

筑波大学 教授

大塚 洋一

「金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用の研究」

## 1. 研究実施の概要

1996年大塚は、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して、東大及びNEC基礎研の研究グループからなる本プロジェクトを提案した。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ったのは、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が期待されると共に、応用においても利点を有すると考えたからであり、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。これと独立に氷上は、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した研究計画を提案した。幸いに両提案は本研究事業によって採択されることとなり、当研究課題のもと合同して研究を実施した。

本研究チームは「微小トンネル接合研究グループ」と「量子カオス研究グループ」とからなり、前者では金属微小トンネル接合で生じる単一電子トンネル現象に研究のねらいを絞り、そのような接合における新しい物理概念の検証を行うとともに、応用への可能性を検討してきた。また後者では量子ドットにおいて顕著になる電子のエネルギー準位の離散性に関し、準位の相関や量子カオスとの関連についての理論的研究を進めてきた。研究場所が分散しているため、計12回のチームミーティングを開催し、互いの情報交換と意志疎通を図りながら研究を進めた。5年間にわたる研究の結果、当初予想していた以上の研究成果を上げることができた。

「微小トンネル研究グループ」(大塚洋一、小林俊一、蔡兆申、島津佳弘、島田宏)

微小トンネル研究グループは、東大低温センター、東大理学系研究科、NEC基礎研究所の3グループからなる研究体として構想されたが、研究期間内にかなりの異動が生じ、最終年度は大塚研究室(筑波大物理学系)、島津研究室(横浜国立大工学部)、島田(東大低温センター)、蔡グループ(NEC基礎研)で研究を行った。上記の目的実現のために、金属で作られた微小トンネル接合に関する実験研究を、基礎物理、素子応用及び技術開発について総合的に行った。

### (1) 基礎物理

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があげられる。この特徴を生かし、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。

超伝導電荷量子ビットの実現：極低温の単一クーパー対箱において、クーパー対数が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、電荷エコー法により、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評価された研究成果であり、これが契機となり、固体素子における量子ビットの研究が現在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。

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が量子力学的なものになるかどうかにはそれ結合する無数のマイクロ自由度（散逸機構）の有無が重要である。この物理を微小ジョセフソン接合を対象として研究し、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。

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）を見出した。また、クーロンブロッケイド状況下では、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。磁気クーロン振動については、理論モデルを構築し、実験的な検証を行った。現在強磁性体を用いた微小素子の研究が注目を集めているがその嚆矢となった研究である。

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。

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これらに付けることによって超伝導ギャップの弱侵襲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。ミクロン以下の微小超伝導体の計測は SQUID を用いても困難であり、新しいマイクロプローブとしての今後の展開が期待できる。

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。電子密度の小さな半導体量子ドットにおいてはこのような離散化準位の観測は多く報告されているが、金属における報告例は少ない。今後、準位統計や電子間相互作用など多くの方面で展開を期したい。

また多層カーボンナノチューブを島電極として用いた 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。これらはより小さなナノメートル導体中の電子状態をプローブする手段として有力であり、

今後のナノ研究での発展につながる成果である。

## (2) 技術開発及びデバイス応用

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において問題となる背景のランダムな電荷に影響のない抵抗接合型単一電子トランジスタ (RSET) の試作に初めて成功した。

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っ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  $0.01e/\text{Hz}^{1/2}$  (@1Hz) 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。

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て、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。

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。

### 「量子カオス研究グループ」(氷上忍)

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できた事は大きな成果の一である。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模型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事ができた。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。

