

ICORP 量子スピン情報プロジェクト事後評価報告書

【研究総括】 樽茶 清悟 (東京大学大学院工学系研究科／教授)
Leo P. Kouwenhoven (デルフト工科大学応用科学科／教授)
Daniel Loss (バーゼル大学物理学科／教授)

【評価委員】 (あいうえお順)
明楽 浩史 (北海道大学大学院工学研究科／教授)
大塚 洋一 (委員長；筑波大学大学院数理物質科学研究科／教授)
音 賢一 (千葉大学大学院理学研究科／准教授)

評価の概要

研究事後報告書及び樽茶総括及びプロジェクト構成員からのヒアリングを通して調査を行った結果、本プロジェクトについて以下のように評価する。

ICORP 量子スピン情報プロジェクトの目標は、(1)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、(2)量子ドット結
合系を舞台として電子相関と量子コヒーレンスの物理を探究することにおかれている。
本プロジェクトの基礎には樽茶総括がリーダーを務めた ERATO および SORST にお
いて開発された寸法、形状、内部構造を高度に制御した半導体量子ドットの作製技術
やそこで見出された研究成果がある。本プロジェクトはそれらの研究を質的に発展・
深化するものであるが、それと共に単一光子と単一電子スピン間における量子状態の
コヒーレント転写の実現など新たな分野への挑戦も取り入れた創造的なプロジェクト
であった。

ICORP 期間の研究の結果、スピンを利用した量子計算関係では、スピン操作にお
ける微小磁石法という技術的ブレークスルーによって現在では 2 スピン量子ビットの
独立操作や 2 電子スピンの SWAP 操作まで実現しており、卓越した成果を上げたと認
められる。核スピン系についても電氣的制御による両方向分極の実現など多くの成果
が上がっている。これらの成果は、将来の量子情報処理の実用化において重要な知見
であり、基礎技術となると考えられる。光子-スピン量子転写はゼロからのスタート
であったが、光生成単一電子のスピン判定まで至っており、今後の展開に十分期待で
きる状況にある。一方、電子相関・量子コヒーレンスの物理関係においても、2 重結
合量子ドットの電子状態、3 重結合量子ドットの作製、1 次元ウィグナー結晶の観測、
種々の近藤効果、超伝導と近藤効果の競合など数多くの重要な研究成果を上げたと認
められる。プロジェクトの成果の質の高さは、樽茶総括やプロジェクトの構成員が次
の研究支援の機会を得たことや、参加研究員が他大学のポストを得た事実でも間接的
に証明されている。

なお研究の推進においては、樽茶総括のもと各研究グループリーダーの若手研究
者への十分な指導・支援が行われるとともに、主要な研究テーマがグループ間で有機

的につながっており、海外グループを含む ICORP の枠組み（東京大学・NTT・理研・デルフト大学・バーセル大学）において人的および先端設備などの特徴を生かした研究が強力に推進されてきたと認められる。

以上を総合して、ICORP 量子スピン情報プロジェクトは、卓越した研究水準にあったと認められ、戦略目標「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」に資する十分な成果が得られたと判断する。

1. 研究プロジェクトの設定・運営、および相手国機関との研究交流実施状況

1-1. プロジェクトの全体構想

樽茶清悟東京大学大学院工学系研究科教授は、2005年3月、量子スピン情報をもとにした新規な情報通信技術の基盤創成への貢献が期待されること等が評価され、ICORP「量子スピン情報プロジェクト」日本側研究総括として採択された。戦略目標「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」のもと、寸法や形状、内部構造を高精度に制御した半導体量子ドットを用いて、スピンの相互作用（スピン相関）に由来する物理を探究することで、量子物理の深化と新たな展開を引き起こし、それがひいては革新的な情報処理（量子情報処理）技術の導出へと繋がることを目指し、2010年3月までの時限付き研究プロジェクトが開始された。

プロジェクトの全体構想を事後評価の中で議論することは違和感があるが、中間評価において確認された以下の事項を繰り返す。

本ICORPプロジェクトの源流には、それ以前のERATO「樽茶多体相関場プロジェクト」やSORST「人工原子・分子の量子スピン情報」における知見や研究成果があった。ただし、本プロジェクトは従来研究の単純な延長ではなく、「スピン」に着目した新たなチャレンジングな取組みであることは既に中間評価において確認されていることである。

