

「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の研究」

1. 研究実施の概要

研究のねらいは、異方的d波高温超伝導体の量子効果の基礎的解明、d波ジョセフソン電流の特徴が明瞭に現れる接合の作製及び新デバイス応用への検討、また異方的高温超伝導体に特有なジョセフソンプラズマ発振現象の解明である。これまで進めてきたジョセフソンランプエッジ接合の作製技術をかなりの高度なところまで高めた結果、ジョセフソン電流の角度依存性について実際確かめることができ、インテリジェントデバイスへの一歩が踏み出せた。またd波超伝導体の量子効果の基礎現象研究で走査SQUID顕微鏡を導入し、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ がd波対称性をもつ直接的な証拠を得たほか、ピオサバール則を用いることにより検出磁束情報から超伝導電流分布を求める試みにも成功した。さらに準粒子注入単結晶を流れるジョセフソンプラズマ電流が、外部からのマイクロ波の照射によりシャピロステップのような応答をすることを新たに見出した。今後はSQUID顕微鏡を用い、奇妙と言われる高温超伝導体の常伝導状態を観測し、高温超伝導d波量子効果の発現機構の解明を行うほか、d波接合のデバイス応用の検討を引き続き行う。またジョセフソンプラズマの発振については、磁場印加、電流駆動による新しい方法も試みる。

2. 研究実施内容

異方的高温超伝導体のジョセフソン効果の研究については、インテリジェントデバイスを目指す角度依存型YBCOランプエッジ接合作製研究に関して新たな進展があった。MgO基板上に直接成長させたYBCO薄膜と CeO_2 バッファ層を介して成長させたYBCO薄膜のab面が相対的に 45° 回転したものになることを利用して、この2つの膜を電極とする非対称ランプエッジ接合作製の研究を行ってきたが、フォトリソグラフィ技術により CeO_2 バッファ層をもつYBCO薄膜を六角形型のパターンに加工し、このうち3つの辺にランプエッジ接合を形成する技術を開発した。この方法で、異なった接合角をもつランプエッジ接合を同一基板上に同時に作製できる。すなわち角度ジオメトリーだけ異なる同質な接合の作製が可能となった。図1は、作製した3つの接合のジョセフソン最大電流の温度依存性の結果である。 $\beta=5^\circ$ 、 10° 、 20° である($\alpha=|\alpha-\beta|=45^\circ$)。接合抵抗はほぼ同じである。全体的な温度依

存性はAmbegaokar-Baratoff理論とは大きく異なり、d波超伝導体接合で期待されるふるまいと定性的によく合っている。低温側では角度の違いによりジョセフソン電流が異なってくる様子が明白である。このような角度依存性はd波超伝導体であるからこそ得られる結果であり、通常のs波超伝導体あるいは半導体では角度依存性がないため得られない。

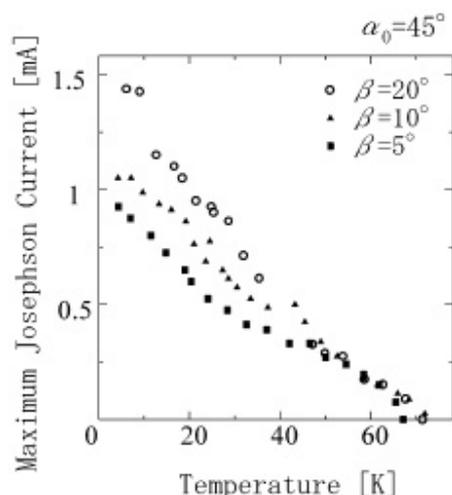


図1 異なった角度ジオメトリーをもつ接合のジョセフソン最大電流の温度依存性

次に平成12年度特に発展させてきた研究内容は、走査SQUID顕微鏡による量子磁束の観測がある。量子磁束は高温超伝導体の量子効果と密接に結びついており、高温超伝導体のペアリング対称性、発現機構について重要な情報を与える。また電磁気則を用いることにより、超伝導電流分布を求めることができる。高温超伝導体が $d_{x^2-y^2}$ 波超伝導体である証拠は、磁場の侵入長の温度依存性、角度分解光電子分光の結果などあるが、もっとも直接的な証拠はIBMによるトリクリスタルを用いた半整数量子磁束の観測である。しかしこの実験はこれまでIBMでしか成功していなく、その真偽のほどが問われていた。平成12年度はこの新しい方法で超伝導薄膜中を流れる輸送電流、また量子磁束に付随する超伝導電流について、ピオーサバルの法則を逆に解くことによりその分布を求めることに成功したほか、トリクリスタルを用いた実験を行い、IBMに次いで半整数磁束量子の観測に成功することができた。図2はトリクリスタル上に堆積したYBCO薄膜上の量子磁束の分布である。小さい磁束がトリクリスタルポイントに生じた半整数磁束量子である。またこの磁束量子が温度とともに変化しなかったことから、 $d_{x^2-y^2}$ 波対称性は T_c 近傍まで変わらないことが判明した。

