

2-2 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

大塚洋一 (筑波大学 物理学系)

ナノスケール伝導の基本原理の一つである単電子トンネル現象を総合的に研究し、以下の成果を得た。微小ジョセフソン接合では、粒子数の異なる2状態間の量子重ね合わせの観測及びその制御に成功した。散逸による巨視的量子現象の古典化を観測した。さらに、強磁性微小トンネル接合における磁気クーロン振動及び巨大TMRの発見、金属微粒子中の1電子準位の観測、抵抗結合型SET及び室温動作SETの開発などの成果も上げた。ランダム行列理論を外場がある場合に適用し新しいユニバーサリティクラスを見出した。

Small Metallic Tunnel Junctions

---Physics and Applications

Youiti Ootuka (University of Tsukuba)

Through an intensive study of small tunnel junctions, we have obtained following achievements: A charge quantum bit (qubit) in a single Cooper-pair box and its quantum gate-manipulations have been achieved. The dissipation-driven quantum phase transition was confirmed in small Josephson junctions. The magneto-Coulomb oscillation and enhanced TMR were discovered in ferromagnetic tunnel junction. Quantized discrete levels in ultra-small metal particles were observed by the tunnel spectroscopy. A resistive-coupled SET (R-SET) and a room-temperature SET were realized successfully. New universality classes were discovered in the presence of external fields.

1. 研究テーマ

「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」

研究代表者： 大塚洋一（筑波大学）

2. 研究の概要

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と考える。

「微小トンネル研究グループ」（大塚洋一、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。

(I) 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ミクロ自由度（散逸機構）の存在が重要である。この物理を微小ジョセフソン接合を対象として研究し、個々の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る超伝導・絶縁体転移を初めて観測した。

- 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。

- 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

強磁性単一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。

- 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。

- 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が期待できる。

(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 $0.01 e/Hz^{1/2}$ (@ 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。

以上の研究成果の他にも、・微小トンネル接合を弱襲侵局所プローブとして用い微小な単一超伝導リングやディスクにおける磁束状態を調べ、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。・自己組織化した金属微小クラスタ

