

## 研究課題別事後評価結果

### 1. 研究課題名

金属微細トンネル接合システムの物理と素子への応用

### 2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は研究参加期間終了時点）

研究代表者 大塚 洋一 筑波大学物理学系 教授

主たる研究参加者名 氷上 忍 東京大学 総合文化 教授

蔡 兆申 NEC基礎研究所 主管研究員

### 3. 研究内容及び成果

本チームは研究課題的には二つのグループから成る。一つは、「微小トンネル接合研究グループ」で、微小なトンネル接合に見られる一電子トンネル現象に着目し、単一の接合の基本的な物理特性を明らかにすると共に、微小トンネル接合ネットワークに生じる多様な量子物理現象の解明を図り、かつこれら量子物理現象の素子応用への可能性を探ることを目的とするものである。特にアルミニウム等の金属を用いた微小トンネル接合に研究対象を絞り、超伝導状態や強磁性状態でのトンネル効果の観測によって単一電子トンネル効果とこれら巨視的秩序が織りなす多様な物理現象を解明し、大学と民間研究所との共同研究によって基礎物理の研究と素子への応用およびそれらの基盤となる微細加工技術の開発を総合的に推進することをねらったものである。他の一つは、「量子カオス研究グループ」で、微小導体における準位統計や量子カオスといった懸案の問題を理論的に解明することを目的とするものである。

主な研究成果の概要

#### 1) 「微小トンネル接合研究グループ」（グループリーダー 大塚 洋一）

半導体量子ドットと比較したとき、金属微小トンネル接合は使用材料の選択肢に富むという特徴を生かし、超伝導体や強磁性体を使った微小トンネル接合の研究を行い、以下のような研究成果をあげた。

- 1] **超伝導電荷量子ビットの実現**：極低温の単一クーパ対箱において、クーパ対数が1だけ異なる2種類の超伝導凝集状態間のコヒーレントな重ね合わせ状態を周波数領域及び実時間領域の双方で観測した。これは固体素子における量子ビット実現及び同ゲート操作の最初の報告となった。さらに、電荷工コー法により、背景電荷揺らぎによるデコヒーレンスの抑制にも成功した。量子計算実現の観点から世界的に注目され、これを契機に、固体素子における量子ビットの研究が各国で強力に進められつつある。なお、電荷と共役な関係にある磁束を利用した量子ビットに関しても、予備的な実験を行った。
- 2] **超伝導微小接合における超伝導コヒーレンスと散逸**：巨視的物変数の運動（時間変化）が量子力学的なものになるかどうかには、超伝導接合に結合する無数のミクロ自由度（散逸機構）の有無が重要である。微小ジョセフソン接合と並列に散逸となる抵抗をつけた単一接合、1次元配列、2次元配列において散逸によって生じる超伝導・絶縁体転移を初めて観測し、 $T=0\text{K}$ における相図を決定した。
- 3] **強磁性単電子トランジスタにおける単一電子帯電効果とスピン偏極**：強磁性単電子トランジスタにおいて、磁場に対して周期的に電流が変化するという現象（磁気クーロン振動）を実験的に見出し、理論モデルも構築した。また、クーロンブロック状態下では、トンネル磁気抵抗効果が従来の理論的限界値を越えて異常増大するという現象も見出した。
- 4] **静電容量で結合した微小Josephson接合列における電流ミラー効果**：多数の微小Josephson接合が直列接続された1次元列を2本静電容量で結合した素子で、一方の接合列に流す直流電流がそれと同じ大きさの電流を他方の接合列に誘起する現象（電流ミラー効果）を発見した。その機構は未だ不明な部分が多いが、電流整数倍器への応用が期待できる。
- 5] **微小な単一超伝導リングやディスクにおける磁束状態の研究**：微小トンネル接合は計測手段としてもユニークな応用が可能である。この研究では、高抵抗の微小トンネル接合を計測プローブに付けることによって超伝導ギャップの無侵襲（測定対象に影響を与えない）局所プローブが可能であることを示し、磁束に依存する超伝導揺らぎや常磁性超伝導電流などの知見を得た。新しいマイクロプローブとしての可能性がある。
- 6] **金属超微粒子における1電子準位のトンネル分光**：10nm級のAl-SETを用いて、アルミニウム島電極中の離散1電子準位による電流の階段構造を確認した。

