

VII-5. 低温物性グループ

教授 大塚洋一  
 講師 富永 昭  
 助手 森下將史  
 神田晶申  
 研究員 大木秀一 (科学技術振興事業団)  
 山口尚秀 (日本学術振興会特別研究員)  
 大学院生 松田亮史 (東大理学系研究科)、宮崎久生 (D2)、黒沢鉄平 (M2)、  
 浅古卓永 (M2)、北田実 (M1)

低温物性実験グループにおいては、電子線微細加工技術によって作製された微小トンネル接合、金属量子ドット、単一カーボンナノチューブなどのメソスコピック・ナノスコピックな微小導体が示す量子伝導現象の研究、熱音響現象の研究、吸着ヘリウム3薄膜の核磁性の研究などを進めている。

大塚が代表者となり1996年度から続けてきた研究プロジェクト (科学技術振興事業団、戦略的基礎研究推進事業、研究領域:「量子効果等の物理現象」、研究課題: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) は2001年11月で研究期間を満了した。このプロジェクトは東大低温センター、横浜国立大工学部、NEC 基礎研究所、東大総合文化研究科、理化学研究所などとの共同研究であり、5年の期間中に、・超伝導電荷量子ビットの実現、・ジョセフソン接合系の超伝導コヒーレンスの実現における量子ゆらぎと散逸、・強磁性単一電子トランジスタにおけるトンネル磁気抵抗の増大及び磁気クーロン振動、並列ジョセフソン接合列における電流ミラー効果、メソスコピック超伝導体の磁束状態、金属微粒子中の離散化準位のトンネル分光、抵抗結合型単電子トランジスタの開発、室温動作アルミニウム単一電子トランジスタの開発、など基礎および応用の両面で多くの成果をあげることができた。また、前年度に引き続き、2001年9月から2002年3月までの間、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業フィジビリティスタディ「極微構造導体における量子伝導現象」(研究代表者:喜多英治(筑波大学物理工学系))の分担者としての研究も行った。

【1】 微小トンネル接合系の伝導 (大塚、神田、山口)

(1) 微小ジョセフソン接合系における超伝導絶縁体転移 (山口、宮崎) [4, 8, 20, 26]

微小ジョセフソン接合系においては、ジョセフソン効果とクーロンブロッケイドの競合によって絶縁体相と超伝導相のいずれかが基底状態となる。T=0Kにおいて生じるこの量子相転移の研究を進めている。前年度までの研究で、2次元ジョセフソン接合列のT=0Kにおける相図を得ると共に、1次元接合列の結果を得始めていた。今年度は1次元配列における結果をまとめるとともに、1次元列~2次元へのクロスオーバーについての実験も行った。

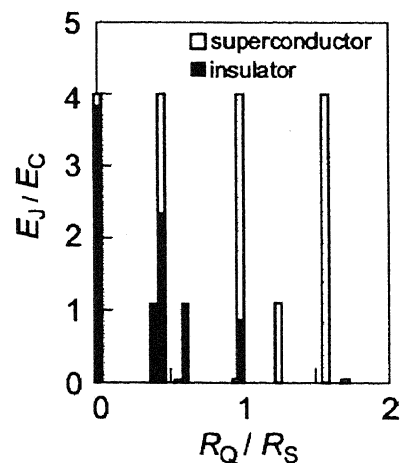


図1 T=0Kにおける一次元微小ジョセフソン列の相図

従来報告のあった1次元列に関する実験ではトンネル接合のみからなる接合列を対象としていた。我々は微小ジョセフソン接合配列における散逸による超伝導・絶縁体転移を明確に観測するため、各接合 (Al-AlO<sub>x</sub>-Al) に並列に抵抗 (C<sub>r</sub>) を付加した配列を作成した。試料の特性は、ジョセフソン結合エネルギー E<sub>J</sub>、単電子帯電エネルギー E<sub>c</sub>、並列抵抗値 R<sub>s</sub> で規定される。試料を<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He希釈冷凍機を使って冷却して、電流電圧特性を測定した結果、ゼロバイアス抵抗の温度依存性及び最低温度での電流電圧特性において基底状態の差異が明瞭に確認された。すなわち、R<sub>s</sub>の高いものは帯電効果に特徴的なクーロンギャップを示すとともに抵抗は温度の低下と共に増大する。一方、R<sub>s</sub>の低いものの抵抗は低温で急速に減少し、電流電圧特性はDCジョセフソン電流的な構造を示した。これらはシャント抵抗値の違いによる超伝導・絶縁体転移を意味する。実験結果から決定された T=0K におけるこの系の相図を図1に示す。ここでそれぞれの縦の線は、弱い磁場によって E<sub>J</sub> を実効的に変化させたことによって得られた結果であり、黒から白にかわっているものは、磁場によって E<sub>J</sub> / E<sub>c</sub> が変化して超伝導・絶縁体転移がおこったことを意味する。この相図から、E<sub>J</sub> / E<sub>c</sub> → 0 においては相境界は R<sub>Q</sub> / R<sub>s</sub> = 1 付近にあることが結論される (R<sub>Q</sub> は量子抵抗)。Fisher によれば、d 次元の正方格子の配列では E<sub>J</sub> / E<sub>c</sub> が非常に小さいとき R<sub>Q</sub> / R<sub>s</sub> = 1/d に相の境界があると予想されている。我々の2次元配列の実験では相境界は R<sub>Q</sub> / R<sub>s</sub> ~ 0.5 にあり、今回の1次元列の結果と共に、この理論的予言とよく一致する。一方、E<sub>J</sub> / E<sub>c</sub> を増したとき R<sub>Q</sub> / R<sub>s</sub> の臨界値がどのように変わるかについては、理論と実験に食い違いがあり、今後さらに検討する必要がある。

得られた1次元配列及び2次元配列の相図を比較すると、R<sub>Q</sub> / R<sub>s</sub> = 0 の軸における転移点は、1次元列のほうが2次元列より1桁程度大きくなっている。これは、2次元より1次元のほうが量子ゆらぎの効果がより重要になるという直感的な予想と一致している。このような次元による特性の変化は、同一基板上に1次元列と幅の異なる2次元列を同時に作製しその特性を比較することでより鮮明になると考えられる。この目的でそのような試料を作製し幅の変化による超伝導・絶縁体クロスオーバーも確認した。

## (2) 金属微粒子中の1電子状態のトンネル分光 (黒沢、神田、大塚)

微小金属に閉じこめられた電子のエネルギー準位の離散化は実は長い歴史のある研究課題であり、久保効果やレベル統計など重要な問題を含む。このような研究は従来多数の粒子を対象に行われてきたが、超微細加工法を応用して10nm級の単一金属ドットのトンネル分光を行うという実験を昨年度から NEC 基礎研察グループとの共同研究として開始した。前年度の研究によって、10nm程度の島電極をもつアルミニウム SET を作製し、この微小島電極中の離散化量子状態を観測するに至ったが、当年度は複数の試料についての実験結果をもとにエネルギー準位の分布についての解析を行った。さらに、アルミニウム以外の金属種についての実験を目指して強磁性金属、半金属、重金属など様々な金属微粒子を島電極とする試料の作製を試みた。

希釈冷凍機温度において試料の電流電圧特性をゲート電圧の関数として測定した一例を図2に示す。温度は30mKである。見やすくするために各 I-V 曲線はゲート電圧に比例した縦方向

