

「量子効果等の物理現象」  
平成8年度採択研究代表者

大塚 洋一

(筑波大学物理学系 教授)

## 「金属微細トンネル接合システムの物理と素子への応用」

### 1. 研究実施の概要

本研究の目的は、微小トンネル接合で生じる個々の電子の間歇的なトンネルによる輸送(単一電子トンネル現象)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る。微小トンネル接合研究グループでは、微小トンネル接合作製技術の開発、基本素子である単一接合や単電子トランジスタにおけるトンネル素過程の物理を中心とした研究、電子素子や回路への応用の各側面から研究を、またこれとは別に、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それぞれ進めてきた。

微小トンネルグループは平成11年度において、超伝導単一クーパー対箱におけるラビ振動の観測、超伝導トンネル接合2次元配列における散逸による超伝導絶縁体転移と相図の決定、微小超伝導リングにおけるリトル・パークス振動の減少の発見、静電容量によって結合した微小Josephson接合列における完全度の高い電流ミラー効果の発見、強誘電体とSETを組み合わせた不揮発メモリの提案、アルミニウムを用いたSETの室温動作の成功などの研究成果をあげた。また、量子カオス研究グループでは、不純物散乱に由来するユニバーサルなゆらぎに関し、外場がある場合の解を得て、二準位の量子ホール系、超伝導渦糸中の励起準位に応用することによって新しい知見を得た。

### 2. 研究実施内容

微小トンネル接合研究グループでは、微小トンネル接合作製技術の開発、単一接合や単電子トランジスタにおける物理、電子素子や回路への応用の各側面から研究を、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た。平成11年度においては以下に述べる各方面における研究の進捗があった、これらの中でもとりわけ単一クーパー対箱における量子コヒーレンスの実験は、固体電子素子で初めて量子ビットを実現すると共にその制御を行ったことに相当し、量子計算への応用の観点から世界的にも高く評価され、この研究を行った中村泰信氏は99年度の仁科記念賞及び第1回Sir Martin Wood賞を受賞した。また1999年夏に開かれた第22回低温物理学国際会議では、この量子コヒーレンスの実験

を始め、3件の招待講演をチーム内から出した。

(1) 微小トンネル接合の物理

【超伝導単一電子箱を使った量子ビットの研究】

微小ジョセフソン接合において2つの異なる粒子数状態間の量子コヒーレンス振動の時間領域における観測に前年度成功し、その結果がNature誌に発表された。11年度においてはさらに、マイクロ波を重畳したパルスを用いて、フォトン場を介した2状態の結合によるラビ振動の観測にも成功した。この実験ではラビ振動周波数のマイクロ波振幅に対する依存性がベッセル関数によって表せることが初めて明確に示された。外部制御可能な量子2準位系は、量子計算実現の観点から大きな関心を呼んでいる。今後、複数量子ビットの実験への展開を図るために、希釈冷凍機中の高速同軸ケーブルの複数化、サンプルホルダ・プリアンプなど作製・測定プログラム改良・マスク設計等の準備を行った。

【2次元微小ジョセフソン接合列における散逸誘起超伝導・絶縁体転移】

超伝導の単一微小ジョセフソン接合において理論的に予想されていた散逸の大小による超伝導・絶縁体転移に関しては、研究第一年度に微小抵抗を並列につなげた単一微小トンネル接合系、第二年度にはエネルギー散逸の機構としてトンネル抵抗を付加した単一微小トンネル接合についての実験を行い、これらの系に実際に超伝導・絶縁体転移が起きることを明らかにした。平成11年度においては、これらの研究をまとめるとともにエネルギー散逸を制御された接合を二次元的に配置した場合の超伝導絶縁体転移に関しての実験を進めた。2次元配列の各ジョセフソン接合に並列に常伝導金属でできた抵抗器を付け加えた試料において、抵抗器の抵抗値を変化させた場合、及び弱い外部磁場を与えることにより実質的ジョセフソン結合エネルギーを変化させた場合のいずれについても超伝導・絶縁体転移を観測した。実験結果をもとに、 $EJ/EC$   $RQ/RS$ 平面における相図を得た。

【微小超伝導リングの磁束状態】

微小トンネル接合を使った超伝導エネルギーギャップ測定法を利用し、極微小超伝導リングの転移温度近傍の磁束状態間遷移について詳細に調べた。その結果、通常理論では予測されていないヒステリシスの無い転移が観測され、また、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小さくなることを見出した。この原因として、1)微小超伝導体に特有な印加磁束に依存する超伝導揺らぎ、2)単連結超伝導状態の出現、の2通りが考えられる。

【静電容量によって結合した微小ジョセフソン接合列における電流ミラー効果】

微小Josephson接合列2本を静電容量によって結合した素子において、完全度

の高い大きな電流ミラー効果（一方の接合列に流す電流が他方の接合列に同じ大きさの電流を誘起する現象）を見いだした。この効果は、精度の高い電流 multiplier を構成する基礎となり、たとえば電流標準など、単一電子あるいは Cooper 対の帯電効果を利用した機能素子の信号レベルを実用的なレベルまで引き上げる可能性を開いたという意義がある。

