

VII-5. 低温物性グループ

教授 大塚洋一
助教授 富永 昭
講師 神田晶申、大木泰造
助手 森下将史
研究員 山口尚秀（日本学術振興会特別研究員）、松田亮史（VBL 非常勤研究員）、
大学院生 宮崎久生（数理物質研究科D4）、迫坪行広（同D2）、和田充洋（同D2）、
富田幸典（理工学研究科M2）、上原康孝（同M2）、大貫厚（同M2）、
中丸隆司（同M1）
林正博（教育研究科M2）、大谷徳樹（同M1）
卒業研究生 大槻亮太、若田昌一、内川全也（自然科学類物理学専攻）

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様々な伝導現象、熱音響現象、吸着ヘリウム3薄膜の核磁性の研究などを進めている。

大塚と神田は、2003年4月に発足した学際物質科学研究センター（TIMS）所属となった。

以前から概算要求（特別設備費）で希望していた電子線リソグラフィ装置の予算が認められ、稼動をはじめた。

夏期特別実験の一環として自然科学類1～3年生を対象に「超流動：第二音波の観測」と「超伝導：交流ジョセフソン効果」の実験を行った。

【1】 単一金属微粒子中の電子状態

極低温におけるトンネル分光を手段として金属超微粒子中の電子状態に関する研究を進めている。研究は、(1)電子線リソグラフィによる微細加工を利用して作製した直径10 nm程度の島電極を持つ単電子トランジスタ（SET）を試料とした伝導測定、(2)金属クラスターを資料とする低温STMによる研究の2方法で行う。本研究は科学研究費補助金基盤研究(A)（期間：2003～2005年度）に採択され、本年度は低温STMの導入を行った。

(1) 金属微粒子中の1電子状態のトンネル分光（和田、神田、大塚）

新しいナノスケール電極対作製法を開発するとともに、これを応用し直径20nmの金コロイド粒子を島電極とする単電子トランジスタを作製し電気伝導測定を行った。

ナノメートルスケールの間隔を持つ電極対は単一金属微粒子のトンネル分光実験に不可欠であるのみならず、分子をはじめとしたナノ導体の伝導研究に重要である。これまで最先端の電子線リソグラフィ法による直接加工によって10nm級のSETを作製してきたが、2回の斜め蒸着によって生じるギャップ（細線の切断）を逆に利用することを考案し、その有効性を確認した。この方法は、既存の方法に比べプロセスが単純であるとともに、電極対間隔はリソグラフィ精度に依存せず、蒸着量と蒸着角度によって決まるという特徴を有する。図1-1に金で作製したギャップ電極の例を示す。電極間隔の設計値からのずれは蒸着金属の凹凸によるものであり、基板を低温にして蒸着することにより改善が見られた。図1-2は金電極の表面にオクタンジチオール単分子膜を形成し、さらに静電トラップ法により、直径20nmの金コロイド粒子を挟み込んだ試料の例であり、本法によって単一微粒子をギャップ内にトラップすることが可能であることが確認された。電気伝導測定

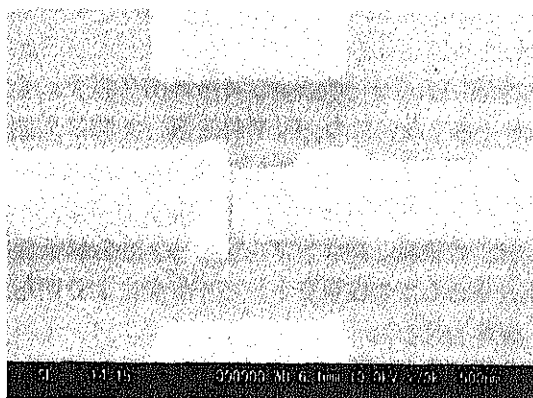


図 1-1: 金ナノギャップ電極対

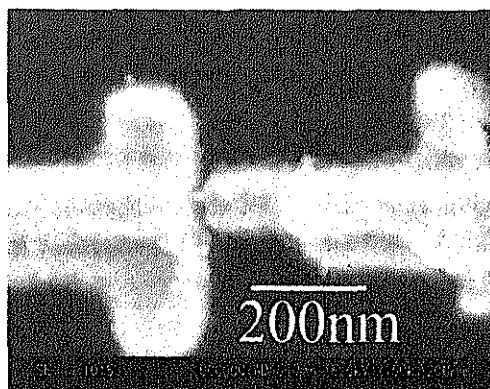


図 1-2: 金コロイド粒子を島電極とする SET

の結果、ゲート電圧による電流・電圧特性の変化が確認できた。ただし、クーロンダイヤモンドは単純な周期性を持たず複雑であった。複数の微粒子が挟み込まれているものと考えている。

(2) トンネル分光による金ナノクラスターのオフセット電荷 (電気化学ポテンシャル) の測定 (大木、迫坪、大塚)

ナノクラスタのようなナノ構造体がトンネルバリアを介して電極とつながるとき両者の電気化学ポテンシャルはどのような配置を取るのであろうか。これは例えば単一電子トランジスタではオフセット電荷として現れるなど、ナノデバイスを構築する上で重要な問題であるにもかかわらず、これまで系統的な研究はほとんどされていない。我々は金ナノクラスタ/ジチオール分子膜/Au(111)を試料として用い、走査トンネル顕微鏡により個々のクラスタのトンネル分光をすることでこのオフセット電荷を系統的に調べた。

金薄膜表面をジチオールによって処理したジチオール分子膜/Au(111)基板に金を蒸着するとサイズのほぼそろったクラスタが得られ、そのサイズは蒸着量によって原子数 50 個から 400 個程度で調整可能である。分子膜はクラスタと金基板との間で約 $100\text{M}\Omega$ から $1\text{G}\Omega$ の抵抗値を持つトンネルバリアとして働く。このようにしてできたクラスタに対し 30K でトンネル分光 (クーロン階段の解析) を行うことによりオフセット電荷 Q_0/e ($=\Delta\mu/\Delta E$)、すなわち基板のフェルミレベルに対するクラスタの電気化学ポテンシャルの相対位置分布を調べた。その結果、① $\Delta\mu/\Delta E$ (各パラメータは図 1-3(a)にて定義されている) は 0 を中心に分布する、② サイズの増大とともに分布の幅が広がることが確認された。(図 (b)(c)) 大きなクラスタでは分布の裾は

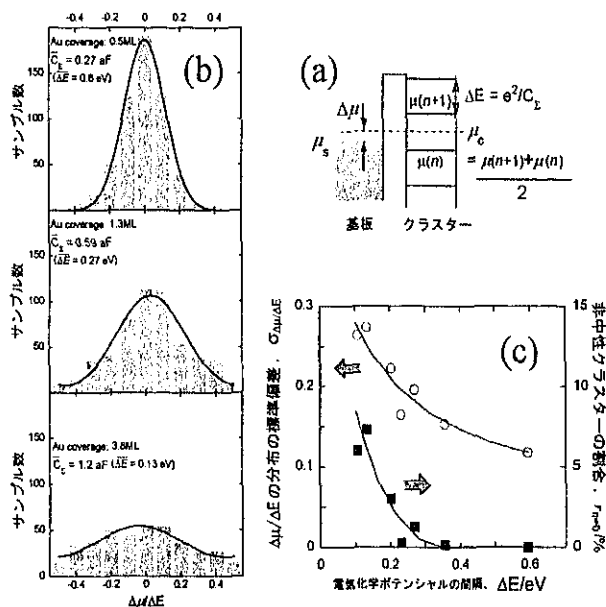


図 1-3 : (a) 基板とクラスターの電気化学ポテンシャルの相対位置の模式図、(b) $\Delta\mu/\Delta E$ の分布の蒸着量 (サイズ) による変化、(c) $\Delta\mu/\Delta E$ の分布の標準偏差と非中性クラスターの割合の電気化学ポテンシャル間隔 (ΔE) 依存性。

0.5e を越えるが、これは電氣的に非中性なクラスタが生じることを意味する (図(c)■)。 $\Delta\mu$ のばらつき ($\sigma \sim$ 数十 meV) にはサイズ依存性が見られた。

