

CREST 研究領域「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

追跡評価報告書

総合所見

本研究領域での成果が高く評価された結果、研究領域終了後も多くの研究代表者は、引き続き大型の研究プロジェクトに代表者、あるいは共同研究者として参加し、各自の研究テーマを継続して実施して質の高い研究成果を生み出した。中でも、井元チームはエンタングルした光子を波長変換してもエンタングルメントが保存されていることを実証して、量子演算処理の可能性を広げた。蔡チームはコヒーレント量子位相すべりを観測して、新たなデバイスにも繋がる量子力学的な輸送現象を検証した。また、超伝導リング+ジョセフソン素子を人工原子として、光との間の量子光学効果が観測された。古澤チームは、量子力学の非局所性をはじめ厳密に実証する実験を行ない、遠隔相互作用の存在を立証した。このような手法は、将来の量子コンピューターへの応用に繋がると期待される。また、検出効率が高い完全な量子テレポーテーションにも成功した。香取チームは、2台のSr 光格子時計の周波数が世界最高レベルで一致することを確認した。宮下チームは、量子アニーリングに関する基礎理論を発展させて、D-Wave Systems による量子コンピューター（この名前に議論はあるが、量子力学の原理で働いていることは確認されている）の商品化に大きな影響を与えた。このように、基礎科学から量子情報デバイスの実装に至る幅広い分野で大きな成果を上げた。

「量子アニーリング」の専用ハードウェアが販売されて、量子コンピューターは急速に現実味を帯びてきた。現在のコンピューターとの相補的な機能が期待され、本研究領域に続く量子コンピューターの開発研究が進展すれば、社会的・経済的に大きな波及効果が期待できる。また、香取チームの光格子時計が従来の数桁高い精度の時間標準や時計同期が実現すれば、GPSをはじめ社会的・経済的な波及効果は極めて大きい。

以上より、本研究領域の終了後も各研究代表者は十分な研究資金を獲得して研究を継続し、大きな研究成果を生みだしている。特に、超伝導量子ビット、量子光情報処理、原子時計の分野においては世界をリードしており、今後インパクトのある展開が期待できる。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域での成果が高く評価された結果、多くの研究代表者は、主として以下の5つのプロジェクトに引き続き代表者、あるいは共同研究者として参加し、各自の研究テーマを継続した。(1)FIRST「量子情報処理プロジェクト」、(2)科学研究費新学術領域研究（研究領域提案型）「量子サイバネティクス」で固体素子系、分子スピン量子、原子系、イオン系の研究項目、(3)ERATO「香取創造時空間プロジェクト」、(4)ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」、(5)平成28年度発足のCREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」。さらに、様々な科研費、基盤

研究費が獲得され研究が継続した。このように高額の研究費が与えられるプロジェクトに数多く採択されている。

量子技術の実用化すなわち人工脳の実現に向けては FIRST と新学術領域研究「量子サイバネティクス」を経て主として光技術が ImPACT 量子人工脳プロジェクトに反映されている。また FIRST において量子情報処理の困難さが認識されたこと、および「量子サイバネティクス」で様々な量子系の研究が実施されたことが、現在の ImPACT プロジェクトの方向性に反映されている。

多くの研究代表者は本研究領域終了後も質の高い研究成果を生み出しており、総数 260 編以上、内被引用件数が 40 以上の論文が 18 編、インパクトファクターの高い Physical Review Letters 24 編、Science 3 編、Nature 2 編、Nature 系ジャーナル 9 編が公刊されている。

本研究領域終了後、香取秀俊と古澤明の紫綬褒章をはじめ、蔡兆申、高橋義朗、小坂英男が著名な賞を受賞しており、継続した研究成果が社会的にも高い成果をあげていると認められている。

2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

(1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

井元チームは、可視域のエンタングルした光子を光通信帯に波長変換してもエンタングルメントが保存されていることを実証した。これは光による量子情報通信に新たな自由度を加え重要である。また、光の弱測定についてハーディーのパラドックスの実験的確認に成功した。これはしばしば議論される量子力学の基礎に関して重要な知見を与える。

蔡チームは、本研究領域期間中に行った超伝導量子ビットの研究を発展させ、その中でコヒーレント量子位相すべりを観測した。これは基礎物理にも重要で、今後の新たな量子効果の発見、量子デバイス開発にもつながる。また、超伝導リング+ジョセフソン素子を人工原子としてマイクロ波と結合し、原子と光子間の量子光学効果が同様に観測できることを示した。これは、巨視的量子現象を示す人工原子を光で操作する基礎技術が確立されたといえる。

高橋チームは、Yb 原子の様々な同位体をレーザー冷却して光トラップに捕獲し、ボース凝縮、フェルミ凝縮を実現している。これを光格子に移し、量子シミュレーターの実現に向けて周辺技術開発を進めている。

古澤チームは、かつてアインシュタインが提唱した量子力学の非局所性をはじめて厳密に実証する実験を行なった。これは光を用いた量子計算の実現にも深く関連するばかりでなく、基礎科学にも非常に重要な貢献である。また、検出効率が高い完全な量子テレポーテーションに成功し、量子情報操作の実装に大きく前進した。

小坂チームは、光と量子ドット間の量子情報の書き込み読み出し技術で量子テレポーテーション実現の可能性を提示した。

井上チームは、DPS-QKD 量子暗号方式による長距離通信を実施して、実用システムレベルに近づいた。

香取チームは、2台のSr光格子時計の周波数が 10^{-18} レベルで一致することを確認し、これまで世界最高だったHg+イオン時計を凌駕した。原子時計は次世代時間標準として実用上重要であるが、物理定数の恒常性の検証の基礎科学から光をリソースとする量子情報実験を支える基礎技術となった。

