

平成 21 年 5 月 22 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540359

研究課題名 (和文) 固有ジョセフソン多重接合における協力的巨視的量子効果の研究

研究課題名 (英文) Study of cooperative macroscopic quantum effects in intrinsic Josephson junction stacks

研究代表者

小山 富男 (KOYAMA TOMIO)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：30153696

研究成果の概要：銅酸化物高温伝導体固有ジョセフソン接合系で観測される巨視的量子効果に対する理論的研究を行った。本研究では、主として Bi 系高温超伝導体の c 軸輸送で観測される低温での量子論的スイッチング現象に対する多重接合効果が考察された。研究成果として、接合間のキャパシティブ結合により量子トンネル効果が顕著に増大すること、及び、ユニバーサルスイッチングにおける脱出率の異常増大の機構を明らかにしたこと等である。以上の結果は、最近の実験結果と定量的に良い一致を示すものである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 II

キーワード：高温超伝導体、巨視的量子効果、ジョセフソン接合

## 1. 研究開始当初の背景

巨視的量子トンネル効果 (MQT) は、物理学の様々な分野に現れる普遍的な現象として知られる。本研究では、高温超伝導体固有ジョセフソン接合の電圧状態へのスイッチング電流値の分布に現れる量子トンネル効果を理論的に考察した。Bi 系高温超伝導体固有接合での MQT は、2005 年に Inomata 等により、第 1 ブランチへのスイッチング現象において初めて観測された。実験結果は、MQT が現れるクロスオーバー温度が 1 K 程度と、従来型のジョセフソン接合に比べて

一桁高く、また、エスケープレートも大きくなることが明らかにされ、大きな注目を集めた。さらに、2006 年には、ドイツのエランゲン大学の Jin 等により、一様電圧状態へのスイッチングでも MQT が観測された。この場合のエスケープレートは、試料に含まれる接合の数の 2 乗に比例する異常増大が生じることが見出され、接合間の相互作用が MQT に本質的効果を及ぼすことが明らかにされた。ジョセフソン接合系での MQT に対する理論は、これまで 1 接合系に対してのみ存在し、多重接合系の理論は皆無であ

った。したがって、固有ジョセフソン接合系で観測されたMQTを理解するためには、接合間に相互作用が存在する多重接合系でのMQTの理論を新たに構築がすることが要求された。固有ジョセフソン接合系の位相差の古典ダイナミクスは、本研究者等により構築されていた。この古典論は、固有ジョセフソン接合系の交流ジョセフソン効果等を定量的にもきわめてよく記述できることが知られている。したがって、この系のMQTは、この古典論を量子化する方法で定式化できることが期待された。

## 2. 研究の目的

本研究では、ナノスケールで積層するジョセフソン多重接合系で、接合間の相互作用を取り入れたMQT理論の構築を行う。この系のMQTは、準安定状態にトラップされた相互作用する準古典多粒子系で、トンネル効果により偽真空（準安定状態）が崩壊する問題と等価である。本研究では、接合間にキャパシティブ結合とインダクティブ結合が存在する固有ジョセフソン多重接合のスイッチング電流をクロスオーバー温度以下の量子論的領域で計算し、この系のMQT理論の構築を目指した。さらに、多重接合系での巨視的量子効果全般を扱える体系的理論の構築も目的とする。

## 3. 研究の方法

固有ジョセフソン接合系は、ナノスケールのSIS接合が積層した構造を持ち、各接合に古典的な位相差が定義できる系である。接合間に、静電相互作用に起因するキャパシティブ結合と、面内を流れる超電導電流間の相互作用に起因するインダクティブ結合が存在する場合、この系の位相差のダイナミクスは、古典領域で、結合型サイン-ゴルドン方程式に従うことが明らかにされている。この系の正準量子化は、2002年に本研究者が完成させた。固有ジョセフソン接合系のMQTは、この正準理論を用いて、多自由度の巨視的量子トンネル効果を計算することにより構築できる。本研究では、固有ジョセフソン接合系の正準理論から出発し、経路積分表示の量子論を導出する。さらに、インスタント近似を拡張した近似理論を用いて、エスケーププレート計算を、種々の終状態に対して試みた。本研究で構築した理論では、どのブランチにスイッチングするかは、終状態により指定できるので、各ブランチへのスイッチングでのエスケーププレートを計算し、実験と比較することが可能である。

