

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 (科学技術振興事業団)
大学院生 4 名
特別研究学生 2 名 (東京大学大学院理学系研究科)

低温物性実験グループにおいては、メソスコピックな微小導体が示す量子伝導現象、熱音響現象、吸着ヘリウム 3 薄膜の核磁性などの研究を進めている。

微小導体の研究に関しては、大塚及び神田が中心となり、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と共同し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、研究代表者:大塚洋一)を平成 8 年度から進めている。さらに、2000 年 9 月から 2001 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。今年度は微小ジョセフソン接合列における散逸誘起超伝導絶縁体転移や微小超伝導リングの超伝導揺らぎの研究で大きな進展を見たほか、特に 10nm の極微単電子トランジスタや単一カーボンナノチューブの伝導などこれまで以上に小さなナノスケール導体の研究への新しい展開を、NEC 基礎研や理化学研究所の研究者の協力を得て、行った。

熱音響現象は富永が長年研究を行ってきたテーマであり、非平衡熱力学の観点から興味深い現象であるのみならず、応用の観点からもきわめて重要である。富永は低温工学会を主な舞台として、日本における波動冷凍の分野の研究をリードしてきた。近年パルスチューブ冷凍機をはじめとした小型ヘリウム冷凍機技術が特に我が国において著しく進歩を遂げており、超伝導技術の普及に大きな役割を果たしているが、これはこれまでの研究の結実である。この功績によって低温工学協会功績賞を受賞した。

【 1 】 微小トンネル接合系の伝導 (大塚、神田、山口)

微小トンネル接合系で顕著になる単電子トンネル現象に関連する様々な現象の研究を行っている。

(1) 微小ジョセフソン接合系における散逸誘起超伝導絶縁体転移 (山口、宮崎)

超伝導トンネル接合 (ジョセフソン接合) には超伝導電流が流れることはよく知られた事実である。しかし接合の寸法が十分小さくなると、クーパ対のトンネルによる静電エネルギーの変化が大きくなるためトンネルが阻害され、 $T=0K$ において接合はむしろ絶縁的となる。ところが、絶縁体的なケースであっても、接合に低抵抗の並列抵抗 R_S を付加すると超伝導性が復活すると考えられている。絶縁体相は超伝導位相 ϕ が量子的に激しく揺らいでいる状態と見なすことができるが、散逸の導入によって巨視的変数である ϕ の量子ゆらぎが抑制されその運動が古典化するためである。このような超伝導・絶縁体転移は量子相転移や量子系における散逸といった視点で興味を持たれ主に理論的な研究がなされてきた。これまでこの超伝導・絶縁体転移についての実験を行ってきたが、

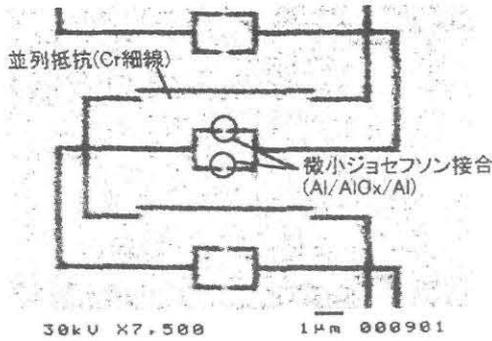


図1：試料のSEM写真

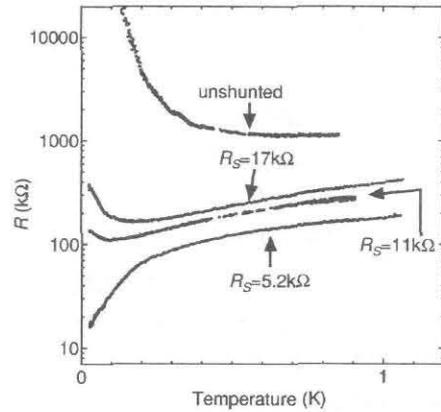


図2：ゼロバイアス抵抗の温度依存性($E_J/E_C=1.1$)

今年度は前年度に行った2次元微小ジョセフソン接合配列における実験結果をまとめ論文として発表すると共に、1次元接合列についての研究を行った。

1次元配列試料として、電子線リソグラフィと斜め蒸着法を用いて、常伝導の並列抵抗としてCrの細線を付加した写真1のような微小ジョセフソン接合(Al/Al₂O₃/Al)列を作成した。同一基板上にCr細線の長さのみが異なる複数の接合列と並列抵抗を付加しない接合列を作成し、単電子帯電エネルギー E_C やジョセフソン結合エネルギー E_J が等しく、 R_S が異なる接合列の特性を比較することができた。

図2に $E_J/E_C=1.1$ の接合列におけるゼロバイアス抵抗の温度依存性を示す。並列抵抗を付加しない接合列や $R_S=17, 11k\Omega$ の接合列は最低温で温度の低下にともない抵抗が増加している(絶縁体的)のに対し、 $R_S=4.1k\Omega$ の接合列は温度の低下にともない抵抗は減少している(超伝導的)。また、電流-電圧特性にも同様に絶縁体的特性から超伝導的特性への転移がみられた。このような、散逸による超伝導・絶縁体転移の臨界点は、 $E_J/E_C \ll 1$ においては $R_S=R_Q=6.5k\Omega$ (量子抵抗)付近であった。この臨界値は、2次元微小ジョセフソン接合列において前年確認した臨界値 $R_S \approx 2R_Q$ と比べてほぼ1/2であり、理論的な予想とも一致する。

(2) メゾスコピック超伝導体の磁気応答 (神田)