1-2. プロジェクトの枠組みや研究体制、および研究活動の状況

樽茶総括は、研究構想を実現するにあたってNTT厚木研究開発センター（NTT）、東京大学（東大）および理化学研究所（理研）を主な研究実施場所とするとともに、(1)量子計算の物理と技術要素、(2)結合系の電子相関・コヒーレンスの物理、(3)量子情報の転写・移送の物理と技術、を中軸的研究課題として定めた。このうち(3)は当初構想にはなく2007年度から着手されたものであり、量子計算の別課題と位置づけられる。

NTT－東大－理研の優れた設備環境を利用し、樽茶総括と優れたチームリーダーの指導の下、優秀な若手研究者・学生が総力を上げて新たなチャレンジングな取組みを実践したプロジェクトである。課題(3)に見るように、樽茶総括の洞察や指導のもと、開始当初の課題設定に必ずしも強くとらわれることなく期間途中で新たな課題設定を行うなど、研究の進展に応じた弾力あるプロジェクト運営が図られた。生まれた研究成果は極めて質の高いものであり、研究体制、運営、研究活動が優れていたことの証左であると考えられる。また、プロジェクト研究員が他大学で准教授のポストを得たことに象徴されるように、研究の原動力である若手研究者の指導・育成という点でも成果を上げたと認められる。

1-3. 相手国機関との研究交流実施状況

本ICORPプロジェクトのカウンター・パートは、デルフト工科大学（オランダ）のLeo P. Kouwenhoven教授のグループ、およびバーゼル大学（スイス）のDaniel Loss

教授のグループである。

デルフトグループとは ERATO 期間から緊密な共同研究を進めてきた歴史の積み重ねがあり、ICORP においてもそれが引き続き維持された。単に、研究員の相互交流・長期滞在や技術の相互提供に留まることなく、互いの専門技術で補完し合う共同研究も展開し、特に中間評価以降のプロジェクト後半期には、学術論文という目に見える成果としても現れるようになってきた。このことから、極めて有効な人的・技術的な協力関係があり ICORP プロジェクトの特徴を生かした研究展開が図られたと認められる。

バーゼル大学グループは量子ビットに関する理論で世界をリードしてきた実績を有する。日本側との協力関係は主に研究に係る討論を中心としたものであり、デルフトとの事例と比較すると目に見える部分は少ない。しかし、縦横結合型量子ドット系の伝導現象や核スピン分極の実験に対する理論面での実効的な貢献など相応の交流があり、プロジェクト終了後も引き続き学術的・人的な協力関係が良好に続く確固とした体制が築かれていると認められる。

このほか本プロジェクトでは国際ワークショップ”Frontiers in Nanoscale Science and Technology”の開催(共催)がなされており、研究の加速、成果の国際的な発信のみならず、国際的なネットワークの形成にも有効であったと認められる。

[研究プロジェクトの設定および運営] a+ (特に優れた的確かつ効果的であった)
 [研究活動の状況] a+ (特筆して望ましい研究活動・展開を示した)

2. 研究成果

本 ICORP プロジェクトでは 3 つの中軸的研究課題が探求されたが、「研究実施事後報告書」では以下の 6 つの個別研究課題に分類して報告されている。

- 1) 量子計算の物理と技術要素：
 - A. 単一電子スピンのコヒーレント制御
 - B. 核スピン検出と制御
- 2) 結合系の電子相関・量子コヒーレンスの物理
 - C. 結合量子ドットの電子状態制御
 - D. 量子結合系の電子相関とコヒーレンス
 - E. 量子細線結合系の電子相関とコヒーレンス
- 3) 量子情報の転写・移送の物理と技術
 - F. 単一光子－単一電子情報交換

