

ERATO 樽茶多体相関場プロジェクト 追跡評価報告書

総合所見

樽茶総括は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、この人工原子の示す電子間相互作用の効果を実験的に明らかにした。本プロジェクトはこの優れた研究成果のもとに発足し、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、電荷、位相、スピン、多粒子系量子相関の制御法を提案することを目標に研究が行われた。ERATO 事後評価報告書において、世界をリードする重要な研究成果を次々と生み出してきたと本プロジェクトに高い評価を与えると共に、研究目標が量子計算と量子情報処理、特に量子ビットとして電子スピンを用いたものへとまとまってきたとの見解が示されている。

ERATO プロジェクト終了後、樽茶総括は SORST および ICORP の二つのプロジェクトを主宰し、ERATO における研究をさらに発展・深化させてきた。その詳細は ICORP 事後評価報告書に見られるとおりである。特に、半導体量子ドットのスピンを用いた固体量子計算の基礎物理を解明し、要素技術を開発することが中心目的の一つに据えられ、ここでも 2 スピン量子ビットの独立操作や SWAP 操作など世界をリードする成果を上げ、量子情報処理の可能性に向けた着実に基本的な情報を提供し続けてきた。

また、ERATO で活躍した若手研究員は研究所や大学などでの研究者としてキャリアアップを果たすとともに、ERATO 以後のプロジェクトにも継続して参画した研究者は多くの顕著な業績をあげ、今や中堅リーダーとしても成長を遂げている。今後の活躍が期待される。

本 ERATO および継続の一連のプロジェクトは、優れた設備・体制が整備された NTT 物性科学基礎研究所を主要な研究拠点として活用し、そこで若手および中堅研究者を育成し、活躍の場を供して特段の成果をあげてきた。これを可能にしたのが樽茶総括の卓越した力量と指導力であり、ERATO 制度がその本領を発揮したプロジェクトであったと言える。

このように事後評価報告書における本プロジェクトへの高い評価は、今回の追跡調査においても再確認された。今年度から最先端研究支援プログラム等でのプロジェクトが始まっている。研究の進展に期待する。

1. 研究成果の発展状況や活用状況について

ERATO プロジェクト終了後 SORST 人工原子・分子の量子スピン情報および ICORP 量子スピン情報プロジェクトとして研究は継続し深化・発展している。そこでは量子結合系を中心とした電子相関と量子コヒーレンスの物理の探求とともに、ERATO 事後評価報告書にも記載された、量子計算と量子情報処理、特に量子ビットとして電子スピンを用いた固体量子情報処理の基礎となる物理と技術の開発が目的とされた。

研究内容の進展状況は ICORP 事後評価報告書に示されているとおりであり、ERATO プロジ

エクトにおいて得られた成果を基礎としつつ格段の進展が見られている。例えば、ERATO での局所的で時間制御可能な電子スピン共鳴の試みが、ICORP における微小磁石傾斜磁場を用いた電子スピン共鳴というブレークスルーをもたらし、現在では 2 スピン量子ビットの独立操作や 2 電子スピンの SWAP 操作まで成功しているし、ERATO での縦型 2 重量子ドットにおけるスピンプロケイドの発見は、ICORP においてスピンプロケイド状態下のリーク電流による核スピンゆらぎの観測、1 電子スピンの読み出し、電氣的制御による核スピンの両方向分極の実現などにつながっている。また、ERATO での 2 重量子ドットにおける人工分子状態の実現が、ICORP において 2 電子スピンの量子もつれ（ハイトラー・ロンドン状態）の実現や 3 重量子ドットの研究へと結実した。

また、ERATO で共同研究を行っていた L. Kouwenhoven 教授（オランダ・デルフト工科大学）とは ICORP でさらに密接な協力関係を構築し人的・学術的交流を深めている。

2. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な効果・効用及び波及効果について

2.1 研究成果は科学技術の進歩にどのように貢献しているか

本プロジェクトで確立された、「半導体中に人工的に 0 次元や 1 次元の電子系を高い制御性で作り上げ、このような低次元系で顕著になる電子相関効果を探求する」という研究手法そのものが新しい流れとして当該分野に大きな影響を与えている。特に縦型量子ドットは樽茶グループのお家芸ともいえる独自技術であり、いまだに他の追随を許していない。