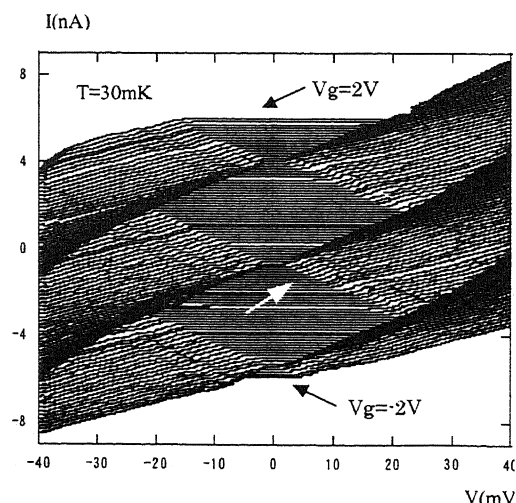


図2：試料のクーロンブロッケイド特性

へのオフセットがかけられている。単電子トランジスタのクーロンブロッケイド特性が明瞭に見られる。さらにクーロンブロッケイドの閾電圧近傍における電流電圧特性を詳細に調べると、電圧間隔  $0.1\text{meV}$  のオーダーの階段あるいはピーク構造が観測され、これが島電極中の 1 電子レベルに由来する構造であると結論できることを前年度に示した。

金属微粒子中の 1 電子準位の分布についてはランダム行列理論に基づく多くの研究がなされている。それによれば、時間反転対称性を有する場合 (orthogonal)、磁場中のように時間反転対称性のない場合 (unitary)、強いスピン・軌道相互作用の場合 (symplectic) など系の基本的な対称性 (ユニバーサリティクラス) によって準位分布は大きな影響を受けると考えられている。特に最近接準位の間隔( $s$ )の分布  $P(s)$  は、 $s$  の小さな領域で  $P(s) \sim s^\beta e^{-cs}$  ( $\beta = 1$  (orthogonal),  $2$  (unitary),  $3$  (symplectic)) であり、いずれの場合も  $P(0)=0$ 、すなわち準位が縮退する確率はゼロである。これは準位の分布が完全にランダムであるポアソン分布の場合とは異なり、レベル反発として知られている。

我々はこの準位間隔分布を調べるために、複数の試料についての電流電圧特性から、数値微分によって求めた微分コンダクタンスの隣り合うスピークの電圧差のヒストグラムを求めた。図 3 がその一例である。横軸は平均間隔で規格化したピーク間隔、縦軸は各領域の頻度で、サンプル (ピーク間隔) 数は 39 である。図中には Poisson 分布と orthogonal case によく一致する Wigner 分布をあわせて示した。実験データは Wigner 分布とよく似ている。ただし、階段の立ち上がりが有限であったり、数値微分や平滑化の処理のために、二つの準位がきわめて接近して存在する場合、実験ではそれらを分離していない可能性がある。簡単な見積では、これらの影響だけでは  $\Delta=0$  近傍での頻度の減少は説明できないが、今後さらに詳しい実験が必要である。

以上の実験はリード及び島電極が共にアルミニウムからなる試料で行った。Al は良好なトンネル接合を自然酸化によって容易に作る事ができ、しかも Al 微粒子は薄い酸化膜によって安定に保護されるという技術的な利点を有する。しかし、1 電子準位のトンネル分光実験を磁性体やスピン軌道相互作用の強い重金属に適用するには Al 以外の金属種についても同様の構造を作れなければならない。このため、上記の研究と平行して以下に示す様々な金属についての試料づくりを試みた。現段階ではまだ成功にいたっていないが、試料作製プロセスの見直し、自然酸化以外の方法によるトンネルバリアの作製、現在の SET 構造以外の試料作成方法の開発などによって Al 以外の金属種についての研究に進みたいと考える。1 電子準位のトンネル分光という実験手法の応用分野はきわめて広く、レベル統計の他、多体効果、デコヒーレンス、緩和、超伝導と準位離散化の関係、強磁性金属における磁化と 1 電子準位の相関などの研究課題に挑戦したい。

### (3) 強磁性単電子トランジスタにおけるトンネル磁気抵抗の増大 (松田、神田、大塚) [3, 5, 25]

強磁性金属で作られたトンネル接合の電気抵抗は電極の磁化の相対的な配置に依存して変わる。このため外部磁場を掃引すると磁化反転の起こる低磁場でヒステリシスをもつ特徴的な磁気抵抗が見られる。これをトンネル磁気抵抗(TMR)効果という。TMR 効果は磁気センサーや MRAM など

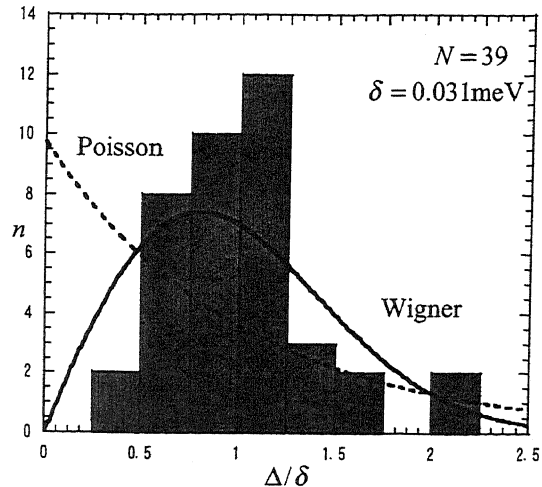


図 3 : 最近接準位間隔の分布  
破線 : Poisson 分布、実線 : Wigner 分布

の応用にも重要な現象である。我々は以前 Ni と Co で作った単一電子トランジスタを用いて、TMR に代表されるスピン依存伝導現象と単電子帯電効果がどのように関連するかを調べ、高温で 4% にすぎないトンネル磁気抵抗比がクーロンブロッケイドが顕著になる低温領域において 40% にも増大することを見出した。この TMR 増大はその後強磁性グラニュー膜などにおいても観測され、注目されている。この増大は単電子トンネルの標準理論の枠内では説明できず、標準理論では無視されている高次のトンネル過程が TMR 増大をもたらすとする機構が提案されている。これらの理論が正しいとするなら、低温での TMR の増大はトンネル抵抗の値によって変わるはずである。すなわち、増大は高次のトンネルが重要になる低抵抗接合で顕著になり、量子抵抗に比べて十分高抵抗の接合では増大は少ないと考えられる。

我々は TMR 増大の原因を探る手がかりとして、低温での TMR 増大とトンネル抵抗値との関係を調べる実験を行った。

試料は Ni/Co/Ni からなる単電子トランジスタであり、レジスト/Ge/レジストの 3 層レジストを用いた電子線リソグラフィと斜め蒸着によって作製した。トンネル障壁は酸素雰囲気中でのアルミナの蒸着、あるいは酸素プラズマによる Ni 電極表面の酸化によって形成した。金属の厚さは 30~45nm、トンネル接合の大きさはほぼ  $0.1\mu\text{m} \times 0.1\mu\text{m}$  である。測定は希釈冷凍機を用いて 20mK までの温度範囲で行った。外部磁場は島電極の長手方向にほぼ平行にかけた。

測定した試料の数は 8 個であり、そのトンネル抵抗は 27k $\Omega$  から 3.1M $\Omega$  の範囲、単電子帯電エネルギーは 20~80 $\mu\text{eV}$  である。4.2K での TMR 比は 2.2%~7.5% であり、Ni の表面酸化によるトンネル接合にくらべアルミナを用いた試料がより大きな TMR 比を示す傾向が認められた。

図 4 に 3 つの代表的な試料の TMR 比の温度変化を示した。横軸は  $E_c/kT_c$  である。3 つの試料のトンネル抵抗値  $R_T$  は 39k $\Omega$ 、350k $\Omega$ 、3.1M $\Omega$  であり、量子抵抗 ( $R_Q = h/2e^2 \approx 13\text{k}\Omega$ ) との比は  $R_T/R_Q = 3, 27, 240$  である。図が示すようにすべての試料において低温で TMR 増大が観測され、その大きさは 3 つの試料についてあまり大きな差異は認められない。この結果は、トンネルの高次過程の基づく TMR 増大の理論の予想とは相容れないものであり、TMR 増大にこれ以外の機構を考える必要があることを意味する。