30K までの測定ではクラスタ内の電子離散準位は観測されなかった。ジチオール分子膜上の金クラスタの密度は高く、一方 STM 探針の曲率はあまり小さくないため、IV 特性を調べる際に周囲のクラスタの荷電に変化が生じクラスタ間の電氣的相互作用によって IV 特性の微細構造を崩してしまう可能性がある。これを避けるためにジチオール/チオール混合分子膜を利用する方法を試み、実際にクラスタの密度が小さい試料の作製に成功した。今後はこのサンプルを用い、さらに低温での測定を行うことによって、金属クラスタの量子ドットとしての性質をトンネル分光により明らかにすることを目指す。

なお、この研究は物質・材料研究機構の藤田大介主席研究員との共同研究として行われた。

【 2 】 多層カーボンナノチューブの量子輸送現象 (神田、富田、大槻)

カーボンナノチューブには大きく分けて単層ナノチューブと多層ナノチューブがある。単層ナノチューブでは、理論的予測と呼応した固有の伝導特性 (1 次元バリスティック伝導) が観測されているのに対し、多層ナノチューブでは多くの場合、乱れた準 1 次元系の振る舞いが現れる。この原因は、ナノチューブ上の格子欠陥や不純物、さらに隣接するグラフェン層の不整合にあると言われている。これに対し最近、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やコンダクタンス量子化というバリスティック伝導の報告があり、その起源が謎となっている。昨年度の研究で我々は、単一多層ナノチューブのコンダクタンスの温度依存性を詳細に検討することによって、朝永-ラッティンジャー液体状態の証拠と言われている現象 (コンダクタンスの温度に対するべき乗依存) が実は証拠としては不完全であり、我々の試料ではべき乗依存性が観測されているにもかかわらずバリスティック伝導は実現していないことを示した。今年度この結果を Phys. Rev. Lett. 誌に発表した。さらに、コンダクタンス量子化の検証を目的として以下の研究を行った。

(1) 条件を制御した多層ナノチューブの作製

ナノチューブの伝導特性の作製/精製条件依存性を明らかにすることを最終目的として、アーク放電法によるナノチューブ作製装置を立ち上げた (図 2-1 左)。原料となる炭素棒、真空チェンバーの冷却を十分に行うことによって、比較的純度の高い多層ナノチューブを作製することに成功した (図 2-1 右)。さらに、ナノチューブに大きなダメージを与えている酸化法による精製に代わる方法として、沈殿法を開発した。

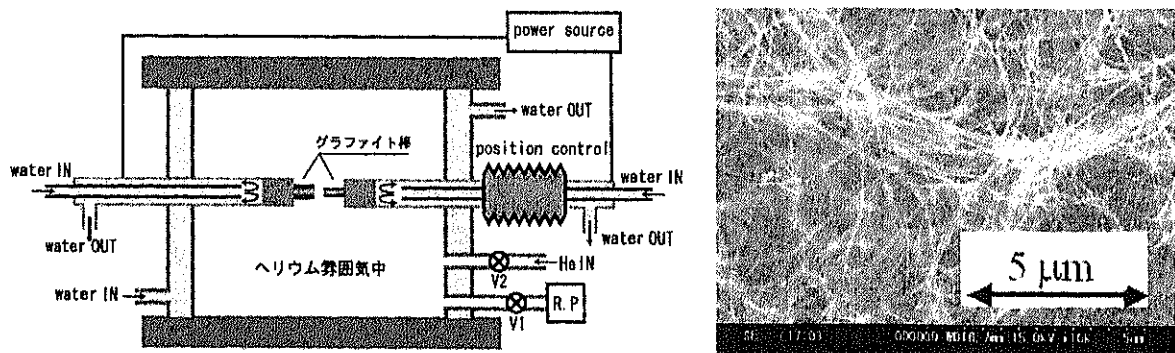


図 2-1: (左)アーク放電法によるナノチューブ作製装置と(右)作製されたナノチューブの電子顕微鏡写真

(2) 新しい電極形成法の開発とナノチューブのコンダクタンス測定

カーボンナノチューブにおけるコンダクタンス量子化の検証実験を行う場合には、電極とのコンタクトを良好にするだけでなく、ナノチューブと基板との接触やナノチューブ表面のレジスト等による汚染を避けることが必要となる。このような条件を満足する電極構造として、ナノチューブの両端を電極に埋め込み、かつ電極間でチューブを中空に保持するものが考えられる。この構造を作製するために窒化シリコンメンブレン法を考案した。この方法ではまず、電子線リソグラフィーによって電極対を作製し、そこに静電トラップ法でナノチューブを付着させる。さらに、窒化シリコンメンブレンを用いたサブミクロンのステンシルマスクを用いて金属をナノチューブ上に蒸着する。このようにして作製したデバイスの SEM 写真を図 2-2 に示す。このデバイスの 2 回目の金属蒸着の前のコンダクタンスは $0.1G_0$ (ただし、 $G_0 = 2e^2/h = (12.9 \text{ k}\Omega)^{-1}$) であったのに対し、蒸着後には、 $0.5G_0$ となり、コンタクトの改善が見られた。低温の測定ではややコンダクタンスが減少したため、バリスティック伝導は実現していないと判断できる。さらに、様々な条件で作製したナノチューブを測定し、コンダクタンス量子化を検証する予定である。

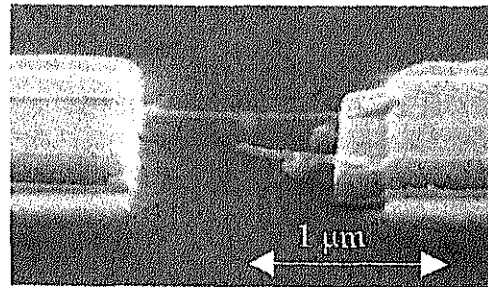


図 2-2: 埋め込み型コンタクトをもつ中空保持カーボンナノチューブ

【 3 】 微小ジョセフソン接合

(1) 低インピーダンス環境下における微小ジョセフソン接合の電流電圧特性の測定 (山口)

低インピーダンス環境下の微小ジョセフソン接合の電流電圧 (IV) 特性を詳しく調べた。帯電エネルギー E_C がジョセフソン結合エネルギー E_J よりも大きくなるほど接合の面積を小さくすると、接合はクーロンブロッケード、プロット振動などの性質を示す。しかし接合から見た外部インピーダンス (環境インピーダンス) を低くすると、微小接合においても、大きな接合で見られるような超伝導電流が回復すると考えられる。これは、散逸によって、接合両端の位相差の振舞いが、量子論的なものから古典的なものに対応しており、興味深い現象である。しかし、このような低インピーダンス環境下の接合の IV 特性についてこれまでほとんど報告例がなかった。これは、低インピーダンス環境を作ること、およびそのような中で接合自体の IV 特性を測ることが一般的には難しいからである。われわれは、Cr 抵抗が並列についた $\text{Al-AlO}_x\text{-Al}$ 微小接合を 2 軸回転斜め蒸着法によって作製した。また電流の掃引速度を上げ電圧アンプのオフセットドリフトを避けることによって、IV 特性を正確に測ることができた (図 3-1)。IV 特性 (並列抵抗に流れる電流を差し引いた特性) は、超伝導電流のピークを持ち、接合面積の大きな古典的な接合の特性と似たものであり、Grabert らによる量子ゆらぎと散逸の影響を取り入れた理論とよく一致した。但し、低温において Cr 抵抗に電流を流すことで発熱し温度が上昇していることを考慮する必要があった。この結果は日本物理学会第 59 回年次

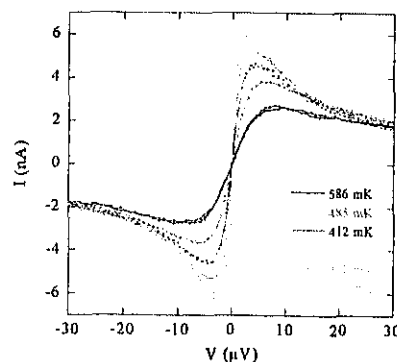


図 3-1: 低インピーダンス環境下におかれた微小ジョセフソン接合の IV 特性

大会において口頭発表し、現在論文投稿の準備中である。本研究の将来的な応用として、このような低インピーダンスによって短絡された微小ジョセフソン接合を使えば、広帯域の超伝導単一電子トランジスタ (SET) を作ることができる可能性がある。

