

固有ジョセフソン接合と超伝導共振器を用いた量子状態制御の研究 Manipulation of intrinsic Josephson-junction quantum bits entangled with microwave photons in a superconducting cavity

北野晴久

Haruhisa Kitano

東京大学大学院総合文化研究科

The University of Tokyo

概要: 将来の量子コンピューター実現に向けて、現在の超伝導量子ビットの動作温度に関する問題点に着目し、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を超伝導量子ビット(特に位相量子ビット)として用いることを提案した。その実証の第一歩となる巨視的量子トンネル状態の観測に必要な素子条件を抽出し、メサ型素子とS字型素子では後者の方がより優れていることを見出した。さらに超伝導共振器を用いて、超伝導量子ビットとマイクロ波光子との量子もつれ状態を生成するための超伝導共振器構造を設計した。両者の強結合条件を満たすために、共振器内のマイクロ波電場を空間的に一点に集中させる手段を検討し、円筒形空洞共振器の内部に金属探針を挿入する方法を提案した。詳細な3次元電磁界解析の結果、この方法により従来のファブリ・ペロー型共振器に比べて約100倍強い電界強度が得られることを見出した。

【研究のねらい】 近年、将来の量子コンピューター実現に向けた研究が急速に活発化している。その有力候補の一つである超伝導量子ビットは、これまで希釈冷凍機を用いてのみ到達可能な数十ミリケルビンの極低温下でしか実験が行われておらず、周辺回路まで含めた将来の実用化を考えた際に大きな障害になるものと予想される。本研究では、従来超伝導体に比べて超伝導転移温度が一桁以上高いという銅酸化物高温超伝導体の潜在的優位性に着目し、高温超伝導体の層状結晶構造に起因した固有ジョセフソン接合(以下、IJJと略記)を量子ビットとして用いることにより、この状況の打開を目指す。さらに、非常に高いQ値を持つ超伝導共振器内で生成される単一モードマイクロ波光子とIJJ量子ビットの量子もつれ状態を生成し、量子計算に不可欠な量子もつれ状態を実験的に研究することを目指した(図1参照)。

本研究により、高温超伝導体が量子コンピューターへ応用可能なことが示されれば、実現可能な量子ビットに新しい有力候補が加わるだけでなく、超伝導量子ビットの動作温度に関するこれまでの制限が一気に緩和され、実用化に向けた研究がさらに加速されるものと期待される。また、IJJには発見から20年が過ぎた今でも未解明部分が残る高温超伝導体のきわめて特異な物性が様々な形で反映されるため、ジョセフソン接合の物理としても

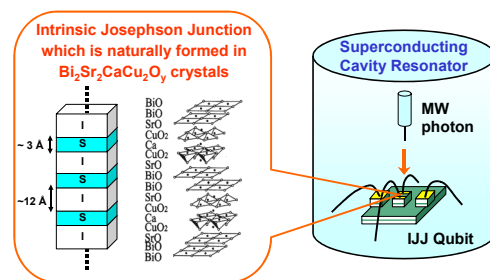


図1 本研究のねらい

大変興味深い未知の新たな現象が発見される可能性がある。

【研究方法】 本研究には大きな研究テーマとして、(1) IJJ を用いた量子ビットの構築と、(2) IJJ 量子ビットとマイクロ波光子との量子もつれ状態の生成、2つが存在する。このため、以下では(1)および(2)について実施した研究方法を述べる。

(1) IJJ を用いた量子ビットの構築

従来超伝導体のジョセフソン接合(以下, JJ と略記)とは違い, 銅酸化物高温超伝導体では人工的に作製される JJ よりも, 超伝導層と絶縁層が交互に積層した結晶構造に由来する IJJ の方がはるかに優れた特性を示すことが知られている。これは, 従来の JJ 作製技術がそのままでは高温超伝導体に適用困難なことを示しており, 高温超伝導体を量子ビットに応用する際の大きな障害となる。