宮下チームの西森が1998年に提案した「量子アニーリング」の概念は、本研究期間中から現在まで基礎理論が発展し、カナダのD-Wave Systemsによる量子コンピューターの商品化に大きな影響を与えた。

(2) 研究成果の応用に向けての発展状況

量子暗号システムは、既に商業機が市販され、量子情報分野で最も実用化が進んでいる。世界レベルの会議QCRYPTが企業のデモセッションも含めて毎年行われ、究極の安全性を有する暗号システムとしてマーケットへの展開を分野全体で模索している。日本発の技術がキーとなっているとともに、井元チームが外乱を測定することなく安全性を保証できる量子暗号方式を提案し、その実現を通してより安全性の高いシステムの提供を可能とし、経済的にも研究成果の発展が期待できる。本研究領域の成果は我が国の情報通信研究機構での実装技術開発に繋がっている。

量子コンピューター実現に向けて、古澤チームはごく最近、エンタングルした光子を効率よく発生できることを報告している。米国はイオントラップ・超伝導などをqビットとしたデバイスで小規模量子計算を実装していた。一方、宮下チームが「量子アニーリング」の基礎理論を発展させたことで、実用化に影響を与えた。専用ハードウェアがカナダで製造販売され、Google・NASAなどがそのシステムを購入して、実用に向けた検証を継続している。量子コンピューターがさらに発展すれば、量子アニーリングも含めた応用展開も期待できる。現在のコンピューターはポスト京の計算能力を目指しているが、シングルチップレベルの高速化の限界や、発熱に対する省消費電力化などの要請で、将来の展開がみえなくなりつつある。新たに量子コンピューターによるアプローチで低消費電力かつ、現在のコンピューターに不得意な問題で高速計算を可能とする方向を目指すことは、世界の研究の趨勢に独自のインパクトを与える意味でも重要である。

香取チームの光格子時計に関する研究は、より精度を高める研究が進んでいる。現在は衛星により 10^{-12} 程度の精度の原子時計が共有できるため、GPSに基づいた位置情報が手軽に入手でき、さらに、これに基づいたカーナビ、自動運転など様々なサービスが創出提供されている。数桁高い精度の時間標準や時計同期が実現すると、どのような分野にまで応用が広がるのか想像すらできず、社会的・経済的な波及効果は極めて大きい。

量子コンピューター、量子力学の非局所性、正確な時計などこの分野の最新成果は社会にも受け入れやすく、インパクトをもって発信されている。これにより、民間の関心が高

まり、何より多くの若い世代の研究者がこの分野へ参加しておりが促され、例えば さきがけ「量子の状態制御と機能化」が平成 28 年度に発足したように、研究の活性化に繋がっていることは重要である。

(3) その他の特筆すべき波及効果

量子情報分野では、既に量子暗号の商業器が流通しているが、「量子コンピューター」は研究室を出て実用化されるのは大分先であろうと予想されていた。しかし、本研究領域の宮下チームで基礎理論が発展した「量子アニーリング」が間接的に影響を与えて、外国企業によりハードウェアとして実装販売されたのは想定外であった。これが「量子コンピューター」としては完全ではないが、量子力学を原理として動作している兆候は確認されていることから、「量子コンピューター」の実現に新たな道筋が現れる可能性がある。

本研究領域およびその成果を引き継いだ諸プロジェクトを通じて、国内の研究者間のネットワークが形成され、今後の量子応用分野の発展に寄与することが期待できる。国外の研究者とのネットワーク形成は、個々の研究者レベルでの連携と共同研究が進んでいることがうかがえる。

古澤グループと海外の研究グループとの共同研究によるシナジー効果は素晴らしく、研究成果の国際的ビジビリティの向上にもつながっている。また若手の国際的な活躍を促進する取組みとして高く評価できる。このように、海外の研究グループと協力することで、国内の研究グループだけでは難しい世界トップレベルの研究グループによる相補的研究ネットワークを形成することは、非常に重要である。

本研究領域は、グループ全体での連携もはかりながら、各自で注力している分野の研究を推進する上で非常に効果的なシステムであると評価できる。このように、基礎科学のレベルから社会展開を目指した技術・システムの研究まで幅広く取り組んでいくタイプの領域には、非常に適している。

3. その他

本研究領域の成功の一因は、各世代のトップ研究者が幅広く集まっていた点にあり、本研究領域内やその周辺では、若手育成のための種々施策も実施されており、それが切れ目のない研究開発推進につながっている。

本研究領域の成果は後続の諸プロジェクトに引き継がれており、研究者も継続して研究をアクティブに行っていることが認められる。ここから、本プロジェクトが継続的な学術研究と研究者間のネットワーク形成に有効に作用していることは間違いない。

一方、大学等の研究機関の研究者と産業界とのネットワークに関しては、研究者間ほどには連携が十分には進んでいない。これがカナダの D-Wave Systems に見られるような起業、製品化などが日本で生じていない理由かもしれない。このようなプロジェクトで、性急に「見える成果」を要求することは研究の自由度を損なうため必ずしも良い結果につながら

ないと考えるが、一方では積極的に実用性を目指す研究も両立できるとよい。

本研究領域の多くの研究代表者は本研究期間を含め10年以上にわたり大型の予算を獲得し、それに見合う成果を出している。これは、若いポスドクを雇用できたことも大きい。良い研究環境下で若手を養成するという面では良いが、一方、ある特定分野の研究者だけが育成され、学問の多様性が損なわれることを危惧する。重点領域に予算を配分することも重要だが、様々な学問分野を維持していく仕組みにも配慮することが望ましい。