

樽茶電子関連プロジェクト中間評価報告書

総括責任者： 樽茶清悟（東京大学大学院理学系研究科 教授）

研究体制： 低次元電子関連グループ 研究員 Michael, P. 他 4 名
異種粒子関連グループ 研究員 井下 猛 他 4 名
異種輸送コヒーレンスグループ 研究員 Kouwenhoven, L.P. 他 3 名

評価委員： 青柳克信 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授
安藤恒也 東京工業大学大学院理工学研究科 教授
外村 彰 日立製作所 フェロー

1. 研究の進捗状況と今後の見込み

1.1. 研究構想と具体化状況

半導体の超薄膜結晶成長技術と極微細加工技術の進歩により、人工的な 1 次元系である量子細線や 0 次元系である量子ドットが作られ、さまざまな新しい現象が観測されている。例えば、1 次元系のコンダクタンスの量子化、量子ドットのクーロンブロック効果と単電子トンネル効果はその典型である。

このプロジェクトの総括責任者である樽茶清悟氏は、低次元構造の作製技術の開発と電気伝導測定により電子間相互作用の重要性を具体的に明確に示す現象を観測した。例えば、2 次元電子系の高精度加工により 10 ミクロン程度の長さの 1 次元量子細線を作製し、そのコンダクタンスが電子間相互作用には依存しないことを発見した。この従来の理論的常識と異なった実験結果は電気伝導現象の基本的な問題を提起し、それが契機となり多くの理論的研究が行われた。また、測定されたコンダクタンスの温度変化は、1 次元系特有の朝永 - ラッティンジャー流体として理解できる。さらに、半導体二重障壁共鳴トンネル構造を円柱状に加工し、理想的なゼロ次元系である量子ドットを作り、電子数を精密に制御することに成功した。この人工原子の電子構造とその磁場効果をトンネル分光法により精密に測定し、交換相互作用によるフント則をはじめ、電子間相互作用の効果を実験的に明らかにした。この人工原子は電子関連効果を研究する格好の舞台を提供する。

本プロジェクトは、総括責任者のこのような研究成果のもとに、半導体低次元構造における少数電子系の多体効果とスピン関連、量子コヒーレンス、異種粒子関連（電子 - フォノン、フォトンなど）など、多彩な関連現象の解明と制御をテーマとして発足した。この研究では、電子構造を厳密に制御できる 0,1 次元系、あるいはスピンを制御できるハイブリッド系を準備し、その電子状態の関与する量子現象を明らかにするとともに、スピントロニクスや量子計算への応用を意識した電荷位相、スピンの自由度、多粒子系量子関連の制

御法を提案することを目標に掲げている。

具体的には、テーマ毎に（１）低次元電子相関グループ、（２）異種粒子相関グループ、（３）量子輸送コヒーレンスグループの３グループに分けて研究を進めている。それぞれのグループの目的は以下のとおりである。

（１） 量子状態が厳密に制御された構造を用いて、0, 1 次元電子の多体状態、強い電子相関の物理を解き明かす。

（２） 伝導電子と他の粒子系（フォノン、光子、核スピンなど） 交流電磁場との相互作用の解明、半導体 - 磁性体ハイブリッド構造によるスピン制御。

（３） 横型量子ドットにおける電荷、位相、スピンのコヒーレンスの解明、量子計算への応用。

グループ（１）と（２）の研究拠点は NTT 厚木 R&D センター、グループ（３）の研究拠点はオランダのデルフト工科大学に置いている。

グループ（１）のこれまでの主な研究対象は縦型量子ドットとその結合系における電子相関と量子細線における朝永 - ラッティンジャー液体効果、結合量子細線におけるクーロンドラッグなどであり、特に量子ドットに関する研究では横型量子ドットを対象とするグループ（３）と密接に関係している。縦型ドットには電子数を 0 個から 1 個ずつ変えられ、しかもそれに伴う電子状態の変化を正確に同定できるという長所がある反面、ドットと電極、ドット間のトンネル結合を変え難いという短所がある。横型ドットは、対照的に、電子数や電子状態を決めることが難しいが、縦型のような短所がない。グループ（３）では、外部電極とのトンネル結合をパラメータとして、スピン相関の電極への広がりや粒子的クーロン相関と位相干渉などに注目して研究を行っている。

各グループは、粒子相関の物理の解明、スピン効果の制御、スピントロニクス・量子計算の応用のための基礎という共通のテーマをもっており、互いに密接な協力関係にあると思われる。海外を拠点とするグループ（３）との共同研究も、以前から共同研究の実績もあり、予想以上の成果が上がっていると判断される。