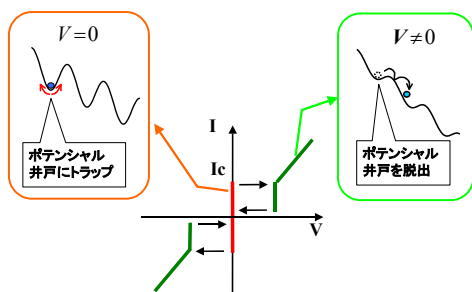


図2 IJJにおけるゼロ電圧状態と有限電圧状態

このため, 本研究では既に従来超伝導体で実証されている3つの超伝導量子ビットのうち[1], 素子構造や動作原理が最も単純な位相量子ビットを IJJ 量子ビットの最有力候補と見なした。この場合, 量子ビット構築に必要な実験的検証は, (i) 巨視的量子トンネル(以下, MQT と略記)状態の観測, (ii) MQT 状態における量子化準位形成(以下, ELQ と略記)の観測, (iii) 量子化準位間のラビ振動の観測, の3つである。実際, 従来超伝導体による位

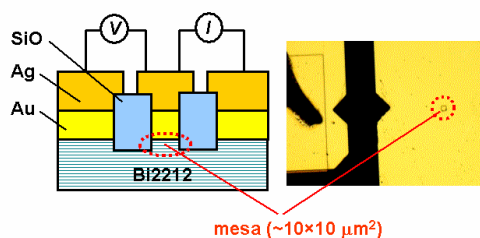


図3 メサ型のIJJ素子構造

相量子ビットも, (i)→(ii)→(iii)の順に実証されてきた。

これら3つの実験に共通する最も基本的な物理現象は, 電流バイアス状態にある JJ のゼロ電圧状態から有限電圧状態へのスイッチング現象であり(図2参照), 力学系における傾けた周期ポテンシャル中の質点運動として記述できることが知られている。通常, ポテンシャル井戸からの脱出確率は古典的熱揺らぎに支配されるが(古典領域), 十分低温では量子揺らぎの方が支配的になり(量子領域), 量子力学的トンネル, すなわち MQT 状態が実現する。したがって, (i)を実証するには古典領域から量子領域への交差温度 T_0 を観測する必要がある。IJJ では高温超伝導体の非常に高い臨界電流密度を反映して, T_0 が従来の JJ よりも1桁以上大きくなるものと考えられている。

このような背景から, 本研究ではゼロ電圧状態から有限電圧状態へのスイッチング電流測定を基本測定とし, スイッチング電流分布

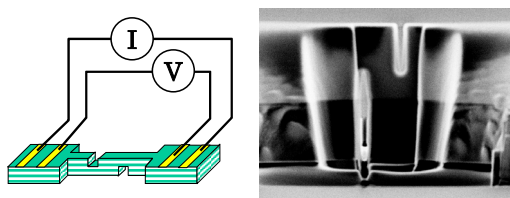


図4 S字型のIJJ素子構造

$P(I)$ を求めるための測定系を立ち上げた。測定には、高温超伝導体の IJJ として最も盛んに研究されている $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 単結晶を浮遊帯域熔融法で作製し、イオンミリング法による微細加工で固有接合部の接合数や接合面積を制御した素子を用いた。全研究期間のうち、前半2年間は接合数の制御性に優れたメサ型構造の IJJ 素子(図3参照)で実験を行ったが、後半は後述するメサ型素子の問題点を克服するため S 字型構造の IJJ 素子(図4参照)で実験を行った。

(2) マイクロ波光子との量子もつれ状態の生成

超伝導体で共振器が構成される超伝導共振器では、交流損失を与える準粒子励起が超伝導ギャップの発達と共に急激に抑えられるため、共振幅の鋭さを示す Q 値が2桁以上増大する。このため、共振幅の逆数(通常マイクロ秒～ミリ秒程度)よりも十分短い時間スケールでは、共振器内の電磁場を量子化された単一モード光子として扱えることが知られており、空洞量子電磁力学(以下、cavity-QED と略記)と呼ばれている。本研究では、このマイクロ波光子が(1)で述べた IJJ 量子ビットと相互作用することにより、量子もつれ状態が形成される可能性に着目した。

このような cavity-QED の原理を利用した量子もつれ状態の研究は、Rydberg 原子など原子系量子ビットを用いて実験されたことがあるが[2]、超伝導量子ビットに対しても同様に実験可能かどうかは全く不明であった。このため、本研究ではまず、cavity-QED を用いた量子もつれ状態の形成には超伝導量子ビットがマイクロ波光子と強く結合する必要があると考え、超伝導共振器内部の電磁場を空間的に一点に集中させる手段の検討から始めることにした。