(2) ジョセフソン接合列における時間依存量子相転移の検出 (山口)

微小ジョセフソン接合配列は E_J/E_C を増加させることで絶縁体から超伝導体への量子相転移を示す。このとき E_J/E_C の増加速度 v を増すことで、超伝導相の配列中に位相欠陥の生じる確率が増加すると予想される。すなわち環状ジョセフソン接合列においては、 E_J/E_C を増加させることで自発的に超伝導電流が発生し、その大きさは v ととも増加すると予想される。われわれは、このような興味深い現象を実験的に捉えることを目的として研究を行った。実際に E_J/E_C を時間的に変化させる方法としては、磁場によって E_J を *in situ* で変化させることがまず考えられるが、磁場中では、電流が自発的に流れたのかあるいは磁場による効果であるのかの区別が難しい。すなわちゼロ磁場中で E_J を変化させる必要がある。そのためにわれわれは、78 パーマロイの磁気シールド中においてブレーク接合の方法で E_J/E_C を *in situ* 変化させることにした。次節に記すように希釈冷凍機とブレーク接合を組み合わせ、70mK において金属接合を自在かつ精密に破断・接触させることに成功した。このように本研究によってジョセフソン接合 1 次元列の E_J/E_C を *in situ* で変化させることや、また微小ジョセフソン接合量子回路中のスイッチとしての応用が可能となった。

(3) 希釈冷凍温度域におけるメカニカルブレーク接合の開発 (山口、宮崎、大貫)

超低温でメカニカル・コントロールド・ブレーク接合(MCBJ)を用いた実験を行えるよう、そのための機構を希釈冷凍機に追加する改造及び、制御方法の開発を行った。MCBJ 法とは、基板を弾性変形させることにより、基板上に橋渡し状に作製した金属細線を切断し、それによってできた微小な電極対のコンタクトを制御する方法である。この方法によってコンタクトを、バルクコンタクト、ポイントコンタクト、トンネル接合を経て完全に切れた状態と広範囲にわたって変化させることができる。また電極対間隔はオングストローム以下の精度で制御できる。基板の変形は、試料のある面の両端 2 点を支点にし、基板の裏側から押し棒で押すことによる。そのためには、希釈冷凍機の最低温部に可動な機構を取り付けなければならない。接合を切断するためには押し棒で基板を 1mm 程度押す必要があり、また、1Å 以下の精度で電極間隔を制御するためには、 μm 以下の精度で押し棒を動かす必要がある。また、熱の発生及び流入はできるだけ抑えなくてはならない。これらの要請をみたす方法として、我々はペローズの先に押し棒を取り付け、ペローズ内の液体ヘリウムの圧力によってこれを動かす方法を採用した。粗動は高圧ヘリウムポンプと真空ポンプによる圧力の調整で行い、微動は一定量のヘリウムを

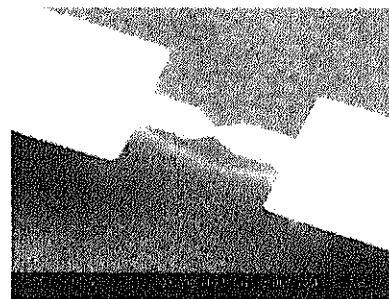


図 3-2 : ブレーク接合試料 (SEM 写真)

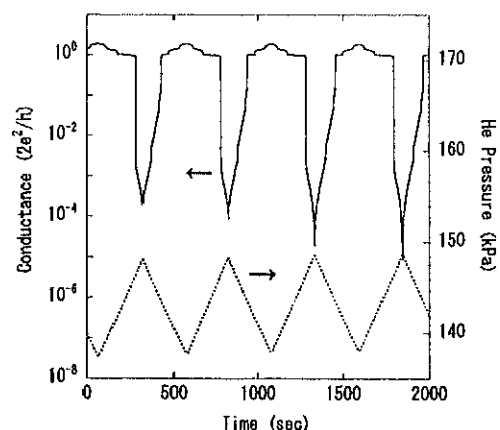


図 3-3 : MCBJ のコンダクタンス変化

系に封入した後、室温部の配管に取り付けたピストンをコンピューター制御できるパルスモーター駆動のメカシリンダーで動かすことによって行う。このような機構を、希釈冷凍機に取り付け、図 3-2 の SEM 写真のような金の MCBJ を用いて試運転を行った。図 3-3 に、ピストンを用いてヘリウムのガス圧を変化させたときの MCBJ のコンダクタンスの変化を示す。ヘリウムのガス圧の増加（減少）に伴って、コンダクタンスが減少（増加）しているのがわかる。また、コンダクタンスが低いときには、ガス圧に対してコンダクタンスは指数関数的に変化しており、トンネル領域の特徴を示している。量子コンダクタンス($2e^2/h$)オーダーのコンダクタンスの階段構造も見られる。

なお、希釈冷凍機 MCBJ の作製とともに、室温及び液体ヘリウム温度域での MCBJ 装置の試作も行い、4.2K では Gundlach 振動の観測にも成功した。

【 4 】 微小超伝導ディスクの渦糸状態 (神田)

磁場中におかれた、サイズが超伝導コヒーレンス長の数倍程度のメゾスコピック超伝導体 (第 2 種) では、渦糸と試料端との相互作用が全体の超伝導状態に影響を及ぼす。その結果、バルクな系で見られるアブリコソフ三角格子は崩壊し、かわりに、いわゆる巨大ボルテックス状態 (giant vortex state: GVS)、マルチボルテックス状態 (multiple vortex state: MVS) が出現することが理論的に予測されている。これまで様々な方法でメゾスコピック超伝導体の実験が行われてきているが、MVS、GVS を特定した例は未だ存在しない。

我々は近年、MSTJ (multiple-small-tunnel junction) 法という独自の方法で微小超伝導体の研究を行っている。これは、サイズが 0.1 ミクロン程度の高抵抗トンネル接合を複数個微小超伝導体に取り付け、各場所の局所状態密度の磁場による変化を同時に観測する方法である。これにより、超伝導電流密度の分布、延いては渦糸の配置に関する情報を得ることができる。今年度は、物質工学系門脇研究室、アントワープ大 Prof. Peeters と共同でこれまでに得られた実験結果の解析を行い、以下の結果を得た。

(1) MVS、GVS 状態の特定と渦糸状態間転移の観測

円形超伝導ディスク (半径 0.75 μm 、厚さ 33 nm) の試料端近くに取り付けた複数個のトンネル接合の特性の磁場依存性の比較から、渦糸状態が MVS か GVS かを特定することに成功した。その結果は、数値シミュレーションの結果と大変よい一致を示した。さらにボルティシティ (磁束量子数) を保存した MVS-GVS 転移 (2 次転移)、MVS-MVS 転移 (1 次転移) をはじめて実験的に観測した。

(2) 渦糸状態間転移点の温度依存性に見られる特異な振る舞いの観測

ボルティシティを変化させる渦糸状態間転移点の温度依存性が、GVS、MVS で異なることを実験的に見出した。また、数値シミュレーションにおいても、同一の振る舞いを再現することに成功した。現在、その起源を検討中である。

【 5 】 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 (松田、大塚)

強磁性単一電子トランジスタ (SET) におけるトンネル磁気抵抗増大のメカニズムとして、接合容量の磁場による変化 (TMC 効果) が有力であると考えている。このことをより確証するために、強磁性 SET と同種材料を用いて高抵抗な Ni/NiO/Co トンネル接合を作製し、TMC 効果について調べた。その結果、接合抵抗が非常に高いデバイスでは TMC 効果は観測されなかった。既報の慶応大グループによる実験結果と合わせて比較検討した結果、TMC 効果の発現には強磁性電極間のトンネル結合が必要であることがわかった。