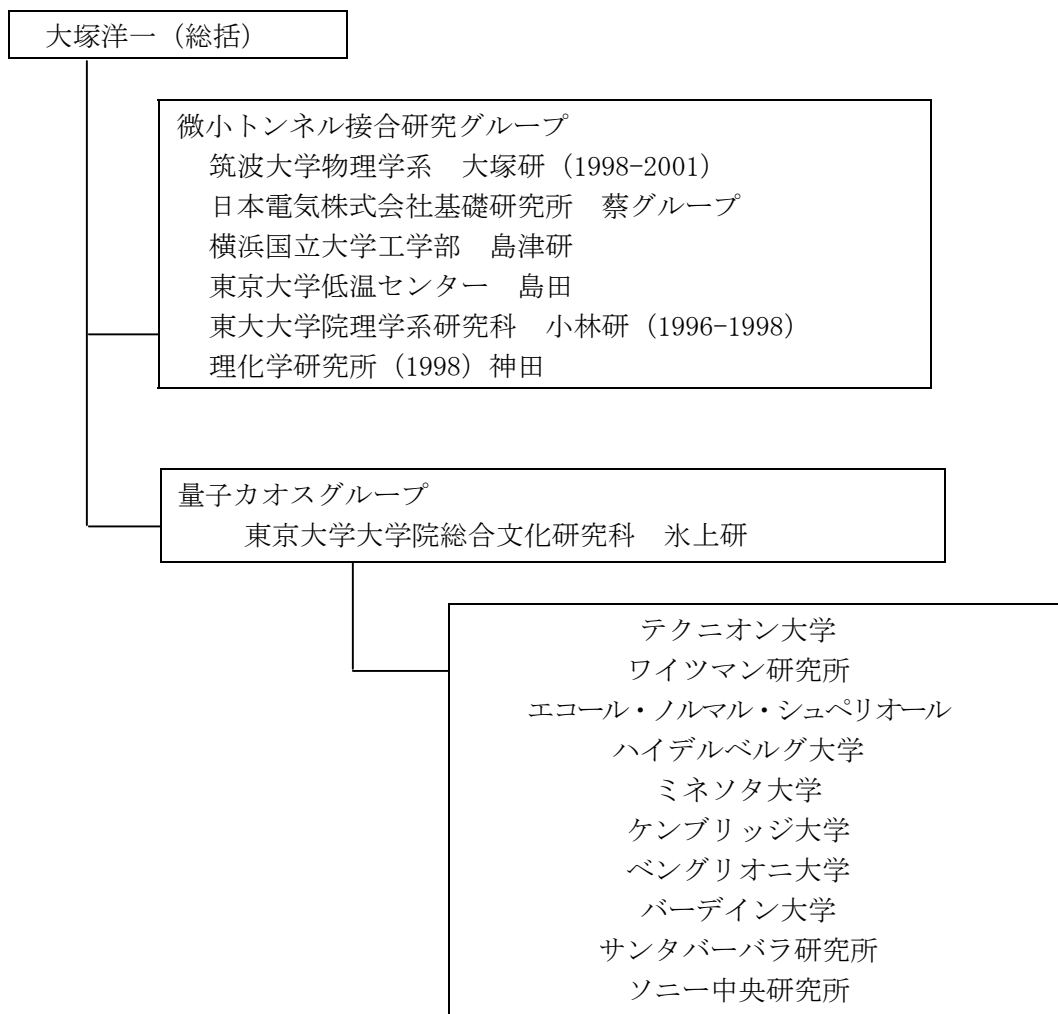
## 2. 研究構想

当初微小トンネル接合グループでは、物理、技術、応用のそれぞれについて以下の研究課題を設定して研究を開始した。(1) トンネル現象と散逸の関わりを独自の試料作成技術を利用して解明する。(2) 超伝導体や強磁性体を電極とした微小トンネル接合で、超伝導位相や磁化と単一電子トンネル現象との相関を追求する。(3) コトンネリングや超伝導一次元、二次元ネットワークでの基底状態など微小トンネルネットワークにおける未解決な問題に挑戦する。(4) 微小トンネル接合素子の実用化、高温動作化のための超微細加工技術を開発する。(5) 一電子デバイスの実用化を念頭に、この素子の特性を考慮した回路技術の検討を行う。(6) 単一電子フラッシュメモリーなどデジタル回路への応用の研究を進める。(7) 散逸の十分少ない単一電子素子における電荷数状態の量子的重ね合わせを利用して量子情報処理素子が実現可能かという基礎的な検討を進める。(8) 単一電子素子の高帯域化を目指した半導体インピーダンス変換回路との複合回路を研究する。(9) 高い電荷感度を有する SET をセンサーとした SPM を開発する。