具体的には、超伝導量子ビットを配置する位置でマイクロ波電場が最も強くなるような

共振器構造を、3次元電磁界解析シミュレーターを用いて詳しく解析した。

【研究成果】

(1) IJJ 素子のスイッチング電流分布測定

本研究では、IJJ 素子を用いて位相量子ビットを構築するために、ゼロ電圧状態から有限電圧状態へのスイッチング電流分布測定を行い、量子領域における MQT 状態がどのような条件で実現されるのかを実験的に検討した。その結果、IJJ 素子の振舞いは従来の JJ に比べてはるかに複雑なことが判明し、従来の JJ より高温で MQT 状態を実現させるには、IJJ の素子サイズや素子構造が非常に重要になることが明らかになった。以下では、本研究で得られた実験結果を用いて、IJJ の本質的特徴を述べると共に、より高温で MQT 状態を実現させるための素子条件を示す。

図5にメサ型 IJJ 素子に対して測定された典型的なスイッチング電流分布を示す。メサ構造の作製には通常の写真リソグラフィと Ar イオンミリングを用い、最小約 $10 \mu\text{m}$ 四方の接合面積と最小約 20 層の接合数にまで制御したメサ型 IJJ 素子を作製することに成功した。詳細な素子の作製方法やスイッチング電流分布の測定方法に関しては、参考文献[3]を参照されたい。

従来の JJ の古典領域に対して用いられてきた熱活性的脱出モデル(以下、SJJ モデルと

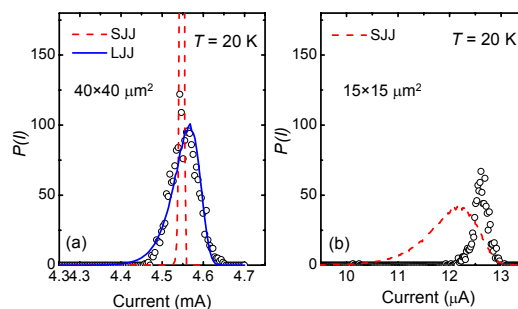


図5 メサ型 IJJ 素子のスイッチング電流分布 (a) $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ (b) $15 \times 15 \mu\text{m}^2$

略記)で図5(a)の実験結果を解析したところ、 $L=40\ \mu\text{m}$ 四方の接合サイズでは、SJJモデルは実験結果を全く説明できないことが判明した。詳細な解析の結果、これはIJJの起源が結晶構造にあることと関連して、接合の特徴的長さスケールであるジョセフソン侵入長 λ_J が通常よりもはるかに小さくなることに原因があることが分かった。つまり、図5(a)の素子サイズでは、従来のSJJモデルで仮定されていた「小さい接合($L < \lambda_J$)」の条件が満たされず、むしろ「大きい接合($L > \lambda_J$)」に対する脱出モデル(以下、LJJモデルと略記)で解析する必要がある。実際、図5(a)の測定結果は、SJJモデルよりもむしろLJJモデルで定量的に説明されることが示された[4]。

ジョセフソン接合の物理では古くから有名だが、大きい接合の電流-電圧特性はフラクソン(あるいはジョセフソン磁束量子)によって記述され、小さい接合の場合に比べて非常に複雑な振舞いが期待される。図6にスイッチング電流分布の力学的脱出モデルにおける両者の違いを模式的に示した。詳細(文献[4]を参照)は省略するが、大きい接合の場合には、より小さいエネルギー障壁で脱出できるため小さい接合に比べて幅の広い分布となることが予想される。従来の人工的JJから構築された超伝導量子ビットでは、あらかじめ小さい接合として扱えるような λ_J の設計が行われてきた。しかしながら、IJJの場合には λ_J は

