

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 18日現在

機関番号：32601

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21200035

研究課題名（和文）マイクロ波近接場の手法による量子もつれ合い状態の観測と量子相転移の研究

研究課題名（英文）Observations of quantum entangled states and quantum critical behavior by using a precise probing method of microwave near-field

研究代表者

北野 晴久 (KITANO HARUHISA)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：00313164

研究成果の概要（和文）：物性物理分野と量子情報分野の境界領域において、重要性が増している量子もつれ合い状態の解明に向けて、量子相転移点近傍での量子臨界挙動を調べるためのマイクロ波顕微鏡の開発研究と量子電磁力学的手法で生成される量子もつれ合い状態を観測するための超伝導空洞共振器の開発研究を行った。その結果、金属探針を利用したマイクロ波近接場によってマイクロ波顕微鏡の空間分解能が向上すること、及び量子電磁力学的な結合強度の調整に金属探針の挿入が有効なことを見出した。

研究成果の概要（英文）：Quantum entangled states become essentially important in both regions of condensed matter physics and quantum information technology. Toward a complete understanding of such states, we study the development of a microwave microscope to probe the quantum critical behavior in the neighborhood of quantum critical point, and the design of a superconducting cavity resonator to investigate the quantum entangled states generated by using a quantum electrodynamics theory. We found that a spatial resolution of the microwave microscope is strongly enhanced by utilizing a microwave near-field, which is realized by the insertion of a metallic needle into a cavity resonator. We also found that such an insertion of the metallic needle is useful for a precise control of the coupling constant between the Josephson quantum bits and the microwave photons at low temperatures, which is required to create the quantum entangled states.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2010年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
年度			
年度			
総計	23,800,000	7,140,000	30,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物性・結晶工学

キーワード：超伝導体、量子もつれ合い、マイクロ波、空洞共振器、量子相転移

## 1. 研究開始当初の背景

本研究代表者は、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合が将来の有力な量子ビット候

補になると着想し、2004年度より量子ビット実現への第一歩となる巨視的量子トンネル(以下、MQT)効果の観測実験に着手した。

また、当時、リドベルグ原子やトラップされたイオンなど原子系量子ビットに限って報告されていた超伝導空洞共振器内のマイクロ波光子を用いた量子もつれ合い（エンタングルメント）状態の生成実験をジョセフソン量子ビット系で行う実験を着想し、マイクロ波光子と強く相互作用させるための共振器設計にも着手した。科学技術振興機構の戦略的創造研究（さきがけ研究「量子と情報」領域、2003年度－2006年度）に採択後、研究環境をゼロから立ち上げ、2008年度までに固有ジョセフソン接合のMQTと離散化した量子準位（以下、ELQ）の観測に成功した。

さらに、これと平行してマイクロ波スペクトロスコピーによる超伝導揺らぎの動的スケーリング解析の手法を開発し、高温超伝導体における量子臨界挙動の有無を検証する実験にも取り組んだ（科研費若手研究(B)15760003、科研費基盤研究(B)17340102）。

このような経緯から、物性分野の量子相転移現象における量子臨界挙動と量子情報分野で活発に研究されている量子エンタングルメントの深い関連性と重要性を認識するに至り、この分野に焦点を絞った実験研究を行うべきという強い信念が芽生えた。さらに、量子ビットとマイクロ波光子との量子エンタングルメント状態を生成するために設計した共振器構造が、高感度なマイクロ波顕微鏡に応用できることに気づき、予備的な共振器設計や実験を経て、本研究を計画するに至った。すなわち、今後の新しい学術領域として、物性分野と量子情報分野の境界領域に着目した次第である。特に、2つの研究分野で重要性が増している量子エンタングルメント状態に焦点を絞り、自然界の様々な量子相転移現象における量子臨界挙動を定量化する実験を通じて量子エンタングルメントの役割を探求すると共に、量子電磁力学的（以下、QED）な手法で生成される様々な量子エンタングルメント状態の観測実験に挑戦することを着想した。

本研究で着目した境界領域では磁性理論的アプローチが急速に進展していたが（例えば、A. Osterloh et al., *Nature* 416, (2002) 608-610.）、この境界領域に着目した実験研究は非常に少なかった。関連する研究動向として、例えば、量子相転移現象は、磁性と超伝導が競合する銅酸化物高温超伝導体の発見後に研究が活発化し、磁性体以外にも重い電子系の超伝導や有機超伝導体など様々な物質で研究されてきた。しかしながら、量子臨界点近傍の臨界挙動を定量的に評価した実験研究はまだ少なく、理論的に予言された量子エンタングルメントのスケーリング挙動も観測されていなかった。一方、量子もつれ合い状態は、リドベルグ原子系（仏国）やトラップされたイオン系（米国）で先駆的実験が