1.2. 研究課題への挑戦状況

各グループが具体的に取り組んでいる新しい研究テーマは以下のとおりである。それらはすべて未踏のテーマであり、国際的なインパクトも高い。

（１）低次元電子相関グループ

- ・縦型単一量子ドットにおける少数電子系の近藤効果、2 電子スピン状態の制御、強磁場中での強い電子相関

- ・縦型結合量子ドットにおける少数電子系の分子相状態、パウリ効果、多重量子ドットに

おける帯電効果

・量子細線における朝永 - ラッティンジャー液体効果、ブラッグ反射現象、結合量子細線におけるクーロンドラッグ、1次元ドット列の電子相関

(2) 異種粒子相関グループ

- ・縦型量子ドットにおける電子 - フォノン、フォトン、核スピン相互作用
- ・自然形成 InAs ドットの強い量子効果と単一電子 - 光子変換
- ・交流電磁場によるコヒーレントな電子スピン制御
- ・強磁性体電極を用いた半導体へのスピン注入

(3) 量子輸送コヒーレンスグループ

- ・横型単一量子ドットにおける多数電子系の近藤効果とスピンコヒーレンス制御
- ・トンネル障壁を埋め込んだ Aharonov-Bohm 型リングの位相コヒーレンス
- ・横型2重量子ドットを用いた量子計算へのアプローチ
- ・新しいナノ技術の開発(走査型プローブ法によるナノスケール材料のトンネル分光, カーボンナノチューブの機械的振動を利用したフォノン制御)

1.3. 研究者の参集状況

研究グループのグループリーダーには、メソスコピック領域の電子物性分野で水準の高い研究者を起用している。グループ(1)には電子輸送理論を専門とするアメリカ人研究員、グループ(3)にはオランダ人のデルフト工科大学教授の実験研究員、グループ(2)には、日立 - ケンブリッジ大共同研究所で微細構造作成・評価に実績のある実験研究員を起用している。前者2名の外国人研究員は日本で長期間研究を行った経験をもっている。これら研究員の構成では、理論グループは実験グループと密接に研究を進めている。

実験研究員はそれぞれ異なるテーマを担当し、各自がナノ構造評価素子を作製し量子物性を測定評価することが要求されている。したがって、各研究員は、その分野での研究能力の他に、素子作製プロセス技術、極低温測定のための希釈冷凍装置の操作技術を持ち合わせている。また、研究員のプロセス技術の補助要員として、高度のプロセス技術を持つ技術員や、東京大学樽茶研究室の大学院生を起用している。

1.4. 施設・設備の整備状況

ナノ構造の半導体評価素子を作成するには高度な半導体プロセス技術が必要となる。そのため、露光装置としてライン&スペース 10 nm x 50 nm x 3 μm の電子ビーム描画装置を導入した。技術員は CAD 技術を習得し幅広い形状と寸法の素子を描画可能である。量子ドットや量子細線(人工原子, 人工分子)を作成するためのクリーンルーム及び半導体プロセス装置は NTT 基礎物性科学研究所の設備を利用している。

この研究プロジェクトでは、素子を絶対零度近くまで冷却し、その電気伝導特性から電子やスピンの振る舞いを研究する必要がある。そのため、温度 1.5 K、磁場 12 T のクライオスタット 1 台と、希釈冷凍装置 2 台（到達温度 20 mK 磁場 12 T、到達温度 6 mK 磁場 17 T）を導入した。磁性半導体などは東京大学の簡易クリーンルームとプロセス装置を使い素子作成を進め、極低温・超高真空 STM 装置等も東京大学の実験室に設置し研究を進めている。

1.5. 今後の見込み

研究テーマは研究者毎に異なり幅広く分布しているが、それぞれ十分に進展している。また、それらは総括責任者の指導のもとにかなりよくまとまっている。したがって、テーマを絞るなどの重点化は必要なく、このままの方針で思う存分やってもらえば良いと思う。研究者もスタート当初から参集しており、設備もほとんど全てが整った段階であり、後述するように多岐にわたった面白い成果が出始めている。残された 2 年半は成果を出す期間ととらえ、さらに大きな成果をどんどん出してもらうように期待したい。

2. 研究成果の現状と今後の見込み

2.1. 低次元電子相関グループ

このグループは、実績のある量子細線と縦型量子ドットの電子相関に絞って研究を進めている。縦型単一量子ドットでは、2 電子状態の物理と制御と近藤効果の物理の研究を行った。そこでは、相互作用の直接項と交換項が本質的で、スピン状態（1 重項と 3 重項）が磁場や電子数の関数として任意に制御できることを明らかにし、さらに量子ドットが 1 重項 - 3 重項縮退状態にあるとき、強い近藤効果が発現することを発見した。また、強磁場中の量子ドットで理論的に予測されている強相関状態（軌道角運動量の魔法数状態、ウィグナー分子状態）の実験的検証を進めている。

結合量子ドットではドット間のトンネル結合の大小により共有結合とインオ結合に相当する結合状態が発現することが理論的に予言されている。それに対応し、強結合系では分子相の存在、弱結合系では帯電効果による量子結合のやぶれを検出した。さらに、3 重項状態が分子中に形成されると、パウリ効果のために二つのドット間での電子遷移が禁止され、それにより整流現象が現れることを発見した。