【 6 】 メゾスコピック有機導体の研究（上原）

低次元性、格子との強い相互作用、強い電子相関など様々な興味深い性質をもつ電荷移動型有機導体におけるメゾスコピック現象の探索を目指して前年度から研究をスタートした。電解酸化法によって微小電極上に微結晶を成長させた後、真空蒸着によって対向電極で試料をサンドイッチするという方法を試みた。まず Si 基板へ金電極を蒸着した後、これをポリイミド膜で絶縁する。電子線リソグラフィーによってポリイミド膜に微小な孔を開け、これを陽極として電解酸化を行うと、孔部分でのみ電解反応が進み有機結晶が成長する。対象とした擬一次元導体 $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ 結晶は $\text{TBA} \cdot \text{ClO}_4$ (TBA : テトラブチルアンモニウム) を含むトリクロロエタン溶液中で TMTSF 分子を電解酸化することにより得られる。電解条件を変えることによって図 6 のように針状あるいは塊状の微結晶を得た。得られた複数の試料について予備的な実験を行ない、超伝導転移と見られる現象を見つけたが、接触抵抗が室温における結晶の電気抵抗と同程度であるため詳しい解析はできていない。今後試料の作製法を変えるなどの一層の工夫が必要である。

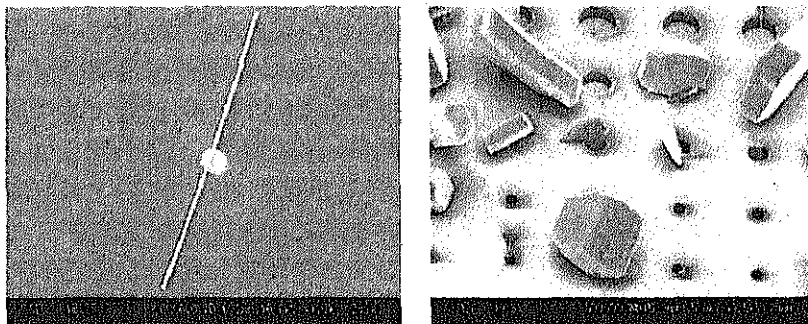


図 6 : $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ 微結晶の電子顕微鏡写真。下地の円形はポリイミド膜に開けられた穴電極である。

【 7 】 不純物半導体における金属・絶縁体転移（大塚）

伊藤公平氏（慶応大学）、Eugin Haller 氏（UC Barkley）らとの共同研究で行っていた $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$ 系の金属・絶縁体転移に関する総説をまとめて公表した。

【 8 】 極低温粒子検出器（大塚）

箕輪真氏（東京大）らとの共同研究として継続中である。

【 9 】 グラファイト上吸着ヘリウム 3 固相薄膜の核磁性（森下）

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 (^3He) 薄膜において、吸着第 1 層及び第 2 層は固化を生ずる。 ^3He は核スピン $1/2$ をもち、 ^3He 固相薄膜は 2 次元量子スピン系のモデル物質を与える。その一方、この系の磁性は、 ^3He 原子の直接位置交換に由来する交換相互作用によるが、原子交換は 2 体だけでなく、3 体、4 体、5 体、・・・と多数の原子が循環的に交換を生じ、 ^3He 薄膜固体は、これら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でもある。低次元性や多体交換相互作用の強い競合のために、この系は frustration の非常に強い系となっていることも特徴であり、基底状態としてスピン液体状態が期待されており、精力的な研究が続けられている。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。これが基底状態の解明を少なからず阻害しているのも事実である。本研究では、0.1 mK以下の超低温度までの比熱測定と理論的考察、特に吸着構造に主眼をおいて、この系の磁性の詳細と基底状態の解明を目指している。

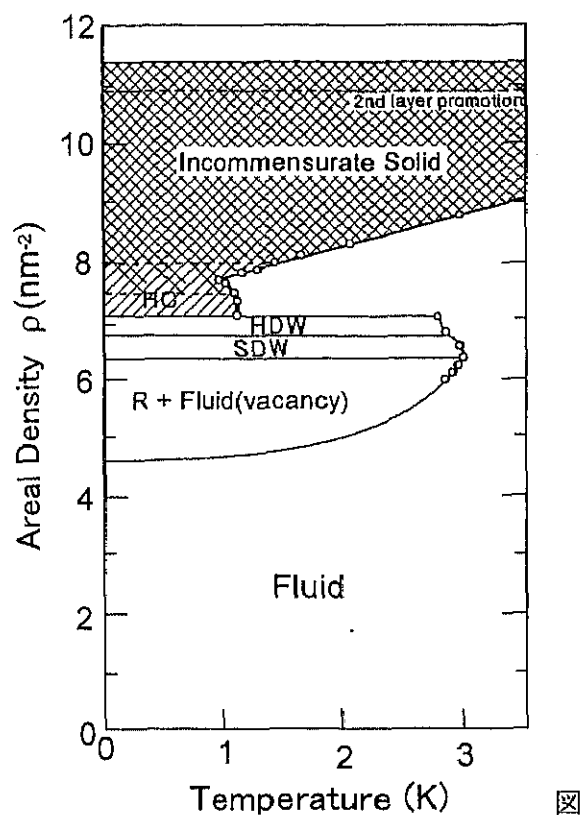
(1) 吸着構造

グラファイト上に吸着した ^3He 薄膜の吸着構造は、様々な実験上の困難のために、吸着第1層における $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造と高面密度領域で生じる不整合固相以外は、直接的な解明は為されていない。これまでいくつかの吸着構造相図が提案されてはいるが、いずれも実験事実を矛盾なく説明することはできなかった。我々は経路積分 Monte Carlo シミュレーションに基づいて吸着構造の解明を試みており、吸着第1層については図 9-1 に示すような構造相図を提案している。図中の○は、Seattle のグループによる融解温度の測定結果である。絶対零度における相境界が、融解温度における折れ曲がりや飛びと良く一致している。さらにこの相図は、多体交換相互作用の面密度依存性なども定性的に説明でき、かなり有望な仮説であると期待されている。

本年度は、融解温度が面密度により大きく変化していることに着目し、我々の提案する構造相図が、この融解温度の振る舞いを再現できるか調査することにより、この構造相図の妥当性の評価を試みた。

実験上、融解温度は比熱の鋭いピークとして観測される。一方、経路積分 Monte Carlo シミュレーションは様々な温度における ^3He 原子系のエネルギーを計算することができ、原理的に比熱を求めることが可能である。しかしながら、有意な比熱のピークを再現することはできなかった。これは、局所的な安定構造のエネルギーを計算しており、流体相のエネルギーを正確に評価できていないことが原因と考えられる。

そこで、もうひとつ、融解温度を評価する方法として、Binder パラメータを用いる手法を試みている。これは、原子配列の相関係数である Binder パラメータの経路積分 Monte Carlo シミュレーションを行う系のサイズ依存性が、融解温度の上下で異なることを利用して融解温度を求める手法である。吸着構造の基本格子が大きいなどの困難のために、計算に膨大な時間を要する問題点はある



9-1. グラファイト上吸着 ^3He 第1原子層の構造相図 (R: $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造、SDW: superheavy striped domain wall 構造、HDW: heavy honeycomb domain wall 構造、HC: honeycomb cage 構造)。○は Seattle グループによる融解温度の測定結果。融解温度の折れ曲がり・飛びと相境界がよく一致する。

が、一部結果が得られており、今後有用な知見が期待される。

なお、本研究は福井大学工学部高木丈夫氏との共同研究である。

(2) 多体交換相互作用の競合

吸着第1層の広い面密度領域と、吸着第2層の比較的低面密度の固相領域において、2桁以上の非常に広い温度範囲に渡り、温度にほぼ反比例する比熱が観測される。局在スピン系において、充分な高温で比熱は温度の自乗に反比例することが期待される。多体交換相互作用が磁性を支配する系においてもこの事情は変わらない。従って、観測される温度にほぼ反比例する比熱は異常なものである。異常の原因は明らかではないが、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られている。これは、多体交換相互作用の競合の強さを示すフラストレーションパラメータと比熱のべき α の正常値(-2)からのずれ($\alpha + 2$)が、吸着第2層において非常によく似た面密度依存性を示すことから支持されている。

