

金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用

研究代表 筑波大学物理学系 大塚洋一

Small Metallic Tunnel Junctions— Physics and Applications

Youti Ootuka, *Research Director of CREST*

Institute of Physics, University of Tsukuba

1. はじめに

本研究プロジェクトの目的は、微小トンネル接合における新しい物理現象を、応用を視野に入れつつ、探索し検証することであり、微小トンネル接合研究グループでは、・微小トンネル接合に関わる基礎物理、・微小トンネル接合作製技術の開発、・電子素子や回路への応用の各側面から研究を進めている。また量子カオス研究グループでは量子カオスとエネルギー準位に関する理論的研究を進めている。

物理に関する研究では、超伝導や強磁性などの金属からなる微小トンネル接合に関し、超伝導オーダーパラメータや磁化などの秩序変数と帯電効果の関わり合いを中心に研究を行っている。

微小な超伝導島電極においては熱励起のない多数電子系基底状態を実現することができる。この島電極を微小ジョセフソン接合でリザーバと結合したとき電荷数の異なるマクロな状態間の量子コヒーレンスが生じること、さらにこの量子コヒーレント状態を素子に高速のゲート電圧パルスを加えることにより制御できることを昨年度までの実験で明らかにし、この系が人工2準位系、すなわち電荷量子ビットとなることを示した。今年度は、複数ゲートパルスによる量子状態の操作、電荷エコーによる不均一広がり抑制の実証、コヒーレンスの原因などで進展を見た。また、2ビット系の研究にも着手した。さらに、メンバーの一人がデルフト工大への留学を行い、微小ジョセフソン接合素子によって磁束型量子ビットに関する研究をスタートした。

微小ジョセフソン接合配列において起こる散逸の大小による超伝導・絶縁体転移は本プロジェクトで一貫して研究を続けている対象である。昨年度までに単一接合、2次元配列での実験を報告した。今年度は1次元系における研究をスタートし、予備的な結果を得た。

抵抗の高い微小トンネル接合は測定対象への擾乱の少ない、メゾスコピックな電子状態のプロープとして利用できることを明らかにしてきた。この方法による微小超伝導体中の磁束状態の研究では、微小超伝導リングにおける超伝導揺らぎに関する新しい知見が得られると共に、常磁性超伝導電流や巨大渦糸状態などを調べた。

強磁性体を用いた微小トンネル接合に関してはクーロンブロッケイドとトンネル磁気抵抗(TMR)の巨大化の関連を詳しく調べつつある。予備的な実験結果によれば、 $1\text{M}\Omega$ 程度の大きなトンネル抵抗をもつ試料においては、TMRの増大は2倍程度にしかならない。これはコトンネリングによる増大と矛盾しない。

超伝導体と強磁性金属とで作ったトンネル接合ではスピン蓄積によるTMRの発生や超伝導の消失などが理論的に予言されている。これらを調べる研究を進めている。一方、超伝導・強磁性のクリーンな界面についても界面におけるアンドレーエフ反射や長距離近接効果などの研究が報告されている。強磁性体・超伝導体界面の抵抗測定、および長距離近接効果の有無の確認を可能にする構造を作製し、これらの現象の研究を行った。

単一電子素子の応用に関しては、高温動作を目的にした超微細加工による 10nm 以下の島電極をもつAl単電子トランジスタの開発を昨年報告した。このような試料を用いて微小導体中の離散準位の直接観察を目指した研究を今年度スタートした。また、金属クラスターの自己組織的配列の実現とその応用を追求してきたが、今年度は直径数nmの金クラスターを用いた電子トラップ型の少数電

子メモリの試作を行った。読み出しにはAI-SETを用い、明確なメモリ特性が認められた。さらに、高速動作が可能で、高度の集積が可能な不揮発メモリとして、電荷蓄積部として強誘電体 (PZT) を用いた単電子トランジスタメモリを昨年度提案・設計した。今年度はその試作を行い、評価測定を開始した。