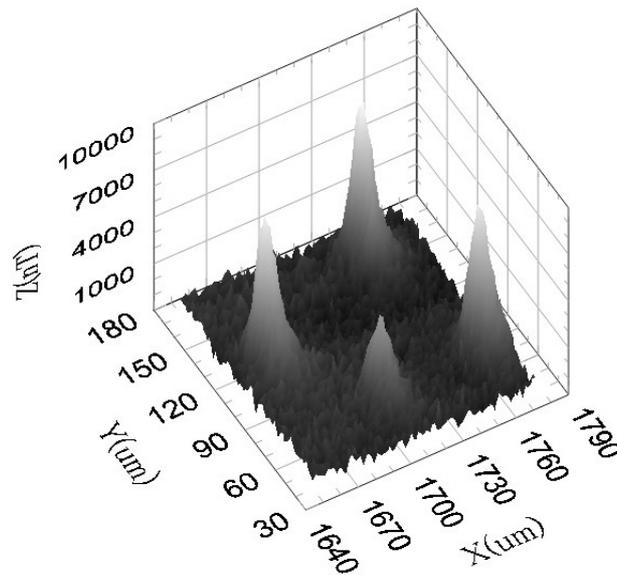


図2 SSMによる半整数磁束量子像

ジョセフソンプラズマ発振について、平成11年度は準粒子注入YBCO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バイクリスタル接合を用いたテラヘルツに及ぶ電磁波検出を、薄膜電流注入発振器及び検出用ジョセフソン接合を同一チップ上に配置する効率の高い検出手段について報告した。平成12年度は、高温超伝導 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 単結晶への準粒子注入により生じる狭帯域のジョセフソンプラズマについて、新しい現象を発見した。すなわちジョセフソンプラズマが励起されている、あるいはジョセフソンプラズマ電流が流れている結晶に、外部からマイクロ波を照射すると通常のシャピロステップに似た鋭い応答がイントリンシック接合の電流 電圧特性に見られるという事実である。図3に測定されたデータを示す。図3は電流 電圧特性の微分特性であるが、シャピロステップに似た応答はピークとなって出現した(電流 電圧特性上では電流ステップとなる)。マイクロ波照射がないときは、ピークは見られない。マイクロ波を照射すると複数個の鋭いピークが生じることがわかる。このピークは電流 電圧特性の負性抵抗領域だけに現れ、鋭い発振ピークが見られた以前の結果と良く合っている。温度を上げ、負性抵抗領域なくなるとピークも消失する。これはジョセフソンプラズマ電流と外部マイクロ波電流とのビートにより生じていると判断される。

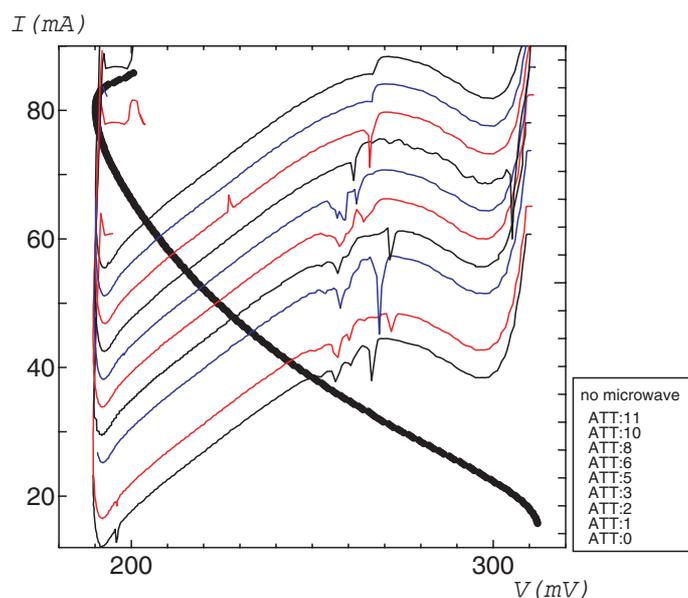


図3 マイクロ波照射による負性抵抗領域でのステップの出現

3 . 主な研究成果研究成果の発表 (論文発表)

I. Iguchi, "HTS Josephson plasma oscillator", Supercond.Sci.Technol.13, 93-97(2001)

I. Iguchi, W. Wang, M. Yamazaki, Y. Tanaka and S. Kashiwaya, "Angle-resolved Andreev bound states in anisotropic d-wave high-Tc $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconductors", Phys. Rev. B62, R6131-R6134(2000)