そこで本節では、この 6 個別研究課題の成果状況などを抽出したうえで、全体所見をまとめて記す。

2-1. 研究課題 A：単一電子スピンのコヒーレント制御

量子計算に求められる量子ビットの実現に向けては、・拡張性のある量子ビットの

実現、・デコヒーレンスの制御、・読み出しの高性能化、・論理演算のゲート操作、・量子エラー訂正などが重要な要素技術として考えられている。

特に顕著な進展が見られたのは、拡張性のある量子ビット制御の実現に向けた取り組みである。オンチップ微小コイル法の問題点である発熱と集積化に対する困難を回避する新しい微小磁石を利用した電場誘起スピン検出・操作（中間評価時点で提案）の開発が契機となり、2つの量子ドットに位置する電子スピンを1つずつ独立に操作（ラビ振動の観測）と、2電子スピんにSWAP操作の確認によって量子ビットの集積化が実現できることを示したことは画期的である。

また本研究課題では、核スピンによるデコヒーレンス問題に関するバーゼル大学のグループとの理論面での議論、電荷雑音抑制の詳細なメカニズムに関するデルフト工科大学のグループとの研究など、ICORPの枠組みを活かした共同研究でも成果が認められる。

2-2. 研究課題 B：核スピン検出と制御

固体中の核スピン自由度は環境との相互作用が弱いため、電荷量子ビットや電子スピンなどに比べてコヒーレンス時間が長く、長寿命固体量子ビットの有力な候補であるが局所的な制御と読みだしにおいて技術的な大きな困難が存在する。本研究課題では、ERATO 期における知見をもとに、核スピンに依存した電気伝導、特にスピンプロケード現象を駆使して、スピン状態の読み出しと制御を目的に研究がすすめられた。

中間評価までに、電子スピン間の交換エネルギーを素子のソースドレイン電圧で制御できることを利用し、電氣的制御のみで核スピンを分極させるとともに、分極の値を正確に見積もることを可能にしていた。それ以降、事後評価までの間においては、異なる g 因子を持つ 2 重量子ドット間の共鳴トンネル電流において、電子スピんに依存する新しい伝導現象（スピン・ボトルネック）を観測したこと、核スピンの両方向分極制御が電氣的操作のみで行えることを実証した。

2-3. 研究課題 C：結合量子ドットの電子状態制御

結合量子ドットは量子ドット間相互作用（クーロン相互作用やトンネル結合、超交換相互作用など）に起因する複雑にして多彩な量子現象の発現が期待できる。無論量子計算は多数の量子ドットの結合と制御によって初めて実現されるが、特に 3 重量子ドットを完全に制御することはデコヒーレンスのエラー訂正のため必要であり、量子計算の実現にとって重要な技術的課題である。このため、結合量子ドット作製技術およびその測定法の確立が重要項目として位置づけられる。

中間評価までの段階で、並列結合縦型 2 重量子ドットの作製とそこでの理想的 2 電子状態の実現や、三角状および直線状縦型 3 重量子ドットの作製技術の確立などといった成果が挙がっていた。

さらに事後評価までの間に、「2 重量子ドット系」では、ドット間の結合を電氣的に制御できる新しい直列結合縦型 2 重量子ドットの作製に成功し、その特性を明らかにした。また「3 重量子ドット系」では、直線型並列結合 3 重量子ドットの作製に成

功し、クーロン振動の反交差や複雑なスピン状態の解明がなされた。本研究において、直線型並列結合 3 重量子ドットの制御と測定に重要な進展があったと認められる。

2-4. 研究課題 D : 量子結合系の電子相関とコヒーレンス

本研究課題では、ドット間の結合様式やドット形状、接合電極の種類をパラメータとして、電子相関とコヒーレンスの物理を探究するものである。その典型は近藤効果であるが、これは ERATO 以来進めてきたものであり、全ての研究課題のルーツであるともいえる。

既に中間評価までの段階で、バーゼル大学との議論などを通じて、並列縦型 GaAs 2 重量子ドットにおける近藤効果とアハラノフ・ボーム振動 (AB 振動) に関する理論構築などの成果を挙げていた。この研究のその後の展開として、AB 振動を実験的に観測し、ドットの結合状態と反結合状態を介したトンネル電流の AB 振動の位相が π だけずれることを実験的に確認した。

また本研究課題では、ICORP 発足後 1 年が経過した 2006 年度より、自己形成 InAs ドット-金属電極接合系に関する研究も開始され、常伝導電極接合系での近藤効果や超伝導電極系での新しいスケーリング則の発見などの成果を上げていた。その後事後評価までの間に、自己形成 InAs ドットを超伝導電極と常伝導電極で挟んだ接合において、アンドレーエフ局在状態を分光的手段で観測し、BCS 一重項と磁氣的二重項の間の転移を見出したこと、異方的なスピン軌道相互作用の評価などの成果を挙げた。