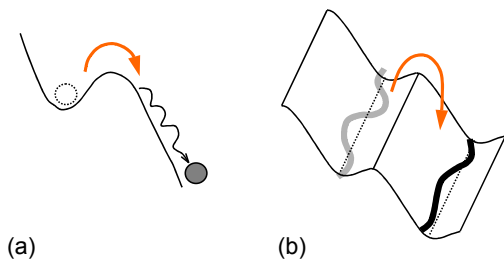


図6 (a) 小さい接合におけるポテンシャル、
(b) 大きい接合におけるポテンシャル

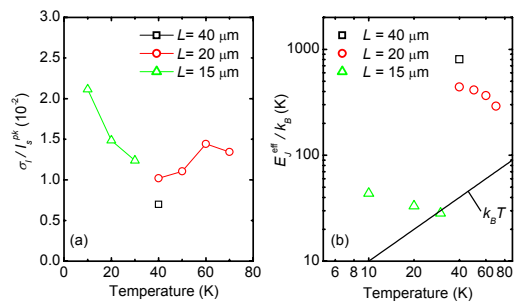


図7 (a)スイッチング電流分布幅の温度依存性、
(b)実効的ジョセフソンエネルギーの温度依存性

物質定数の一つであり、むしろ接合サイズLの方から設計していく必要があると考えられる。

このため、図5(b)に示すように、より接合サイズの小さい $L=15\ \mu\text{m}$ 四方のメサ型IJJ素子に対してスイッチング電流分布測定を行ったところ、予想に反して、SJJモデルよりもさらに分布幅が狭くなる実験結果を得た。これは上で述べたLJJモデルとは逆の振舞いである。通常、古典領域では熱揺らぎで分布幅が決まるため、測定温度から決まる分布幅より狭くなることはあり得ない。また、図7(a)に示すように、分布幅の温度依存性も温度減少と共に分布幅が広がる振舞いを示しており、通常の熱活性的脱出過程の振舞いとは逆の振舞いになっている。こうした結果は、メサ型素子において接合サイズを小さくしても、直ちに従来のSJJモデルで説明されるような古典領域には至らず、したがってその低温側に存在するはずの量子領域も観測が難しいことを示唆している。

この原因は、接合サイズLを系統的に変えたメサ型IJJ素子に対する実効的ジョセフソンエネルギー E_J^{eff} の温度依存性から明らかになった。ここで E_J^{eff} は、臨界電流 I_c と接合サイズパラメーター $(\lambda_J/L)^2$ に比例する量である。図7(b)に示すように、 $L=15\ \mu\text{m}$ まで接合サイズを小さくすると、温度のエネルギースケール

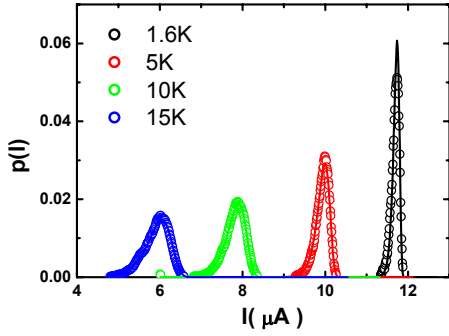


図8 S字型IJJ素子のスイッチング電流の確率分布. 実線はSJJモデルによるフィッティング

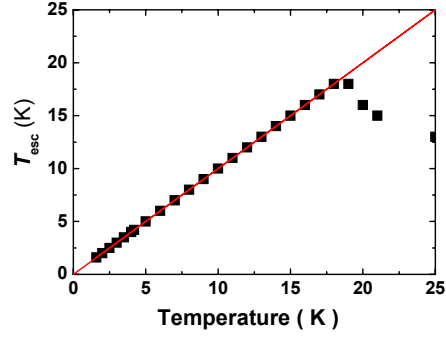


図9 S字型IJJ素子のスイッチング確率分布から得られた脱出温度

ル $k_B T$ 程度にまで E_J^{eff} が小さくなることが判明した. 最近, 従来の JJ でも $E_J^{\text{eff}} \leq k_B T$ となる古典領域でスイッチング電流分布が温度増大と共に狭くなる振舞いが報告され[5], ポテンシャル井戸から脱出後に再び束縛されるリトラッピング過程の影響が指摘されている. したがって, 図7の振舞いは E_J^{eff} 減少に伴うリトラッピング過程の増大と関係している可能性がある. また, 接合サイズに依存した E_J^{eff} の減少は, 臨界電流密度 $j_c (=I_c/L^2)$ が L に依存しない場合には起こらない振舞いであり, 何らかの理由でメサ型 IJJ 素子の臨界電流密度が, 接合サイズ減少と共に急速に劣化していることを強く示唆している.