スタート程なく CREST 研究員の採用も決まり、おおむね順調に研究を進めることができた。たとえば、(5)については、集積回路の構成への応用を念頭に、ニオブ系ジョセフソン回路である程度の集積規模を実現している「三層構造技術」に電子ビームリソグラフィ技術を取り入れた微細なトンネル集積回路の形成などの試みを行い、また(8)では HEMT/SET ハイブリッド回路の設計試作を行った。しかし、(8)に関しては Chalmers 大グループによる RF-SET 開発の成功が報告されたこともあり、さらに、「基礎的な検討を行う」とした(7)電荷量子ビットの実験が大きな成功を遂げたことから、この方面の研究に力を集中する方針とし、(5)及び(8)の研究は取りやめた。また、期間途中であたりにメンバー入りしたり、海外派遣や研究の進展に伴って可能になった新たな研究テーマもある。(10) 微小超伝導体の磁束状態に関する研究、(11) 磁束量子ビット、(12) 並列ジョセフソン列、(13) 超微粒子中の 1 電子状態離散化準位のトンネル分光などがそれに当たる。

一方、量子カオスグループでの研究目標は、(1) ランダムマトリックス理論により、ユニバーサルな相関関数を、時間に依存する場合を含めて、様々な対称性の下での計算を行ない、その形状因子を求め、量子カオスの場合と比較する。(2) クーロン相互作用及び緩和過程の影響を取り込んだマトリックス模型の研究を行うなどであり、これらの研究を海外の研究者らの協力を得ながら、進めることとした。5年の研究期間内に5回の国際ワークショップを開催し、研究を進めた。

### 3. 研究実施体制



#### 4. ワークショップ・シンポジウム等

月 日	名 称	場 所	趣旨と内容	参加人数
1997. 3. 21	第 1 回研究会	東大低温センター	チームミーティング 研究の現状と計画	13 人
1997. 9. 10 ～ 9. 12	1 <sup>st</sup> Crest Workshop on ‘Random Matrix and Quantum Chaos’	日仏会館 (恵比寿)	量子カオスグループによる海外共同研究者等を招いてのワークショップ トピックス：ランダム行列理論、レベル相関、量子コヒーレンス、量子カオスなど	30 人
1997. 8. 7	第 2 回研究会	NEC 基礎研	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	14 人
1997. 11. 6	第 3 回研究会	東大低温センター	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	12 人
1998. 2. 25	第 4 回研究会	東大理学部	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	20 人
1998. 7. 29	第 5 回研究会	東大低温センター	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	12 人
1998. 11. 18 ～11. 20	2 <sup>nd</sup> Crest Workshop on ‘Random Matrix and Quantum Chaos’	Ecole Normale Superieure (Paris)	量子カオスグループによる海外共同研究者等を招いてのワークショップ トピックス：ランダム行列理論、レベル相関、量子コヒーレンス、量子カオスなど	30 人
1998. 12. 15	第 6 回研究会	NEC 基礎研	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	14 人
1999. 7. 4 ～ 7. 9	3 <sup>rd</sup> Crest Workshop on ‘Random Matrix and Quantum Chaos’	東大数理科学研究科 (駒場)	量子カオスグループによる海外共同研究者等を招いてのワークショップ トピックス：ランダム行列理論、レベル相関、量子コヒーレンス、量子カオスなど	50 人
1999. 10. 22	第 7 回研究会	筑波大 VBL	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	9 人
2000. 5. 29	第 8 回研究会	筑波大 VBL	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	16 人
2000. 9. 11 ～12	Japan-Israel Symposium on “Physics of nanostructures and mesoscopic systems”	理研 (和光)	日本・イスラエル両国のナノ構造及びメゾスコピック系関係の研究者が集いシンポジウムを行った。 主催：理化学研究所 (共催：大塚チーム、東大)	120 人
2000. 9. 13 ～ 9. 15	4 <sup>th</sup> CREST Workshop ‘Disorder, Random Matrix and quantum chaos’	東大数理科学研究科 (駒場)	量子カオスグループによる海外共同研究者等を招いてのワークショップ トピックス：ランダム行列、相互作用の影響、アンダーソン局在等	80 人
2001. 9. 14	セミナー及び研究会	筑波大 VBL	Issai Shlimak 教授 (Bar-Ilan 大) によるセミナー・研究進捗状況報告と Discussion	16 人
2000. 10. 20	第 9 回研究会	NEC 基礎研	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	20 人
2001. 3. 7	第 10 回研究会	筑波大 VBL	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	14 人
2001. 5. 23	第 11 回研究会	筑波大物理	・チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion セミナー加藤岳生 (大阪市立大工)	17 人
2001. 6. 28 ～29	研究セミナー	NEC 基礎研	Daniel Esteve (CEA Saclay)によるセミナー及び Discussion	14 人
2001. 10. 26	第 12 回研究会	NEC 基礎研	チームミーティング 研究進捗状況報告と Discussion	12 人
2001. 11. 5 ～11. 8	The 5th CREST Workshop “Random matrix and random field theory”	東大数理科学研究科 (駒場)	量子カオスグループによる海外共同研究者等を招いてのワークショップ	50 人