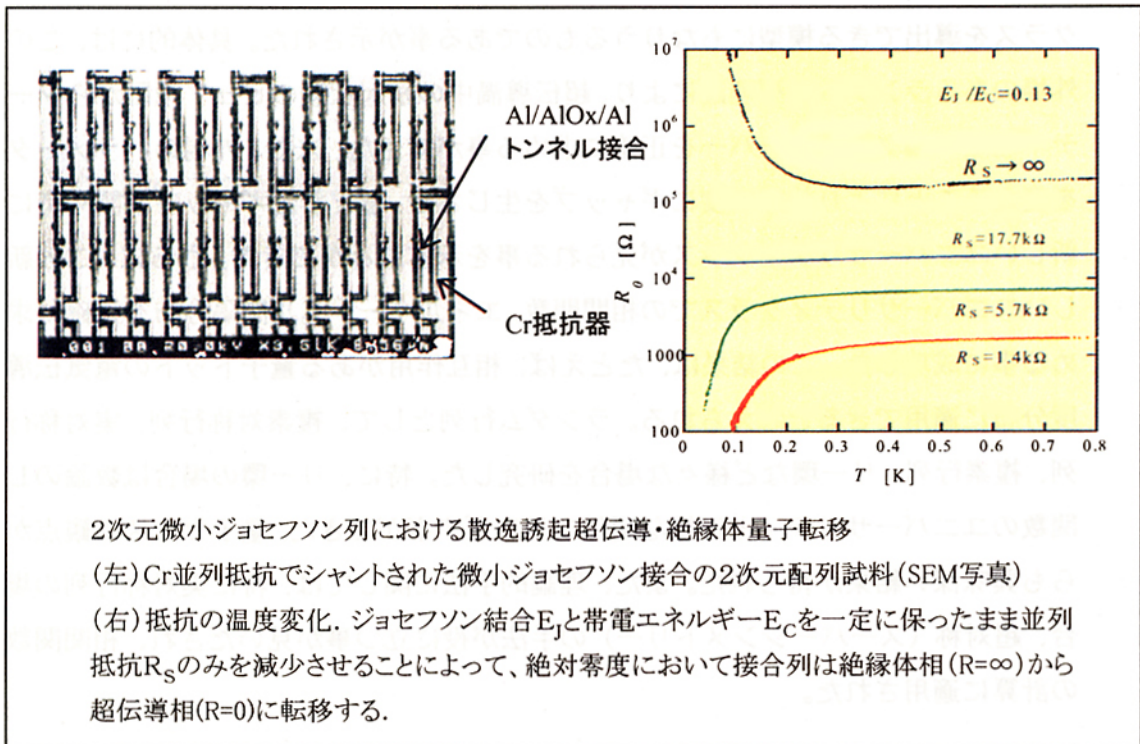
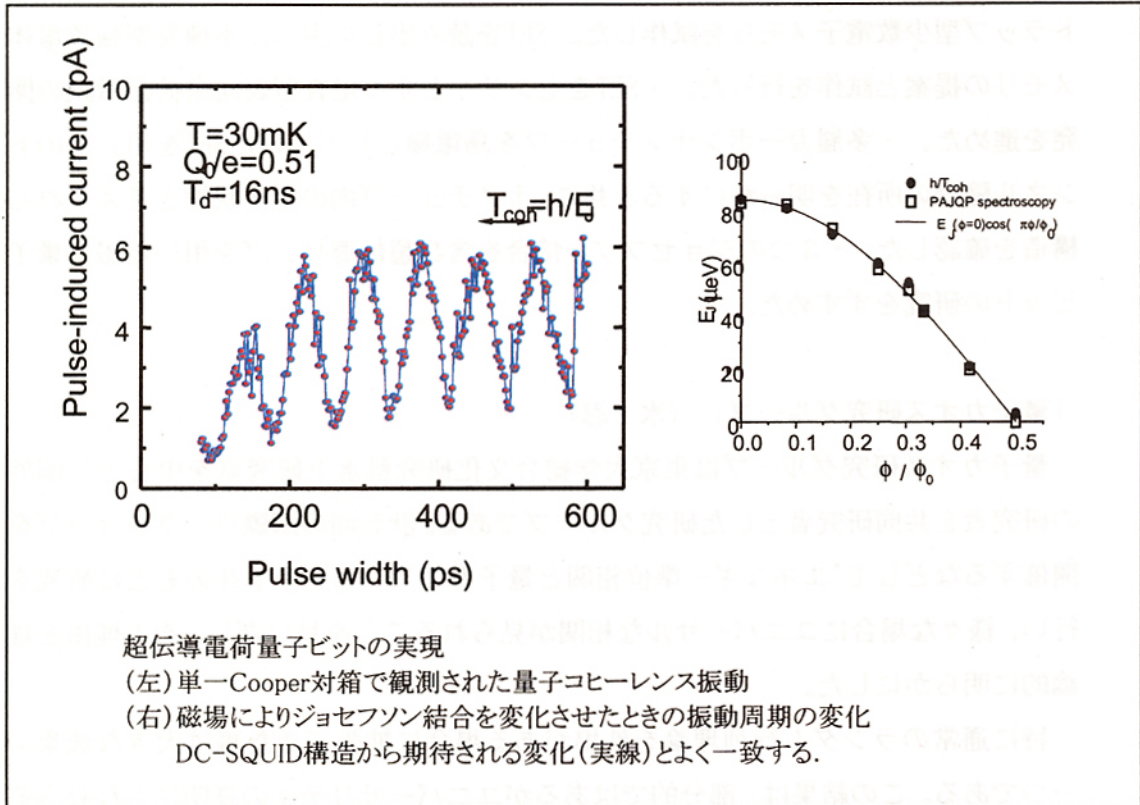
一を利用した微細加工技術の開発をすすめ、直径数nmの金クラスターを用いた電子トラップ型少数電子メモリを試作した。SETを読み出しに用いた不揮発型強誘電体メモリの提案と試作を行った。・SETをセンサーとする走査型表面電荷顕微鏡の開発を進めた。・多層カーボンナノチューブを島電極として用いたSETを用いそのトンネル障壁の所在を明らかにすると共に、ナノチューブ内の電子状態と考えられる構造を確認した。・3つのジョセフソン接合を含む超伝導リングを用いた磁束量子ビットの研究をすすめた。