サイズが1ミクロン以下のいわゆるメゾスコピックな超伝導体では、試料サイズが超伝導コヒーレンス長や磁場侵入深さと同程度あるいはそれ以下であるために、バルクな超伝導体では見られない特異な超伝導状態があらわれると期待される。我々は、微小トンネル接合を用いた超伝導エネルギーギャップの局所的測定という独特の方法を用いて、メゾスコピック超伝導体の磁場応答を実験的に研究してきた。前年度の研究では、微小超伝導リングにおいて磁場による超伝導転移温度の振動(リトル・パークス振動)の振幅が理論値よりも小さくなることを見出した。この実験結果に関して、これまでに、1) 印加磁束に依存する超伝導揺らぎ、2) 断面積の不均一性に起因する単連結

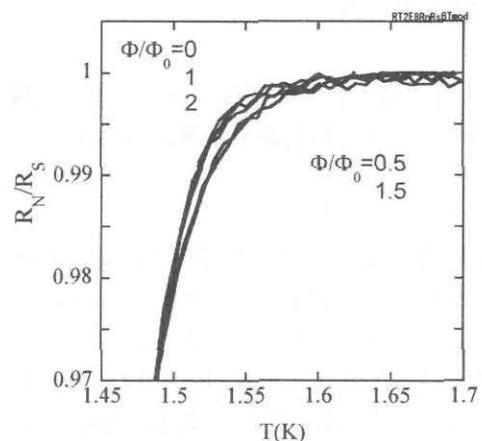


図3：様々な印加磁束における常伝導抵抗と超伝導抵抗の比の温度依存性。(ただし、低温におけるリトル・パークス振動分だけ温度軸を補正している。)

超伝導状態の出現、の2つの原因が提案されている。今年度は、1)の印加磁束に依存する超伝導ゆらぎを実験的に明確に観測することを目指して、提案者の林正彦講師(東北大学大学院情報科学研究科)と協力しつつ実験を行った。

実験では、アルミニウムの微小リング(直径300 nm、線幅80 nm、厚さ15 nm)に2本の幅100nmの銅のリード線(ソース・ドレイン)が接合面積 $0.01(\mu\text{m})^2$ の微小トンネル接合を介してつながった構造を電子線リソグラフィと真空斜め蒸着によって作製し、希釈冷凍機を用いて、超伝導転移温度(1 K)付近の抵抗の磁場依存性、温度依存性を詳細に測定した。その結果、図3に示すように、リング内の磁束が磁束量子の半奇数倍の時の抵抗値が整数倍のときに比べて、温度上昇とともに緩やかに常伝導値に近づく事がわかった。これは、1)の理論予測と定性的に一致する。現在、定量性を調べるために数値シミュレーションを行っている。

(3) 強磁性微小トンネル接合(松田、大藤、大塚)

強磁性トンネル接合でみられるトンネル磁気抵抗効果(TMR)がクーロンブロッケイド領域において著しく増大することを以前 Ni/Co/Ni-SET で見いだした。この現象はその後 Co-AlO_x グラニューラ膜などでも確認されることが報告されている。この増大は単電子トンネルの標準理論では説明できず、高次のトンネル過程に原因を求める理論が提出されているが量的な問題を含めて完全な理解が得られた状態とは言い難い。このTMR増大の機構を探るため、Ni/Co/Ni-SETについてTMRの増大とトンネル抵抗値の相関を調べる実験を行っている。これまでのところ、TMRの増大はR_Q程度の抵抗試料でもっとも大きく、高抵抗試料での増大は著しくないとの結果が得られている。

強磁性金属と常磁性金属とのトンネル接合におけるトンネル電子は一般にスピン偏極しており、このスピン偏極電流が引き起こす様々な現象が理論的に予言されている。特に、強磁性/超伝導/強磁性二重トンネル接合に電流を流すと、両端の強磁性金属の磁化の相対的配向によっては超伝導体中にスピン蓄積が生じ、超伝導の破壊が生じることが期待される。このスピン蓄積効果を探るために、Co/Al/Niの二重接合を作成しその磁気抵抗を調べた。

磁場の掃引によってヒステリシスを持った磁気抵抗効果が観測された。これはCoとNiの保磁力の差に原因する現象であり、特に両電極の磁化が反平行配置から平行配置に遷移する磁場で抵抗にジャンプがみられた。解析の結果、この変化はCo及びNiの磁化がAl電極に及ぼすfringe fieldが磁化配置によって変わり、これによってAlの超伝導ギャップに変化が生じるというモデルではほぼ説明できることが分かった。スピン蓄積の有無を調べるために、磁化配置が異なり、しかも実効外場の等しい二つの状態に対し抵抗のバイアス電流依存性を測定し比較した。両配置でわずかな差がみられたが、その変化は予想される変化とは逆であり、スピン蓄積による超伝導の抑制を確認するには至っていない。

(4) 金属量子ドットのトンネル分光(黒沢、神田、大塚)

微小導体中に閉じこめられた電子の準位の離散化は長い歴史のある研究課題であり、久保効果、エネルギー準位統計、超伝導・強磁性などの巨視的秩序やその量子揺らぎとの関連など興味深い物理を含む。しかし、実験において離散準位を個別に観測できるようになったのは比較的最近のことである。なかでも、半導体と比較して電子密度の高い金属において離散準位を観測するには10nm以下の微粒子を用いる必要があるため困難である。

共同研究を行っている NEC 基礎研究所の蔡グループの協力を得て、標準的な微細加工法である電子線リソグラフィと斜め蒸着法を用いて10nm級の島電極をもつアルミニウムのSETの作製に成功した。(図3) T=30mKの極低温領域における電流-電圧特性の測定結果を以下に示す。図4はクーロンブロッケイドの閾値電圧付近の拡大図である。約0.1mVの周期的なピークが見られ