## 5. 主な研究成果

### (1) 原著論文等

1. H. Kazawa H, R. Yagi, K. Ono, Y. Ootuka and S. Kobayashi, Gate voltage dependence of the resistance of a two-dimensional array of small tunnel junctions, *Jpn. J. Appl. Phys.* L36 (1997) 4020-4021.
2. H. Kazawa, R. Yagi, K. Ono, Y. Ootuka and S. Kobayashi., Chemical potential dependence of resistance of two-dimensional array of small tunnel junctions, *J. Phys. Soc. Jpn.* 66 (1997) 276-277.
3. K. Ono, H. Shimada, and Y. Ootuka, “Enhanced Manetic Valve Effect and Magneto-Coulomb Oscillations in Ferromagnetic Single Electron Transistor”, *Journal of Physical Society Japan* 66 (1997) 1261-1264.
4. E. Brezin and S. Hikami, “Extension of level-spacing universality”, *Physical Review* E56 (1997) 264-269.
5. E. Brezin and S. Hikami, “Spectral form factor in a random matrix theory”, *Physical Review* E55 (1997) 4067-4083.
6. E. Brezin, and S. Hikami, “Irrelevance in the (d-2) expansion of nonlinear  $\sigma$  and Heisenberg models”, *Physical Review* B55 (1997) R10 169-172.
7. S. Higuchi, “Renormalization group approach to multiple-arc random matrix models”, *Physics Letters* B398 (1997) 123-129.
8. S. Hikami and K. Minakuchi, “Diagrammatic analysis of the two-state quantum Hall system with chiral invariance”, *Physical Review* B55 (1997) 7155-7159.
9. C.D. Chen, Y. Nakamura, J.S. Tsai, “Aluminum Single Electron Nonvolatile Memory Cell”, *Applied Physics Letters*, 71 (1997) 2038.
10. Y. Nakamura A.N. Korotkov, C.D. Chen, and J.S. Tsai, “Singularity-matching peaks in superconducting single -electron transistor”, *Physical Review* B56 (1997) 5116-5119.
11. Y. Nakamura, C.D. Chen, and J.S. Tsai, “Spectroscopy of energy-level splitting between two macroscopic charge states coherently superposed by Josephson coupling”, *Physics Review Letters* 79 (1997) 2328-2331.
12. R. Yagi and S. Kobayashi, “Tuning of Superconductor-Insulator Transition in Single Small Josephson Junctions by Shunt Resistor”, *Journal of the Physical Society of Japan* 66 (1997) 3360-3362.
13. R. Yagi, S. Kobayashi, and Y. Ootuka, “Phase Diagram for Superconductor- Insulater Transition in Single Small Josephson Junctions with Shunt Resistor”, *Journal of the Physical Society of Japan* 66 (1997) 3722-3724.
14. H. Shimada, K. Ono and Y. Ootuka, “Magneto-Coulomb Oscillation in Ferromagnetic Single Electron Transistors”, *Journal of the Physical Society of Japan* 67 (1998) 1359-1370.
15. K. Ono, H. Shimada, and Y. Ootuka, “Ferromagnetic Single Electron Transistor”, *Solid-State Electronics* 42 (1998) 1407-1411
16. K. Ono, Hiroshi Shimada and Youiti Ootuka, “Spin Polarization and Magneto-Coulomb Oscillations in Ferromagnetic Single Electron Devices”, *Journal of the Physical Society of Japan* 67 (1998) 2852-2856
17. A.D. Mirlin, R. Pnini and B. Shapiro, “Intensity distribution for Waves in disordered media: deviations from Rayleigh statistics”, *Physical Review* E57 (1998) R6285-R6288).