#### (4) 単一電子トランジスタの圧力効果 (北田、大塚)

我々は以前強磁性単一電子トランジスタ (SET) において外部磁場によって生じる抵抗の振動 (磁気クーロン振動) を見出し、その原因についての考察を行った。それによれば、外部磁場を加えることによって生じる強磁性金属のフェルミエネルギー (化学ポテンシャル) の変化がこの振動の根本的な原因であると考えられる。この考察をさらに一歩進めると、磁場以外の外部パラメータであっても、もしそれが伝導電子のフェルミエネルギーに影響を与えるならば、単一電子トランジスタの抵抗の振動となって現れることを意味する。これを検証するために圧力によって SET の抵抗が影響を受けるか否かの実験を始めた。試料はアルミニウムと銅からなる異種金属 SET であり、これを圧力容器内にセットしたのち 2K で高圧ヘリウムガスによって約 5MPa までの圧力を加えクー

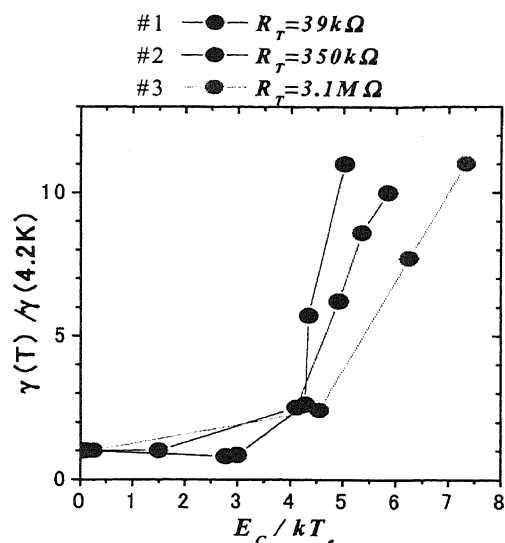


図 4 : TMR 比の温度変化

ロン振動の位相が変化するかどうかを調べた。これまでの実験で、圧力による位相変化が観測されているが、その振る舞いは理論的な予想とは必ずしも一致しない。今後も研究をすすめる。

## 【 2 】 単一カーボンナノチューブの電気伝導 (神田、大塚) [1, 2, 21-23]

カーボンナノチューブには、1本のグラファイトの筒からなる単層ナノチューブと、同心円状に配置した複数のグラファイトの筒からなる多層ナノチューブがある。単層ナノチューブは、その微細な構造と多彩な電気特性ゆえにこれまで盛んに研究されてきた。しかしながら、マニピュレーションに伴う折れ曲がりや基板との相互作用、さらには電極との相互作用が電気特性に大きく影響することがわかっており、実際に理想的な電気特性を得るのは困難だと思われる。これに対して、多層ナノチューブでは、明確な半導体的振る舞いなどを期待するのが困難である反面、力学的に強固で、歪みや折れ曲がりほとんどなく、基板や電極の影響が軽減されると期待できる。このような理由から、本研究では、多層ナノチューブの持つ準1次元「ナノ配線」としての可能性を探求している。なお、本研究は理化学研究所半導体工学研究室との共同研究である。

### (1) 多層カーボンナノチューブと金属電極との接触抵抗の制御

昨年度の研究で、カーボンナノチューブと金属電極間の接触抵抗が金属の種類とその成膜方法に依存する事を見出し、高抵抗の原因を提案した。すなわち、蒸着金属がTiのように容易に酸化されるもの場合、ナノチューブに吸着されている酸素によってTiとナノチューブとのインターフェースに酸化膜が形成され高抵抗となる。この仮説を検証するために、蒸着直前に試料基板を真空中で約100度にて数分間加熱した。その結果、Ti電極でも10k $\Omega$ 程度の低抵抗を得た。これは、加熱によってナノチューブ表面に吸着しているガス分子が取り除かれたためであると考えられ、仮説を支持する。

接触抵抗の大小によって、金属/多層ナノチューブ/金属構造の低温における電気伝導特性は大きく変化することがわかった。抵抗が数10k $\Omega$ 以上のTi試料では、明確なクーロン・ブロッケード効果が観測され、単一電子トランジスタを構成するトンネル接合は、ナノチューブと金属電極との間に存在する。これは、多層ナノチューブからなる単一電子デバイスで、トンネル接合キャパシタンスを制御できる可能性を示している。一方、Pt/AuやVからなる低抵抗( $\sim 20$ k $\Omega$ )の試料では、離散的なエネルギーレベルを介したクーロン・ブロッケード効果に重畳して、ナノチューブ自身のコンダクタンス変化が観測される。後者は格子欠陥、不純物、半導体的グラファイト筒などに起因すると考えられる。さらに低抵抗の試料では、ゼロバイアス付近のコンダクタンス減少は観測されるが、ゲート電圧依存性はほとんど見られない。これは、いわゆる朝永-ラッティンジャー-液体的振る舞いを反映しているものと考えられる。詳細については後節で述べる。以上のべた10k $\Omega$ 付近を境とする振る舞いの変化は、我々がこれまで行ってきた金属微小トンネル接合系における電荷揺らぎの実験結果と一致している。

### (2) 多層ナノチューブの電子状態の磁場依存性

カーボンナノチューブは、丸まったグラフェンシートという特徴的な構造のために、独特の電子状態を持つことが示されている。特に磁場をかけたときのランダウレベル形成の過程はカーボンナノチューブ固有のものである。我々は、高抵抗の金属/多層ナノチューブ/金属構造に垂直磁場を印加した際の1電子レベルの変動をクーロン振動を用いて調べた。その結果、クーロン振動の電流ピ

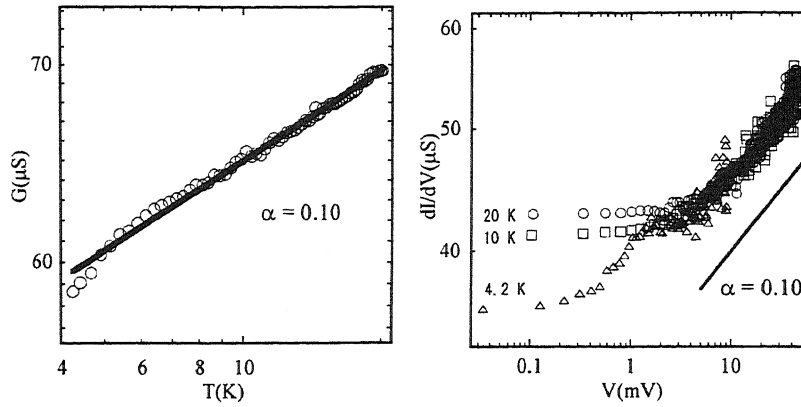


図5：室温抵抗が20 kΩのV電極試料における（左図）ゼロバイアス抵抗の温度依存、（右図）微分コンダクタンスのバイアス電圧依存。

ークの磁場による複雑な移動を観測した。電流ピークの磁場による移動の仕方は4本ずつの組になるが、これはゼロ磁場で各準位がスピンとバンドの対称性 ( $E(k) = E(-k)$ ) により4重縮退していることを反映している。すなわち、この振る舞いは理想的なナノチューブに特有のもので、同様の振る舞いは数値計算によって再現することが可能である。一方、多くの試料で電流ピークの交差を観測した。これは、この素子に複数個の量子ドットが含まれていることを示唆していると我々は解釈している。このことは、電流ピーク高さのゲート電圧依存が顕著であることからわかる。