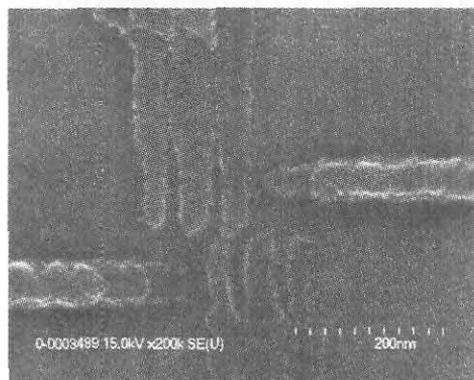


図3：10nm級Al-SET
(電子顕微鏡写真)

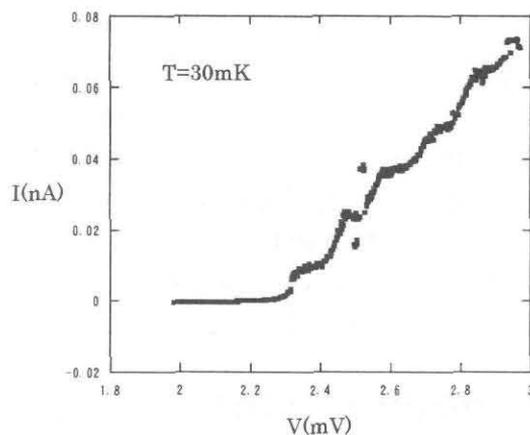


図4：10nm級Al-SETの電流-電圧特性

る。この周期は自由電子モデルから見積もられるエネルギー準位の平均間隔とほぼ一致し、離散一電子準位を反映した構造であると考えられる。また、電流-電圧特性の磁場、温度に対する応答においても特徴的な変化が測定され、これらも島電極の一電子準位を考えた簡単な議論で説明できることがわかった。微小試料作製プロセスに関してのルーチン化は定着しつつあるので今後は他の金属微粒子の分光をめざしている。

(5) 単一電子トランジスタ (SET) の高速動作 (山口)

SETは高い電荷感度を有するが高インピーダンス素子であるため高速動作には工夫が必要である。微小ジョセフソン接合における Bloch 振動など、微小接合系における時間依存現象の測定を目的とし、高周波ラインを組み込んだ希釈冷凍機の整備を行った。ヘリウム循環系等各ラインの配管から、混合器、試料ホルダー部の設計、高周波ラインの組み込みを行った。また帯電効果を観測するためのノイズ対策として、DC 測定ラインに同軸のローパスフィルターを取り付けた。従来、このフィルターとしては Thermocoax 社製の高抵抗の同軸ケーブルが用いられることが多いが、絶縁体が吸湿性に富み、芯線と外側導体との絶縁が破れやすいという欠点がある。われわれは、30% キュプロニッケルのパイプ (内径 0.3mm 外径 0.5mm) にマンガン線 (外径 0.05mm) を通したものを作り、これを同軸ケーブルの代わりにした。これは絶縁性が良く、また周波数特性を調べたところ、2GHz で -40dB 程度の減衰が得られた。

(6) 2次元微小ジョセフソン接合配列のキャパシタンス測定 (大塚、山口)

微小ジョセフソン接合系における量子相転移は E_C/E_J 比、散逸以外のパラメータによっても起こることが期待されている。例えばゲート電圧は実効的な帯電エネルギーをコントロールすることに等しく、電圧の引加によって超伝導・絶縁体転移を引き起こすことが理論的に予言され、さらには supersolid という興味深い相の存在も予想されている。しかしこのゲート電圧による転移は、いくつか実験が試みられたもののまだその観測の報告はない。従来の実験では配列の電気伝導の測定のみであるが、ゲート電極と配列間の非線形静電容量にもその影響があると考え、予備的な実験を行った。

静電容量 C_g の測定は、キャパシタンスブリッジを用いた交流三端子測定法によった。除去しきれない浮遊容量の存在や雑音レベルのためにこれまでのところ期待する結果を得るには至っていない。

(7) 微小トンネル接合二次元配列における電荷ソリトン輸送 (浅古、神田、大塚)

高抵抗の二次元微小トンネル接合系では、有限温度において導体から絶縁体に転移することが理論的に予想されている (電荷 Kosteritz-Thouless 転移)。この現象を、実験的に詳しく調べることを試みている。これまでこのような二次元配列試料の作製には、二層レジスト構造による電子線リソグラフィと斜め蒸着法、リフトオフを組み合わせた方法が一般的に用いられているが、この方法には、製作パターンに制約があり、配列の周期の微小化には限界があった。我々は、従来の方法を補うものとして、窒化シリコンのメンブレンをステンシルマスクとして金属を多層蒸着する方法を開発しつつある。

【 2 】カーボンナノチューブの電気伝導 (神田)

カーボンナノチューブは、nm 級の直径を持つ一次元導体であり、構造がはっきりしており理論的取り扱いが可能であることから、基礎物性、工学的応用両方の観点から大変興味をもたれている物質である。我々は、理化学研究所半導体工学研究室と共同で金属/カーボンナノチューブ/金属接合系を作製し、希釈冷凍機を用いた極低温における電気伝導を測定している。今年度は以下の4項目について研究を行った。

(1) 多層カーボンナノチューブからなる単一電子トランジスタの開発

カーボンナノチューブには、大きく分けて単層、多層の2種類がある。単層ナノチューブにおけるクーロンブロッケイド現象に関してはいままでも多くの研究があり、単層ナノチューブの上にソース・ドレイン電極が置かれている場合 (metal-on-tube 構造)、金属電極とナノチューブの接点にトンネル障壁ができると解釈されている。しかしながら、マルチドットの振る舞いが観測されることも多く、トンネル障壁の位置を制御するのはたやすいことではない。これに対し、共通の軸を持ち直径の異なる複数のナノチューブからなる多層ナノチューブでは、クーロンブロッケイドに関する実験はほとんど行われていなかった。我々は、単層ナノチューブに比べると弾性係数の大きな多層ナノチューブのほうがマニピュレーションが容易で、かつその太さゆえにチューブ間の特性のばらつきが小さいことを考慮して、多層ナノチューブを用いたナノエレクトロニクス、シングルエレクトロニクスの可能性を検討するに至った。