18. E. Brezin and S. Hikami, "Universal singularity at the closure of a gap in a random matrix theory", *Physical Review* E57 (1998) 4140-4149.
19. E. Brezin and S. Hikami, "Level spacing of random matrices in an external source", *Physical Review* E58 (1998) 7176-7185.
20. H. Minakuchi, "Two-dimensional random network model with symplectic symmetry", *Physical Review* B58 (1998) 9627.
21. S. Higuchi, "Counting Hamiltonian Cycles on planar random lattices", *Modern Physics Letters* A13 (1998) 727-734.
22. S. Higuchi, "Field theoretic approach to the counting problem of Hamiltonian cycles of graphs", *Physical Review* E58 (1998) 128-132.
23. S. Hikami and R. Pnini, "Density of state in a complex random matrix theory with external source", *Journal of Physics* A31 (1998) L587-591
24. S. Hikami, "Level-Spacing universality in a random-matrix model with an external source", *Phil. Mag* B77 (1998) 1173-1179
25. Y. Nakamura and J.S. Tsai, "Photon-assisted Cooper-pair tunneling in Superconducting single-electron transistor", *Solid-State Electronics* 42 (1998) 1471-1475.
26. T. Yamaguchi, R. Yagi, S. Kobayashi, and Y. Ootuka, "Two-Dimensional Arrays of Small Josephson Junctions with Regular and Random Defects", *Journal of the physical Society of Japan* 67 (1998) 729-73
27. Y. Shimazu, H. Ishikawa, I. Yamamoto and M. Yamaguchi, "Effect of Superconductivity on Magnetoresistance in Ferromagnetic Tunnel Junctions", *Japanese Journal of Applied Physics* 37 (1998) 3299-3303.
28. Y. Shimazu, T. Teramura, I. Yamamoto, and M. Yamamoto, "Effects of Superconductivity on Magnetoresistance in Ferromagnetic Tunnel Junctions", *Proceedings of 3rd International Symposium on Metallic Multilayers (June14-19, 1998, Vancouver, Canada)* p.49
29. R. Yagi, S. Kobayashi, Y. Ootuka, Effect of shunt resistor on superconductor-insulator transition in superconducting single small Josephson junction, *Solid State Electron.* 42 (1998) 1477-1480.
30. E. Brezin, 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* B60 (1999) 3589-3602.
31. S. Higuchi, "Hamiltonian cycles on random lattices of arbitrary genus" *Nuclear Physics* B540 (1999) 731-741.
32. S. Higuchi, "Compact polymers on decorated square lattices" *Journal of Physics* A32 (1999) 3697-3709.
33. S. Higuchi, "Loop Model with generalized Fugacity in Three Dimensions" *Journal of Physics* A33 (1999) 1661-1673.
34. H. Sunamura, T. Sakamoto, Y. Nakamura, H. Kawaura, J.S. Tsai, T. Baba, "Single Electron Memory Using Carrier Traps in a Silicon Nitride Layer", *Applied Physics Letters*, 74 (1999) 3555.
35. J. Sone, J. Fujita, Y. Ochiai, S. Mtsui, S. Manako, E. Nomura, T. Baba, H. Kawaura, T. Sakamoto, C.D. Chen, Y. Nakamura, and J.S. Tsai, "Nanofabrication toward sub-10nm and its application to novel nanodevices", *Nanotechnology*, 10