このような接合サイズ減少に伴う臨界電流密度の劣化は, 素子構造に起因する可能性が高い. 特にメサ型素子の場合には, メサ外周部の SiO 絶縁層への漏れ電流やメサ上部電極からの準粒子注入の影響が懸念される. このため, 本研究の後半では, メサ構造とは別の素子構造を持つ IJJ 素子として, 図4に示すような S 字型 IJJ 素子の作製にも着手した. この構造では, 接合周辺部が真空のため漏れ電流の影響がなく, 電極部が同じ超伝導体から形成されるため準粒子注入の影響もないなどの利点がある. 作製には, 通常のイオンミリング装置よりさらに微細な加工ができる集束イオンビーム(以下, FIB と略記)装置を

用いた. 図4に示した IJJ 素子の接合サイズは約 $0.9 \times 0.8 \times 0.09 \mu\text{m}^3$ であり, 接合数は約 60 層と見積もられた.

図8に S 字型 IJJ 素子に対するスイッチング電流の確率分布 $p(I)$ を示す. 図5(b)に示したメサ型素子 ($15 \times 15 \mu\text{m}^2$) よりも接合面積が $1/200$ 以下になっているにも関わらず, スイッチング電流の大きさがほとんど変化していないことに注意されたい. これは S 字型素子の j_c がメサ型素子に比べて2桁以上向上していることを直接示している. また, 確率分布 $p(I)$ は, $T=1.6\text{ K} \sim 17\text{ K}$ の温度範囲で SJJ モデルを用いて定量的に説明できることが分かった. 図9に示すように, SJJ モデルとのフィッティングから得られる脱出温度 T_{esc} は $T=17\text{ K}$ まで熱浴の温度とよく一致しており, この領域では従来の JJ で知られた小さい接合における古典領域とほぼ見なせることが分かった.

以上の研究から, IJJ 素子を用いて位相量子ビットを構築する際の第1ステップとなる MQT 状態を観測するには, 少なくとも(1) $1 \mu\text{m}$ 程度の接合サイズと, (2) 1 kA/cm^2 以上の臨界電流密度を満たす IJJ 素子が必要ことが分かった. 現在, $T=1\text{ K}$ 以下の極低温領域までスイッチング電流分布測定が可能な測定系を立ち上げ中であり, これにより MQT 状態の直接観測が可能になるものと期待される.

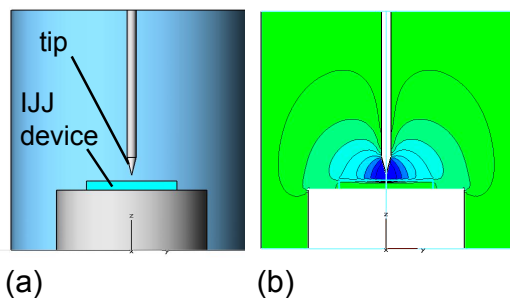


図10 (a) 超伝導共振器 (b) 電磁界解析から得られた共振電場の空間分布

既に述べたように本研究ではメサ型 IJJ 素子から研究を始め、様々な問題点に直面しその原因を特定しながら MQT 観測のための素子条件を絞り込んできたが、本研究の開始後、別の研究グループにより S 字型 IJJ 素子による MQT 状態および ELQ の観測結果が報告され[6,7], 当初予想した IJJ 素子の潜在的優位性が実証された。ここで述べた研究成果はこれら観測結果を相補するものであり、かつフラクソン量子ビットなど IJJ 素子の新たな可能性を示した重要な研究成果と位置付けられる。

(2) 超伝導共振器内の電磁場分布解析

本研究では様々な共振器構造に対して電磁場分布解析を行い、共振器内の共振電場を空間的に一点に集中させる手段を検討してきた。その結果得られた共振器構造を図 10(a)に示す[8]。この共振器は、円筒形のリエントラント型空洞共振器の一種と見なせる構造を持ち、