実験では、多層ナノチューブに接触する金属として、Ti と Pt/Au を使い、まず、室温における抵抗の分布を比較した。結果は Ti が Pt/Au に対して数桁高抵抗であった。このことは、金属電極とナノチューブの接点の抵抗率を決めるものが、ナノチューブのカイラリティーなどナノチューブ個々の性質に依存するのではなく、むしろナノチューブと金属材料との組み合わせに関わっていることを示している。この接触抵抗の電極金属依存性の原因として、ナノチューブ表面に吸着している酸素の影響を指摘し、その検証のための実験を進めている。

Ti 試料の場合には、低温でクーロンブロッケイドが観測された。特性から得られる全接合キャパシタンスは、Ti 電極の下にあるナノチューブの部分の長さ按比例していることから、トンネル障壁はナノチューブと電極の界面に存在するとの結論を得た。この結果は、単一電子素子を作製する際に、接合キャパシタンス制御の点では、単層ナノチューブに比べて多層ナノチューブが有利であることを示している。

(2) 多層カーボンナノチューブからなる超伝導トランジスタの開発

準1次元系を介したアンドレーエフ反射の基礎物性の解明をめざして、超伝導体間にカーボンナノチューブをはさんだ構造 (超伝導体/カーボンナノチューブ/超伝導体) を作製しその電気伝導を測定している。これまで、AuSn、Ti、Mo を用いたが、いずれも接触抵抗が高く、アンドレーエフ反射の観測には至っていない。

(3) カーボンナノチューブの電子状態

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。単層ナノチューブの場合、その微小な半径のために、ランダウレベル形成のための特徴的な磁場は 1000 T 以上となり、実験的にその電子状態を確認するのは困難だと思われる。それに対して、多層ナノチューブの場合、最外殻のナノチューブの半径は 10 nm のオーダーでランダウレベル形成のための特徴的な磁場は 10 T のオーダーになる。したがって、実験室レベルの磁場で固有の電子状態を確認できる可能性がある。

半導体量子ドットに関して知られているように、単一電子トランジスタ構造を用いることで個々の量子ドットの電子状態を調べることができる。我々は、1) で調べた多層ナノチューブの単一電子トランジスタを用いて、磁場下のエネルギーレベルを詳細に調べた。その結果、磁場の増加とともに、高ゲート電圧側、低ゲート電圧側にシフトする小さなコンダクタンスピークを観測した。これらは、カーボンナノチューブ特有の電子状態を反映していると考え、現在理論家を交えて詳細を検討している。

(4) フラーレンを内包したカーボンナノチューブの電気伝導

ナノスケールの分子を介した電気伝導には、振動、回転など分子固有のエネルギー状態を反映した非線形性が期待される。これは、分子トランジスタ等への応用の観点のみならず、電気伝導のメカニズムを考える上でもきわめて興味深い。単一分子に関する実験を行うためにはナノスケールの電極を作製する必要があるが、現在のリソグラフィ技術を用いて作製することはきわめて困難である。我々は、分子を内包した単層カーボンナノチューブを用いることで、マクロな電極を用いて分子レベルの電気伝導を調べることができると考え、実験を開始した。

試料は、フルラーレン C₇₀ を内包した単層ナノチューブの束を常伝導電極で挟んだものである。これまでのところ、すべての試料でゼロバイアス付近のコンダクタンスディップを観測し、一部の試料では、高バイアスにコンダクタンスピークを観測したが、C₇₀ の電子状態との関連付けには至っていない。

【 3 】 メゾスコピックな超伝導・強磁性接合系における超伝導近接効果 (石井、大木、大塚)

強磁性体の非局所電気抵抗が従来の超伝導近接効果の理論値よりも桁違いに離れた超伝導体の存在の影響を受けるという複数の実験的報告がなされている。この強磁性体中の長距離近接効果の原因を調べるべく以下の実験をおこなった。

強磁性細線 (ニッケル) と超伝導細線 (アルミニウムまたはスズ) が直交し、かつその交点のごく近傍に複数の電圧プローブを持つ試料を作り、適当な電流・電圧プローブを用いることで、超伝導からわずかに離れたニッケルの電気抵抗、ニッケルと超伝導体の界面抵抗、超伝導体への準粒子の注入に伴う charge imbalance などを調べた。この結果、超伝導体から 0.2 ミクロン程度離れた位置でのニッケルの電気抵抗にはなんら超伝導の影響は見られなかった。界面抵抗の測定では温度依存性が見られ、超伝導転移温度付近とそれより低温側にそれぞれピークが現れた。転移温度付近のピークは charge imbalance に起因するとの考えと矛盾しない。一方、低温側のピークの主因はニッケル上にある超伝導体の超伝導転移に伴う際に起こる電流の再分布によるものと思われる。以上の結果から、これまでで報告されている強磁性・超伝導体複合系で見られる抵抗変化は、ほとんどの場合、超伝導電子対の長距離侵入によるものではなく、界面抵抗の変化に起因するものであると結論される。

【 4 】 $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$ の金属・絶縁体転移 (大塚、森下)

