65-70.

Kiejin Lee, Wan Wang, and Ienari Iguchi, "Spin-polarized quasiparticle tunneling in a  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  / Au / Co junction", Applied Physics Letters, Volume75, No.8 (1999) 1149.

Kiejin Lee, Wan Wang, and Ienari Iguchi, "Spin-polarized quasiparticle tunnel injection in a  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  / Au / Co junction", Applied Physics Letters (1999), August 23 issue.

Ienari Iguchi, Kiejun Lee, Wan Wang, Masashi Tachiki, Kazuto Hirata and Takashi Mochiku, "Observation of Josephson Plasma Emission by Quasiparticle Injection Into a  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  Single Crystal", MOS'99(1999) Stockholm, J. Low Temp. Phys. Vol. 117, Nos. 3/4, (1999) 617.

Akira Sugimoto, Tetsuji Yamaguchi and Ienari Iguchi, "Direct Observation of Vortex Structure in High Tc  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  Thin Film by Bitter Decoration Method", MOS'99 Stockholm, J. Low Temp. Phys. Vol. 117, Nos 5/6 (1999) 1347.

I. Iguchi, K. Lee and E. Kume, "Non-equilibrium Microwave Emission due to Tunnel Injection of Quasiparticles into High-Tc  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  Superconductor", Phys. Rev. B, Volume 61, Number 1, (2000) 689.

Wan Wang, Ienari Iguchi, Masashi Yamazaki and Kiejun Lee, "Direct Comparison of Andreev Bound States Formed at Different Interfaces Using  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y} / \text{I} / \text{Ag}$  Ramp-edge Junction", MOS'99 Stockholm, J. Low Temp. Phys. Vol. 117, Nos. 3/4, (1999) 545.

E. Kume, I. Iguchi and H. Takahashi, "On-Chip spectroscopy detection of terahertz radiation emitted from a quasiparticle-injected nonequilibrium superconductor using a high-Tc Josephson junction", Applied Physics Letters Volume 75, number 18, (1999) 2809.

O. Morikawa, M. Tonouchi and M. Hangyo, "A cross-correlation spectroscopy in sub-terahertz region using an incoherent light source" Appl. Phys. Lett., Vol. 76, No. 12, pp. 1519-1521, Mar, 2000.

Morikawa, M. Tonouchi and M. Hangyo, "Sub-THz Spectroscopic System Using Multimode Laser Diode and Photoconductive Antenna", Appl. Phys. Lett. Vol. 75, No. 24, pp. 3772-3774, Dec, 1999

T. Kondo, M. Sakamoto, M. Tonouchi, and M. Hangyo, "Terahertz Radiation from (111) InAs Surface Using  $1.55 \mu\text{m}$  Femtosecond Laser Pulses", Jpn. J. Appl. Phys. Part 2., Vol. 38, No. 9A/B, pp. L1035-L1037, Sep. 15, 1999.

S. Nashima, M. Kawamura, S. Shikii, M. Tonouchi and M. Hangyo, "Ion Milling of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  Thin Films and Their Characterization", Advances in Superconductivity, Vol. XI, pp. 129-132, 1999.

S. Nashima, M. Tonouchi, M. Hangyo, K.-U. Barholz, and P. Seidel, "Femtosecond Optical Pulse Response of  $\text{Y}_{0.7}\text{Pr}_{0.3}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  Thin Films", Advances in Superconductivity, Vol. XI, pp. 93-96, 1999.

M. Yamashita, S. Shikii, T. Kiwa, M. Tonouchi and M. Hangyo, "Evaluation of Supercurrent Distribution by Terahertz Radiation Mapping", Advances in

Superconductivity, Vol.XI, pp.189-192, 1999.

T. Kiwa, M. Yamashita, O. Morikawa, T. Nakamura, M. Tonouchi, and M. Hangyo, "Magnetic Flux Trap in Ion Implanted YBCO Thin Films Diagnosed by Terahertz Mapping", *Advances in Superconductivity*, Vol.XI, pp.219-222, 1999.

T.Kondo, S.Shikii, M.Yamashita, T.Kiwa, O.Morikawa, M.Tonouchi, M.Hangyo, M.Tani and K.Sakai, "A Novel Two-dimensional Mapping System for Supercurrent Distribution Using

Femtosecond Laser Pulses", *Advances in Superconductivity*, Vol.XI, pp.1285-1288, 1999.