### (3) 多層ナノチューブにおける朝永-ラッティンジャー液体的振る舞い

1次元電子系では、微弱なクーロン相互作用の存在により、フェルミ液体が不安定になり、朝永-ラッティンジャー液体（以下、ラッティンジャー液体と略す）と呼ばれる特殊な状態が現れることが知られており、活発に研究されている。ラッティンジャー液体の主な特徴のひとつに、トンネル状態密度のエネルギーに対するべきの依存性が挙げられる。これまでの研究で、単層ナノチューブではラッティンジャー液体の理論とべきの値まで含めて合致する振る舞いが観測されている。それに対して、多層ナノチューブではラッティンジャー液体的振る舞いと2次元弱局在効果の両方の報告がなされており、また、前者の報告におけるべきの値は理論の予想と大きく食い違い、かつ、ばらついていることから、現時点では、どの状態が実現しているか明らかとはいえない。我々は、

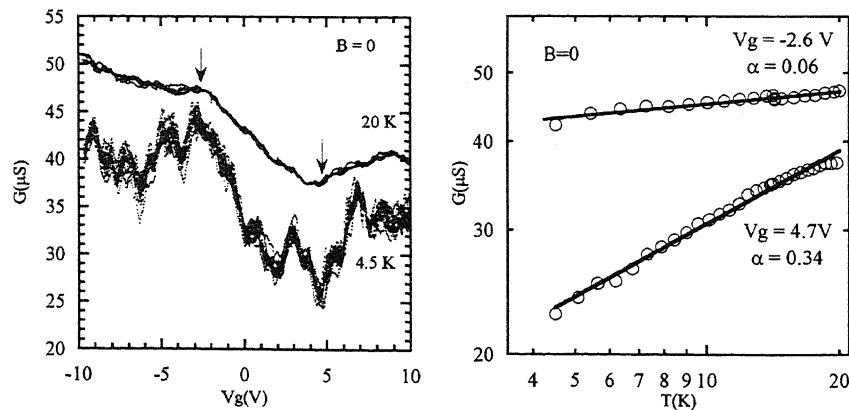


図6：ゼロバイアスコンダクタンスのゲート電圧依存と、任意に選んだ2点のゲート電圧（(a)に矢印で示す）におけるゼロバイアスコンダクタンスの温度依存性。

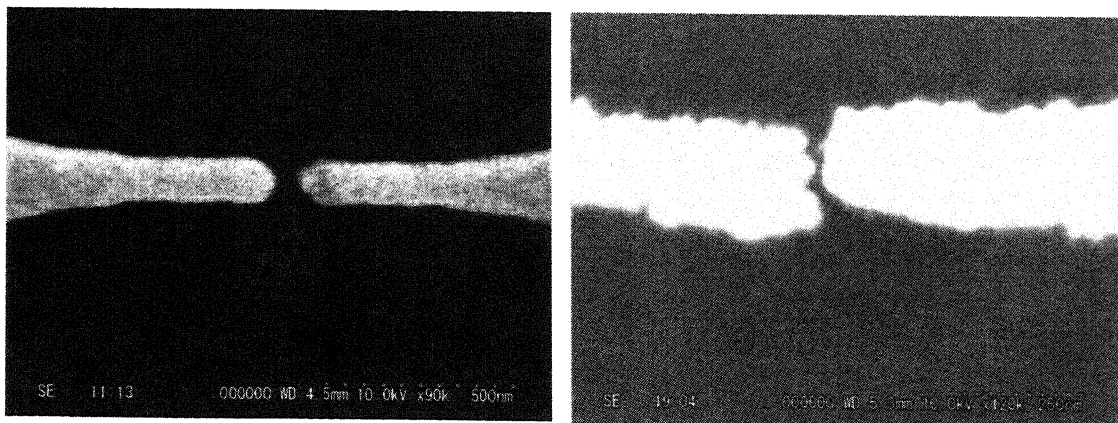
ほとんどの多層ナノチューブのコンダクタンスがゲート電圧依存することに着目し、ラッティンジャー液体的振る舞いのゲート電圧依存を調べることで、この問題の解決への手がかりが得られるものと考えた。実験の結果、V/多層ナノチューブ/V 構造において明確なラッティンジャー液体的振る舞いを観測し、そのべきはゲート電圧に依存することを見出した。図5は室温抵抗が 20 k $\Omega$  の V 電極試料におけるゼロバイアス抵抗の温度依存、微分コンダクタンスのバイアス電圧依存である。

(ゲート電極は接地している。) べきの値は $\alpha = 0.1$  である。図6はこの試料のゼロバイアスコンダクタンスのゲート電圧依存と、任意に選んだ2点におけるゼロバイアスコンダクタンスの温度依存性を示す。ともにラッティンジャー液体的振る舞いを示しているが、べきの値が異なる。さらに、磁場 4 T を印加して同様の測定をしたところ、コンダクタンスのゲート電圧依存性がわずかに変化したことに対応し、温度依存のべきの値も変化した。このようなべき的な振る舞いが測定ゲート電圧全体で起こっていると仮定すると、べきのとり範囲は、0.04 から 0.34 となる。これは、いままで報告されている多層ナノチューブにおけるべきのばらつきとほぼ一致する。すなわち、これまで多層ナノチューブで問題とされてきたべきのばらつきは、ゲート電圧の効果として説明がつかないのである。

図6左図における 4.5 K のコンダクタンスの微小な振動はクーロン・ブロッケードとナノチューブ中における量子ドットの形成に起因していると考えられる。この振動にべきの値が追随しているということは、べきがクーロン・ブロッケードに関係していることを示唆しているが、詳細に関してはさらなる実験と理論的検討が必要であると考えている。

### 【 3 】 極微小電極ギャップ構造の作製とナノスケール物質の電気伝導測定 (神田)

巨大分子やクラスターのなどナノスケール物質の電気伝導を測定することを目標として、ナノスケール物質を挟み込むための極微小電極ギャップ構造の作製を行った。微小ギャップを持つ金属電極対の作製方法としてはこれまで、メカニカル・ブレーク・ジャンクション法、めっき法、斜め蒸着プラス electromigration、電子線描画、SiN メンブレン法など様々なものが提案されているが、本研究ではめっき法を用いた。めっき法は、プロセスが容易である、電極間コンダクタンスにより電極間隔を制御できる、という利点がある。図7にめっき法によって作製したギャップが 20 nm の電極構造を示す。左が、めっき前、右がめっき後である。ここでは電極間隔を 20 nm で止めているが、めっきを進行させることでさらに間隔を狭めることができる。



めっき前 電極間隔 50nm

めっき後 電極間隔 20nm

図7：めっき法によって作製したギャップが 20 nm の電極構造 (金)。

電極間隔を制御するための方法として、めっき液中の電極間コンダクタンス測定がこれまで利用されてきた。しかしながら、コンダクタンス自体は、電極形状、めっき液のイオン濃度にも依存することから、再現性のあるめっき進行の指標とすることは困難であることがわかった。その一方で、我々は、電極間隔の狭まりとともに、めっき電圧オン・オフ時のコンダクタンス比が1に漸近することを見出した。(図8)めっき電圧オン・オフ時でコンダクタンス値が異なるのは、溶液中の局所イオン濃度の変化による。この比が1に近づくことはコンダクタンス全体における溶液のコンダクタンスの占める割合が小さくなっていることを意味する。この比によって、電極間隔をより精密に制御できる可能性があることがわかった。