不純物をドーピングした半導体において、不純物濃度により金属・絶縁体転移が生ずる。臨界濃度近傍でスケールリング則が成り立つが、臨界指数について理論と実験値が一致しない問題があり、その原因として不純物濃度の不均一性が指摘されていた。同位体濃縮と中性子照射によって作製した $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$ は不純物濃度の均一性が高い特徴を持つ。臨界濃度のごく近傍 ($N/N_c \cdot 1 > 4 \times 10^{-4}$) における精密な電気抵抗測定から、絶対零度における伝導度に関する臨界指数 ν は $\nu = 0.50 \pm 0.04$ とこれまでの測定と一致することが示されている。しかし、測定温度が 20 mK 以上の温度域での測定に限られており、より精度の高い議論を行うためには、抵抗測定の温度領域をより低温、少なくとも 10 mK 以下へ拡張することが必要となる。ここでの困難は、試料の電子系・格子系間に温度の 4 乗に反比例し、低温で急速に増大する熱抵抗が存在することである。電子系を充分冷却するためには試料への熱流入を抑える以外に手段がない。これまで、数 10 fW あった熱流入を 1 fW 程度まで減少させることに成功し、10 mK 以下までの測定に目処を得た。

【 5 】 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 , 核スピン=1/2) 薄膜において吸着第 1 層及び第 2 層は固化し、量子スピン系のモデル物質を与える。この系の磁性は交換相互作用 (その大きさは吸着第 1 層で 100 μK 、吸着第 2 層で数 mK 程度) により支配されるが、 ^3He 原子間のハードコア斥力のために多体の交換相互作用が重要となる。偶数個の交換が反強磁性的な相互作用を与えるのに対し、奇数個の交換は強磁性的な相互作用を与えるため、これら多体交換相互作用の競合が、 ^3He 固相薄膜の吸着面密度による多彩な磁性を生むことが知られている。我々のグループでは、この系について世界的に例を見ない 100 μK 以下の超低温までの比熱測定を通じて磁性の解明に取り組んでいる。

(1) 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第 2 層の低面密度領域で、温度にほぼ反比例する比熱が広い温度範囲で観測されている。例えば多体交換相互作用が支配する系であっても、局在スピン系においては、相互作用よりも充分な高温においては温度の自乗に反比例する比熱が期待され、観測される温度依存性は異常なものである。我々は、この異常比熱について、詳細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ているものと考えている。この予測は、吸着第 2 層において比熱の温度に対するべき α が、多体交換相互作用の競合の強さを表す frustration parameter ζ の対数と非常によく似た振る舞いをするところからも支持されている。今年度、さらに多体交換を考慮した比熱の高温展開を用いた解析を進め、この予測について検証を行った。その結果、多体交換相互作用の競合が強い場合、計算された比熱は交換相互作用の大きさの数桁高い温度で、温度の自乗に反比例した振る舞いから外れ、緩やかな温度依存性へ移行した。これは、測定された比熱のべきが 2 より大きいことと符合するものであり、異常な比熱の依存性が、強い競合を反映したものであるとのモデルを支持する。ただし、実際観測された single exponent に近い振る舞いは再現せず、異常比熱の理解にはさらなる議論が必要である。

(2) 吸着構造

この系においては磁性が面密度とともに複雑な振る舞いを示す。この複雑な振る舞いは、多体交換相互作用の競合の結果生ずるものと考えられているが、その詳細は明らかでない。交換相互作用について様々な計算が試みられているが、いずれの計算も交換相互作用の面密度変化を定性的にすら再現できていない。我々は、これらの計算において吸着ポテンシャルの corrugation や吸着構造が考慮されていないことがその大きな原因であると考え、吸着構造についての考察を進めて

いる。実験的な困難から、この系の吸着構造は 6.4 nm^2 の面密度で現れるルート 3 相以外明らかになっていない。比熱測定等の結果からも吸着構造が提案されているものの幾つかの実験事実を説明できないなどの問題がある。我々は、経路積分モンテカルロシミュレーションによる吸着エネルギーの計算に基づき、吸着構造相図の提案を行った。ここでは吸着構造として、他系で観測されている domain wall 構造の他に、'cage' 構造と命名した独自の構造を仮定した。提案された相図は、これまで最大の謎であった、面密度の増大に伴う反強磁性から強磁性への急激な移行を説明できるほか、多体交換相互作用の競合の面密度変化や従来の相図では説明できなかった実験事実を定性的に説明できるものである。さらに様々な吸着構造について吸着エネルギーの計算を進め、相図の精度を高いものにするとともに、各吸着構造における交換相互作用の値の計算を進め、交換相互作用の面密度依存性を再現できるかの検証を行っている。

【 6 】 流体 ^3He 薄膜を用いたフェルミ流体の研究 (森下)

2次元フェルミ流体の比熱(C)は十分な低温で温度(T)に比例し、温度の上昇とともに T^{linear} の依存性からズレを生ずるが、このズレが理論上の争点になっている。Ogura-Namaizawa は数値計算により、特性温度 T^* ($\sim 0.01 T_F$; T_F はフェルミ温度) 以下という非常に低い温度ではこのズレが T^2 に比例するが、 T^* 以上では比熱が $T \ln T$ に比例することを示した。一方、Misawa はこの系の比熱が $C = \gamma_0 T + \gamma_2 T^2$ (γ_0, γ_2 は定数) の依存性を示すことを理論的に示している。これらの理論予測を確かめるために、ほぼ理想的な2次元フェルミ流体と見なされている graphite 上吸着 ^3He 薄膜流体相の比熱との比較を行った。ここで ^3He 流体薄膜として、bare graphite 上に吸着した ^3He 薄膜第1層、第2層の流体相、及び ^4He 薄膜上に浮かんだ ^3He 単原子層流体相の3つの系を取り上げた。bare graphite 上の ^3He 流体薄膜においては $T < 0.2 T_F$ で、 ^4He 薄膜上 ^3He 単原子層流体相でも少なくとも $T < 0.6 T_F$ で Misawa の予測と一致していることが確認された。系により一致する温度範囲が異なる理由は明らかではないが、相関の強さが関与しているものと考えている。 T^2 項の係数 γ_2 の面密度依存性についても、Misawa の理論予測において、2次元フェルミ流体の自己エネルギーとして Fujimoto による計算を取り入れると測定と良く一致し、Misawa の理論を強く支持することも示した。