W. Wang, M. Yamazaki, K. Lee, and I. Iguchi, "Observation of quasiparticle Andreev bound states using $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{Ag}$ ramp-edge junctions with different interface geometries", Phys. Rev. B60, 4272-4276(1999)

K. Lee, W. Wang and I. Iguchi, M. Tachiki, K. Hirata and T. Mochiku, "Josephson plasma emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ intrinsic junctions due to quasiparticle injection" Phys. Rev. B61, 3616-3619(2000)

I. Iguchi, K. Lee, and E. Kume, "Nonequilibrium microwave emission due to tunnel injection of quasiparticles into a high-Tc $\text{Bi}_2\text{SrCaCu}_2\text{O}_y$ superconductor", Phys. Rev. B61, 689-693(2000)

I. Iguchi, E. Kume, and H. Takahashi, "Emitted spectra of electromagnetic waves from a tunnel-injected nonequilibrium high-Tc $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconductor", Phys. Rev. B62, 5370-5373(2000)

H. Arie, K. Yasuda, H. Kobayashi, I. Iguchi, Y. Tanaka and S. Kashiwaya, "Josephson tunneling of anisotropic high-Tc d-wave junctions with tilted ab-plane $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ electrodes", Phys. Rev. B62, 11864-11871(2000)

K. Lee, W. Wang, I. Iguchi, B. Friedman, T. Ishibashi, K. Sato, "Spin-polarized

quasiparticle tunnel injection in a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y/\text{Au}/\text{Co}$ junction.", Appl. Phys. Lett. 75, 1149-1151(1999)

A. Sugimoto, T. Yamaguchi and I. Iguchi, "Supercurrent distribution in high-Tc superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ thin films by scanning superconducting quantum interference device microscopy", Appl. Phys. Lett. 77, 3069-3071(2000)

I. Iguchi, W. Wang and M. Yamazaki, "Andreev bound states and d-wave symmetry of high-Tc $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconductors", Physica C 335(2000)190-195

I. Iguchi, W. Wang, K. Lee, E. Kume, H. Takahashi, "Josephson plasma emission from tunnel-injected nonequilibrium high-Tc superconductors", Proceeding of SPIE, Superconducting and related oxides : Physics and Nanoengineering IV pp. 255-264(2000)

A. Sugimoto, T. Yamaguchi and I. Iguchi, "Evaluation of supercurrent distribution in High-Tc superconductor by scanning SQUID microscopy(SSM)", ISS 2000, Physica C

T. Yamaguchi, A. Sugimoto and I. Iguchi, "Trapping state of quantized vortices in high-Tc $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ thin films observed by scanning SQUID microscope", ISS 2000, Physica C

H. Kobayashi, T. Imaizumi, I. Iguchi, Y. Tanaka and S. Kashiwaya, "Angle-dependent Josephson current in high-Tc $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ramp-edge junctions", ISS 2000, Physica C

I. Iguchi, and K. Lee, "Microwave emission from quasiparticle-injected intrinsic Junctions", ISS'99(FD-17) 1 Advances in Superconductivity, XII, Eds. T. Yamashita and K. Tanabe, Springer-Verlag, Tokyo, 2000, pp. 1096-1101

H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya : "The resonance states around an impurity in dx^2-y^2 -wave superconductors", Physica B Vol. 284-288, pp. 427-428(2000)

S. Kashiwaya and Y. Tanaka : "Transport properties between unconventional superconductor and ferromagnets", Physica B, Vol. 280, pp. 182-183(2000)

N. Yoshida, Y. Tanaka, S. Kashiwaya and J. Inoue : "Current-voltage relation for Josephson junctions including ferromagnetic insulator", Physica B Vol. 284-288, pp. 511-512(2000)

S. Kashiwaya and Y. Tanaka : "Ferromagnetic insulator effects in spin-polarized ferromagnet/d-wave superconductor junctions", Physica B Vol. 284-288, pp. 501-502(2000)

R. Hirai, K. Kusakabe and Y. Tanaka : "Theory of d.c. Josephson effect in

unconventional superconductor/Luttinger liquids/unconventional superconductor junction" Physica C Vol. 336, pp. 107-122(2000)

Y. Tanaka, and S. Kashiwaya : "Phase dependent Energy levels of bound states and d.c. Josephson current in superconductor/ferromagnetic insulator/superconductor junction" J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 69, No. 4, pp. 1152-1161 (2000)

Y. Tanuma, Y. Tanaka, M. Ogata, and S. Kashiwaya : "Local density of states near the surfaces of d-wave superconducting state", J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 69, No. 5, pp. 1472-1476(2000)