H.Saijo, M.Yamashita, T.Kiwa, T.Kondo, O.Morikawa, M.Tonouchi, and M.Hangyo, "Magnetic Flux Generation in YBCO Thin Film Loops by Optical Excitation Under Magnetic Field", *Advances in Superconductivity*, Vol.XI, pp.199-202, 1999.

K.Shikita, M.Yamashita, T.Kiwa, O.Morikawa, M.Tonouchi, M.Hangyo, "Controllability and Stability of Magnetic Flux in YBCO Thin Film Loop Trapped by Optically Induced Current Imbalance", *Advances in Superconductivity*, Vol.XI, pp.215-218, 1999.

M. Tonouchi, S. Shiki, M. Yamashita, K. Shikita, and M. Hangyo, "Magnetic Flux Quanta in YBCO Thin Film Loop Controlled with Femtosecond Optical Pulses", *Advances in Superconductivity*, Vol.XI, pp.1293-1296, 1999.

M.Tonouchi, M.Hangyo, J.Ramos, R.Ijsselsteijn, V.Shultze, H-G.Meyer, and H.E.Hoening,

"Design of Superconductive Optical Flux Trap Memory for Femtosecond Laser Pulse Detection", *Advances in Superconductivity*, Vol.XI, pp.1297-1300, 1999.

M. Hangyo, S. Nashiama, M. Kawamura, S. Shikii, and M. Tonouchi, "Ion-Beam Milling of YBCO Thin Films and Their Characterization by Time-Resolved Pump-Probe Method", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol.9, No.2, pp.1952-1955, June, 1999.

M. Hangyo, S. Shikii, M. Yamashita, T. Kondo, and M. Tonouchi, "Observation of Supercurrent Distribution in YBCO Thin Film Devices by Photoexcited THz Radiation", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 9, No. 2, pp.3038-3041, June, 1999.

M. Tonouchi, S. Shikii, M. Yamashita, K. Shikita, and M. Hangyo, "Detection and Storage of Femtosecond Laser Pulse Signals by Optical Magnetic-Flux-Generation in a YBCO Thin Film Loop", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 9, No.2, pp.4467-4470, June, 1999.

Y. Tanaka and S. Kashiwaya Theory of Josephson effect in d-wave superconductor junctions in *Physics and Applications of Mesoscopic Josephson Junctions*, H. Ohta and

C. Ishii Journal of Physical Society of Japan, pp.153-176, 1999

S. Kashiwaya and Y. Tanaka  
 Surface states and tunneling spectroscopy of high T-C superconductors Superlattices and Microstructures, 25 Nos. 5-6, pp.1099-1114, 1999

Y. Tanaka and S. Kashiwaya Theory of novel properties of Josephson effect in anisotropic superconductors Superlattices and Microstructures, 25 Nos. 5-6, pp. 1083-1098, 1999

S. Kashiwaya and underline{Y. Tanaka}, N. Yoshida and M. Beasley Spin current in ferromagnet/ insulator /superconductor junctions Phys. Rev. B. Vol. 60, pp.3572-3580, 1999

N. Yoshida, Y. Tanaka, J. Inoue and S. Kashiwaya Theory of spin polarized tunneling in superconducting  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 68, No. 4, pp. 1071-1074, 1999

M. Yamashiro, Y. Tanaka, N. Yoshida and S. Kashiwaya Tunneling conductance and spatial dependences of pair potentials in normal metal -triplet superconductor junctions J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 68, No. 6, pp. 2019-2025, 1999

Y. Tanaka, R. Hirai, K. Kusakabe and S. Kashiwaya Theory of Josephson effect in superconductor one-dimensional electron gas superconductor junction Phys. Rev. B, Vol. 60, pp.6308-6311, 1999

Y. Tanaka and S. Kashiwaya Josephson effect in Unconventional superconductor / ferromagnet / Unconventional superconductor Junctions J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 60, No. 11, pp. 3485-3488, 1999

Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata, and S. Kashiwaya Quasiparticle states near the surface of high TC superconductors based on the extended t-J model Phys. Rev. B. Vol.60, No. 10, pp. 9817-9826, 1999.

H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya Quasiparticle properties around a nonmagnetic impurity in the superconducting state of the two-dimensional t-J model J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 68, No. 8, pp. 2510-2513, 1999.