平行量子細線では「負のドラッグ」と呼ばれる新奇な現象を発見した。これは希薄一次元電子系特有のウィグナー結晶化に関係づけられる可能性があり面白い成果であり、その解明が待たれる。

2.2. 異種粒子相関グループ

異種粒子相関を見るためには特別な試料（結晶）も必要となる。そのため一部、産総研、東京大学工学部、東北大学通研、富士通研究所などから結晶の提供を受け、グループ内で

加工するという体制で研究を進めている。その結果、NTT のグループと共同で行ったフォノンボトルネックの観測、2 電子状態の 3 重項から 1 重項へのエネルギー緩和に現れるスピン反転によるボトルネック効果の観測など、新しい成果が得られている。これは量子計算の鍵となる量子コヒーレンスに対する重要な情報を与える。

エネルギー緩和にフォノンが効かないことを利用し、量子ドットで単一電子・単一光子変換を行う実験を進めている。そのため微小 InAs ドットの基礎的な性質を研究するとともに、10-20 meV 程度の光子を捕らえるのに必要な遠赤外光検出器の開発も行っている。2 重量子ドットの電気伝導の実験で核スピンと電子スピンの相互作用を発見し、量子ドットでの電子と核スピンとの動的相互作用について実験・理論の両面から研究している。

強磁性体 (Fe) 層を GaAs 上に結晶成長したハイブリッド構造でホットな電子を使い偏極度の高いスピンを GaAs に注入できることを示した。また、希薄磁性半導体の GaMnAs を電極と井戸、非磁性半導体の AlAs を障壁とする微小共鳴トンネルダイオードにおいて、バイアス電圧の大きさに依存するスピバルブ効果を発見した。さらに、スピンのコヒーレント制御を目指し、電子スピン共鳴の実験技術を立ち上げている。

2.3. 量子輸送コヒーレンスグループ

このグループはデルフト大学の現有研究設備を活用し高いレベルの研究成果を得ている。横型ドットの電極とのトンネル結合や電子数を調整することで、ユニタリー極限の近藤効果の観測に成功した。これは、量子ドットのスピンのコヒーレンスが高いことを裏付ける実験である。さらに、非平衡系での近藤効果、2 段階近藤効果など、近藤効果の新しい様々な側面を見出した。量子計算では量子ビットを量子ドットのスピンや電荷を使って実現することを目指し、マイクロ波照射により結合ドットで電荷の重ね合わせが測定できることを確認した。この技術を拡張し、電荷量子振動の測定に取り組んでいる。また、スピンの重ね合わせについても、電子スピン共鳴による制御技術(スピンドコヒーレンス時間測定、スピン量子ビットと 2 量子ビットの交換結合制御)の開発を異種粒子グループと共同で行っている。走査型プローブ顕微鏡に手を加えて、ナノクリスタル、DNA などの電氣的性質を調べる実験や、ナノチューブの機械的固有振動を利用してフォノンを制御するなど、新しい実験に取り組んでいる。

2.4. 成果公表状況

これまでの研究成果による投稿論文数は 40 件、解説・書籍発表は 10 件、国内学会発表は 25 件、国際会議発表は 50 件、研究会・セミナー等での発表は 9 件となっている。また、2001 年 10 月 1 - 4 日に東京大学で開催された第 28 回化合物半導体国際シンポジウムでは、総括責任者である樽茶清悟氏とグループ (3) の Leo Kouwenhoven リーダーが The Quantum Devices Award を受賞した。さらに、研究成果の公表などのために、ミニシンポジウム "Quantum Computing - Principles and Implementations" を 2001 年 8 月 24 日に

JST Science Plaza で（講演 10 名、参加者 60 名）また、ERATO Workshop "Mesoscopic Correlations In Nanostructures"を 2002 年 7 月 26-27 日にオランダのデルフトで開催（招待講演 22 名、ポスター 19 名、参加者 60 名）した。

2.5. 研究成果の意義と将来性

全般に 2 年半の短い間に多数の興味深い成果が上がっており、残りの 2 年半の成果が楽しみである。従来単一電子系の議論が多くなされてきたがフント則をはじめとして多体系での物理は大変重要な分野であるが、まだその理解には不十分の点が多い。本研究ではこの分野にかなりの知見が得られたと見受けられる。今後もこれらの研究をさらに発展させ多体系での電子相関に関しさらに多くの知見が得られその分野の物理の進展が広がることが期待できる。

量子力学の基礎の原理とナノテクノロジーを駆使した実証実験は、学術的に意義深いだけでなく、今後の実験で思わぬ結果が出て来る可能性をはらんでおり、たいへん楽しみである。あまり実用面を気にせず、基礎的、物理的側面に集中する方が実り多いように思う。これからの研究の展開によっては、発展の著しい分野を対象を絞った新たなプロジェクトを考える必要が出てくるであろう。

以 上