M. Ogata, A. Himeda, H. Tsuchiura, Y. Tanaka and S. Kashiwaya : "Impurities and vortex cores in the t - J Model" Advances in superconductivity XII, pp. 62-67 (2000)

R. Hirai, K. Kusakabe, Y. Tanaka and S. Kashiwaya : "Josephson effect in Luttinger liquid between anisotropic superconductors, Advances in superconductivity XII, pp. 254-256(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", Phys. Rev. Lett. Vol. 84, No. 4, pp. 3165-3168(2000)

Y. Tanaka, T. Asai, N. Yoshida, J. Inoue and S. Kashiwaya : "Interface effects on the shot noise in normal metal-d-wave superconductor Junctions" Phys. Rev. B Vol. 61, No. 18, pp. R11902-R11905(2000)

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

T. Hirai, K. Kusakabe and Y. Tanaka : "Josephson effect in spin-or charge-gapped one-dimensional system", J. Phys. Chem. Solids. 62, 257-260(2001)

T. Asai, N. Yoshida, Y. Tanaka, J. Inoue and S. Kashiwaya : "Current fluctuation in high T_c superconductors" J. Phys. Chem. Solids. 62, 261-264(2001)

H. Tsuchiura, Y. Tanaka, M. Ogata and S. Kashiwaya : "Magnetic impurities in t - J model", J. Phys. Chem. Solids. 62, 265-267(2001)

S. Kashiwaya and Y. Tanaka : "Tunneling effects on surface bound states in unconventional superconductors", Reports on Progress in Physics, Vol. 63, pp.

1641-1724(2000)

S. Nashima, M. Tonouchi, M. Hangyo, K-U. Barholz, F. Schmidl, and P. Seidel, "Two components in femtosecond optical response in $Y_{0.7}Pr_{0.3}Ba_2Cu_3O_{7-d}$ thin film strips" Jpn. J. Appl. Phys., vol. 39, no. 7A, July(2000)L663-L666.

S. Nashima, M. Tonouchi, M. Hangyo, K-U. Barholtz, H. Wald and P. Seidel, "Femtosecond optical response of $Y_{0.7}Pr_{0.3}Ba_2Cu_3O_{7-d}$ thin films", Physica B, 284-288 (2000)931-932.

T. Kondo, H. Saijyo, M. Tonouchi and M. Hangyo, "Terahertz radiation from YBCO thin films excited with 1.55 μ m femtosecond laser pulses", Advances in Superconductivity XII, Eds. T. Yamashita and K. Tanabe, Springer-Verlag Tokyo, 2000, pp. 227-229.

K. Shikita, M. Yamashita, M. Tonouchi and M. Hangyo, "Dependence of magnetic flux generation in YBCO thin film loop on femtosecond laser excitation position", Advances in Superconductivity XII, Eds. T. Yamashita and K. Tanabe, Springer-Verlag Tokyo, 2000, pp. 233-235.

K. Shikita, T. Kiwa, M. Tonouchi and M. Hangyo, "Optical magnetic flux generation by selected femtosecond laser pulses" Advances in Superconductivity XII, Eds. T. Yamashita and K. Tanabe, Springer-Verlag Tokyo, 2000, pp. 230-232.

A. Moto, M. Yamashita, K. Shikita, H. Saijo, M. Tonouchi and M. Hangyo, "Observation of supercurrent distribution in antidot-formed YBCO thin film strips" Advances in Superconductivity XII, Eds. T. Yamashita and K. Tanabe, Springer-Verlag Tokyo, 2000, pp. 236-238.

M. Morimoto, H. Saijo, M. Yamashita, M. Tonouchi, M. Hangyo, "Terahertz radiation patterns of YBCO thin film antennas", Advances in Superconductivity XII, Eds. T. Yamashita and K. Tanabe, Springer-Verlag Tokyo, 2000, pp. 1111-1113.

H. Wald, S. Nashima, M. Yamashita, M. Tonouchi, P. Seidel and M. Hangyo, "Terahertz radiation properties from YBCO and YPBCO thin films" Advances in Superconductivity XII, Eds. T. Yamashita and K. Tanabe, Springer-Verlag Tokyo, 2000, pp. 224-226.

N. Kida, M. Hangyo, and M. Tonouchi, "Low-energy charge dynamics in $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$: THz time-domain spectroscopic studies" Phys. Rev. B., Vol. 62, No. 18(2000)R11965-R11968.

T. Kiwa I. Kawashima, S. Nashima, M. Hangyo, and M. Tonouchi, "Optical

response in amorphous GaAs thin films prepared by pulsed laser deposition"
Jpn. J. Appl. Phys. Part. 1, Vol. 39, No. 11(2000)6304-6308.