微小電極ギャップ間にナノ構造物質を挟みこむ方法には、静電トラップ法を用いた。これは、電極間に高電圧(数ボルト)を印加しておき、そこに、ナノ構造を含む溶液を滴下することで、ナノ構造の分極を誘起して電極に引き付ける方法である。図9は、静電トラップ中の電極間を流れる電流の時間変化を示したものである。20 nm の Ni 微粒子を含むシクロヘキサン溶液を使用している。滴下から 780 秒で大きな電流が流れ始めているのがわかる。これは、電極間が微粒子によって電気的につながったことを意味する。このように、微粒子の吸着を電流でモニターできることが、静電トラップ法の利点である。

20 nm の Ni 微粒子を静電トラップした後の試料の室温における電流電圧特性において、非線形な振舞いを観測した。これを  $\log(I/V^2)$  vs.  $1/V$  でプロットすると高バイアス ( $V > 1.4$  V) で傾き負の直線部分が現れる。これは、この領域で電界放出型のトンネルが起こっていることを示している。理論式との比較により得られる NiO トンネルバリアの高さは、0.7 eV となり、NiO と Ni のショットキーバリアの高さ 0.5 eV とよい一致を示した。

#### 【 4 】 グラファイト上吸着ヘリウム3固相薄膜の核磁性 (森下) [9, 10, 11]

原子レベルで平坦なグラファイト表面に物理吸着したヘリウム3 ( $^3\text{He}$ ) 薄膜において、吸着第1層及び第2層は固化し2次元固体を形成する。 $^3\text{He}$  は核スピン  $1/2$  をもち、これらの系は量子スピン系のモデル物質である一方、様々な多体交換相互作用の競合がその磁性を支配する特異な系となっている。この系の磁性は、面密度の増大とともに、吸着第1層目では強磁性 - 反強磁性 - 強磁性、吸着第2層目では反強磁性 - 強磁性と変化する。このような面密度による変化は、様々な多

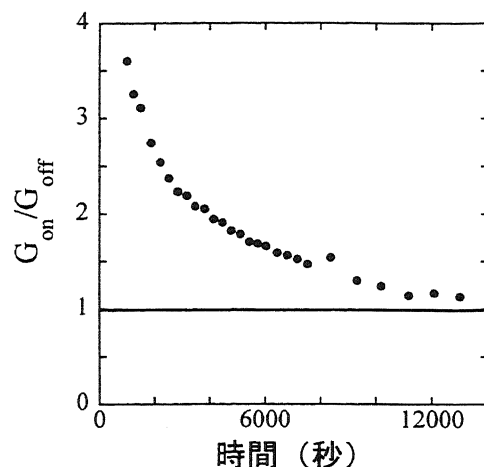


図8：めっき電圧 on、off 時のコンダクタンス比のめっき開始時からの時間依存性。1に漸近していくことがわかる。

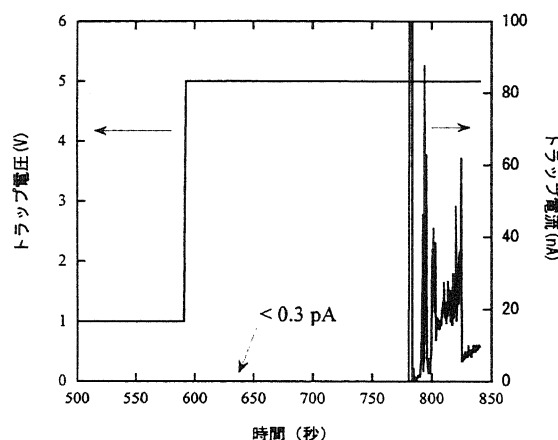


図9：静電トラップ中の電極間を流れる電流の時間変化。



体交換相互作用の面密度依存性がそれぞれ異なるために、面密度とともに競合が変化することに依るものと理解されているが、有効的な交換相互作用が面密度とともに複雑に変化することを説明できないなど、詳細は未だ解明されていない。

我々は、0.1 mK 以下の超低温度までの比熱測定によりこの系の磁性の解明を試みている。多体交換相互作用が磁性を支配する系であっても、ほぼ局在しているスピン系の比熱は充分な高温においては温度の自乗に反比例することが期待される。しかし、第1層目のほぼ全面密度領域及び第2層目の低面密度領域において、この期待とは異なる、どちらかと言えば温度にほぼ反比例する比熱が観測されている。特に吸着第1層においては single exponent に近い振る舞いが2桁以上の温度範囲に渡り観測されており、明らかに異常な振る舞いである。このような異常な振る舞いが何故起こるのかは依然明らかではないが、多体交換相互作用の強い競合を反映したものであると考えている。さらには、比熱の温度に対するべきの正常値 (-2) からのずれは、多体交換相互作用の強さを示す frustration parameter と見なすことができると考えている。この frustration parameter は面密度に対し、複雑な振る舞いを示す。従来、多体交換相互作用の競合には吸着構造はあまり影響を及ぼさないと考えられていたが、我々は吸着ポテンシャルの corrugation が多体交換に強く影響するものと考え、吸着構造の解明の重要性を指摘している。残念ながら、様々な実験的困難から、グラファイト上<sup>3</sup>He 薄膜の吸着構造はほとんど明らかになっていない。そこで我々は経路積分モンテカルロシミュレーションに基づいて、吸着構造の解明を試み、様々な実験結果をつじつま良く説明することのできる吸着構造相図を得ることに成功している。特に、これまで最大の謎であった多体交換相互作用の急激な変化についても定性的な説明を与えることに成功している。また、この構造相図は frustration parameter の面密度変化も良く説明することができ、逆に比熱のべきが多体交換相互作用の競合の強さを反映しているという我々の仮説を強く支持するものである。本年度は、上記の成果についての論文発表とともに、比熱測定を再開し、さらなるデータ収集を進めた。また、上記の吸着構造に関する考察の中で考慮しなかった比較的低面密度の領域についての考察を行った。

グラファイト上の吸着系において安定な整合構造は図 10(a)に示す $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造であり、その面密度は $6.4 \text{ nm}^{-2}$ である。これよりわずかに高い面密度領域では、domain wall 構造が安定になるものと期待される。domain wall 構造とは $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造を形成する複数の domain が接し、その境界で面密度が高くなっている構造である。wall 自身の構造は図 10(b)に示す heavy domain wall と図 10(c)に示す superheavy domain wall の2種類が考えられる。また、図 10(d)のように3つの domain が接する構造も考えられる。この場合、domain wall は蜂の巣状の構造を形成するため、honeycomb domain wall と呼ばれる。この構造では wall は heavy になる。Honeycomb に対し、(b)、(c)のように2つの domain が接する構造は striped domain wall 構造と呼ばれる。これらの構造について、周期境界条件のもと、経路積分モンテカルロシミュレーションの手法により、吸着エネルギーの計算を行った。結果は図 11 に示す通りである。低面密度領域では domain wall 構造の単位格子が大きくなり、周期境界条件のもと考慮しなければいけない吸着子の個数が膨大となるため、まだ計算が完了していないが、約 $6.8 \text{ nm}^{-2}$ を境に、低面密度側では striped domain wall (superheavy)構造が、高面密度側では honeycomb domain wall (heavy)構造が安定であると見なせる。即ち、 $6.8 \text{ nm}^{-2}$ 近傍で domain wall 構造の striped - honeycomb 転移が起こると考えられる。磁化測定から得られた交換相互作用はこの面密度で折れ曲がりを与え、低面密度ではほぼ一定であるのに対し、密度の増大とともに強磁性が弱まる傾向を示している。図 10(d)に矢印で示すように、heavy domain wall 近傍では3体の交換は起こりにくいことが想像される。striped - honeycomb 転移により、強磁性的な相互作用を与える3体交換が抑えられるために、強磁性が弱まるものとして、実験結果と符合する。この面密度では固相の融解温度にも折れ曲がりを生じており、構造相転移の存在を支持する。