## 4. 研究成果

本研究では、主として、Inomata 等による第1ブランチへのスイッチングと、Jin 等による一様ブランチへのスイッチングの実験で観測されたMQTに対する理論的定式化を行い、エスケーププレートの計算を行った。系がN個の接合を含む場合、第1ブランチへのスイッチングは、N個存在する自由度の内、1自由度のみMQTを引き起こす場合に対応する。この場合、残りの(N-1)個の自由度は、微小な量子揺らぎとみなせるので、経路積分が実行できる。すなわち、MQTを引き起こさない(N-1)個の自由度は、MQTを引き起こす自由度の運動方程式に含まれる定数の繰り込みという形で処理できる。インダクティブ結合が無視できる微小接合系では、接合間の相互作用は、キャパシティブ結合が位相差間の主要な相互作用となる。この場合、キャパシティブ結合はMQTを引き起こす自由度に対して、質量の繰り込み効果を与えること、及び、繰り込まれた質量は軽くなることが示される。このため、量子効果は増強され、エスケーププレートの増大が生じる。Bi系固有接合の古典領域で評価されたキャパシティブ結合の相互作用定数を用いて計算したエスケーププレートのバイアス電流値依存性は、Inomata 等の実験結果と定量的に一致する。

一様電圧状態へのユニバーサルスイッチングでは、接合数Nの系に対しては $N^2$ に比例するエスケーププレートの異常増大がJin等によりBi系固有接合で観測されている。この異常増大をもたらす機構として、本研究では successive tunneling という概念を提起した。このトンネル過程が生じる場合、系のN個の自由度は、同時に準安定状態から脱出するのではなく、時間的な遅れを伴って次々に脱出していく。この量子過程は、キャパシティブ結合する系が弱結合領域にある場合 most probable であることを本研究で示した。この successive tunneling が生じる場合、低温極限でエスケーププレートは、接合数の2乗 ( $N^2$ ) 比例することを汎関数積分の計算により厳密に示すことができる。実験的にも、 $N^2$ が観測されるのは、低温領域のみであり、本研究で構築した理論は、実験とコンシステントであることがいえる。また、本研究では、マイクロ波照射した場合に生じるMQTに対する定式化も与えた。

## 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 19件)

① T. Tachiki, S. Fukuya and T. Koyama,

- “Mechanism of Terahertz Electromagnetic Wave Emission from Intrinsic Josephson Junctions”, Phys. Rev. Lett. **102**, 127002/1-4, 2009. 査読有り
- ② T. Koyama, H. Matsumoto, M. Machida and K. Kadowaki, “In-phase Electrodynamics and Terahertz Wave Emission in Extended Intrinsic Josephson Junctions”, Phys. Rev. B **79**, 104522/1-12, 2009. 査読有り
- ③ T. Koyama and M. Machida, “Macroscopic Quantum Effects in Capacitively-Coupled Intrinsic Josephson Junctions”, J. Phys. Conf. Series **150**, 052127/1-4, 2009. 査読有り
- ④ M. Machida, T. Kano, S. Yamada, M. Okumura, T. Imamura and T. Koyama, “Quantum Synchronization Effects in Intrinsic Josephson Junctions”, Physica C **468**, 689-694, 2008. 査読有り
- ⑤ T. Koyama and M. Machida, “Macroscopic Quantum Tunneling in a Stack of Capacitively-Coupled Intrinsic Josephson Junctions”, Physica C **468**, 695-700, 2008. 査読有り
- ⑥ T. Koyama and M. Machida, “Macroscopic Quantum Effects in Intrinsic Josephson Junctions”, Physica C **468**, 1899-1902, 2008. 査読有り
- ⑦ T. Koyama, H. Matsumoto and M. Machida, “Emission of Terahertz Electromagnetic Wave in Intrinsic Josephson Junction Stacks”, J. Phys. Conf. Series **129**, 012026/1-5, 2008. 査読有り
- ⑧ M. Machida, T. Koyama and H. Matsumoto, “Synchronization Effects in Intrinsic Josephson Junctions by Non-Equilibrium Heating”, J. Phys. Conf. Series **129**, 012027/1-6. 2008 査読有り
- ⑨ M. Machida, T. Kano, S. Yamada, T. Okumura and T. Koyama, “Quantum Effects on Capacitively-Coupled Intrinsic Josephson Junctions”, J. Phys. Chem. Solid. **69**, 3221-3224, 2008. 査読有り
- ⑩ T. Koyama and M. Machida, “Effects of Capacitively Coupling on the Escape Rate in Intrinsic Josephson Junction Stacks”, J. Phys. Chem. Solid **69**, 3286-3288, 2008. 査読有り
- ⑪ H. Matsumoto, T. Koyama and M. Machida, “Electromagnetic Waves in Single- and Multi-Josephson Junctions”, Physica C **468**, 576-580, 2008. 査読有り
- ⑫ M. Machida, T. Kano, T. Koyama, M. Kato and T. Ishida, “Direct Numerical Simulation for Non-Equilibrium Superconducting Dynamics at the Transition Edge”, J. Low Temp. Phys. **151**, 58-63, 2008. 査読有り
- ⑬ M. Machida and T. Koyama, “Collective Dynamics of Macroscopic Quantum Tunneling in Layered High-Tc Superconductors”, Supercond. Sci. Tech. **20**, S23-S27, 2007. 査読有り
- ⑭ T. Koyama, M. Machida, M. Kato and T. Ishida, “Quantum Dynamics of Spontaneous Magnetic Flux in Closed 0-p Josephson Junctions”, J. Mag. Mater. **310**, e90-e92, 2007. 査読有り
- ⑮ M. Machida and T. Koyama, “Collective Macroscopic Tunneling in Intrinsic Josephson Junctions”, Physica C **460**, 275-276, 2007. 査読有り
- ⑯ T. Koyama, M. Machida, M. Kato and T. Ishida, “Quantum Dynamics of the Phase-Difference in an Assembly of Closed 0-p Josephson Junctions made by d- and s-wave Superconductors”, Physica C **460**, 1305-1306, 2007. 査読有り
- ⑰ T. Koyama and M. Machida, “Quantum Correction to the Discrete Breather in Capacitively-Coupled Intrinsic Josephson Junctions”, Physica C **460**, 1321-1322, 2007. 査読有り
- ⑱ T. Koyama, M. Machida, M. Kato and T. Ishida, “Macroscopic Quantum Effect in Intrinsic Josephson Junctions Containing Magnetic Flux”, Physica C **463**, 985-988, 2007. 査読有り
- ⑲ M. Machida and T. Koyama, “Theory for Collective Macroscopic Tunneling in High-Tc Intrinsic Josephson Junctions”, Physica C **463**, 262-265, 2007. 査読有り