36. Y. Nakamura and J.S. Tsai, "A coherent two-level system in a superconducting single-electron transistor observed through photon-assisted Cooper-pair tunneling", *Journal of Superconductivity* 12 (1999) 799-806.
37. Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J.S. Tsai, "A novel solid-state quantum bit in a single-Cooper-pair device", *Extended Abstracts of the 1999 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)*, (Tokyo, 9/21/99) p.
38. Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J.S. Tsai, "Quantum coherence and decoherence in a superconducting single-electron transistor", *Quantum Coherence and Decoherence, Proceedings of the 6th International Symposium on Quantum Mechanics*
39. 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
40. Yu. Pashkin, Y. Nakamura, and J.S. Tsai, "Coulomb Blockade in Resistively Coupled Single Electron Transistor", *J. Appl. Phys.* 83 (1998) 2466-2469.
41. Yu. Pashkin, Y. Nakamura, and J.S. Tsai, "Metallic Resistively Coupled Single-Electron Transistor", *Applied Physics Letters* 74 (1999) 132-134
42. Yu. Pashkin, Yasunobu Nakamura, and Jow Shen Tsai, "Implementation of Single Electron Transistor with Resistive Gate", *Jpn. J. Appl. Phys.* 38 (1999) 406-409.
43. A. Kanda, M.C. Geisler, K. Ishibashi, K. Aoyagi and T. Sugano, "Local detection of superconducting energy gap by small tunnel junctions", *Proceedings of ISQM-Tokyo '98*, 229-232 (Elsevier, Amsterdam, 1999)
44. 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
45. Y. Ootuka, Keiji Ono, Ryoji Matsuda and Hiroshi Shimada, "Magneto-Coulomb Oscillations in Ferromagnetic Single Electron Transistors", *Microelectronic Engineering* 47 (1999) 409-411.
46. Y. Shimazu, I. Yamamoto and M. Yamaguchi: "Superconductivity Effect on Magnetoresistance in Ferromagnetic Tunnel Junctions", *J. Magn. Magn. Mater.* 198-199, 76-78 (1999)
47. 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.
48. H. Shimada and Per Delsing, "Current mirror effect and correlated Cooper-pair transport in coupled arrays of small Josephson junctions", *Physical Review Letters* 85 (2000) 3253-3256.
49. 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.
50. E. Brezin, and S. Hikami, "Characteristic polynomials of random matrices at edge singularities", *Phys. Rev. E* 62 (2000) 3558-3567.
51. E. Brezin, and S. Hikami, "Characteristic Polynomials of Random Matrices", *Commun. Math. Phys.* 214 (2000) 111-135.
52. E. Brezin, and S. Hikami, Logarithmic moments of characteristic polynomials of random matrices, *Physica A* 279 (2000) 333-341.
53. Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J.S. Tsai, "Quantum Coherence in a single-Cooper-pair box: experiments in the frequency and time domains", *Physica B*, 280 (2000) 405-409.

54. Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J.S. Tsai, "Quantum-state control with a single-Cooper-pair box", *Journal of Low Temperature Physics* 118 (2000) 765.
55. Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura and J.S. Tsai, "Room-temperature Al single-electron transistor made by electron-beam lithography", *Applied Physics Letters*, 76 (2000) 2256-2258.
56. A. Kanda, M.C. Geisler, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and T. Sugano, "Suppression of the Little-Parks Oscillation in a Mesoscopic Superconducting Ring", *Physica B*284-288 (2000) 1870-1871.
57. T. Yamaguchi, R. Yagi, A. Kanda, Y. Ootuka, and S. Kobayashi, "Superconductor-Insulator Transition in a Two-dimensional Array of resistively shunted small Josephson Junctions", *Phys. Rev. Lett.* 85, (2000) 1974-1977.
58. Y. Ootuka, R. Matsuda, K. Ono, and H. Shimada, "Spin polarization and magneto-Coulomb oscillations in ferromagnetic single-electron transistors", *Physica B*280 (2000) 394-398.
59. Y. Shimazu, K. Sakai, T. Noda, I. Yamamoto and M. Yamaguchi, "Effect of domain walls on resistivity in ferromagnetic films and wires", *Physica B*284-288 (2000) 1239-1240.
60. Y. Shimazu, T. Noda and T. Uchikawa, "Domain wall effect at room temperature in ferromagnetic wires of micron-range diameter", *Proceedings of Symposium on Spin-electronics, Halle, Germany* (2000) p.91.
61. 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.
62. R. Yagi, S. Kobayashi, Y. Ootuka, "Superconductor-Insulator Transitions in Single Small Josephson Junctions with Shunt Resistor and with Normal Tunneling Junction", *Physica B*280 no.1-4, 416-417 (2000).
63. H. Shimada and Y. Ootuka, "Magnetic-Field-Driven Single Electron Pump", *Physical Review B*64. (2001) 5418.
64. E. Brezin, and S. Hikami, New correlation function for random matrices and integrals over supergroup, preprint (2001)
65. E. Brezin, S. Hikami "Characteristic polynomials of real symmetric random matrices", *Commun. Math. Phys.* 223 (2001) 363-382.
66. J.S. Tsai, Y. Nakamura, and Yu. A. Pashkin, "Qubit Utilizing Charge-Number State in Superconducting Nanostructure", *Quantum Information & Computation*, 1, Special, 124, 2001
67. J.S. Tsai, Nakamura Y, Pashkin Y, Superconducting single-Cooper-pair box as quantum bit, *PHYSICA C*357: 1-6 Part 1 AUG 2001
69. M. Baba, J.S. Tsai, and Tohru Nakamura, "Single-Electron Memory using Self-Assembled Gold Nano Particles", *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 26, 723, 2001
69. Y. Nakamura, Pashkin YA, Tsai JS, Rabi oscillations in a Josephson-junction charge two-level system, *Phys. Rev. Lett.* 87 (2001) 246601.
70. Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J.S. Tsai, "Quantum-state interference in a Cooper-pair box", *Macroscopic Quantum Coherence and Quantum Computation, Proceedings of the workshop on Macroscopic Quantum Coherence and Quantum Computat*
71. A. Kanda, K. Tsukagoshi, Y. Ootuka, and K. Aoyagi, "Observation of Coulomb Blockade in a Ti/Multi-wall Carbon Nanotube/Ti Structure", *Nanonetwork Materials* (ed. S.Saito, 2001) 265-268