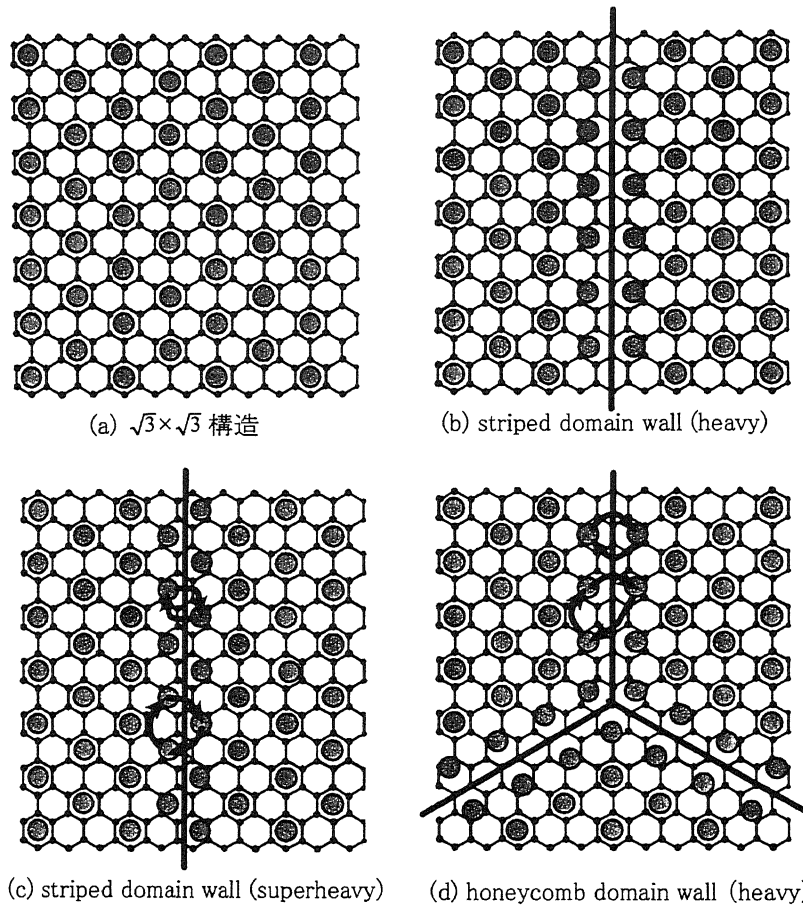


図 10.  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  吸着構造及び domain wall 構造。黒丸はグラファイトを形成する炭素原子の位置、灰色の丸は吸着した  $^3\text{He}$  原子の位置を模式的に示す。太線は domain wall を、矢印は2体及び3体の原子交換を模式的に示す。

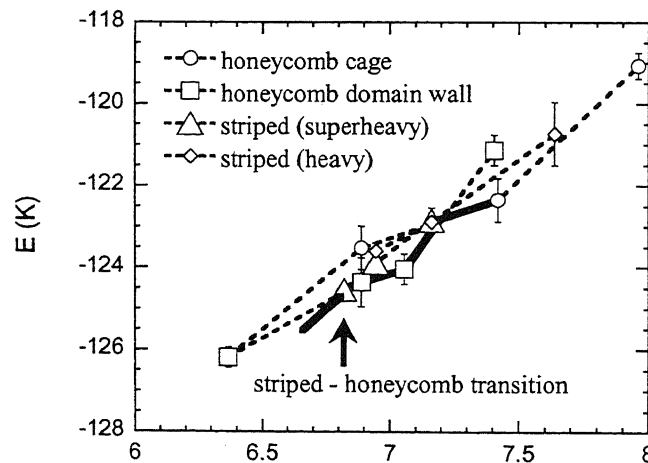


図 11. 経路積分モンテカルロシミュレーションによる様々な吸着構造の  $^3\text{He}$  原子1個あたりの吸着エネルギーの計算結果。  $6.4 < \rho < 6.8 \text{ nm}^{-2}$  では striped domain wall (superheavy)、  $6.8 < \rho < 7.1 \text{ nm}^{-2}$  では honeycomb domain wall (heavy)、  $7.1 < \rho < 7.5 \text{ nm}^{-2}$  では honeycomb cage 構造が最も安定と考えられる。  $6.4 \text{ nm}^{-2}$  以下では  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  構造と流体相が共存し、  $7.5 \text{ nm}^{-2}$  以上ではグラファイト基盤に不整合な吸着構造が出現すると考えられる。

## 【 5 】 熱音響現象 (富永) [12 ~ 19]

平成 12 年度から続いている熱音響自励振動の研究ではエントロピー生成最小の法則が本質的に重要であることが判明しつつある。エントロピー生成最小の法則と平成 12 年度に主張したエントロピー流増大最小の法則との関係を議論し、エントロピーとエントロピー流とエントロピー生成との関係が明らかにされた。これは平成 13 年度の最大の成果である。

熱音響理論の再検討が行われ、20 世紀の熱音響理論は非理想気体では熱力学的矛盾を含んでいることが明らかにされた。問題は流体の振動運動とエントロピー流との関係であり、非理想気体でも差し支えないように、20 世紀の熱音響理論を修正拡張した。このことも大きな成果であろう。

ノイズボイリングなどの名で親しまれている現象にも熱音響現象の立場からの実験も平成 12 年度に始まり、その成果が出てきた。飽和超流動ヘリウム流路における自励振動は 1 次相転移の効果が顕著なのでヒステリシスがあり熱力学的解析が難しいが、加圧超流動ヘリウムの場合には 1 次相転移の効果が小さいので理解し易いように見える。

## 【 6 】 極低温粒子検出器 (大塚)

東京大学大学院理学系研究科養輪眞研究室と共同で極低温を利用した粒子検出器、フッ化リチウム単結晶を吸収体としたボロメータを神岡宇宙素粒子研究施設に設置し、2000 年度から暗黒物質探索実験を行っている。

## 【 7 】 $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$ における金属-絶縁体転移 (大塚、森下)

伊藤公平 (慶応大)、渡部道生 (理研) などとの共同研究である不純物半導体  $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$  における金属-絶縁体転移の実験に関して、磁場中の転移に関する報告[7]及び、酸化ルテニウム極低温抵抗温度計の磁気抵抗に関する報告[6]をまとめた。

## <論文>

1. A.Kanda, K.Tsukagoshi, Y.Ootuka, and Y.Aoyagi, Electron transport in metal/multiwall carbon nanotube/metal structures (metal=Ti or Pt/Au), Appl. Phys. Lett 79 1354-1356 (2001).
2. A. Kanda, K. Tsukagoshi, Y. Ootuka, and Y. Aoyagi, Observation of Coulomb Blockade in a Ti/Multi-wall Carbon Nanotube/Ti Structure, Proceedings of the International Symposium on Nanonetwork Materials: Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems. (AIP proceedings 590), 265 - 268 (2001).
3. Y. Ootuka, K. Ono, H. Shimada, R. Matsuda and A. Kanda, Electron transport in ferromagnetic small tunnel junctions, Materials Science and Engineering B84 114-119 (2001).