【 7 】 熱音響現象 (富永)

(1) 熱音響理論によるスターリング熱機関の研究

スターリング熱機関にはスターリング冷凍機とスターリング原動機とがある。いずれも平衡状態の熱力学に基づく伝統的議論からはカルノー成績係数やカルノー効率が実現されると期待されたものであるが現実にはカルノー成績係数もカルノー効率の 50%程度に止まる。この相違は伝統的議論では可逆過程を議論した後で経験的に不可逆過程の寄与を取り込むために不可逆過程の一般的議論ができないことに起因する。熱音響理論では不可逆過程が初めから取り込まれているので、熱音響理論を使うことによりスターリング熱機関の議論がより現実的になるに相違ない。

実際に熱音響理論を使って議論し、*THERMOACOUSTICA* を使って数値計算を実行した。*THERMOACOUSTICA* による数値計算では熱力学第一法則を自動的に満足しているが、熱力学第二法則を自動的に満足することは保証されていない。このために熱力学第二法則に抵触する結果が出てきた場合には警告を発するようにプログラムしてある。これまでの経験では熱力学第二法則に抵触する結果が出てくるのは数値計算の精度の問題であり、計算手順や数値計算の際の変数の変更により改善された。

数値計算では主に周波数依存性を調べた。その結果、スターリング熱機関には2つの特性周波数があることが判明した。1つは成績係数や効率が最大になる周波数であり、この運転周波数を使う

とカルノー機関の場合の90%以上にもなることがある。しかし、この周波数では冷凍能力も出力仕事も小さい。もう一つの特性周波数は冷凍能力や出力仕事最大となる周波数であり、そこでは成績係数や効率がカルノー機関の50%になる。皮肉なことに、良い熱機関では2つの特性周波数は10倍以上離れていて、この2つの特性周波数が近づくとも成績係数や効率の最大値が下がる。従って環境問題を重視すると、熱機関の幾何学的サイズの割には冷凍能力も出力仕事も小さくなり、冷凍能力も出力仕事を重視すると成績係数や効率がカルノー機関の50%程度で満足しなければならない。

(2) 非一様温度の非平衡系熱力学の研究

熱音響現象現象は非一様温度の非平衡系である。熱音響現象を対象としながら、1999年後半から非一様温度の非平衡系の熱力学的考察を行い、エントロピー生成最小の法則に辿り着いた。一様温度の非平衡系に対してはエントロピー生成最小の法則は既に確立されている。エントロピー生成最小の法則は非一様温度の系で本質的な役割を果たしている。例えば熱機関の動作原理はエントロピー生成最小の法則により初めて理解可能となる。

熱力学史を繙くと、カルノーからクラウジウスに至る議論は熱機関を対象とし、熱流、エントロピー流、仕事流などの移動量に関わる研究だった。その主な成果は熱力学第一法則と熱力学第二法則とである。特に熱力学第二法則の数式表現であるクラウジウスの不等式はエントロピー増大則そのものである。

しかし1865年にクラウジウスにより状態量としてのエントロピー概念が導入されると、その後は平衡状態の熱力学が主流となり、平衡状態の熱力学はギブズによりほとんど完成された。平衡状態の熱力学は移動量を扱わないところに特徴がある。

西洋思想では不変な実体の本質的なモノとして捉え、移動量は不変な実体の移動であり、移動量を本質的な実体とすることを避ける。移動量を扱うことを避けて、状態量だけに着目することで平衡状態の熱力学を建設したのはまさに西洋思想のあらわれであろう。クラウジウスがエントロピー概念を導入する際にも断熱不変量としてエントロピーを導入している。このためにエントロピー増大則に現れたようなエントロピーの生成量としての性質は最も理解し難いこととされている。最近の熱力学の教科書がボルツマン流の統計力学的エントロピーを基本概念とするのはこのためだろう。

移動量と生成量とに着目して、熱力学の基本的な枠組みを再検討する必要があるが出てきた。

【 8 】 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真研究室と共同で極低温を利用した粒子検出器、暗黒物質ニュートラリーノの直接検出を目的とする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、実験を行っている。

<論文>

1. Suppression of the Little-Parks Oscillation in a Mesoscopic Superconducting Ring, A. Kanda, M.C. Geisler, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and T. Sugano, *Physica B* 284-288 (2000) 1870-1871.
2. Spin polarization and magneto-Coulomb oscillations in ferromagnetic single-electron transistors, Y.Ootuka, R.Matsuda, K.Ono, and H.Shimada, *Physica B* 280 (2000) 394-398.
3. Metal-insulator transition of NTD $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$ in magnetic fields, M. Watanabe, K. M. Itoh, Y. Ootuka, E. E. Haller, *Physica B* 280 (2000).