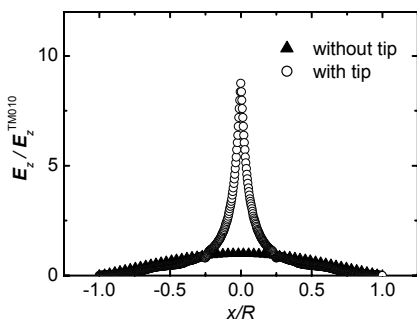


図11 電磁界解析から得られた電界強度分布

共振器下部の金属ステージ上に試料を設置し、共振器上部から伸びた金属探針を用いて共振電場を局所的に集中させる。

実際に 3 次元電磁界解析シミュレーターを用いて共振器内に生じる共振電場の空間分布を調べたところ、図 10(b)に示すように金属探針の先端に共振電場が集中することが分かった。金属探針により電界強度が増強される効果は、図 11 からも明らかである。この共振モードは、円筒の中心軸に平行な共振電場成分を持つため、IJJ 素子の接合面に垂直にマイクロ波電場を加えることが可能である。共振周波数に関しては、基本モードは円筒の直径や高さを調整することにより自由に設計できる他、高次モードの利用も可能なため、極低温用の測定インサートの先端に搭載できる共振器サイズでも 10 GHz~100 GHz の周波数範囲を十分カバーできることが分かった。

従来の cavity-QED 実験[2]では、Nb 超伝導体から作製されたファブリ・ペロー型共振器が用いられていた。この場合、1 光子当たりの電界強度は高々 1 mV/m 程度であるのに対して、図 10 に示す共振器構造では、金属探針を素子から 100 μm の距離にまで近づけることにより 1 光子当たり 100 mV/m 程度にまで電界強度を増強させられることがその後の数値解析から明らかになった。このような強い増強効果は、本研究の開始後に報告されたコプラナー型ストリップライン共振器を用いた cavity-QED 実験[9]の場合と同程度であり、本研究で示した超伝導共振器構造が将来の cavity-QED 実験に十分適用可能なことが示された。

【今後の展開】 本研究では、銅酸化物高温超伝導体の IJJ 素子を用いて位相量子ビットを構築することを提案し、これを実証するための基礎的実験をゼロから積み上げてきた。約 3

年の研究期間が経過し、ようやくMQT状態が観測できる一歩手前までたどり着いた。この間、IJJ素子におけるMQT状態とELQが相次いで報告されるに至り[6,7]、本研究で提案した位相量子ビットの構築が急速に現実味を帯びてきた。今後、この方面での研究競争が激化するのには必至であり、新たな研究分野として急速に発展することが期待される。

本研究では、メサ型IJJ素子から研究を始めた結果、大きい接合領域におけるフラクソンドYNAMICSに起因した非常に複雑な振舞いを観測するに至った。IJJにおけるフラクソンドYNAMICSは平行磁場下におけるジョセフソン磁束量子のフロー運動に伴うTHz発光源として以前から研究されていたが、ゼロ磁場中の振舞いはほとんど研究されておらず、この方面でも新たな展開が期待される。また、本研究では従来のJJと同様な位相量子ビットを構築するには、大きい接合よりも小さい接合の方が有利との判断から1 μm 以下の接合サイズを目指してきたが、最近、従来の人工的JJにおいて大きい接合領域でもMQT状態が観測されており、フラクソン量子ビットとして利用できる可能性が検討されている[10]。この意味で、IJJ素子は位相量子ビットとしてもフラクソン量子ビットとしても実現可能性の高い有力候補と見なすべきであり、今後の展開が大変楽しみである。

また、これまで言及してなかったが、従来の人工的JJに含まれないIJJの際立った特徴として、多数のジョセフソン接合が原子スケールで結合し多重接合系を形成している点も今後の重要な研究課題である。近年、従来の人工的JJを用いた超伝導量子ビットを2つ並べて、量子もつれ状態を生成する実験が盛んだが、IJJ接合間の相互作用をこのような量子もつれ状態の観点から研究していく方向性も考えられる。最終的に多重接合系であ

るIJJ量子ビットの量子もつれ状態を任意に制御できるかどうかは現時点で不明だが、人工的JJ系では生成困難な特殊な量子もつれ状態が作り出せる可能性もあるので非常に興味深い。

さらに、本研究も含めて現在、量子ビット構築に向けて研究されているIJJ素子は全て $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 高温超伝導体に限られている。高温超伝導体では CuO_2 面に注入されるキャリア数を制御することにより、反強磁性絶縁体相から超伝導相まで物性が大きく変化する振舞いが有名だが、IJJ系で観測された量子領域がキャリア数と共にどのように変化するかは全く未知のままである。キャリア数依存性や他の高温超伝導体との対比から重要な知見が得られるものと期待される。また、文献[6,7]によれば、超伝導転移温度が約90KのBi系IJJ素子で観測された古典領域から量子領域への交差温度 T_0 は、超伝導転移温度が約10KのNb系JJと比べて、高々2~3倍しか増大しておらず、まだ高温超伝導体の潜在的優位性を十分に引き出した結果になっていないことに気付く。この原因究明も今後の重要な研究課題である。