2-5. 研究課題 E : 量子細線結合系の電子相関とコヒーレンス

本研究課題の研究対象である量子細線は、朝永-ラッティンジャー液体やウィグナー結晶の形成など、電子間クーロン相互作用の果たす役割の大きい一次元電子系を形成する。中間評価までの段階で、ウィグナー結晶の検証実験を独創的なアイデアで進めるなど、プロジェクト発足時の研究目標を達成する進捗を示していた。

中間評価以降は、新たに量子細線の導波路としての性質に着目した研究に力が注がれた。量子計算への応用が期待される飛行量子ビットを二重量子細線の結合状態で実現することを目指し、AB リングを導入することによって、結合状態の位相を磁氣的および電氣的に制御し、検出することに成功している。さらに量子ビットとして応用を図るための方策として、表面弾性波と 1 次元細線の複合系による量子多ビットの提案など今後の成果が期待できる提案が行われている。

2-6. 研究課題 F : 単一光子-単一電子情報交換

本研究課題における究極目標は、単一光子と単一電子スピン間における量子状態のコヒーレント転写を実現することである。2006 年度より東京大学樽茶・大岩研究室で探索的研究が進められていたが、2007 年度になって、ICORP プロジェクトでの研究課題として組み入れられ、中間評価の時点では、低温で単一光子-単一電子スピン検出を行うための実験装置セットアップを完了し、幾つかの知見を得られつつあるところであった。

事後評価までの事業後半では、量子ドット・量子ポイントコンタクト近接系を利用した単一光子吸収による単一電子電荷の検出、次いでスピン分裂量子ホールエッジ状態を利用した光生成電子スピン情報の検出に成功し、単一光子から単一電子スピンへの角運動量転写の検出が可能であることを示した。量子情報転写の試みは、量子ドット以外でも現在活発に研究されている。幾つかの方法の利点を組み合わせることでブレークスルーとなる可能性もあり今後が期待される。

以上、総体として当初の目的通り ERATO・SORST で見出された基礎的知見を質的に発展・進化させて、これまで以上に高い研究ピークを形成すると共に、ICORP で新たに加わった研究課題でも十分な成果を上げている。研究結果は *Nature Nanotechnology*, *Science*, *Physical Review Letters*, *Applied Physics Letters* などを含む 99 編の論文、8 編の書籍・総説として出版されており、科学技術的観点からは十分な研究成果を上げた結論とすることができる。中でも以下の事項は特筆すべき成果である。

「単一電子スピンのコヒーレント制御」における、2 スピン量子ビットの独立操作や 2 電子スピンの SWAP 操作に関する成果は、個々にアクセス可能な量子ビットの集積化が実現可能であることを示したという意味において画期的なことである。半導体量子ビットをめざす他グループの研究が 1 量子ビットレベルに留まっていることを考えると、この分野を先導する成果として高く評価できる。

「結合量子ドットの電子状態制御」の研究課題などを通じては、3 重量子ドットに関する研究が飛躍的に進展したと評価できる。量子計算では、デコヒーレンスのエラー訂正のため、3 つの量子ドットを同時に制御することが要求される。その意味で、本研究課題における成果は、量子計算の実現にとって重要な基盤技術となる可能性を持っている。今後の量子エラー補正の実証に期待したい。またドットの配列方法やスピンの相関する物理現象としての興味においても、3 重量子ドットの基本原理を理解することは大変重要であるといえる。

「核スピン検出と制御」は核スピンの制御・観測を電氣的に行うユニークな方法を実証した。量子情報への応用にはさらにブレークスルーが必要と考えられるが、基礎物理への応用が期待できる。

「量子結合系の電子相関とコヒーレンス」は、ERATO 時代からの最も歴史ある研究であるといえるが、ICORP になって特に、自己形成 InAs 量子ドットのスピン軌道相互作用（特に近藤効果）の研究、超伝導電極結合系での超伝導と近藤効果の競合に関する研究が精力的に行われ、興味深い成果が得られた。