また多層カーボンナノチューブを島電極とするSETを用い、そのトンネル障壁の所在を明らかにすると共に、ナノチューブ内の電子状態と考えられる構造を確認した。

#### 7) 技術開発及びデバイス応用

1. **抵抗結合型SET(R-SET)の開発**：通常の単一電子トランジスタの動作で問題となる背景のランダムな電荷に影響されない抵抗接合型単一電子トランジスタ (R-SET) の試作に初めて成功。

2. **室温動作SETの開発**：初めて金属材料による単一電子トランジスタ(SET)の室温動作を実現した。材料はアルミであり、通常のゲート周期性のそろうた電気特性が観測された。室温での等価入力電荷雑音は約  $0.01 e/\text{Hz}^{1/2}$  (@ 1 Hz) であり、従来のFETより2～3桁高い電荷感度を有し、超高感度電荷計として十分期待できる。

3. 自己組織化した金属微小クラスターを利用した微細加工技術の開発をすすめ、直径数 nm の金クラスターを用いた電子トラップ型少数電子メモリを試作した。また、SETを読み出しに用いた不揮発型強誘電体メモリの提案と試作を行った。

4. SETをセンサーとする走査型表面電荷顕微鏡の開発を進めた。

#### 2) 「量子カオス研究グループ」(グループリーダー 氷上 忍)

量子カオス研究グループは東京大学大学院総合文化研究科氷上研究室を中心とし国外の研究者を共同研究者とした研究グループである。計5回の国際ワークショップを開催するなどして"エネルギー準位相関と量子カオス"のタイトルのもとに研究を行い、様々な場合にユニバーサルな相関が見られることを見だし、その理由を理論的に明らかにした。

特に通常のランダム行列理論を外場がある場合に拡張することに成功した。この結果は、部分的ではあるがユニバーサリティの証明にもなりうる事を意味し、また、外場のパラメータを変えることにより新しいユニバーサリティクラスを導出できるモデルにもなりうるものである事が示された。具体的には、この外場のあるランダム行列理論により、超伝導渦中の励起状態のピュア極限からダーティ極限へのクロスオーバーを正確に求める事ができた。また、外場のパラメータを変えることにより状態密度にギャップを生じさせ、ちょうどギャップが開く時に新しいユニバーサリティクラスが見られる事を示すことができた。さらに、この新しいユニバーサリティクラスでの相関関数、エネルギーレベル間隔分布を正確に求める事に成功した。この結果は、たとえば、相互作用がある量子ドットの電気伝導度分布に適用できると考えられる。ランダム行列として、複素対称行列、実対称行列、複素行列、リー環など様々な場合を研究した。特に、リー環の場合は数論のL関数のユニバーサリティと密接な関係を見いだす事ができた。量子カオスの観点からも興味深い結果が得られた。また、理論的手法に関しては、特に実対称行列の場合、超対称(スーパーシンメトリー)の手法が役に立つ事が見いだされ、相関関数の計算に適用された。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

「微小トンネル接合研究グループ」の成果であるが、固体素子Qビット、巨視的量子トンネル現象と散逸との関連、金属ドットによる室温動作SET、磁気クーロン振動など、それぞれにおいて最先端の成果を得ている。特に、単一クーパー対箱を用いた量子2準位系固体素子Qビットの成果は、固体電子素子での世界初の量子ビット実現ということで、世界的に強いインパクトを与え、その後、ヨーロッパやアメリカに複数の追従研究グループが生まれているのは高く評価できる。散逸と超伝導転移の研究成果は量子力学の観測理論につながる重要な成果である。また、この散逸問題は、量子コンピューターの基本となる量子ビットのコヒーレンスの持続時間(デコヒーレンス時間)を決定する重要な問題でもある。超伝導量子ビットは、デコヒーレンス時間が比較的長く、微細加工技術も半導体微細加工技術をそのまま利用できるということもあり、半導体量子ドット、核スピンなど、いくつか提案されている固体素子Qビットの中で優位にある。その意味で、本研究チームの成果は、量子コンピューターの実現への入り口に最も近いところにある。2量子ビットの達成は遅れているが、その早い実現を期待する。その他成果として、室温動作SETを実現したのは意義のある成果である。単電子トランジスター(SET)が広く実用に供されるためには、室温での動作は達成されなければならない大条件であり、そのためには単電子トランジスターの超微細化が不可欠となる。これを電子ビーム露光法による超微細加工技術で成功したことは、将来の応用への展開を考えると意義は大きい。また、本研究チームの命名になる磁気クーロン振動の初めての発見も注目すべき成果である。強磁性単電子トランジスターにおける単一電子帯電効果とスピン偏極の相関で発生するクーロン閉塞状態における大きな異常磁気抵抗は、新奇な機能デバイスの可能性がある。これも強磁性金属の微細加工の独自の工夫によって達成されたもので、成果の内容とともにそれを達成するための努力を評価する。その他の成果も、現状では不定な要素もあるが、