4. 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* 352 181-185 (2001).
5. H.Shimada and Y.Ootuka Magnetic-Field-Driven Single Electron Pump, *Phys. Rev. B* 64 (2001) 5418.
6. M.Watanabe, M.Morishita and Y.Ootuka, Magnetoresistance of RuO<sub>2</sub>-based resistance thermometers below 0.3K, *Cryogenics* 41(2001)143-148.
7. M. Watanabe, K. M. Itoh, M. Morishita, Y. Ootuka, and E. E. Haller, Critical exponent for the metal-insulator transition of <sup>70</sup>Ge:Ga in magnetic fields Proceedings of the 25th International Conference on the Physics of Semiconductors: Osaka, Japan, September 17-22, 2000/ N. Miura; T. Ando (Eds.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001 pp. 152-153.
8. 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)
9. M. Morishita, H. Nagatani, and Hiroshi Fukuyama, Anomalous Temperature-dependence of Nuclear-Spin Heat Capacity of Submonolayer Solid <sup>3</sup>He Adsorbed on Graphite, *Phys. Rev. B* 65 (2002) 104524-1 – 7.
10. M. Morishita and T. Takagi, Evolutions of Competition of Multiple-Spin-Exchange Interactions and Structure in Submonolayer Solid <sup>3</sup>He Film Adsorbed on Grafoil, *Phys. Rev. Lett.* 87(2001) 185310-1 - 4.
11. M. Morishita and T. Takagi, Adsorption Structure of <sup>3</sup>He Monolayer Solid Film on Grafoil, *J. Low Temp. Phys.*, 126 (2002) 1541.
12. A.Tominaga, Thermoacoustic Spontaneous Oscillation and its Relation to Thermodynamics, *Proc.ICA17(Rome, 2001) vol.1 Physical Acoustics-Part A, Thermoacoustics*, 5-6 (2001)
13. T. Yazaki, T. Biwa and A. Tominaga, A pistonless Stirling cooler, *Applied Physics Letters* 80, No1, 157-159 (2002)
14. 富永 昭, 枝管つきループ管の振動モード、低温工学 36 巻 4 号、178-183 (2001)
15. 富永 昭, スターリングエンジンの性能の周波数依存性, 低温工学 36 巻 4 号、212-217 (2000)
16. 小林久恭、菅沼洋一、吉田栄之、松原洋一、富永 昭, 加圧超流動ヘリウムにおける熱音響振動, 低温工学 36 巻 12 号、687-692 (2001)
17. 小林久恭、吉田栄之、菅沼洋一、松原洋一、富永 昭, 飽和超流動ヘリウム流路における熱振動と異常熱移送特性, 低温工学 36 巻 12 号、693-698 (2001)
18. 富永 昭、熱音響自励振動, 低温工学 36 巻 4 号、163-169 (2001)
19. 富永 昭、共鳴管内の流体振動のイメージ, 低温工学 36 巻 4 号、170-177 (2001)
20. Y. Ootuka, T.Yamaguchi, H.Miyazaki and A.Kanda, Dissipation and Quantum Fluctuations in 2D-Array of Small Josephson Junctions, To be published in *MicroelectronicEngineering* (2002)
21. A. Kanda, S. Uryu, K. Tsukagoshi, Y. Ootuka and Y. Aoyagi, Magnetic field dependence of

- Coulomb oscillations in metal/multi-wall carbon nanotube/metal structures, Physica B in press.
22. K.Tsukagoshi, N.Yoneya, S.Uryu, Y.Aoyagi, A.Kanda, and Y.Ootuka, B.W.Alphenaar, Carbon nanotube devices for nanoelectronics, Physica B (2002), in press.
  23. A. Kanda, K. Tsukagoshi, S. Uryu, Y. Ootuka and Y. Aoyagi, Resistance dependence of transport properties in metal/multi-wall carbon nanotube/metal structures, Microelectronic Engineering, in press.
  24. A. Kanda and Y. Ootuka, Response of a mesoscopic superconducting disk to magnetic fields, Microelectronic Engineering, in press.
  25. R. Matsuda, A. Kanda, Y. Ootuka, Enhanced Tunnel Magnetoresistance in Ferromagnetic Single Electron Transistor, to appear in Proceedings of ISQM.
  26. 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

<報告書>

1. 科学技術振興事業団、戦略的基礎研究推進事業、研究領域「量子効果等の物理現象」研究課題「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」報告書（2002年2月）
2. 平成13年度日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業フィジビリティスタディ研究成果報告書「極微構造導体における量子伝導」（平成14年4月）
3. 一次元微小ジョセフソン接合列の散逸誘起超伝導転移（平成12～13年度科学研究費補助金研究成果報告書）

<学位論文>

- ・ 八幡和志： $^3\text{He}$  Melting Curves in High Magnetic Fields、(博士(理学)、物理学研究科、2001.6)
- ・ 宮崎久生：Quantum fluctuations and dissipative phase transition in Josephson chains、(修士(理学)、数理物質科学研究科物理学専攻、2002.3)
- ・ 黒沢鉄平：Tunnel spectroscopy of an ultra-small metal particle、(修士(理学)、理工学研究科、2002.3)
- ・ 浅古卓永：極微小二次元トンネル接合列の作製と電荷ソリトン輸送の研究、(修士(理学)、理工学研究科、2002.3)

<講演>

国際会議

1. A. Kanda, K. Tsukagoshi, S. Uryu, Y. Ootuka and Y. Aoyagi, Transport properties of multiwall carbon nanotubes, Fifth International Symposium on New Phenomena in

Mesoscopic Physics (Nov. 25-30, 2001, Hawaii)

2. A. Kanda and Y. Ootuka, Paramagnetic supercurrent in a mesoscopic superconducting disk, Fifth International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Physics (Nov. 25-30, 2001, Hawaii)
3. Y. Ootuka, R. Matsuda and A. Kanda, Tunnel magnetoresistance in ferromagnetic single electron transistor, Fifth International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Physics (Nov. 25-30, 2001, Hawaii)
4. Y. Ootuka, T. Yamaguchi, H. Miyazaki and A. Kanda, Dissipation and quantum fluctuations in 1D- and 2D-array of small Josephson junctions, Fifth International Symposium on New Phenomena in Mesoscopic Physics (Nov. 25-30, 2001, Hawaii).
5. A. Kanda, Mesoscopic effects in small superconducting rings and disks, Workshop on Quantum Transport in Nanoscopic and Mesoscopic Structures (Hsinchu and Taipei, Taiwan, Nov. 9-10, 2001)
6. Y. Ootuka, some topics in metal-base single-electron transistors. Workshop on Quantum Transport in Nanoscopic and Mesoscopic Structures, International Conference Hall, Library, National Chiao Tung University, Taiwan, 2001/11/9
7. K. Tsukagoshi, A. Kanda, N. Yoneya, E. Watanabe, Y. Ootuka, and Y. Aoyagi Nano-device formation in a multi-wall carbon nanotube, 2001 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2001), Matsue, Japan, October 31-November 2, 2001.
8. A. Kanda, K. Tsukagoshi, S. Uryu, Y. Ootuka and Y. Aoyagi, Electronic transport in multi-wall carbon nanotubes, Tsukuba Symposium on Carbon Nanotube in Commemoration of the 10th Anniversary of its Discovery (Tsukuba, Oct. 4. 2001).
9. A. Kanda, K. Tsukagoshi, Y. Ootuka, K. Aoyagi, Intn. Workshop on the Science and Application of Nanotubes (Nanotube2001), (Patsdum, 2001/7/22)
10. Yamaguchi Takahide, H. Miyazaki, A. Kanda, Y. Ootuka; "Superconductor-Insulator Transition in One- and Two-Dimensional Arrays of Dissipative Small Josephson Junctions"; ISQM-Tokyo '01 (The 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology) (ARL Hitachi, Saitama), August 27-30, 2001
11. R. Matsuda, A. Kanda, and Y. Ootuka, Enhanced Tunnel Magnetoresistance in Ferromagnetic Single Electron Transistor, ISQM-Tokyo'01 (The 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology) (ARL Hitachi, Saitama), (2001/8.29)
12. M. Morishita and T. Takagi, Adsorption Structure of  $^3\text{He}$  Monolayer Solid Film on Grafoil, International Symposium on Quantum Fluid and Solid (qfs2001) (Konstanz, July 2001).
13. A. Tominaga, Thermoacoustic Spontaneous Oscillation and its Relation to Thermodynamics (invited) Proc. ICA17 (Rome, 2001) vol.1 Physical Acoustics-Part A, Thermoacoustics, 5-6 (2001)