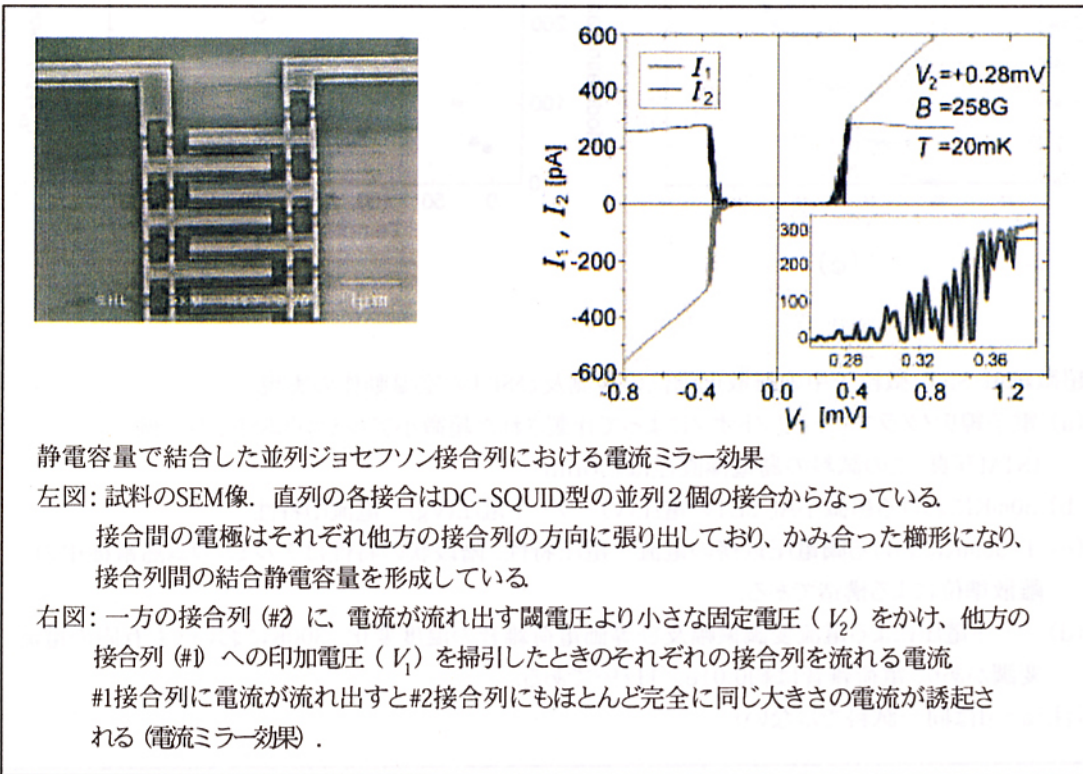
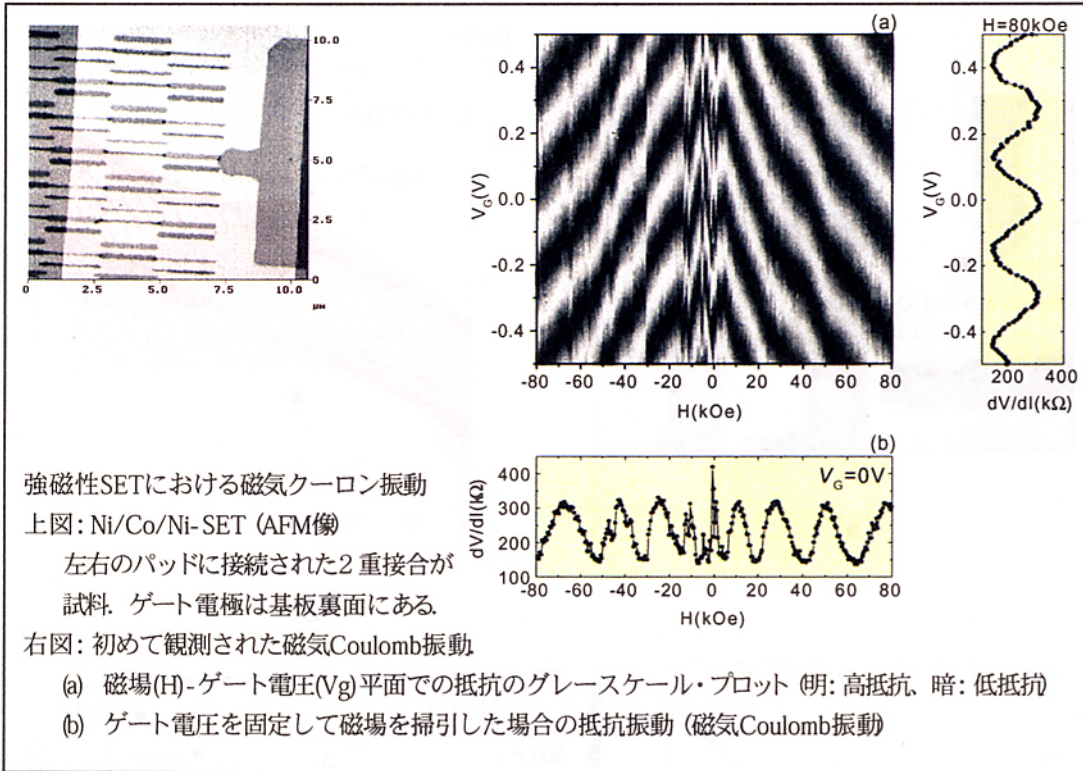
「量子カオス研究グループ」(氷上忍)