(2) 素子・回路への応用

【単一電子メモリ】

強誘電体膜とアルミニウム SET を組み合わせた高速不揮発性記憶素子について検討を行い、素子の基本特許を申請した。書き込みの低電圧化を如何に実現するかが鍵である。素子の実証に向け、設計を終了し、試作を開始した。

(3) 微細加工技術の開発

【微細トンネル素子(室温 SET)】

室温級アルミニウム SET の作製に初めて成功した（静電エネルギー 700K）。室温での電荷相当ノイズは 10Hz において  $8 \times 10^{-3} e / \text{Hz}^{1/2}$ 、高周波のホワイトノイズ領域では従来の FET より約 2 ~ 3 桁高感度であり、超高感度電荷計として十分期待できる。室温アルミ SET の特性解析を進め、量子準位に由来する輸送特性上の構造および静電エネルギーから推定される島の大きさが一致することがわかった（約 2 nm）。

自己組織金微粒子列により SET を作成し、大きなプロクード電圧とそのゲート変調を観測した。微小金クラスターを電極間に整列させる技術は目覚しく進歩した（特許出願）が、まだ十分なトンネル電流を観測するには至っていない。

(4) 量子カオスとエネルギー準位相関の理論的研究

量子カオス研究グループは東京大学総合文化研究科氷上研究室が中心となり、国外の研究者を共同研究者として、量子カオスとエネルギー準位の理論的研究を行ってきた。11年度は第三回ワークショップを東大数理研究科ホールで開催し、メンバーを中心に招待講演者を招き、多くの議論を行い問題の理解を深めた。これらのワークショップにはチームメンバー以外にもこの分野で活躍している人が多く参加した。

具体的な研究内容は以下の通りである。量子ホール効果状態、金属微粒子、超伝導渦糸等のメソスコピック系で見られる不純物散乱に由来するユニバーサルなゆらぎを理論的に解明することを目的とした研究を行ってきた。ユニバーサリティーを証明する為、また系統的に扱う為に、ランダム行列模型を使っての解析的研究を進めて来た。特に、外場がある場合の解を得て、今まで知られていたランダム行列理論に興味ある新しい寄与を行った。具体例として、二準

位の量子ホール系、超伝導渦系中の励起準位にその相関関数の結果が応用され新しい知見が得られたことが上げられる。また、その他には特性多項式のモーメントがユニバーサリティーを持つことが見いだされ、リーマンゼータ関数のモーメント平均に一致する注目に値する結果が得られた。これは、上記のユニバーサリティーの証明の一部として理解されるものである。

### 3 . 主な研究成果の発表（論文発表）

Y. Shimazu, T. Noda, T. Uchikawa and K. Sakai, "Resistive Barkhausen Noise at Room Temperature in Thin Ferromagnetic Wires", Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) 458-463.

H. Shimada, Y. Ootuka, S. Kobayashi, S. Katsumoto and A. Endo, "Quantum Charge Fluctuations in Quantum Dots", Journal of Physical Society of Japan 69 (2000) 828-865.

Y. Shimazu, I. Yamamoto and M. Yamaguchi: "Superconductivity Effect on Magnetoresistance in Ferromagnetic Tunnel Junctions", J. Magn. Magn. Mater. 198-199, 76-78 (1999)

A.Kanda, M.C.Geisler, K.Ishibashi, K.Aoyagi, and T.Sugano, "Energy gap measurement in ultrasmall superconducting rings", MICROELECTRIC ENGINEERING 47 (1999) 389-391

Y.Nakamura, Yuri Pashkin, and J.S.Tsai, "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box", Nature 398 (1999) 786-788

Yu.pashkin, Y.Nakamura, and J.S.Tsai, "Coulomb Blockade in Resistively Coupled Single Electron Transistor", J. Appl. phys 38 (1999) 2466-2469.

島津佳弘 山本勲 山口益弘 " Superconductivity Effect on Magnetoresistance in Ferromagnetic Tunnel Junctions" J.Magn.Magn.Mater 198-199, (1999) 76-78

Y. Ootuka, Keiji Ono, Ryoji Matsuda and Hiroshi Shimada, "Magneto-Coulomb Oscillations in Ferromagnetic Single Electron Transistors", Microelectronic Engineering 47 (1999) 409-411.

樋口三郎, "Loop Model with generalized Fugacity in Three Dimensions" Journal of Physics A 33 (1999) 1661-1673.

樋口三郎, "Compact polymers on decorated square lattices" Journal of Physics A 32 (1999) 3697-3709.

樋口三郎, " Hamiltonian cycles on random lattices of arbitrary genus " Nuclear Physics B 540 (1999) 731-741.

大塚洋一、強磁性体単電子トランジスタ、 社団法人日本応用磁気学会第111回研究会資料 主題 微細加工微小磁性体における新しい物理現象 (1999.7.21)15-22 .

E.bre'zin, S.Hikami, and A.J.Larkin, "Level statistics inside the vortex of a

superconductor and symplectic random matrix theory in an external source", Physical Review B 60 (1999) 3589-3602.

R. Yagi, S. Kobayashi and Y. Ootuka, Dissipative Phase Transition in Single Small Josephson Junction with Normal Tunnel Junction, J. Phys. Soc. Jpn. 68 (1999) 1075-1077.

大塚洋一、強磁性単一電子トランジスタの磁気抵抗、物性研だより39 (2000) 29.