## 国内会議

1. 神田晶申, 塚越一仁, 青柳克信, 大塚洋一, 金属/多層ナノチューブ/金属構造におけるクーロン・ブロッケード、日本物理学会 2001 年秋季大会 (徳島市)
2. 神田晶申, 瓜生誠司, 塚越一仁, 安食博志, 青柳克信, 大塚洋一, 多層カーボンナノチューブ単一電子トランジスタにおけるクーロン振動の特異な磁場依存性、日本物理学会 2001 年秋季大会 (徳島市)
3. 山口尚秀, 宮崎久生, 大塚洋一, ジョセフソン接合列の伝導特性の次元依存性、日本物理学会 2001 年秋季大会, 徳島文理大 2001/9/19
4. 宮崎久生, 山口尚秀, 神田晶申, 大塚洋一, 1 次元微小ジョセフソン接合列の電気伝導特性のゲート電圧依存性、日本物理学会 2001 年秋季大会 (徳島市)
5. 浅古卓永, 神田晶申, 大塚洋一, SiN メンブレンマスクを用いた微小トンネル接合二次元アレイの作製、日本物理学会 2001 年秋季大会 (徳島市)
6. 黒沢鉄平, 馬場雅和, Yuri Pashkin, 蔡兆申, 神田晶申, 大塚洋一, 金属微粒子のトンネル分光 II、日本物理学会 2001 年秋季大会 (徳島市)
7. 松田亮史, 島田宏, 神田晶申, 大塚洋一, 強磁性 SET における磁気抵抗効果 II、日本物理学会 2001 年秋季大会 (徳島市)
8. 瓜生誠司, 神田晶申, 塚越一仁, 安食博志, 大塚洋一, 青柳克信, ナノチューブドットにおける特異なクーロン振動の磁場効果、第 62 回応用物理学会学術講演会 (愛知工業大学)、2001 年 9 月 11 日-14 日
9. 身内賢太郎, 伊藤寛, 井上慶純, 大谷航, 大塚洋一, 清水雄輝, 関谷洋之, 竹田敦, 蓑輪眞, 森山茂栄, 渡辺隆行, LiF ポロメータを用いた神岡地下実験室での暗黒物質探索実験・LiF 結晶の低バックグラウンド化及び振動対策を行なった 2001 年の測定経過、日本物理学会 2001 年秋季大会, 沖縄国際大, 2001/9/23
10. 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, 量子効果等の物理現象」平成 8 年度採択チーム最終シンポジウム, 東京, 津田ホール 2001/12/19
11. 大塚洋一, 北田実, 神田晶申, 単電子トランジスタの圧力効果、日本物理学会代 57 回年次大会 (草津市(滋賀県)、2002 年 3 月)
12. 神田晶申, 極微細構造の電子輸送 —メゾからナノへ— はじめに、日本物理学会第 57 回年次大会シンポジウム (草津市(滋賀県)、2002 年 3 月)
13. 大塚洋一, 単一金属微粒子のトンネル分光、日本物理学会 第 57 回年次大会 (シンポジウム)、立命館大びわこ・くさつキャンパス 2002/3/25
14. 神田晶申, 塚越一仁, 青柳克信, 大塚洋一, 多層カーボンナノチューブにおける朝永ラッティンジャー液体的振る舞いの起源、日本物理学会代 57 回年次大会 (草津市(滋賀県)、2002 年 3 月)
15. 島田 宏, 大塚洋一, 強磁性単一電子ポンプ日本物理学会 第 57 回年次大会、立命館大びわこ・くさつキャンパス、2002/3/25

16. 山口尚秀, 宮崎久生, 大塚洋一 量子 XY 模型の基底状態の次元依存性—ジョセフソン接合列の実験、日本物理学会 第57回年次大会、立命館大びわこ・くさつキャンパス 2002/3/25
17. 身内賢太郎, 伊藤寛, 井上慶純, 大谷航, 大塚洋一, 清水雄輝, 関谷洋之, 竹田敦, 蓑輪眞, 森山茂栄, 渡辺隆行, LiF ボロメータを用いた神岡地下実験室での暗黒物質探索実験—2001年の測定結果報告、日本物理学会 第57回年次大会、立命館大びわこ・くさつキャンパス, 2002/3/27
18. 竹田敦, 伊藤寛, 井上慶純, 大谷航, 大塚洋一, 清水雄輝, 関谷洋之, 身内賢太郎, 蓑輪眞, 森山茂栄, 渡辺隆行, LiF ボロメータの高感度化及び LiF 以外の吸収体を用いた暗黒物質探索実験計画、日本物理学会第57回年次大会、立命館大びわこ・くさつキャンパス, 2002/3/27
19. 森下將史, 高木丈夫, グラファイト上  $^3\text{He}$  単原子層固相の吸着構造、日本物理学会 2001 年秋季大会、徳島大学, 2001/9/19.
20. 高木丈夫, 森下將史, 経路積分による Graphite に吸着した  $^3\text{He}$  1 層目の交換相互作用、日本物理学会 2001 年秋季大会、徳島大学、2001/9/19.
21. 森下將史, 高木丈夫, グラファイト上  $^3\text{He}$  単原子層固相の吸着構造 II、日本物理学会第 57 回年次大会、立命館大学、2002/3/26.
22. 小林久恭, 菅沼洋一, 斎藤宏文, 吉田栄之, 松原洋一, 富永昭, 超流動ヘリウムにおける熱音響効果の測定, 春季低温工学会講演概要集 (2001)、141
23. 吉田栄之, 菅沼洋一, 斎藤文宏, 越坂部淳, 松原洋一, 富永昭, 小林久恭, 飽和超流動ヘリウムにおける熱音響効果と熱移送, 春季低温工学会講演概要集 (2001)、142
24. 菅沼洋一, 吉田栄之, 斎藤文宏, 谷藤岳, 富永昭, 松原洋一, 小林久恭, 加圧超流動ヘリウムの熱音響効果と熱移送, 春季低温工学会講演概要集 (2001)、143
25. 吉田栄之, 菅沼洋一, 松原洋一, 富永昭, 小林久恭, 飽和超流動ヘリウムにおける熱音響効果と熱移送-2, 秋季低温工学会講演概要集 (2001)、152
26. 菅沼洋一, 吉田栄之, 松原洋一, 富永昭, 小林久恭, 加圧超流動ヘリウムにおける熱音響効果と熱移送-2 秋季低温工学会講演概要集 (2001)、153
27. 富永 昭, 熱音響理論の拡張 1 : 熱音響理論批判, 秋季低温工学会講演概要集 (2001)、263
28. 富永 昭, 熱音響理論の拡張 2 : エントロピー流, 秋季低温工学会講演概要集 (2001)、264
29. 富永 昭, 熱音響理論の拡張 3 : その及ぼす影響, 秋季低温工学会講演概要集 (2001)、265
30. 富永 昭, 熱音響理論の拡張, 平成 13 年度第 2 回熱音響自励振動研究会 (京都, 2001 年 12 月)
31. 富永 昭, エントロピー流増大最小の法則, 平成 13 年度第 2 回熱音響自励振動研究会 (デンソー浜名湖研修所, 2002 年 3 月)
32. 富永 昭, エントロピーとエントロピー増大則, 平成 13 年度第 2 回熱音響自励振動研究会 (デンソー浜名湖研修所, 2002 年 3 月)