「単一光子-単一電子情報交換」は半導体中の不純物準位などを利用した研究が先行している。本プロジェクトでは途中から始まった研究課題であり光生成単一電子のスピン判定まで至りキャッチアップができた段階と考える。今後、量子ドットの特性を活かした展開が期待される。

プロジェクト期間内に得られたこれらの科学技術的知見は、新たな研究の目標・展開のシーズとなっている。ICORP プロジェクトが終了する 2009 年度内に、樽茶総

括やプロジェクト構成員が、最先端研究支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」（中心研究者：山本喜久教授）や科学研究費補助金・新学術領域（領域提案型）「量子サイバネティクス」（領域代表：蔡兆申博士）、JST 戦略的国際科学技術協力推進事業（日本・ドイツ共同研究型）「トポロジカルエレクトロニクス」（日本側研究代表者：樽茶清悟教授）に次なる研究機会を得ることが決まったことは、これまでの成果の質の高さが評価されていることの表れでもある。更なる進展に期待する。

一方、これらの成果の産業・社会的側面の評価、言い換えれば 10 年先、15 年先を予測しつつ評価することは容易ではない。取り組まれた研究テーマが将来の量子情報処理の実用化へ向けて克服すべきとされる課題であることは間違いない。例えば、「結合量子ドットの電子状態制御」での 3 重量子ドットは、上述の通り、量子計算でのエラー訂正を行う際に必要とされる基本単位であり、これを実現することは量子計算実現のマイルストーンとなる。本プロジェクトではその一步手前まで近づいている。「単一電子スピンのコヒーレント制御」における、背景電荷ゆらぎやノイズの低減、デコヒーレンス問題に関する研究は、量子ビットの信頼性を確保する意味で重要な要素であり、本プロジェクトで得られたゆらぎの低減法は有用である。しかし、本質的な解決には、樽茶総括も述べるように、材料探索から始める必要があるかもしれない。実用化には、これらのまだ手のつけられていない課題の克服がおそらく必要である。

いずれにしても、真の意味で産業・社会的側面から評価されるのはこれからの取組み次第である。ERATO から約 10 年にわたって支援されてきたプロジェクトの今後への期待も加味して、現時点では産業・社会へ成果が還元されていく途上にあるという点で、産業・社会的側面からは良好な成果が上がっていると判断した。

〔研究成果（科学技術的側面）〕 a+（成果として秀逸である）
 〔研究成果（産業・社会的側面）〕 a（成果として良好である）

3. 総合所見

本 ICORP プロジェクトの原点には、半導体量子ドットの物理的研究で世界を先導してきた樽茶総括自身がリーダーを務めてきた ERATO および SORST がある。これを受け継ぐかたちでの ICORP は、ERATO・SORST 時代の成果の質的な発展および深化に留まらず、「単一光子-単一電子情報交換」などをはじめとする新たなチャレンジングな取組みなども積極的に採り入れ、「量子スピン情報処理」の新境地を切り拓く取組みを実践した。

樽茶総括の研究構想を実現するにあたって優れた若手研究者が活躍の場を与えられ、多くの研究成果を上げることができたと評することができる。その研究推進の過程では、ICORP 内の在外グループをはじめとする海外グループとの協調が図られたと認められる。とりわけ、デルフトのグループとは ERATO 時代からの協力関係があり、相互補完的な人員の交流や技術情報の提供（およびその結果としての共同研究や共著論文）があった。デルフト、バーゼルともに、ICORP 下での協力関係は終了するもの

の、これを契機とした新たな展開をともに検討するなどの方策を考えてもらいたいと願う。

本 ICORP プロジェクトからは多くの発明・発見が成し遂げられた。それらの成果は、将来の量子情報処理の実用化において重要な知見であり、基礎技術となると考えられる。このことは、樽茶総括やプロジェクトの構成員が次なる研究支援の機会を得た事実や、参加若手研究者が大学にプロモートされたことを見ても明らかであるといえる。

以上を総合して、ICORP 量子スピン情報プロジェクトは、卓越した研究水準にあったと認められ、戦略目標「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」に資する十分な成果が得られたと判断する。

〔総合評価〕 **A+** （戦略目標に資する十分な成果が得られた）