単電子トランジスタの正常動作に障害となる背景電荷についての研究を行い、とりわけ大きな影響を与えるトンネルバリア内の背景電荷に関し、荷電粒子の安定・準安定2状態間の単純な熱活性的運動で理解できる事例を見出した。

微小トンネル研究グループでは、この他、カーボンナノチューブを用いた微小接合系、窒化シリコン薄膜を利用した微小トンネル接合作成法の高精度化、単電子トランジスタの高速動作などの研究を新たにスタートした。また9月に「ナノ構造とメゾスコピック系に関する日本-イスラエルシンポジウム」を共催した。

一方、量子カオスグループにおいては“ランダム行列理論と量子カオス”を主な研究課題とし、このテーマで9月に第3回国際ワークショップを開催した。ランダム行列の固有値分布と不純物系でのエネルギー準位分布との関連性が指摘され、量子ドット中の電子、超伝導渦中の準粒子、金属微粒子中の電子準位などに共通する普遍性が理解されつつある。

以下では上記各方面における今年度の研究進捗の状況を概説する。

2. 超伝導単一クーパー対箱における電荷量子ビット

微小ジョセフソン接合でリザーバと結合した超伝導島電極に生じるマクロな人工2準位系の量子コヒーレンスの研究では、複数ゲートパルスによる量子状態の操作、電荷エコーによる不均一広がり抑制の実証などで以下の進展を見た。

クーパー対箱に複数のゲート電圧パルスを印加して、パルス間の遅延時間における波動関数の位相発展に対応する量子干渉効果を観測した。位相発展をゲート制御することは、「量子位相ゲート」の動作に相当する。しかし図1に示すように、この干渉は約1nsしか持続しなかった。二準位の縮退しているバイアス点（共鳴状態）では5ns以上のデコヒーレンス時間が実際に得られており、非共鳴点でのこの短いデコヒーレンス時間は本質的とは考えにくい。現在の測定は1回の測定ではなく、多数回の同操作を積算するという方法であるため、低周波の電荷揺らぎによって生じる位相発展の違いによって見かけ上干渉が失われたと考えることができる。これを検証するため、NMRスピネコー法にヒントを得た「電荷エコー」実験をおこなった。 $\pi/2$ パルス $\rightarrow\pi$ パルス $\rightarrow\pi/2$ パルスの順にゲート電圧パルスを加える。第1パルスの後の位相発展の試行毎の違いは、 π パルスによる反転後の運動により相殺し、低周波の電荷揺らぎによる見かけ上のデコヒーレンスは効率よく取り除かれる。実際この方法により、量子振動は6ns（全体のゲート操作時間）まで観測され、エコー法の有効性が確かめられた。一方、このことはこのデバイスの動作に対し背景電荷の揺らぎが大きな障害となることを意味している。