プロジェクトで生み出された学術的成果は基礎物理学の面でも非常に高く評価できる。中でも、総合的に見て引用数の高い量子ドットにおける近藤効果についての研究は重要である。1964 年に理論的に見いだされた近藤効果は固体物理学における 20 世紀最大の理論的発見のひとつである。1930 年代に低温技術が発展した頃から一部の金属で観測され謎として残されていた抵抗極小の原因を解明したことで知られている。その後の世界的な研究で数学的な厳密解まで発見されるようになり、かなり理論的な理解が進んで研究が終了したかと思われていた。しかし、人工原子・分子による近藤効果の研究により、その理解がまだ不十分であったことが明らかになり、その理解をさらに格段に進歩させることになった。

ERATO で確認された長いスピン緩和時間は量子ドット中の電子スピンの量子ビットとして有効であることを示すものであった。また、2 重量子ドットにおけるスピンプロケイドの発見と核スピンとの相互作用によるプロケイドの破壊メカニズムの解明は、電氣的手法による核スピン制御という新しい道を開拓した。これらは基礎物理へのインパクトとともに量子情報処理に関する基礎技術としても重要であり、スピンを用いた量子情報処理は本プロジェクトが開拓した現在進行形の研究課題である。

2.2 研究成果はどのような形で応用に向けて発展しているか

長いスピン緩和時間の確認、電子状態の精密制御、スピンプロケイド、核スピンと

の相互作用の発見等の ERATO における成果は、スピン量子情報の読み出しと制御への足がかりを与えたものと言える。その後の SORST および ICORP での研究において、量子ドットによるスピンの量子制御に取り組み、重要な成果を着実に上げている。量子情報処理に関連する研究は現在さまざまな系を対象として多様な分野で進められているが、その中でこのプロジェクトから発展したテーマは重要な位置を占めている。

量子情報処理実現のインパクトは現在各国で競争的に行われている関連研究の数をみれば十分であろう。我が国でも最先端研究開発支援プログラムの一つとしても取り上げられており、さらに研究が発展・継続し、しばらくは応用研究の大きな柱となることは疑いのないことと思われる。ただし、数年後に具体的な応用の花が咲くようなテーマではないことは確実であり、息の長い研究の積み重ねが必要であろう。

2.3 参加研究者はどのような形で活躍しているか

ERATO プロジェクトの博士研究員からは、NTT 常勤研究者や九州大学、東北大学などの大学助教へのキャリアアップを果たしたものがいる。また、ERATO プロジェクトから SORST-ICORP プロジェクトに継続して研究を推進した4名の研究者は、同プロジェクトで更に多くの顕著な業績をあげ、中堅研究者として成長した。今後の活躍が期待される。また海外の大学でプロジェクトのディレクター (Harvard University, Director of National Nanotechnology Infrastructure Network Computation Project) に着任した研究者もいる。

3. その他

今日の科学技術研究は、企業でも国家プロジェクトでも効率重視の傾向にあり、基礎研究への投資の比重は必ずしも十分ではない。基礎研究は、自然界と自然現象の理解を深めることを本来目的としており、その理解は応用研究の土台ともなる。土台が弱いところでは、たとえ東の間の成果が上げられたとしても、結局長続きはせず、研究体制は崩れてしまうことになる。基礎研究の本来の目的は自然現象の理解と学術的方法の構築であるので、たとえ応用への直接的な成果が現時点では明らかでなくても基礎研究は推進するべきであろう。ERATO 研究制度は応用面へのインパクトも目的とするプロジェクトであるが、この「樽茶多体相関場プロジェクト」のように基礎研究の比率の高いテーマが採択されたことは、高い見識によるものだと考えられる。その見識にしたがって、長期的な展望でその後の成果を見守るのが正しい姿勢であろう。

今回の追跡評価対象である ERATO プロジェクトから、それに続く SORST-ICORP プロジェクトにおいて、樽茶総括らによる半導体量子ドット、量子細線の基礎物性の探求と量子情報処理技術への展開は、本分野における顕著な学術的業績をあげているだけでなく、(1) 国内外の第一線の研究者・研究拠点との、人的・学術的な強い協力関係、(2) 日本でも屈指の研究設備を有する NTT 物性科学基礎研究所および東京大学を研究拠点として活用し、強化

した点、(3)本分野の有能な若手研究者の育成およびキャリアアップによる人材活用のすべてにおいて成功している点が特筆すべきと考える。また、本追跡評価の過程を通じて、樽茶総括らによる ERATO 期におけるさまざまな学術的発見や現象の解明といった物性物理学の基礎研究への真摯な取り組みが、当該学術分野の発展だけでなく、それに続く技術的分野への展開、そして何よりも将来の研究者・開発者の人材育成の観点からも、如何に重要であるかを再認識させられた。今後も、JST-ERATO 制度による卓越した研究総括の発掘と研究支援による日本の科学技術振興に強く期待したい。