報告され（例えば、J. Raimond et al., *Rev. Mod. Phys.* 73 (2001) 565.）、量子光学分野に波及した他、最近では従来超伝導体によるジョセフソン量子ビットとコプラナー型共振回路内のマイクロ波光子を相互作用させる「サーキット QED」の研究（米国、オランダ、日本など）が活発化した（例えば、A. Wallraff et al., *Nature* 431 (2004) 162.）。ただし、国内のジョセフソン量子ビット研究は、大規模なクリーンルーム施設と微細加工設備の充実した企業系研究所に限られており、この分野の最先端研究を大学が担う欧米諸国とはきわめて異なる状況が続いていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、空洞共振器に内蔵された金属探針によるマイクロ波近接場の高い空間分解性能と高密度性を利用して、物性分野と量子情報分野の双方で重要な役割を果たす量子エンタングルメントに関して、以下に挙げる2つに着目した研究を行う。(1) 極低温下（絶対温度 2 K 以下）で動作可能なマイクロ波顕微鏡を開発し、量子相転移点近傍の量子揺らぎに起因する相分離現象の観察、および量子臨界挙動における量子エンタングルメントの役割を探求する。(2) 高温超伝導体のジョセフソン量子ビット系とマイクロ波光子系の結合強度を極低温下で調整可能な空洞共振器を開発し、様々な量子エンタングルメント状態の生成実験（例えば、真空ラビ分裂など）に挑戦する。

## 3. 研究の方法

申請時当初に比べて研究予算が 25%程度削減されたことを受け、ジョセフソン接合アレイの作製に必要な真空チャンバー、スパッタ源、および成膜コントローラの導入を断念し、当初の研究計画のうちジョセフソン接合アレイを用いた金属絶縁体量子相転移近傍の量子臨界挙動の研究を延期するなど研究計画を一部修正し、以下の方法で研究を進めた。

### (1) 低温実験環境の整備と拡充

本研究で着目する量子相転移現象や量子もつれ合い状態は、多くは希釈冷凍機などを用いて実現される絶対温度 0.1 K 以下の極低温領域で観測されているが、本研究では絶対温度 4 K の低温環境の長期維持に必要なヘリウム再凝縮装置の導入と、絶対温度 0.5 K までの極低温実験環境実現に必要なヘリウム 3 冷凍機の作製を行う。

### (2) マイクロ波顕微鏡の開発

空洞共振器に内蔵された金属探針によるマイクロ波近接場を利用したマイクロ波顕微鏡の空間分解能を高性能化するために、電磁界シミュレーターを用いて電磁界解析を

行った結果に基づき、試料ステージ部分に大幅な改良を加えた空洞共振器を作製し、その動作試験を実施する。

### (3) 超伝導空洞共振器の開発

Bi系高温超伝導体の固有ジョセフソン接合をジョセフソン量子ビット系に選択し、超伝導空洞共振器をマイクロ波光子系に選択して、様々な量子エンタングルメント状態の生成実験を行うための空洞共振器構造について検討する。

### (4) 空洞共振器を用いた有機伝導体のマイクロ波応答測定

有機伝導体における金属絶縁体量子相転移の臨界挙動を調べるために、空洞共振器を用いて有機伝導体のマイクロ波応答測定を行い、その基本特性を研究する。

## 4. 研究成果

### (1) 低温実験環境の整備と拡充

液体ヘリウムを用いた低温実験を長期間実施していくために、ヘリウム再凝縮装置用コンプレッサー装置の設置(2009年度)とヘリウム再凝縮装置本体の導入(2010年度)を行い、絶対温度4 Kでの低温実験環境の長期維持を実現した。さらに、ヘリウム3冷凍機を自作し、絶対温度0.5 Kまでの極低温実験環境の拡充を達成した。これにより、Bi系高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を用いたジョセフソン量子ビット構築の基盤となる巨視的量子トンネル効果の実験および離散化量子準位の観測実験に成功することができた(図1参照)。