Physica C 2000 Josephson effect in unconventional superconductor / Luttinger liquids / unconventional superconductor junction T. Hirai, K. Kusakabe and Y. Tanaka

N. Kawai, H. Tsuchiura, Y. Tanaka, and J. Inoue Intrinsic Josephson effect in layered two-dimensional t-J model J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 68, No. 10, pp. 3166-3169, 1999

Y. Tanaka and S. Kashiwaya Phase Dependent Energy levels of Bound states and d.c. Josephson current in unconventional superconductor / ferromagnetic insulator / Unconventional superconductor junctions J. Phys. Soc. Jpn. No. 4, pp. 1152-1161, 2000

Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata, and S. Kashiwaya Local Density of States Near the Surfaces of a d+s-Wave Superconducting State J. Phys. Soc. Jpn. No. 5, pp. 1472-1476,

2000

H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya Local density of states around a magnetic impurity in high- $T_c$  superconductors based on the  $t$ - $J$  model ¶par Phys. Rev. Lett. Vol. 84, No. 4, pp. 3165-3168, 2000

N. Yoshida, Y. Tanaka, M. Yamashiro and S. Kashiwaya Quasiparticle current for  $d$ -wave superconductor junctions Physica C, Vol. 317-318, pp.666-668, 1999

M. Yamashiro, Y. Tanaka and S. Kashiwaya Theory of Josephson effect in  $Pb/Sr_2RuO_4$  junction Physica C, Vol. 317-318, pp.672-675, 1999

Y. Tanaka and S. Kashiwaya Theory of tunneling effect and Josephson effect in anisotropic superconductors under spatially varying pair potentials Physica C, Vol. 317-318, pp.403-409, 1999

Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya Local density of states of quasiparticles near the surface of  $t$ - $t'$ - $J$  model Physica C, Vol. 317-318, pp.521-523, 1999

H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya Local density of states of quasiparticles near the impurities of  $t$ - $J$  model Physica C, Vol. 317-318, pp. 518-520, 1999

N. Yoshida, Y. Tanaka and S. Kashiwaya A.C. Josephson current in  $d$ -wave superconductor junctions Proceedings of the 11th International Symposium on Superconductivity (Fukuoka Japan), 1998 Advances in superconductivity XI, pp.339-342, 1999

N. Yoshida, Y. Tanaka and S. Kashiwaya Theory of tunneling effect in ferromagnetic metal / insulator / superconductor junction Proceedings of the 11th International Symposium on Superconductivity (Fukuoka Japan), 1998 Advances in superconductivity XI, pp.335-338, 1999

H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya Impurity effects on the superconducting state with a nodeless gap in the  $t$ - $J$  model Proceedings of the 11th International Symposium on Superconductivity (Fukuoka Japan), 1998 Advances in superconductivity XI, pp. 331-334, 1999

H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya Superconducting states with a nodeless gap in the  $t$ - $t'$ - $J$ - $J'$  model Proceedings of the 11th International Symposium on Superconductivity (Fukuoka Japan), 1998 Advances in superconductivity, XI, pp.347-350, 1999

H. Tsuchiura, Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata, S. Kashiwaya, and J. Inoue Study of the quasiparticle spectra near the surface or impurity in high- $T_c$  superconductors



International symposium on Surface and Interface (Tokyo Japan), 1998 Surface Science, bf 438, pp.347-352, 1999

Y. Tanaka and S. Kashiwaya DC Josephson current in *S/F/S* junctions International Conference on Physics and Chemistry of Molecular and Oxide superconductors Journal of Low Temperature Physics, bf 117, pp. 521-525, 1999

N. Yoshida, Y. Tanaka, S. Kashiwaya and J. Inoue Theory of the AC Josephson effect in triplet superconducting junction International Conference on Physics and Chemistry of Molecular and Oxide superconductors Journal of Low Temperature Physics, bf 117, pp. 563-567, 1999

S. kashiwaya, Y. Tanaka, N. Yoshida, M. R. Beasley, "Spin current in Ferromagnet-insulator-superconductor junctions", Phys. Rev. B. 60, No.5, PP,3572(1999.8.1)

S. Kashiwaya and Y. Tanaka, "Surface states and tunneling spectroscopy of high *T<sub>c</sub>* superconductors", Superlattices and Microstructures, vol.25, Nos. 5-6, pp.1099-1114 (1999)