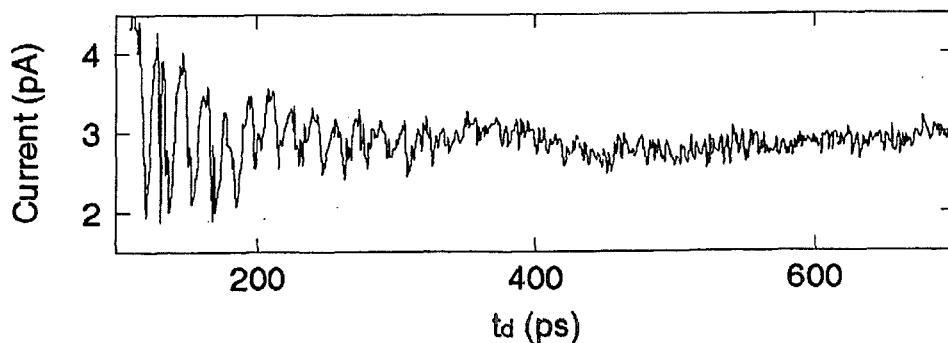


図1：電荷 qubit の2パルス実験における量子コヒーレンス振動とその減衰

3. 微小ジョセフソン接合配列における散逸誘起超伝導・絶縁体転移

超伝導微小トンネル接合（微小ジョセフソン接合）は量子相転移研究の恰好の舞台である。絶対零度において微小ジョセフソン接合系は系に付随するいくつかのパラメータの大小に応じ、超伝導状態、あるいはクーロンブロッケイド状態のいずれかになる。このうち特に散逸の大小に依って生じる両状態間の転移は巨視的変数の量子相転移に特有なものであり、とりわけ興味深い。我々はこれまで、この散逸による超伝導・絶縁体転移を微小抵抗を並列につなげた単一微小トンネル接合系、常伝導トンネル抵抗を付加した単一微小トンネル接合、並列抵抗を持つ二次元的配列について実験を行い、それぞれの場合に明確な超伝導絶縁体転移を観測した。本年度は2次元配列の実験結果を詳しく検討すると共に、新たに1次元系の実験を開始した。

各ジョセフソン接合をdc-SQUID型の並列接合とし、これらにさらに常伝導 C_r の抵抗器を並列に付け加えたものを1次元的に並べた試料を作製した。図2に示すように並列抵抗の大小により明確な転移が確認される。dc-SQUID型とすることにより弱い外部磁場を加えることにより実効的なジョセフソン結合エネルギーを連続的に変えることが可能であるが、これらの結果は理論的予測とよく一致する。

4. 微小超伝導体の磁場応答

4-1. 微小超伝導リングにおける磁束依存超伝導揺らぎの観測

微小トンネル接合を通して流れるトンネル電流をプローブとして用い、微小超伝導体の磁場応答を研究している。昨年微小リングの超伝導転移温度の磁場に対する振動（Little-Parks 振動）の振幅が理論値よりも減少することを報告したが、今年はさらに小さいAlリング（直径300nm、線幅80nm）の超伝導転移を詳細に調べた。その結果、印加磁束が半奇数倍時の秩序パラメータの揺らぎが整数倍の時よりも大きくなるという新しい現象を観測した。

4-2. 微小超伝導ディスクにおける常磁性超伝導電流の観測

メゾスコピック超伝導ディスクにおいては磁場下降時に正の磁化が観測されるケースがある（常磁性マイスナー効果）。その原因として複数の可能性が提案されているが、実験的な検証は行われていない。微小ディスクの超伝導エネルギーギャップの磁場依存性を測定することにより、磁場下降時には、弱磁場でディスクの外周に常磁性電流が流れている証拠を得た。このことは、常磁性マイスナー効果の原因が常磁性電流であることを強く示唆する。

5. 磁束型量子ビットの状態制御と量子コヒーレンス

3個のジョセフソン接合を含む微小超伝導ループにおいて、異なる磁束状態の間の量子コヒーレンスが観測されたとの報告が最近なされた。これは、微小ジョセフソン接合素子によって磁束型量子ビットを構成できる可能性を示すものである。我々は約1000個の量子ビットがDC-SQUIDと結合した試料に関して実験を行った。この試料においてはDC-SQUIDで検出される量子ビットの磁束が単一量子ビットの場合より約百倍大きく、外部磁場に依存する量子ビットの状態変化を非常に明確に観測することができた。なお、この研究は、デルフト工科大学の量子コンピュータ研究グループとの共同研究として行われた。