吸着第1層においてはフラストレーションパラメータを求めることができないため、逆に($\alpha + 2$)が多体交換相互作用の競合の強さの指標となるが、比較的複雑な面密度依存性を示す。これらは、zero point vacancyの存在や吸着構造の整合-不整合転移などで定性的な説明がなされている。しかしながら従来、 $6.5 \sim 7.5 \text{ nm}^2$ の間の面密度領域では充分な低温までの測定は為されていない。この面密度領域は(1)で述べたような新奇な吸着構造が提案されている上、磁性も強磁性-反強磁性-強磁性と変化しており、多体交換相互作用の競合に関する情報が欠かせない。本年度、この面密度領域について比熱測定を行った。その結果、やはりほぼ温度に反比例する比熱が広い温度範囲で観測された。比熱のべきは図9-2に示すように大きな値を持ち、多体交換相互作用の競合が非常に強いことを示している。現状、残念ながら充分な精度・分解能がなく、吸着構造や磁性の面密度による変化の詳細を議論することはできない。しかし、この面密度領域では吸着基盤に整合な吸着構造が実現されており、吸着ポテンシャルのcorrugationのために少数スピンの関与する多体交換相互作用が抑制されて競合が非常に強くなっているはずであるとの予測は確認された。

(3) 熱緩和機構

グラファイト基盤上に吸着した ^3He 薄膜は0.1 mK以下の低温まで、基盤の温度に追従して冷却されていることが知られている。しかしながら、 ^3He 薄膜の冷却機構は必ずしも明らかにされていない。バルクな液体及び固体ヘリウムでは、他の物質との間の熱伝導はフォノンを媒介としたものが主である。ただし、密度の大きな違いや音響インピーダンスの不整合のために、界面にほぼ垂直なフォノンのみが熱伝導を担う媒体となり得る。このためにバルクなヘリウムと他の物質との間にはKapitza抵抗と呼ばれる大きな熱抵抗が介在する。これに対し、 ^3He 薄膜においては、界面に鉛直方向のフォノンは存在しないため、このようなフォノンは熱媒体とはなり得ないと考えられる。もう一つ、界面に平行方向の長波長フォノンによる結合という可能性もあり得る。しかし、少なくとも基盤に整合な吸着膜においては吸着ポテンシャルのcorrugationのために ^3He 薄膜のフォノンには

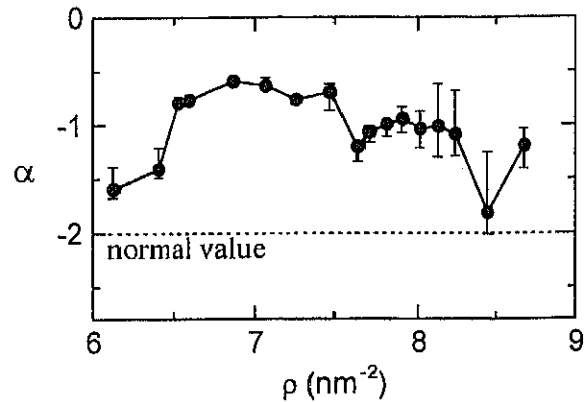


図9-2. グラファイト上吸着 ^3He 第1原子層の比熱のべき α の面密度依存性。 $6.5 \leq \rho \leq 7.5 \text{ nm}^{-2}$ で α が大きな値を持ち、多体交換相互作用の競合が強いことが新たに確認された。

10 K にも及ぶギャップが存在する。そのため、1 mK 以下の温度域ではこのようなフォノンが存在せず、フォノンによる熱伝導機構が働くとは考えられない。一方、バルクな ^3He においては、magnetic Kapitza と呼ばれる磁気的な機構による熱伝導機構が観測されている。 ^3He 薄膜においても、グラファイト中の磁性不純物と ^3He スピンとの磁気的な結合による熱伝導の可能性は充分にあり得るが、その存在は必ずしも自明ではない。グラファイト上吸着 ^3He 薄膜系の主要な研究目的の一つは、核スピン系の基底状態の解明である。そのためには、さらなる低温への冷却が必要であり、冷却機構についての情報は大変重要となる。緩和法により、0.1 mK から 1 mK という限られた温度領域ではあるが、熱伝導度についての測定を行っており、本年度は吸着第2層を中心に測定点を増やし、熱伝導機構について重要な知見を得ることができた。

図 9-3 に吸着第1層、および第2層の幾つかの面密度におけるグラファイト - ^3He 薄膜間の熱伝導度の温度依存性を示す。ここで、グラファイトの吸着表面積はおよそ 390 m^2 である。吸着第1層においては温度にあまり依存していないのに対し、吸着第2層では温度にほぼ比例する振る舞いが見て取れる。ただし、吸着第2層においても、高温域では温度に依存しなくなっている傾向が見て取れる。また、1層目と2層目の熱伝導度の絶対値を比較すると、2層目の方が大きくなっている。吸着第2層は、第1層を介して吸着基盤に接しており、1層目を介して熱緩和する2層目の方が逆に熱伝導度が大きいという、一見不思議な振る舞いを示している。

面密度による変化を明らかにするために、吸着第1層、第2層それぞれについて、幾つかの温度における熱伝導度を面密度の関数として図 9-4(a)、図 9-5(a)に示す。吸着第1層では、各温度において、 7.5 nm^2 を中心に緩やかなピークが見て取れる。比較のため物性研グループにより磁化測定から得られた有効的な交換相互作用の大きさを図 9-4(b)に示す。熱伝導度が交換相互作用の大きさを反映していることが推測される。吸着第2層においても、高温での熱伝導度は 8 nm^2 付近になだらかなピークをもっており、図 9-5(b)に示した交換相互作用の大きさを反映しているように見える。これらの結果は、 ^3He 固相薄膜内では磁気的な機構により熱が運ばれ、これが系全体の熱緩和を決めている可能性を示唆し、さらに、吸着基盤と ^3He 薄膜は局所的に熱結合していることを示している。これは、グラファイト中の 10~100 ppm 程度含まれる磁性不純物と ^3He スピンとの磁気的な結合という magnetic Kapitza の描像と一致する。

以上の測定においては、 ^3He 薄膜 - アデンダ - 熱浴の3つの系が、熱抵抗を介して直列に接続されているモデルを用いて熱伝導度を求めている。だが、 ^3He 薄膜内の熱伝導がボトルネックになっているとすると、このモデルは必ずしも正しくない。しかしながら、簡単な数値シミュレーションによると、観測された程度の比熱、熱伝導度を仮定する限り、モデルが異なることによる誤差は最大 10 % 程度であり、今回の測定の精度では問題とならない。

^3He 薄膜内の熱伝導をになう磁気的な機構の可能性の一つとして、 ^3He 原子の位置交換によるスピ

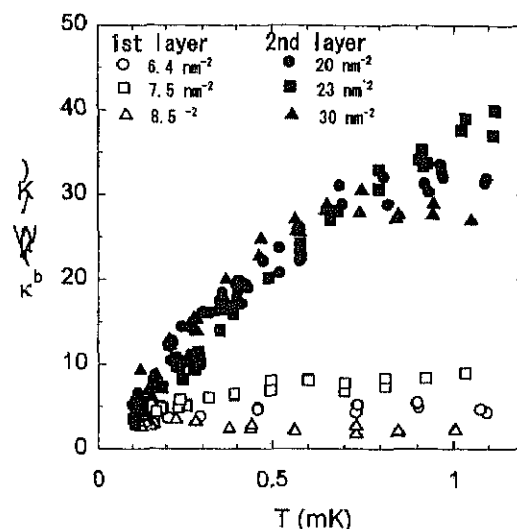


図 9-3. グラファイト基盤 - ^3He 薄膜間の熱伝導度。白抜きのシンボルは吸着第1層、黒く塗りつぶしたシンボルは第2層での結果。第1層と第2層とで温度依存性が異なる上、第2層の方が基盤との熱伝導が大きいという、一見奇妙な振舞いを示す。

