

【100】

氏 名（本籍）	宮 崎 久 生 (千 葉 県)		
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)		
学 位 記 番 号	博 甲 第 3647 号		
学位授与年月日	平成 17 年 3 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審 査 研 究 科	数理解物質科学研究科		
学 位 論 文 題 目	<b>Cooper-pair transport in mesoscopic and atomic-scale Josephson junctions</b> (メゾスコピック及び原子スケールのジョセフソン接合におけるクーパー対伝導)		
主 査	筑波大学教授	理学博士	大 塚 洋 一
副 査	筑波大学教授	理学博士	森 岡 弓 男
副 査	筑波大学教授	理学博士	松 本 秀 樹
副 査	筑波大学助教授	理学博士	小野田 雅 重

## 論 文 の 内 容 の 要 旨

ジョセフソン接合は、SQUID（超伝導量子干渉計）やジョセフソン電圧標準など超伝導の計測応用において中心的な役割を果たす素子である。また基礎物理学においても、2次元ジョセフソン接合列を用いた2次元渦糸のKT転移の研究をはじめ、ジョセフソン接合は人工モデル系として有用であり多くの研究が行われてきた。近年の微細加工技術の発展に伴い、微小ジョセフソン接合に関する研究が大きな進展を見せている。ジョセフソン接合のダイナミクスは超伝導位相に対する微分方程式として書き下すことができる。この位相は超伝導状態における秩序変数であるエネルギーギャップの位相であり巨視的変数であるが、微小なジョセフソン接合においては位相の量子論的揺らぎが無視できなくなりうる。すなわち、微小接合では電子の移動に伴う電気エネルギーの増加が無視できなくなるため、位相と電荷（粒子数）との間にある不確定性関係によって位相の不確定性が増大することになる。このようにして微小ジョセフソン接合系は巨視的変数の量子効果を研究する恰好の舞台であり、最近ではこれを利用した量子ビットの実現などが報告されている。

著者は本論文において、微小なジョセフソン接合を研究の対象として3つの現象を研究した。論文は5章からなっており、第1章では研究の背景が、第2章では実験技術の詳細が述べられている。第3章では最初の主題である1次元微小ジョセフソン接合列における超伝導－絶縁体（S-I）転移の研究がまとめられている。著者はCrの抵抗と微小dc-SQUIDの並列回路をユニットとする1次元列試料を作製し、並列抵抗とジョセフソン結合エネルギー  $E_J$  を様々に変えた試料の極低温での伝導を調べた。 $E_J$  と一電子帯電エネルギー  $E_C$  の比は上述の量子性の度合いを表すパラメータであり、各接合に付加されたシャント抵抗の逆数は位相の時間変化に比例する散逸をもたらす。巨視的量子トンネルの理論によれば、散逸は巨視的変数の量子ゆらぎを抑える働きをし、これら3つの効果（ジョセフソン結合、帯電効果、散逸）の競合によって、ジョセフソン接合列の基底状態は位相が固定した状態（超伝導）かクーパー対数が固定した状態（絶縁体）かのいずれかとなる。実際著者は抵抗変化と電流電圧特性においてこの転移を確認し、これらのパラメータに対する基底状態の相図を決定した。特に並列抵抗の臨界値は散逸誘起のS-I転移の理論が予想する値とよく一致する。

また、2次元列の場合と比べて相図における絶縁体の領域が広がっており、これは低次元性の現れであると考えられる。

第4章は、超伝導原子ポイントコンタクトにおけるジョセフソン効果に関する研究で、ポイントコンタクトの電流－位相特性と伝導チャネルの透過率の間の関係を実験的に調べたものである。超伝導原子ポイントコンタクトの伝導はアンドレーエフ反射に基づく理論で解釈されている。例えば、Bagwellらはアンドレーエフ束縛状態の考え方によってその電流－位相関係を求め、またはAverinらは多重アンドレーエフ反射によって電流－電圧特性を決めた。いずれの場合もコンタクトの特性は伝導チャネルの数 $N$ とそれぞれの透過率 $\tau_i$ を通して現れる。Koopsらは原子ポイントコンタクトからなるrf-SQUIDの磁化を測定し電流－位相関係を調べたが、 $\{\tau_i\}$ との関連を定量的に議論した例はこれまでない。実験はトンネル接合と原子ポイントコンタクトからなるSQUID試料を用いるというアイデアに基づき、試料の電流－電圧特性をAverinらの理論によって解析し伝導チャネルの数とそれぞれの透過率を決定し、その一方で最大超伝導電流の磁場依存性からポイントコンタクトの電流－位相関係を知ることができる。解析の結果、Bagwellらの理論による電流－位相特性と類似の特性が得られたが、その絶対値には約2倍の違いが見られた。

第5章はSQUIDラチェットに関する研究である。ラチェットとは空間反転非対称な周期的なポテンシャル中にある粒子のことで、適当な大きさの振動外力を加えると粒子は一定方向への運動をすることがある。これをロッキングラチェット効果と呼ぶ。特に、熱ゆらぎが無視できない微小ラチェット系は、生物の分子モーターのモデル系として注目されている。Zapataらは片方の分枝を直列二重トンネル接合とした非対称dc-SQUIDが人工的ラチェット系となることを理論的に示したが、その実験的確認はまだ報告が無い。著者は第4章で作製した超伝導原子ポイントコンタクトとトンネル接合からなるSQUIDがこれと類似の特性を持つことに気づき、実際ロッキングラチェット効果の確認を行った。低周波の実験結果はDC特性から期待されるものと同じであったが、1MHzの交流に対する結果は極性が反転している。これは、カオス的な運動に原因があるとも考えられるが、今後の詳しい検討が必要である。

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文において著者は微小ジョセフソン接合に関する3つのテーマについて研究を行っている。第1のテーマでは1次元接合列のS-I転移を確認した。特に散逸による転移の確認ははじめてであり、この成果は既にPhysical Review Letters誌他において発表済みである。第2のテーマでは原子ポイントコンタクトとトンネル接合からなる非対称DC-SQUIDを用いるという秀逸なアイデアによりはじめて電流－位相特性と透過率の間の関係を定量的に議論した。理論との不一致の原因がどこにあるのかは今後の研究に待たなければならないが、原子ポイントコンタクトに関する基本的な実験として高く評価できる。第3のテーマであるSQUIDラチェットは第2テーマの副産物であり、まだその結果を十分検討するには至っていないが、量子ラチェットやカオス現象研究への新しい展開の可能性を秘めており十分評価できる萌芽的な研究である。以上、本論文が有する意義は大変深く今後のジョセフソン接合系及び関連の研究の発展に対する寄与は大きいと判断される。

よって、著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。