[学会発表] (計 11 件)

- ① 小山 富男 「テラヘルツ波発振をもたらす固有ジョセフソン接合内の電磁場」日本物理学会第64回年次大会（東京、2009年3月28日）
- ② 小山 富男 「2バンド層状超伝導体の集団モード」日本物理学会2008年秋季大会（盛岡、2008年9月20日）
- ③ T. Koyama, “Theory for THz Emission in

- Intrinsic Josephson Junctions” (invited), International Conference on Theoretical Physics “DUBNA-NANO 2008” (July 7-11, 2008, Dubna, Russia)
- ④ 小山富男「固有ジョセフソン接合におけるテラヘルツ波発振II」日本物理学会第63回年次大会（大阪、2008年3月26日）
  - ⑤ T. Koyama, “Macroscopic Quantum Tunneling in Intrinsic Josephson Junction Stacks” (invited), The 4<sup>th</sup> CREST-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity (Dec. 17-18, 2007, Kitakyushu, Japan)
  - ⑥ T. Koyama, “Macroscopic Quantum Effects in Intrinsic Josephson Junction stacks”, 20<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity (Nov. 5-7, 2007, Tsukuba, Japan)
  - ⑦ T. Koyama, “Plasma Excitation in the Superconducting State of Two-Band Layered Superconductors”, 21<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity (Oct. 27-29, 2007, Tsukuba, Japan)
  - ⑧ 小山富男「固有ジョセフソン接合における第1及び第2ブランチへのMQT」日本物理学会第62回年次大会（札幌、2007年9月24日）
  - ⑨ T. Koyama, “Macroscopic Quantum Tunneling in a Stack of Intrinsic Josephson Junctions” (invited), Fifth International Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (Sep. 8-14, 2007, Rhodes, Greek)
  - ⑩ T. Koyama, “Effects of Capacitive coupling in the Escape Rate in Intrinsic Josephson Junction Stacks”, Spectroscopies and Novel Superconductors (Aug. 20-24, 2007, Sendai, Japan)
  - ⑪ T. Koyama, “Electromagnetic Wave Emission in Intrinsic Josephson Junction Stacks” (invited), 6<sup>th</sup> International Symposium on Intrinsic Josephson Effects in High T<sub>c</sub> Superconductors (July 17-19, 2007, Pohang, Korea)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小山 富男 (KOYAMA TOMIO)  
東北大学・金属材料研究所・助教  
研究者番号：30153696

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

加藤 勝 (KATO MASARU)  
大阪府立大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：90204495  
町田 昌彦 (MACHIDA MASAHIKO)  
独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究主幹  
研究者番号：60360434