72. A. Kanda, Y. Ootuka, K. Tsukagoshi and K. Aoyagi, "Electron transport in M/multi-wall carbon nanotube/M structures (M=Ti,Pt/Au)", Applied Physics Letters 79 (2001) 1354-1356.
73. T. Yamaguchi, R. Yagi, A. Kanda, Y. Ootuka, and S. Kobayashi, "Phase Diagram for Two-Dimensional Arrays of Small Josephson Junctions with Shunt Resistors", Physica C, 352 (2001) 181-185.
74. Y. Ootuka, K. Ono, H. Shimada, R. Matsuda and A. Kanda, Electron transport in ferromagnetic small tunnel junctions, Mat. Sci. Eng. B84 (2001) 114-119.
75. J.S. Tsai, Nakamura Y, Pashkin Y, Superconducting single-Cooper-pair box quantum bit with multi-gate-pulse operation, PHYSICA C367 (1-4) : 191-196 FEB 15 2002
76. Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J.S. Tsai, "Charge Echo in a Cooper-Pair Box", Physical Review Letters, 88 (2002) 047901.
77. A. Kanda, S. Uryu, K. Tsukagoshi, Y. Ootuka and K. Aoyagi, "Magnetic field dependence of Coulomb oscillations in metal/multi-wall carbon nanotube/metal structures", Physica B (in press)
78. A. Kanda and Y. Ootuka, "Response of a mesoscopic superconducting disk to magnetic fields", to appear in Microelectronic Engineering
79. A. Kanda, K. Tsukagoshi, S. Uryu, Y. Ootuka and K. Aoyagi, "Resistance dependence of transport properties in metal/multiwall carbon nanotube/metal structures", to appear in Microelec. Eng.
80. Y. Ootuka, T. Yamaguchi, H. Miyazaki and A. Kanda, Dissipation and Quantum Fluctuations in 2D-Array of Small Josephson Junctions, To be published in Microelectronic Engineering.
81. R. Matsuda, A. Kanda, Y. Ootuka, Enhanced Tunnel Magnetoresistance in Ferromagnetic Single Electron Transistor, to appear in Proceedings of ISQM-Tokyo'01.
82. T. Yamaguchi, H. Miyazaki, A. Kanda, Y. Ootuka; Superconductor-Insulator Transition in One-and Two-Dimensional Arrays of Dissipative Small Josephson Junctions"; to appear in Proc. of ISQM-Tokyo '01