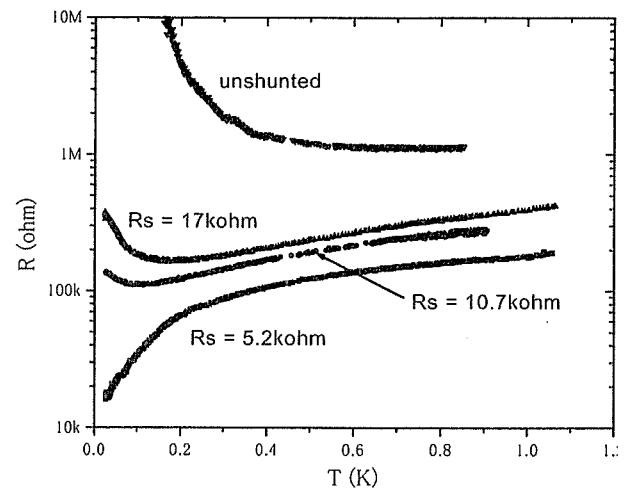


図2：一次元微小ジョセフソン接合列の散逸誘起超伝導・絶縁体転移

6. 単一電子素子

直径数nmの大きさの金属クラスターを単一電子素子に応用する方法を試行している。昨年までに基板上的特定位置に金クラスターを堆積させる技術の開発を行ってきたが、今年度はこの技術を利用して少数電子メモリセルを試作した。これは電子トラップ型のメモリセルを目指したもので、電子トラップ部を金・チオールアレーで構成し、読み出しはアルミニウムSETを用いる。ゲート特性に安定したヒステリシスが現れ、メモリ動作をするのが確認された。このメモリセルは自己組織化構造を使用しているため、潜在的には作成が大変容易な素子である。

また、昨年度提案した電荷蓄積部に強誘電体(PZT)を利用したSETメモリについては、今年度その試作を行い、評価測定を開始した。

7. 単電子トランジスタにおける熱活性化型背景電荷ゆらぎの観測

単一電子トランジスタ (SET) の動作に大きな影響を及ぼす背景電荷の位置と性質を調べるために、島電極の近接する複数個のSETを用いて、クーロン振動の同時観測を行った。その結果、図3に示すような2状態間を確率的に遷移するテレグラフ状時間的変動が観測された。これは安定状態・準安定状態間の2位置を有する単独の荷電不純物の運動を見ているものであり、その位相変化に対する影響の度合いから、原因となる背景電荷はトンネル障壁内にある可能性が高い。この変動を解析することにより双状態間の遷移確率が単純な熱活性化型であることがわかった(図3下図)。このような熱活性化型荷電不純物の報告は初めてである。

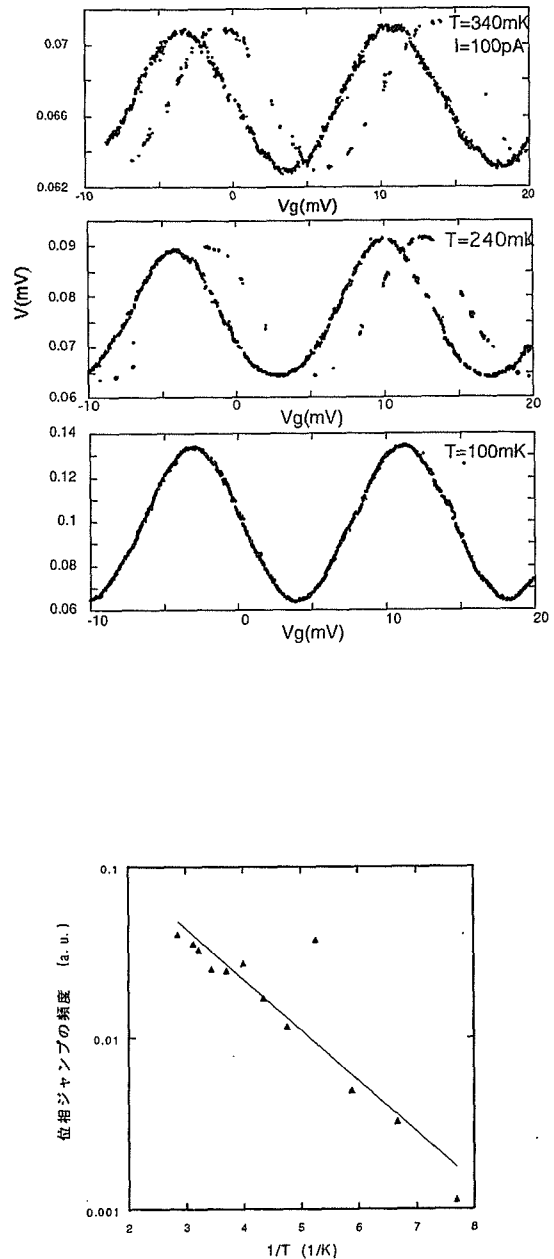


図3：背景電荷による位相ジャンプ（上）とその頻度の温度変化（下）