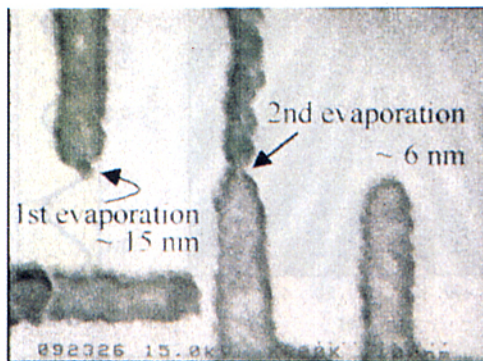
量子カオス研究グループは東京大学総合文化研究科氷上研究室を中心とし国外の研究者を共同研究者とした研究グループである。計5回の国際ワークショップを開催するなどして“エネルギー準位相関と量子カオス”のタイトルのもとに研究を行い、様々な場合にユニバーサルな相関が見られることを見だし、その理由を理論的に明らかにした。

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つである。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。

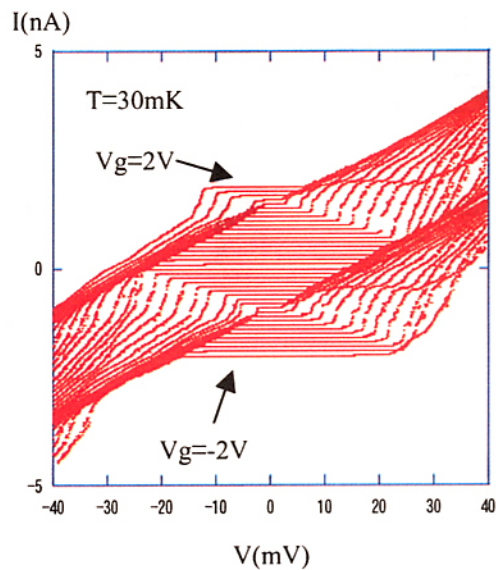
3. 主要成果の図表による説明



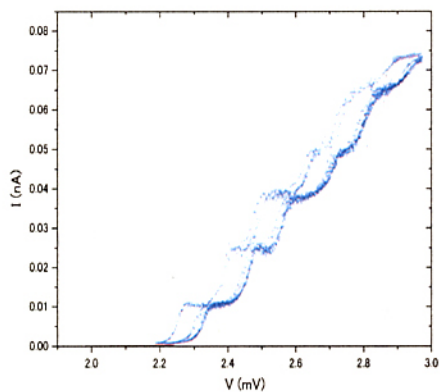




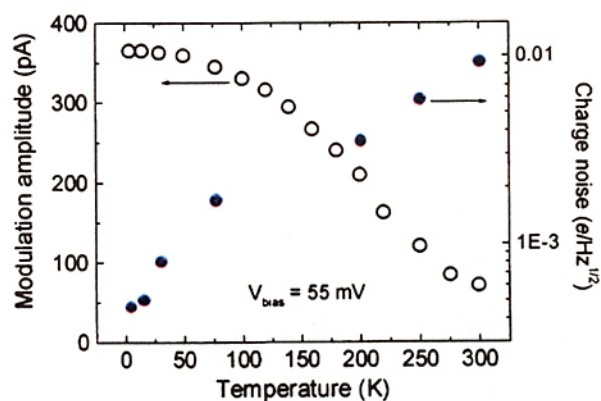
(a)