#### 国内誌

1. 蔡兆申、中村泰信、陳啓東、「微細化の進むアルミニウム単電子デバイス技術」、応用物理 (学会誌) 66 (1997) 141。
2. 大野圭司、島田 宏、大塚洋一、「トンネル型磁気抵抗と単一電子帯電効果」、日本金属学会会報「まてりあ」38 (1998) 749-752。
3. 蔡兆申、講談社 ブルーバックス、「電子一つ一つを制御する」ISBN4-06-257215-X (科)、1998年5月。
4. 大塚洋一、「強磁性体単電子トランジスタ」、日本物理学会誌 53 (1998) 342-345。
5. 中村泰信、蔡兆申、微小 Josephson 接合回路におけるコヒーレントな2準位系、日本物理学会誌 53 (1998) 516-519。
6. 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。
7. 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。
8. 中村泰信、蔡兆申、「超伝導電子対を操る一量子状態の重ね合わせ」、パリティ 15 No.4 (2000)。
9. 大塚洋一、単電子トンネルと強磁性、パリティ 15 No.06 (2000) 20-27 (丸善)。

10. 蔡兆申、中村泰信、ユーリパシュキン “固体素子量子ビット—単一電子クーパー対箱におけるコヒーレンス” FED ジャーナル 10 (2000) 36。
11. 中村泰信、蔡兆申、“ジョセフソン接合を用いた量子ビット”、応用物理 69 巻 11 号 (2000) 1299。
12. 中村泰信、“超伝導素子における巨視的量子状態の重ね合わせとその制御” パリティ (2000)
13. 山口尚秀、神田晶申、大塚洋一、ジョセフソン接合 2 次元配列における摩擦による超伝導・絶縁体転移、物性研究、Vol.76 no.2, 183-188, 2001 年 5 月 (京都大学基礎物理学研究所研究会 “摩擦の物理” 2000 年 11 月 15-17 日 研究会報告書)

(2) 特許出願 (国内 3 件、海外 1 件)

① 国内 3 件

「発明者」 大塚洋一、曾根純一、蔡兆申、安井孝成、中村泰信

「発明の名称」 不揮発性メモリー

「出願人」 科学技術振興事業団、日本電気株式会社

「出願日」 1999 年 9 月 3 日

「発明者」 馬場雅和

「発明の名称」 金属微粒子秩序構造形成方法

「出願人」 科学技術振興事業団、日本電気株式会社

「出願日」 1999 年 12 月 8 日

「発明者」 大塚洋一

「発明の名称」 圧力・応力センサー

「出願人」 科学技術振興事業団

「出願日」 2002 年 2 月 日 (予定)

② 海外 1 件 (内→海外への移行)

「発明者」 大塚洋一、曾根純一、蔡兆申、安井孝成、中村泰信

「発明の名称」 不揮発性メモリー

「出願人」 科学技術振興事業団、日本電気株式会社

「国際出願日」 2000 年 8 月 9 日

(3) 新聞報道、受賞等

① 新聞報道

1999年4月29日	主要一般全国紙（朝日新聞、毎日新聞など）、NHKニュース 「世界初、固体電子デバイスによる量子コンピュータ用ゲートの開発に成功」
1999年11月18日	日刊工業新聞、The Daily Yomiuri中村泰信氏受賞
1999年6月21日	日本経済新聞19面 量子コンピュータを開発した中村氏の活動
1999年12月27日	朝日新聞3面 量子コンピュータでマーティンウッド賞と仁科記念賞を受賞
2000年5月12日	日本工業新聞9面 若手研究者の活動（若き群像）
2000年4月11日	東京新聞 仁科賞受賞（中村泰信氏）
2000年5月16日	日本経済新聞 11面 中村泰信氏の研究活動
2000年12月5日	Newton1月号 量子コンピュータ 文芸春秋 量子コンピュータ
2001年1月1、19日	日本経済新聞 量子コンピュータ
2001年3月2日	科学新聞 戦略基礎研究推進事業注目される研究成果から
2001年5月5、16日	日本経済新聞 量子コンピュータの集積技術開発
2001年6月4日	ビジネスSPA! 7月号 中村泰信氏の研究活動

② 受賞

- 中村泰信、第1回 Sir Martin Wood 賞（1999. 11）
- 中村泰信、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）