ン拡散が考えられる。しかし、このような機構による熱伝導度は温度の3乗に反比例する温度依存性が期待され、温度にはあまり依存しないという観測結果と一致しない。もう一つの可能性としてスピン波による熱伝導機構が考えられる。バルクな固体 ^3He 中においてもフォノンがほとんど存在しない低温においては magnon が唯一の熱媒体となっており、同じような機構による熱伝導の可能性は期待される。しかしながら、今回の測定では、温度が充分低くなくスピン秩序は成長しておらず、秩序したとしても短距離秩序であり、magnon は良いモードとは言えない。 ^3He 固相薄膜内での温度にあまり依存しない磁気的な熱伝導機構については今後の課題である。

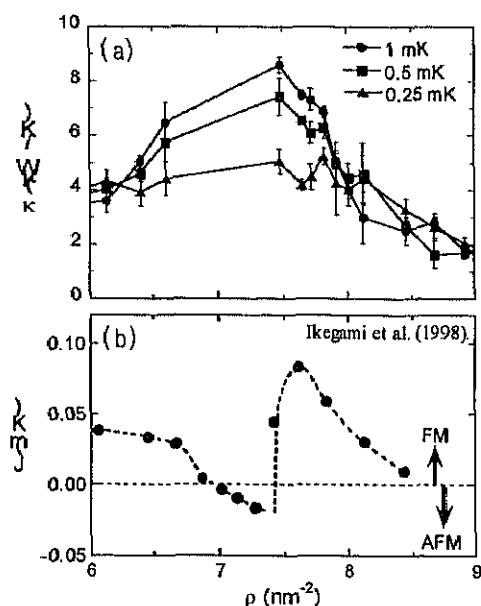


図 9-4. (a) 吸着第1層における熱伝導度の等温曲線。(b) 吸着第1層における有効的な交換相互作用の大きさ。熱伝導度は、交換相互作用の大きさを反映していると考えられる。

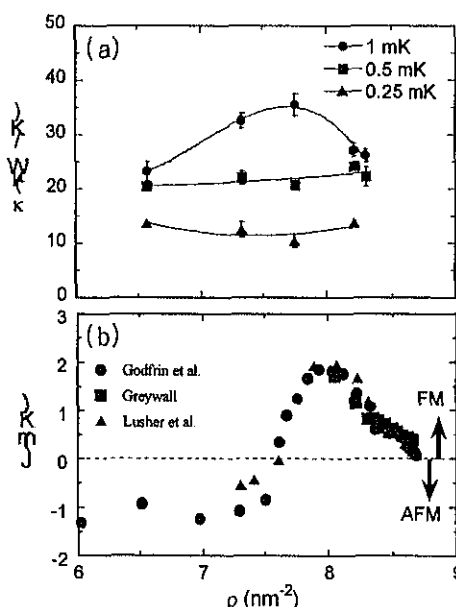


図 9-5. (a) 吸着第2層における熱伝導度の等温曲線。(b) 吸着第2層における有効的な交換相互作用の大きさ。横軸の面密度は吸着第2層のみの値。

【 1 0 】 熱音響現象 (富永)

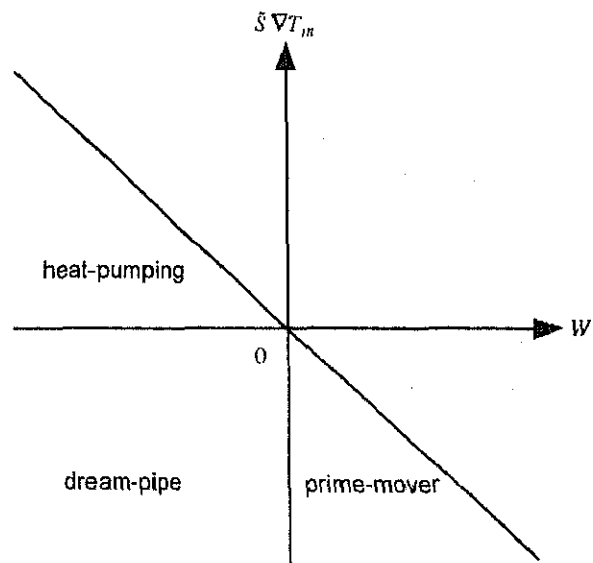
示量性状態量と移動量と生成量とを一組の関係概念と認識すると、熱力学の基本法則は生成量に関わる法則である。熱力学第一法則は局所的エネルギー生成の値が0であることを主張する経験則であり、熱力学第二法則は局所的エントロピー生成が負にならないことを主張する経験則であり、エントロピー生成最小の法則はエントロピー生成最小の状態が安定であることを主張する経験則である。熱力学史を繙きながら以上の視点を解説したのが著書『誕生と変遷にまなぶ熱力学の基礎』である。論文「熱力学に潜在している基本概念」はこの視点のまとめであり、周期性のない非定常状態に対して形式的に温度概念を持ち込むことに疑義があることも示した。いずれも今後の熱力学の重要な出発点となるだろう。

自然認識に階層構造を認めるなら、示量性状態量と移動量と生成量とは上位の階層であり、流体物理学は下位の階層である。熱音響理論は熱音響現象を理解するために上位の階層と下位の階層とを直感的に結びつける一つの提案である。熱音響現象は周期的定常状態なので熱音響理論を使うと

局所的エントロピー生成が表現できる。
21 世紀の熱音響理論を整理することから始めて局所的エントロピー生成の熱音響理論による表現を与えた。

熱音響現象の局所的エントロピー生成の表現が決まったので、熱音響現象に熱力学第二法則とエントロピー生成最小の法則を適用して議論することが原理的に可能となった。熱音響現象に熱力学第二法則を使うと、熱音響現象が図のように分類できる。更に、熱音響現象で可能な温度勾配の範囲や圧力と流速の位相差の範囲が決まる。温度勾配は流体力学的議論では境界条件の一つであり任意に選ぶことが出来たが、熱力学的議論では任意ではない。このことは上位の階層が下位の階層に制限を与えている一つの例である。

エントロピー生成最小の法則を具体的に使うことは難しいが、電動モーターの回転数はエントロピー生成最小の法則を使うことで理解できる。電動モーターを定電圧電源で駆動する際の定常的回転数はエントロピー生成が最小になるように決まる。



<学位論文>

- ・ 迫 坪 行 広 : Tunneling spectroscopy of gold nanoclusters grown on self-assembled monolayers (自己組織化単分子膜上金クラスターのトンネル分光) (数理物質研究科物理学専攻、修士論文、2004.3)
- ・ 和田 充 洋 : 金コロイド粒子を用いた単一電子トランジスタ (数理物質研究科物理学専攻、修士論文、2004.3)
- ・ 富田 幸 典 : 窒化シリコンメンブレン法による単一ナノチューブデバイスの作製とその伝導測定 (理工学研究科、修士論文、2004.3)
- ・ 上原 康 孝 : (TMTSF)₂ClO₄ 微結晶の電気伝導測定 (理工学研究科、修士論文、2004.3)
- ・ 大貫 厚 : メカニカルブレークジャンクション法による金属ナノコンタクトの伝導測定 (理工学研究科、修士論文、2004.3)
- ・ 林 正 博 : 単極誘導と単極モーターに関わる実験的研究 (筑波大学教育研究科、修士論文、2003年3月)

<論文>

- 1) Y. Ootuka, T. Kurosawa, A. Kanda, Y. Pashkin, J.-S. Tsai, "Tunnel spectroscopy of small Al particle", Physica E 18, 19-20 (2003).
- 2) T. Ohgi, "Single electron charging effect of supported Au nanoclusters studied by Photoelectron and Tunneling Spectroscopy", まてりあ 43, 101 (2004).