(b)



(c)



(d)

超微細Al-SET: 微粒子中の離散化準位の観測及びSETの室温動作の実現

(a) 電子線リソグラフィとリフトオフによって作製された超微小アルミニウムSETの一例

(STM写真、この試料の島電極直径は約6nm)

(b) 30mKにおける超微小Al-SETの電圧(V)–ゲート電圧(V_g)–電流(I)特性

(c) $T=30\text{mK}$ における閾電圧近傍の電流–電圧特性. 階段状の特性はアルミニウム島電極中の離散準位による構造である.

(d) ゲート電圧による電流変調振幅及び等価電荷雑音の温度変化. 300Kにおいても有限の電流変調があり、電荷雑音は約 $0.01e/\text{Hz}^{1/2}$ である.

(注: a~dは同一試料ではない)

4. 主要論文リスト

「微小トンネルグループ」

1. 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.
2. 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.
3. Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura and J. S. Tsai, "Room-temperature Al single-electron transistor made by electron-beam lithography", *Appl. Phys. Lett.* 76 (2000) 2256.
4. H. Shimada and Per Delsing, "Current mirror effect and correlated Cooper-pair transport in coupled arrays of small Josephson junctions", *Phys. Rev. Lett.* 85 (2000) 3253-3256.
5. Y. Nakamura, Yu..Pashkin, and J.S.Tsai, "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box", *Nature* 398 (1999) 786-788
6. R. Yagi, S. Kobayashi, and Y. Ootuka, "Dissipative Phase Transition in Single Small Josephson Junction with Normal Tunneling Junction", *J..Phys. Soc. Jpn* 68 (1999) 1075-1077.
7. Yu. Pashkin, Y.Nakamura, and J.S.Tsai, "Metallic Resistively Coupled Single-Electron Transistor", *Appl..Phys. Lett.* 74 (1998) 132-134
8. Y. Shimazu, H.Ishikawa, I. Yamamoto and M. Yamaguchi, "Effect of Superconductivity on Magnetoresistance in Ferromagnetic Tunnel Junctions", *Jap. J. Appl. Phys.* 37 (1998) 3299-3303.
9. H.Shimada, K.Ono and Y.Ootuka, "Magneto-Coulomb Oscillation in Ferromagnetic Single Electron Transistors Japanese", *J.Phys.Soc.Jpn* 67 (1998) 1359-1370.
10. K.Ono, H.Shimada, and Y.Ootuka, "Enhanced Manetic Valve Effect and Magneto-Coulomb Oscillations in Ferromagnetic Single Electron Transistor", *J. Phys. Soc. Jpn.* 66 (1997) 1261-1264.
11. R.Yagi, S.Kobayashi, and Y.Ootuka, "Phase Diagram for Superconductor-InsulaterTransition in Single Small Josephson Junctions with Shunt Resistor", *J. Phys. Soc. Jpn.* 66 (1997) 3722-3724.
12. Y.Nakamura, C.D.Chen, and J.S.Tsai, "Spectroscopy of energy-level splitting between two macroscopic charge states coherently superposed by Josephson coupling", *Phys..Rev..Lett.* 79 (1997) 2328-2331.

「量子カオスグループ」

13. Characteristic polynomials of random matrices at edge singularities, E. Brezin and S. Hikami, *Phys. Rev.* E62, (2000) 3558-3567.
14. Level statistics inside the vortex of a superconductor and symplectic random-matrix theory in an external source, E. Brezin, S. Hikami and A. I. Larkin, *Phys. Rev.* B60 (1999) 3589-3602.
15. Density of state in a complex random matrix theory with external source, S. Hikami and R. Pnini, *J. Phys. A: Math. Gen.* 31 (1998) L587-L591.
16. Level spacing of random matrices in an external source, E. Brezin and S. Hikami, *Phys. Rev.* E58 (1998) 7176-7185.

5. 外部発表件数

論文 93件

口頭発表

国内発表 181件

国際会議発表 76件

特許出願 2件