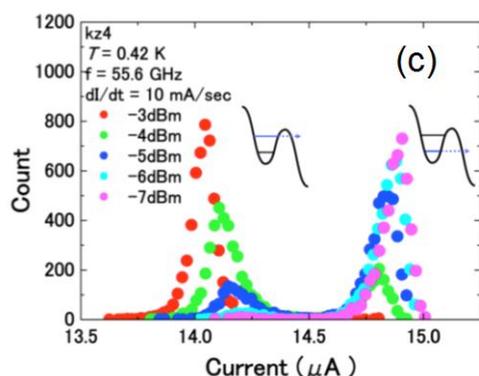


図1 離散化量子準位の観測

### (2) マイクロ波顕微鏡の開発

マイクロ波近接場を利用したマイクロ波顕微鏡の空間分解能を高性能化するために、試料ステージ部分に大幅な改良を加えた空洞共振器を作製した。室温環境下における性能評価を行うために、絶縁体基板に金ペーストを部分的に作成したテスト試料を用意し、

金属探針をテスト試料表面に近づけて金属探針と垂直方向に試料を移動させながら、空洞共振器の共振特性の変化を測定した。金属探針と試料表面間の距離が小さいほど大きな変化が検出されることから、指数関数的に減衰していくマイクロ波近接場を利用した測定原理が有効に機能している可能性が示唆された。しかしながら、定量的な再現性に若干の問題が残ることが判明したため、金属探針と試料表面間の距離を定量的にモニターするために、モニター用の光学センサを導入し、駆動ステージの再現性を定量的に検証した。絶縁体基板の一部に金ペーストを塗布した試料とアルミ蒸着膜の2種類のテスト試料を用意し、金属探針をテスト試料表面に十分に近づけながら、試料表面の電気伝導性の変化に伴う共振特性の変化を詳細に調べたところ、金ペーストを一部塗布したテスト試料では共振周波数の変化の検出に成功したが、アルミ蒸着膜試料では検出できなかった。これは、マイクロ波の表皮深さに比べてアルミ蒸着膜の膜厚が小さすぎて共振周波数の変化が検出限界以下であったためと考えられる。

次に、入力マイクロ波と出力マイクロ波の位相情報も測定可能なベクトルネットワークアナライザと、金属探針と試料表面間の距離をモニターするためのズームレンズを導入した。アルミ金属とガラス誘電体の多層膜試料を作成し、より定量的なマイクロ波顕微鏡動作試験を室温で行った。ズームレンズの導入により、金属探針の試料表面からの位置制御の分解能が飛躍的に増大し、マイクロ波測定の感度向上に成功した。その結果、多層膜試料におけるアルミ金属とガラス誘電体の表面電気伝導性の変化に伴う共振特性の急峻変化の検出に成功した(図2参照)。今後は、現在の電力振幅測定に加えてベクトルネットワークアナライザの特性を生かして、入力マイクロ波と出力マイクロ波の位相変化測定に取り組み、有機伝導体の相分離現象を観測するための低温動作マイクロ波顕微鏡装置の開発と測定結果から誘電率や電気伝導度など物質定数を求めるための解析技術の開発に取り組んでいく予定である。

### (3) 超伝導空洞共振器の開発

Bi系高温超伝導体の固有ジョセフソン接合をジョセフソン量子ビット系に選択し、超伝導空洞共振器をマイクロ波光子系に選択した場合の空洞共振器構造について検討した。現時点では、固有ジョセフソン量子ビット系における二準位系のエネルギーギャップの大きさを設計したり、外部制御したりする手段が十分に確立していないため、両者を結合させるには超伝導空洞共振器の動作周波数を広範囲(40 GHz~65 GHz)に、かつ