- 3) T. Ohgi, Y. Sakotsubo, D. Fujita and Y. Ootuka, "Electrochemical potential arrangement of nanoclusters weakly coupled with metal surface", *Appl. Phys. Lett.* 84, 604 (2004).
- 4) Y. Sakotsubo, T. Ohgi, D. Fujita and Y. Ootuka, "Growth and Characterization of Isolated Nanoclusters", submitted to *Applied Surface Science*.
- 5) T. Ohgi and D. Fujita, "Octanedithiol layer as tunneling barrier", *Physica E* 18, 249 (2003)
- 6) T. Ohgi and D. Fujita, "Single electron charging effects in gold nanoclusters on Alkanedithiol Layer with different molecular length", *Surface Science* 532-535C pp. 294-299 (2003)
- 7) 神田晶申、塚越一仁、「多層カーボンナノチューブの特異な電気伝導」、*パリティ* Vol. 18, No. 8, 36 - 40 (2003).
- 8) Akinobu Kanda, Kazuhito Tsukagoshi, Yoshinobu Aoyagi and Youiti Ootuka, "Gate-voltage Dependence of Zero-bias Anomalies in Multiwall Carbon Nanotubes", *Phys. Rev. Lett.* 92 036801 (2004).
- 9) T. Yamaguchi, H. Miyazaki, A. Kanda, Y. Ootuka, Dimensional crossover from 2D to 1D in small-Josephson-junction arrays, *Physica B* 329-333, 1407 - 1408 (2003).
- 10) H. Miyazaki, T. Yamaguchi, A. Kanda, Y. Ootuka, "Quantum Fluctuations and Dissipative Phase Transition in One-Dimensional Josephson Junction Arrays", *Physica E* 18, 41 - 42 (2003).
- 11) T. Yamaguchi, H. Miyazaki, A. Kanda, Y. Ootuka, "Experimental Studies on Cooper Pair Transport in Josephson Junction Arrays", *J. Phys. Soc. Jpn*, 72 Suppl. A, 96 - 99 (2003).
- 12) Hisao Miyazaki, Yamaguchi Takahide, Akinobu Kanda, Youiti Ootuka, "Analysis of zero-bias resistance of overdamped mesoscopic Josephson junction chains", *Physica C* 404 (2004) 256-259.
- 13) A. Kanda, Y. Ootuka, Paramagnetic supercurrent in a mesoscopic superconducting disk, *Physica B* 329 - 333, 1421-1422 (2003).
- 14) A. Kanda and Y. Ootuka, "Paramagnetic supercurrent and transition points between different vortex states in mesoscopic superconducting disks", *Physica C* 404 (2004) 205-208.
- 15) R. Matsuda, A. Kanda, Y. Ootuka, "Enhancement of tunnel magnetoresistance in ferromagnetic single-electron transistors", *Physica B* 329-333, 1304 - 1305 (2003).
- 16) H. Shimada, K. Ono and Y. Ootuka, "Driving the single-electron device with a magnetic field", *Journal of Applied Physics* 93 (2003) 8259.
- 17) K. Miuchi, M. Minowa, A. Takeda, H. Sekiya, Y. Shimizu, Y. Inoue, W. Ootani, Y. Ootuka, "First results from dark matter search experiment with LiF bolometer at Kamioka Underground Laboratory", *Astropart. Phys.* 19 (2003) 135-144
- 18) Takeda A, Minowa M, Miuchi K, et al., Limits on the WIMP-nucleon coupling coefficients from dark matter search experiment with NaF bolometer, *PHYS LETT B* 572 (3-4): 145-151 OCT 23 2003.
- 19) Kohei M. Itoh, Michio Watanabe, Youiti Ootuka, and Eugene E. Haller, "Comparison of the Effects of the Doping-Compensation and Magnetic-Field on the Metal-Insulator Transition of Ge:Ga", *JPSJ Suppl. A* 72 (2003) 181-182.
- 20) K. M. Itoh, M. Watanabe, Y. Ootuka, E. E. Haller and T. Ohtsuki, "Complete Scaling Analysis of the Metal-Insulator Transition in Ge:Ga: Effects of Doping-Compensation and Magnetic Field", *J. Phys. Soc. Jpn.* 73 (2004) 173-183.
- 21) J. R. ヒース、M. A. ラトナー (神田晶申 訳) 「分子エレクトロニクス」、*パリティ* Vol. 19,

- No. 1, 4 - 13 (2004).
- 22) D. Fujita, T. Ohgi, T. Kumakura, K. Onishi, M. Harada, "Discovery of Carbon Nanowires Formed on a Carbon-Doped Ni(111) Substrate by Bulk-to-Surface Precipitation Process", *Japanese Journal of Applied Physics*, **42**, 1391 (2003).
 - 23) Xiao ZW, Xu MX, Ohgi T, Ishikawa N, Fujita D. "Controlled deposition of single DNA molecules on bare gold electrodes", *PHYSICA E* **21**, 1098 (2004)
 - 24) ZW. Xiao, MX. Xu, T. Ohgi, K. Onishi, D. Fujita, "Removal of Si(111) wafer surface etch pits generated in ammonia-peroxide clean step", *APPL. SURF. SCI.*, **221** (1-4): 160-166 (2004).
 - 25) D. Fujita, K. Sagisaka, M. Kitahara and T. Ohgi, "Nanostructure Characterization Using Low Temperature Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy", *Physics of Low-Dimensional Structures. Vol. 3/4*, 167-174 (2003)
 - 26) Zhanwen Xiao, Mingxiang Xu, Taizo Ohgi and Daisuke Fujita, "Influence of Silicon Surface Structure on Long Deoxyribonucleic Acid Molecule Alignment", *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** 4748-4751 (2003)
 - 27) P. J. Godowski, T. Ohgi and D. Fujita, "Surface Segregation of CoPt Polycrystalline Alloy", *ACTA PHYS POL A* **104** (1): 35-44 JUL (2003)
 - 28) Masashi Morishita, Takeo Takagi, Striped-honeycomb transition of domain wall structure of 3He submonolayer solid film on graphite, *Physica B* (329-333 • 137-139), 2003 年
 - 29) 富永 昭、熱力学に潜在している基本概念 (Implicit concepts of Thermodynamics), *低温工学* 38 巻 7 号, 363-370 (2003)
 - 30) 富永 昭: Local Entropy Production Rate of Thermoacoustic Phenomena, *低温工学* 39 巻 2 号 54-59 (2004)
 - 31) 本弓康之、林正博、富永 昭、はねかえり係数についての再検討、*物理教育* 51 巻 3 号、174-177 (2003 年 9 月)
 - 32) 本弓康之、林正博、富永 昭、Kundt の実験の物理現象、*物理教育* 51 巻 4 号、245-249 (2003 年 12 月)
 - 33) 本弓康之、林 正博、大谷徳樹、富永 昭: 事実を見せる物理教育を、*大学の物理教育* 10 巻 1 号 (2004 年 3 月) 51-54
 - 34) 富永 昭: 科学文化専攻 (仮称) を創設しよう、*筑波フォーラム* 66 号 111-114 (2004 年 3 月)

<著書>

- 1) 富永 昭『誕生と変遷にまなぶ熱力学の基礎』(内田老鶴圃、2003 年 11 月)
- 2) 神田晶申、「ナノチューブの輸送特性の実験」、「カーボンナノチューブの基礎と応用」(斎藤理一郎、篠原久典編) 第 14 章 p191-204 (培風館 2004. 3)

<講演>

国際会議

- 1) T. Ohgi, Y. Sakotsubo, D. Fujita and Y. Ootuka, "Chemical potential distribution of supported nanoclusters", 22nd European Conference on Surface Science, Praha, Czech, Sep. 7-12, 2003
- 2) A. Kanda, and Y. Ootuka, "Vortex states and paramagnetic supercurrent in mesoscopic