それぞれに評価できる成果である。総じて、科学・技術的に先端的で、レベルの高い成果を得ている。

「量子カオス研究グループ」は、金属微粒子、量子ドット、超伝導渦中の準粒子などに適用され、実験との一致が見られているランダム行列理論をさらに拡張することを目指し、外場と結合したランダム行列の解法に成功したことは大きな成果である。本グループは、本研究分野で世界的に先頭を走る多数の理論家を組織し、数学者の参加も得て、5回の国際研究集会で議論を戦わせて、大きな発展があったことは意義の大きいことである。今後の、この分野の新しい進展が、このグループを中心に展開されることは、間違いない。

外部発表は310件、特許は3件となっている。外部発表は質量ともに十分と言える。特許については「不揮発性メモリ」、「金属微粒子秩序構造形成法」、「カセンサ及び力検出装置並びに力検出方法」の3件となっているが、主要成果に対する特許が出願されていない。基礎科学的で特許として有効性が不定という要因があるかも知れないが、もう少し出願出来たはずである。

受賞は以下の通りとなっている。仁科記念賞など中村氏の受賞が目立つが、これは固体Qビットの実現による成果に対して与えられたものである

中村泰信	第1回Sir Martin Wood 賞(1999.11)
中村泰信	第45回仁科記念賞(1999.12)
大野圭司・島田宏・大塚洋一	第4回日本物理学会論文賞(1999.3)
大野圭司	第16回井上研究奨励賞(2000.2)

#### 4-2. 得られた研究成果の科学技術への貢献

その実現は、まだ遠い先で、夢の段階にあるが、量子コンピューターは国の内外で、大変に高い関心が持たれている。量子コンピューターに関する学会、講演会などには、非常に多くの研究者が集まるが、その切っ掛けとなったのが、本研究成果である単電子クーバー対箱による世界初の固体素子Qビットの成功であった。本研究成果は夢実現の入り口の扉を開く役割を果たしたもので、科学的にも、将来への技術的可能性への指針として、内外の研究者に与えたインパクトは大変に大きく、量子コンピューターの内外の重要シンポジウムでは本成果の招待講演が定番メニューに入る状況が続いている。2Qビット、さらには多数Qビットの実現が強く期待されている。また、強磁性金属の接合トンネルによる磁気クーロン振動と異常磁気抵抗増大、電流ミラー効果などは独自の発見であり、科学的意義とともに、技術的にも展開が考えられる。技術的なインパクトとしては、金属材料による室温動作SETのインパクトは大きい。抵抗結合型SET、金属クラスターを自己組織的に配列し利用するためのプロセス開発(特許出願)、また強誘電体とSETを組み合わせたメモリ素子(特許出願)などは、単電子デバイス応用を考える上で技術的に重要な研究成果である。その他の成果も含めて、本研究の微小トンネル接合の成果は、個別の素子は既にできており、これらが基になって応用研究が実現に向けて進むことが期待される。

#### 4-3. その他の特記事項

研究チームの「微小トンネル接合研究グループ」は大学の研究者と企業の基礎研究所の研究者が協力して研究が進められて、個々の成果は、それぞれの機関で独立に出されているが、相互に十分に議論がなされるなかでの成果である。

[<<量子効果トップ](#)

This page updated on April 1, 2003

Copyright(C)2003 [Japan Science and Technology Corporation](#)