4. Superconductor-Insulator Transitions in Single Small Josephson Junctions with Shunt Resistor and with Normal Tunneling Junction, R. Yagi, S. Kobayashi, Y. Ootuka, Physica B 280 (2000) 416-417.
5. Metal-insulator transition of isotopically enriched neutron-transmutation-doped $^{70}\text{Ge}:\text{Ga}$ in magnetic fields, M. Watanabe, K. M. Ito, Y. Ootuka and E.E. Haller, Phys. Rev. B 60 (1999) 15817-15823.
6. Quantum Charge Fluctuations in Quantum Dots, H. Shimada, Y. Ootuka, S. Kobayashi, S. Katsumoto and A. Endo, J. Phys. Soc. Jpn. 69 no.3 (2000) 828-835.
7. 強磁性単一電子トランジスタの磁気抵抗、大塚洋一、物性研だより 39 (2000) 29.
8. Superconductor-insulator transition in a two-dimensional array of resistively shunted small Josephson junctions, T. Ymaguchi, R. Yagi, A. Kanda, Y. Ootuka and S. Kobayashi, Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 1974-1977.
9. Orbital-Degenerate Paramagnetic Metal Sr_2MoO_4 : An Electronic Analogue to Sr_2RuO_4 , S. Ikeda, N. Shirakawa, H. Bando and Y. Ootuka, J. Phys. Soc. Jpn. 69 (2000) 3162-3165.
10. Phase Diagram for Two-Dimensional Arrays of Small Josephson Junctions with Shunt Resistors, Takahide Yamaguchi, Ryuta Yagi, Akinobu Kanda, Youiti Ootuka, and Shun-ichi Kobayashi, Physica C, Vol 352/1-4, 2001, pp 181-185.
11. Nuclear-Spin Heat Capacities of Submonolayer Solid ^3He Adsorbed on Graphite, M. Morishita, H. Nagatani, and H. Fukuyama, Physica B 284-288 (2000) 220-221.
12. Excess Heat-Capacities of ^3He Films adsorbed on Grafoil, M. Morishita, H. Nagatani, and H. Fukuyama, Physica B 284-288 (2000) 223-229.
13. A Possible Quantum Spin-Liquid State in Antiferromagnetic 2D Solid ^3He , H. Fukuyama and M. Morishita, Physica B 280 (2000) 104-105.
14. Influence of Corrugation of Adsorption Potential on Competition of Multiple-Spin-Exchanges, M. Morishita, J. Low Temp. Phys. 121 (2000) 477-482.
15. Temperature-Squared Terms in the Heat Capacities of ^3He Fluid Films, M. Morishita and S. Misawa, J. Low Temp. Phys. 121 (2000) 483-488.
16. スターリング冷凍機の性能の周波数依存性、富永昭、低温工学 35 巻 4 号 184-189 (2000).
17. Frequency Dependence of the Performance of a Stirling Engine, A. Tominaga, Proc. 6th Japanese-Sino Joint Seminar on Cryocooler and its Applications (Lanzhou, 2000) 83-88.
18. 熱音響現象：流体力学と熱力学との学際的現象(基調講演)、富永 昭、第 50 回理論応用力学講演会(日本学術会議、2001 年 1 月 24 日)講演論文集 347-50.

<解説など>

1. 用語解説 「量子コンピュータ」、大塚洋一、高圧ガス 37, No.2 (2000) 45.
2. 単電子トンネルと強磁性、大塚洋一、パリティ 15 No.06 (2000) 20-27 (丸善).
3. Ga ドープ Ge における金属-絶縁体転移、伊藤公平、渡部道生、大塚洋一、日本物理学会誌 54 (1999) 205-208.
4. 熱音響理論による冷凍機の実験的理解、富永昭、真空 43 巻 4 号(2000)484-491
5. 熱音響現象の実験とその応用、富永昭、日本物理学会誌 55 巻 5 号(2000)326-331.

<学位論文>

大藤敬士：強磁性／超伝導／強磁性二重トンネル接合におけるスピン依存伝導、(修士(理学)、筑波大学理工学研究科、2001.3)

石井裕司：Transport Phenomena in Mesoscopic Ferromagnet-Superconductor Hybrid Junctions, (博士(理学)、東京大学、理学系研究科、2001.3)(1999~2000 特別研究学生として指導)。

<講演>

1. Y.Ootuka、 Spin-polarized single-electron tunneling in ferromagnetic small tunnel junction systems、 日本イスラエルシンポジウム、理化学研究所(和光)、2000/9/12.
2. Y.Ootuka、 Electron transport in ferromagnetic small tunnel junctions、 NEC Symposia on Fundamental Approaches to new Material Phases “Spin-Related Quantum Transport in Mesoscopic Systems”、 Nasu, Japan, October 22-26, 2000.
3. A. Kanda, K. Tsukagoshi, Y. Ootuka, and Y. Aoyagi、 Observation of Coulomb Blockade in a Multi-wall Carbon Nanotube、 International Symposium on Nanonetwork Materials: Fullerenes, Nanotubes, and Related Systems、 鎌倉, Jan. 2001.
4. Yamaguchi Takahide, Akinobu Kanda, Youiti Ootuka, Ryuta Yagi, Shun-ichi Kobayashi、 Dissipation-Driven Phase Transition in Two-Dimensional Arrays of Resistively Shunted Small Josephson Junctions、 American Physical Society March meeting (Seattle, USA) March 12-16, 2001.
5. Akinobu Kanda, M. Hayashi, and Y. Ootuka、 Flux-dependent thermodynamic、 American Physical Society March meeting (Seattle, USA) March 12-16, 2001.
6. M. Morishita, Influence of Corrugation of Adsorption Potential on Competition of Multiple-Spin-Exchanges、 International Symposium on Quantum Fluid and Solid (qfs2000) (Minnesota, June 2000).
7. M. Morishita and S. Misawa, Temperature-Squared Terms in the Heat Capacities of ^3He Fluid Films、 International Symposium on Quantum Fluid and Solid (qfs2000) (Minnesota, June 2000).
8. M. Morishita and T. Takagi, Adsorption Structures of ^3He Monolayer Solid Films Adsorbed on Graphite Surface、 International Symposium on Quantum Fluid and Solid (qfs2000) (Minnesota, June 2000).
9. M. Watanabe, K. M. Itoh, M. Morishita, Y. Ootuka, and E. E. Haller, Critical exponents for the metal-insulator transition of $^{70}\text{Ge-Ga}$ in magnetic fields、 25th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS25) (Osaka, September 2000)
10. Akira Tominaga, Frequency Dependence of the Performance of a Stirling Engine、 6th Japanese-Sino Joint Seminar on Cryocooler and its Applications (Lanzhou, 2000) .
11. 身内賢太郎, 伊藤寛, 井上慶純, 大谷航, 大塚洋一, 関谷洋之, 竹田敦, 蓑輪真, 森山茂栄, 渡辺隆行、 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験 I、 日本物理学会 2000 年春の分科会、 近畿大学、 2000/4/2.
12. 阪東寛, 白川直樹, 池田伸一, 武田直也, 石川征靖, 大塚洋一, 鈴木博、 $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{TiO}_3$ の超伝導性の再確認、 日本物理学会第 55 回年次大会、 新潟大学、 2000/9/23
13. 神田晶申, 大塚洋一, 林正彦、 微小超伝導リングにおける超伝導ゆらぎと Little-Parks 振動 II、 日本物理学会第 55 回年次大会、 新潟大学、 2000/9/23.
14. 山口尚秀, 宮崎久生, 神田晶申, 大塚洋一、 微小ジョセフソン接合 2 次元配列における Kosterlitz-Thouless 転移と散逸の影響、 日本物理学会第 55 回年次大会、 新潟大学、 2000/9/23.
15. 宮崎久生, 山口尚秀, 神田晶申, 大塚洋一、 並列抵抗を付加した 1 次元微小ジョセフソン接合列における超伝導・絶縁体転移 II、 日本物理学会第 55 回年次大会、 新潟大学、 2000/9/23.