極低温下で調整できる機能を付加する必要があることが判明した。さらに、様々な量子

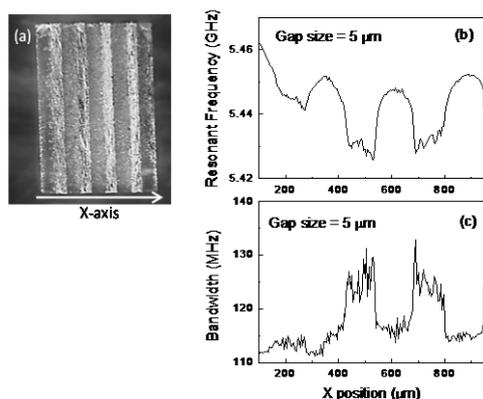


図2 (a) 作製した測定試料  
(b) 共振周波数の変化  
(c) 半値幅の変化

エンタングルメント状態の生成実験を行うためには、ジョセフソン量子ビット系とマイクロ波光子系の結合強度を極低温下で調整する機能が必要なが分かた。このような調整機能は誘電体や金属探針を空洞内に挿入／拔出する駆動機構の導入により実現可能と見込まれるが、絶対温度 1 K 以下の極低温で実施する場合、駆動機構の設置スペースや熱設計の観点から予想以上に実現困難なことが判明した。このため、超伝導共振器の設計・試作については一旦計画を延期し、固有ジョセフソン接合の量子二準位系におけるエネルギーギャップの直接制御を目指して、二準位系エネルギーギャップを支配するジョセフソンプラズマ周波数の直接決定に向けた測定装置開発の方を優先して取り組んだ。現在、高温超伝導銅酸化物の超伝導転移温度近傍でジョセフソンプラズマ共鳴の観測実験を進めている。今後は、ジョセフソンプラズマ共鳴の観測実験を進めると共に、超伝導空洞共振器の基本構造についても再検討し、試作機の設計と作製を進めていく予定である。

#### (4) 空洞共振器を用いた有機伝導体のマイクロ波応答測定

空洞共振器を用いて、①中村敏和准教授研究室（分子科学研究所）で合成された  $(\text{TMTTF})_2\text{SbF}_6$  擬一次元有機伝導体、および②佐々木孝彦教授研究室（東北大学金属材料研究所）で合成された  $\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$  擬二次元有機伝導体のマイクロ波応答測定を行った。

①  $(\text{TMTTF})_2\text{SbF}_6$  擬一次元有機伝導体に関して、良質な単結晶試料を用いて異方的な電気

伝導と電荷秩序相の形成について調べたところ、絶対温度 154 K で発現する電荷秩序の形成に伴い、擬一次元伝導方向に垂直な方向のマイクロ波電気伝導度が急激に減少する挙動を見出すと共に（図3参照）、擬一次元伝導方向の測定では誘電率の異常な増大に伴い、従来の  $\text{TE}_{011}$  モードを利用する空洞共振器振動法が破綻することを見出した。

②  $\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$  擬二次元有機伝導体に関して、27 GHz 空洞共振器によるマイクロ波応答測定より誘電率が擬二次元面内ではマイクロ波領域でも 100 程度あること、および液体ヘリウム温度近傍の低温で観測される折れ曲がりの挙動が他の実験で見える絶対温度 6 K~9 K での異常に対応する可能性が高いことを見出した。

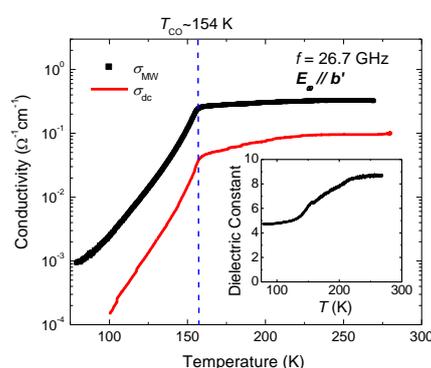


図3  $(\text{TMTTF})_2\text{SbF}_6$  のマイクロ波電気伝導度

今後は、空洞内の高周波電場分布の空間対称性がより優れた  $\text{TE}_{111}$  モードを利用する楕円筒型空洞共振器を用いて、 $(\text{TMTTF})_2\text{SbF}_6$  有機伝導体の擬一次元伝導方向の測定および  $\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$  有機伝導体の低温測定を進める他、金属絶縁転移を示す他の有機伝導体に対するマイクロ波応答測定にも着手していく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

1. M. Itoi, Y. Ishii, S. Takekoshi, H. Kitano, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, T. Nakamura, “Completely hydrostatic pressure effect of anisotropic resistivity in the 1-D organic conductor  $(\text{TMTTF})_2\text{SbF}_6$ ”, Physica C 470, S594-S595 (2010). 査読有  
doi:10.1016/j.physc.2009.11.138
2. 北野晴久, 大橋健良, 前田京剛, “超伝導揺らぎから見た高温超伝導銅酸化物の超伝

導発現機構” 固体物理, 45 卷, 511-527  
(2010). 査読無

〔学会発表〕(計 1 件)

竹腰秀甫 他,“(TMTTF)<sub>2</sub>SbF<sub>6</sub> のマイクロ  
波電気伝導度測定”, 日本物理学会 2009 年秋  
季大会 (2009.9.27) 熊本大学

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-kitano/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北野 晴久 (KITANO HARUHISA)  
青山学院大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 00313164

### (3) 連携研究者

佐々木 孝彦 (SASAKI TAKAHIKO)  
東北大学・金属材料研究所・教授  
研究者番号: 20241565