最後に、本研究で提案した超伝導量子ビットを用いたcavity-QED実験について触れておく。本研究では、将来のcavity-QED実験に適用可能な超伝導共振器構造を提案し、その電磁場分布を数値的に調べるに留まったが、本研究の開始後、従来の人工的JJを用いた超伝導量子ビットと超伝導共振器を組み合わせたcavity-QED実験が少しずつ報告されるようになった[9,11,12]。そこで用いられた超伝導共振器と本研究で提案したものを比べると、本研究で提案した構造の方が設計や制御性の自由度が高く、より高度な制御操作が可能であると考えられる。特に本研究で示した超伝導共振器は、原理的に従来の人工的JJ

を用いた超伝導量子ビットにも十分適用可能である。したがって、今後は数値シミュレーションだけでなく、実際に超伝導共振器を作製し、その効果を実証していきたいと考えている。

【結言】 本研究では、将来の量子コンピューター実現に向けて、現在実現されている超伝導量子ビットの動作温度に関する本質的問題点に着目し、高温超伝導体の IJJ を超伝導量子ビット(特に位相量子ビット)として用いることを提案した。その実証に必要な基本測定として、ゼロ電圧状態から有限電圧状態へのスイッチング電流の確率分布を測定し、位相量子ビット構築への第一歩となる MQT 状態の観測に必要な素子条件を抽出した。その一つは、小さい接合領域の実現に必要な接合サイズであり、もう一つは臨界電流密度を劣化させない素子構造であった。この観点でメサ型 IJJ 素子と S 字型 IJJ 素子を比較した結果、後者の方がより優れていることを見出し、S 字型 IJJ 素子において MQT 状態観測の一手前に相当する熱活性的脱出過程の観測に成功した。

さらに、超伝導共振器による cavity-QED の原理を用いて、超伝導量子ビットとマイクロ波光子との量子もつれ状態を生成するための超伝導共振器構造を設計した。量子もつれ状態の形成に不可欠な超伝導量子ビットとマイクロ波光子間の強結合条件を満たすために、共振器内のマイクロ波電場を空間的に一点に集中させる手段を検討し、円筒形空洞共振器の内部に金属探針を挿入する方法を提案した。詳細な 3 次元電磁界解析の結果、従来のファブリ・ペロー型共振器に比べて約 100 倍強い電界強度が得られることを見出し、この超伝

導共振器構造が将来の cavity-QED 実験に十分適用可能であることを示した。

【謝辞】 本研究は、太田健介氏、丸山修平氏、前田京剛助教授(以上、東大総合文化)との共同研究です。また素子作製に用いた FIB 装置は、田辺圭一博士と町敬人氏(以上、超電導工学研究所)、フォトリソグラフィ装置は、小宮山進教授(東大総合文化)からご支援を受けました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) M. H. Devoret and J. M. Martinis, *Quantum Information Processing* **3**, 163 (2004).
- 2) J. Raimond, M. Brune, and S. Haroche, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 565 (2001).
- 3) K. Ota, H. Kitano, and A. Maeda, *Physica C* **445-448**, 955 (2006).
- 4) H. Kitano, K. Ota, and A. Maeda, *Supercond. Sci. Technol.*, in press.
- 5) J. M. Kivioja *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **94**, 247002 (2005).
- 6) K. Inomata *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 107005 (2005).
- 7) X. Y. Jin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 177003 (2006).
- 8) H. Kitano, K. Ota, and A. Maeda, *Proceedings paper of 24th International Conference on Low Temperature Physics (LT24), the AIP Conference Proceedings* **850**, 943 (2006).
- 9) A. Wallraff *et al.*, *Nature* **431**, 162 (2004).
- 10) A. Wallraff *et al.*, *Nature* **425**, 155 (2003).
- 11) I. Chiorescu *et al.*, *Nature* **431**, 159 (2004).
- 12) J. Johansson *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **96**, 127006 (2006).