16. 大木秀一, 石井裕司, 大塚洋一, 超伝導/強磁性複合系における電気伝導, 日本物理学会第 55 回年次大会, 新潟大学 2000/9/24.
17. 石井裕司, 大木秀一, 神田晶申, 大塚洋一, Ni/Al 微小接合系の近接効果, 日本物理学会第 55 回年次大会, 新潟大学 2000/9/24.
18. 浅古卓永, 浅田美里, 神田晶申, 大塚洋一, 単一電子トランジスタにおける熱活性化型背景電荷揺らぎ, 日本物理学会第 55 回年次大会, 新潟大学 2000/9/25.
19. 松田亮史, 島田宏, 大藤敬士, 神田晶申, 大塚洋一, 強磁性 SET における磁気抵抗効果, 日本物理学会第 55 回年次大会, 新潟大学 2000/9/25.
20. 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, 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験 II, 日本物理学会第 55 回年次大会, 新潟大学 2000/9/25.
21. 山口尚秀, 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, 京都大学基礎物理学研究所研究会"摩擦の物理", 京大基礎物理学研究所 2000.11.15.
22. 大塚洋一, 単一電子デバイスの基礎と応用 (招待講演), 第 12 回日本 MRS 学術シンポジウム, 神奈川サイエンスパーク, 川崎 2000/12/8.
23. 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, 第 4 回「量子効果等の物理現象」シンポジウム, 津田ホール 2000/12/21.
24. 大木秀一, 石井裕司, 神田晶申, 大塚洋一, 強磁性・超伝導微小接合, 第 4 回「量子効果等の物理現象」シンポジウム, 津田ホール 2000/12/21.
25. 塚越一仁, 神田晶申, 大塚洋一, 青柳克信, fluctuations in a mesoscopic superconducting ring, 第 48 回応用物理学関係連合講演会, 東京 2001/3/1.
26. 黒沢鉄平, 神田晶申, 山口尚秀, 大塚洋一, 金属量子ドットのトンネル分光, 筑波大学 VBL 研究発表会, 筑波大学 2001/3/2.
27. 大塚洋一, 微小超伝導トンネル接合列における散逸誘起超伝導絶縁体転移, 東京工業大学極低温システムセンターセミナー, 東京工業大学 2001/3/6.
28. 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 日本物理学会 第 56 回年次大会, 中央大学 2001/3/27.
29. 大木秀一, 石井裕司, 大塚洋一, 強磁性/超伝導複合系における電気伝導, 日本物理学会第 56 回年次大会, 中央大学 2001/3/27.
30. 神田晶申, 大塚洋一, 林正彦, 微小超伝導リングにおける超伝導ゆらぎと Little-Parks 振動 III, 日本物理学会第 56 回年次大会, 中央大学 2001/3/29.
31. 宮崎久生, 山口尚秀, 神田晶申, 大塚洋一, 並列抵抗を付加した 1 次元微小ジョセフソン接合列における超伝導・絶縁体転移 III, 日本物理学会第 56 回年次大会, 中央大学 2001/3/29.
32. 関谷洋之, 伊藤寛, 井上慶純, 大谷航, 大塚洋一, 清水雄輝, 竹田敦, 身内賢太郎, 蓑輪眞, 森山茂栄, 渡辺隆行, 神岡地下実験室に於ける暗黒物質探索実験, 日本物理学会第 56 回年次大会, 中央大学 2001/3/27.
33. 森下将史, 三沢節夫, 2 次元流体 ^3He の比熱における T^2 項, 日本物理学会第 55 回年次大会 (新潟大学, 2000/9/23)
34. 富永 昭, 共鳴管のイメージ, 平成 12 年度熱音響工学研究会第 1 回(横浜, 7 月 21 日)
35. 富永 昭, ポンポン船の科学 (論文賞受賞講演), 2000 年度秋季低温工学・超電導学会(熊本市産業文化会館, 11 月 1 日)
36. 富永 昭, 熱音響現象: 流体力学と熱力学との学際的現象(基調講演) 第 50 回理論応用力学講演会(日本学術会議, 2001 年 1 月 24 日)
37. 富永 昭, エントロピー流とエントロピー流増大則, 2000 年度第 3 回熱音響工学研究会(デ

ンソー浜名湖研修所、3月2日)

38. 富永 昭、熱電気現象の熱力学、2000年度第3回熱音響工学研究会(デンソー浜名湖研修所、3月3日)

<受賞>

1. 低温工学協会論文賞(2000年5月30日):「蓄冷器の冷凍能力と特性周波数:熱音響理論の4K G-M冷凍機への応用」低温工学 34巻3号(1999) 117-124
2. 低温工学協会業績賞(2000年5月30日)