- superconductors", Third European Conference on "Vortex Matter in Superconductors", 2003 年 9 月 23 日、クレタ島 (ギリシャ共和国)
- 3) H. Miyazaki, Y. Takahide, A. Kanda, Y. Ootuka, "Dissipation-driven phase transition in mesoscopic Josephson-junction chains", Third European Conference on "Vortex Matter in Superconductors", 2003 年 9 月 25 日、クレタ島 (ギリシャ)
 - 4) T. Ohgi, Y. Sakotsubo, D. Fujita and Y. Ootuka, "Electrochemical potential arrangement of Au nanoclusters with respect to Fermi energy of weakly supporting substrate", Active Nano, Tsukuba, Japan, Nov. 12, 2003
 - 5) Y. Sakotsubo, T. Ohgi, D. Fujita, Y. Ootuka, "Formation of isolated nanoclusters on self-assembled monolayers", 1st International Symposium on Active Nano-Characterization and Technology, 2003 年 11 月 12 日~14 日 (物質材料研究機構)
 - 6) A. Kanda, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi and Y. Ootuka, "Multiwall carbon nanotubes: Luttinger liquid or not?", Joint Meeting of the 2nd International Symposium on "Future-oriented Interdisciplinary Material Science" and the 1st International Tsukuba-Symposium on "Nanoscience" (FIMS/ITNs 2003), 2003 年 11 月 17 日、つくば市
 - 7) M. Wada, A. Kanda and Y. Ootuka, "Fabrication of single electron transistors with Au nanoparticles", Joint Meeting of the 2nd International Symposium on "Future-oriented Interdisciplinary Material Science" and the 1st International Tsukuba-Symposium on "Nanoscience" (FIMS/ITNs 2003), 2003 年 11 月 17 日、つくば市
 - 8) Y. Ootuka, M. Kitada and A. Kanda, "Mechano-Coulomb oscillations in a single-electron transistor", Joint Meeting of the 2nd International Symposium on "Future-oriented Interdisciplinary Material Science" and the 1st International Tsukuba-Symposium on "Nanoscience" (FIMS/ITNs 2003), 2003 年 11 月 17 日、つくば市
 - 9) Y. Sakotsubo, T. Ohgi, D. Fujita, Y. Ootuka, "Chemical potentials of supported nanoclusters", Joint Meeting of the 2nd International Symposium on "Future-oriented Interdisciplinary Materials Science" and the 1st International Tsukuba-Symposium on "NanoScience", 2003 年 11 月 17 日、18 日 (つくば国際会議場)
 - 10) R. Matsuda, A. Kanda and Y. Ootuka, Enhanced Magnetoresistance in Ferromagnetic Single-Electron Transistor International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics 2003 名古屋大学、2003 年 11 月 25 - 27 日
 - 11) A. Kanda, B. J. Baelus, F. M. Peeters, K. Kadowaki, Y. Ootuka, "Vortex states in mesoscopic superconducting disks", International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2004 (MS+S2004), 2004 年 3 月 1-4 日、厚木
 - 12) T. Ohgi, Y. Sakotsubo, D. Fujita, Y. Ootuka, "Electrochemical potential arrangement of nanoclusters weakly coupled with bulk metal", 9th International Symposium on Advanced Physical Field (APF-9), March 1-4, 2004.
 - 13) Y. Sakotsubo, T. Ohgi, D. Fujita, Y. Ootuka, "Growth and Characterization of Isolated Nanoclusters on Mixed Self-Assembled Monolayers", The 9th International Symposium on Advanced Physical Fields (APF-9), 2004 年 3 月 1 日~4 日 (物質材料研究機構)
 - 14) A. Kanda, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi and Y. Ootuka, "Gate-voltage Dependence of Zero-bias Anomalies in Multiwall Carbon Nanotubes", APS March Meeting 2004, 2004 年 3 月 24 日、モントリオール (カナダ)

国内会議

- 1) 神田晶申、富田幸典、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」、ナノ学会設立総会、神戸市、2003年5月30日
- 2) 宮崎久生、山口尚秀、神田晶申、大塚洋一、「微小ジョセフソン接合列における超伝導・絶縁体転移」、ナノ学会設立総会、神戸市、2003年5月30日
- 3) 大塚洋一、北田実、神田晶申、「単電子トランジスタにおける圧力誘起クーロン振動」、ナノ学会設立総会、神戸市、2003年5月30日
- 4) 大木泰造、迫坪行広、藤田大介、大塚洋一、「トンネル分光による金ナノクラスターの化学ポテンシャルサイズ依存性評価」、ナノ学会設立総会、神戸市、2003年5月30日
- 5) 大塚洋一、量子制御コア、学際物質科学研究センタースタートアップシンポジウム、筑波大、2003/6/17
- 6) 大木泰造、迫坪行広、藤田大介、大塚洋一、「金ナノクラスターの化学ポテンシャルのサイズ依存性と環境の影響」、応用物理学会、福岡大学、2003年8月
- 7) 迫坪行広、大木泰造、藤田大介、大塚洋一、「金ナノクラスターの化学ポテンシャル：サイズ依存性と環境の影響」、日本物理学会 2003年秋季大会、2003年9月22日、岡山大学
- 8) 上原康孝、市村晃一、野村一成、神田晶申、大塚洋一、「 $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ 微結晶の電気伝導測定」、日本物理学会 2003年秋季大会、2003年9月23日、岡山大学
- 9) 大塚洋一、北田実、神田晶申、「単電子トランジスタにおける圧力誘起クーロン振動」、日本物理学会 2003年秋季大会、2003年9月21日、岡山大学
- 10) 森下将史、「グラファイト上 ^3He 固相薄膜の熱緩和 II」、日本物理学会、岡山大学、2003年9月22日
- 11) 大塚洋一、mK 領域の物性実験研究、東陽テクニカ 希釈冷凍機・極低温測定セミナー、東京 2003/10/8
- 12) 富永 昭、「熱音響現象の局所的エントロピー生成」、2003年度秋期低温工学・超伝導学会 (2003年12月3-5日、松江)
- 13) 神田晶申、「多層カーボンナノチューブの電気伝導」、東北大学情報・数物研究会、2003年12月19日、仙台
- 14) 富永 昭、「熱音響現象の局所的エントロピー生成」、熱音響自励振動研究会 (2003年12月20日、横浜)
- 15) 富永 昭、「熱音響現象の熱力学的分類と熱音響熱機関の必要条件」、熱音響自励振動研究会 (熱海、2003年3月)
- 16) 大塚洋一、「協奏的ナノ機能サイエンス」、ナノ特プロ成果発表会、筑波大、2004.3.15
- 17) 大塚洋一、大木泰造、迫坪行広、藤田大介、「金ナノクラスターの電気的中性度のサイズ依存性」、日本物理学会第59回年次大会 (2004.3.27、九州大学)
- 18) 和田充洋、神田晶申、大塚洋一、「新しいナノスケール電極ギャップ作製法を用いた金微粒子単一電子トランジスタの電気伝導測定」、日本物理学会第59回年次大会 (2004.3.27、九州大学)
- 19) 山口尚秀、大塚洋一、Pertti Hakonen、「低インピーダンス環境を持つ微小ジョセフソン接合の電流電圧特性」、日本物理学会第59回年次大会 (2004.3.27、九州大学)
- 20) 畑中歩、柳原英人、掛谷一弘、神田晶申、喜多英治、「エピタキシャル CrO_2 細線を用いた $\text{CrO}_2/\text{CrOx}/\text{CrO}_2$ 接合の作製」、日本物理学会第59回年次大会、2004年3月27日、福岡
- 21) 迫坪行広、大木泰造、藤田大介、大塚洋一、「SAM 上における金ナノクラスターの密度・粒径制御とトンネル分光測定」、日本物理学会第59回年次大会 (2004.3.30、九州大学)
- 22) 神田晶申、「メゾスコピック超伝導体におけるマルチボルテックス状態ー巨大ボルテックス状態

- 間転移の観測」,第1回「超伝導ナノサイエンスと応用」研究会 (別府、2004年3月31日)
- 23) 宮崎久生、「1次元微小ジョセフソン接合列のSI転移」、第1回「超伝導ナノサイエンスと応用」研究会 (別府、2004年3月31日)

<受賞>

- 1) A. Kanda, Honoree Prize in the Poster Competition, "Vortex states and paramagnetic supercurrent in mesoscopic superconductors", The organizing committee of the conference on "Vortex Matter in Superconductors III" (Sep. 26, 2003)