

## さがけ研究領域「量子と情報」 追跡評価報告書

### 総合所見

本研究領域は、様々なバックグラウンドを持つ研究者が量子情報に関する研究を実施し、研究領域終了後もそれぞれの分野において精力的に研究を継続しており、引続き優れた成果を得ている。さらには、量子情報技術の発展を指向する研究と他分野への展開を行う研究とがバランスが取れた形で発展している。研究成果は内外の一流論文誌に多数掲載されており、世界的にトップレベルの研究支援をなしえたものと認められる。

量子情報技術は長期的には社会・経済に大きなインパクトを持つが、直ちに実用化される段階にはなく、量子暗号を除いてまだ基礎原理を実証できる系を広く模索している段階である。今後の実用化基盤の確立には、さらなるブレークスルーが必要とされている。

しかしながら、量子情報の研究を集中して推進したことは、我が国の研究水準を大きく向上させるとともに、理論的研究でも量子力学の理解を深化させることに大きく貢献した。また「量子と情報」の分野で重要となる概念が着実に醸造されてきている。さらに物理的な実装に関わる研究テーマについては産業応用への貢献も期待される。

### 1. 研究成果の発展状況や活用状況

概ねすべての研究者とも研究課題終了後も順調に競争的資金を獲得し、また、論文の公表も継続している。

顕著な成果は、以下のようである。

- 黒田隆：「さがけ」で培った量子ドットの技術を発展させ、量子力学の検証、顕微発光測定系の開発、量子もつれ光子源開発まで世界的に最先端の研究成果を上げている。
- 阿部真之：「さがけ」で培った原子間力顕微鏡と原子操作を発展させ、室温での原子操作を実証した。この技術は基礎科学から応用分野に大きな波及効果が期待できる。
- 遊佐剛：「さがけ」で培った核磁気共鳴の光学的検出法を発展させ、分数量子ホール効果の微視的（ナノ領域）観察に成功している。
- 松下道雄：「さがけ」で開発した極低温で働く対物レンズを使って単一  $\text{Pr}^{3+}$  イオンからの発光を観測し論文を発表している。これは、物理、生物分野に大きな波及効果を与えうる世界的結果である。
- 石坂智：共有され劣化したエンタングルメントを LOCC（局所的量子操作と古典的通信）で回復するための条件や方法を研究した。また受信者側のユニタリー変換を必要としない port-based teleportation という新しいテレポーテーションプロトコルを提案している。
- 村尾美緒：量子鍵暗号のための基礎研究として LOCC による多体エンタングルメントの識別・抽出・破壊などの能力について多くの知見を得た。今後多体量子系における量子情報処理や量子状態の自由な制御が可能になった場合には、量子状態の多体エンタングルメントの評価や、より高い多体エンタングルメントを持つ量子状態を利用した量子プロトコルの設計などに役立つことが期待される。

○宇佐見康二：原子集団を媒体とする高度な量子観測、量子干渉の実験を行った。特に原子スピン系の多体エンタングルメント状態である Dicke 準位に対しホモダイン測定によるトモグラフィに取り組んだ。この系は現在量子中継や量子計算で応用が期待されているものである。また偏極された  $\text{Rb}^{87}$  原子のスピン量子数ゼロの状態に対する Robbins-Berry 位相の観測に成功している。スピン集団に対する量子光学的手法は例えば量子中継や量子計算などの光を用いた量子情報処理の基礎手法として今後大いに発展することが予想される。またトポロジカル位相の量子計算機への応用が期待できる。

その他、濱田充の量子誤り訂正符号に代数的手法を導入する研究は量子情報理論の発展に、長谷川祐司の中性子干渉計を用いた小澤の不等式の検証 (Nature Physics 2012 年) は量子力学の基礎に、趙福來のコヒーレント電子源は次世代電子顕微鏡と電子線描画に繋がる成果である。清水明の多体量子系の新しい統計力学は野心的で基礎物理分野の教科書を書き換える可能性を持っている。

領域の半数弱を占めた理論研究では、領域終了後の研究により、量子エンタングルメントについての理解がより深化、拡大しており、wire-tap channel (盗聴通信路モデル) 等の暗号通信の新潮流への展開や、非平衡量子多体系の新しい定式化など優れた研究成果につながっている。実験研究では、量子ドットや単一の中性子、原子および分子の量子的な制御技術が更に進展し、量子もつれ光源の実現や生体分子の分光などの成果が得られている。

継続の方向としては、本領域のテーマであった量子情報技術の発展を指向するものと、本領域での研究成果を別の方向で発展させるものがあり、両者のバランスが取れている点は積極的に評価すべきと考える。前者の例としては石坂智の量子もつれの研究が挙げられ、本領域では量子もつれ最適回復プロトコルを主題としていたが、終了後はその成果を活かしつつ量子テレポーテーション等の研究に発展させている。後者の例としては松下道雄の研究が挙げられ、本領域では固体中の単一スピン観測のため極低温用のレンズを開発し、終了後は生体分子の観測を活発に展開している。

## 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

### 2.1 研究成果の科学技術の進歩への貢献

本領域の対象となった量子情報は、領域設定時において、科学および技術の広い分野の発展の基盤となることが期待されていた分野であり、その観点から、本領域の真価は、今後時間が経つにつれて、量子情報の概念や技術が広い分野に浸透していくかどうかによって問われるべきであろう。この浸透は、20 年 30 年の時間スケールを要するものであるが、基礎科学の分野では既に浸透の様子が明白にみられる。物理科学分野では、宇宙初期の揺らぎや多体量子系の相転移現象を議論する際に、量子エンタングルメントの指標が用いられるようになっている。本研究領域では、量子計算機を多体量子系としてとらえる先駆的な研究が実施され、領域終了後には、多体量子系と非平衡系という物理学の 2 つの未開拓領域を切り開く、新しい定式化といった成果も得られている。また、情報科学分野における世界動向において、量子情報の概念の浸透が見られ、情報セキュリティの重要性が増していることもあり、本研究領域で実行された暗号通信に関する研

究は注目を集めた。実験的な量子制御技術についても、情報処理だけでなく、生命科学など広い分野への波及効果が期待される。本研究領域から生み出された成果は独創的なものが多く、例えば、AFM による固体表面単一原子の操作は海外からも表彰されるなどレベルも高い。

本領域の研究成果は内外の一流論文誌（Physical Review A, Physical Review B, Physical Review Letters, Nature Physics など）に多数（研究期間中および研究期間後の合計で 300 件以上）掲載されており、世界的にトップレベルの成果と言ってよい。黒田隆の単一の量子ドットの光読み出しに関わる研究は国際的な共同研究を経て、世界最高性能の量子もつれ光子源の開発へとつながった。高インパクト誌の Editor's Suggestion にも選ばれており、注目度の高い研究である。長谷川祐司の中性子干渉計・ポラリメータを用いた研究は、終了後も発展を続けており、重要な成果の一つとして名古屋大学教授 小澤正直が 2003 年に提唱した「小澤不等式」の実験的検証がある。この実験によって不確定性原理への関心が高まり、新しい検証実験の進展を生んでいる。

## 2.2 研究成果の応用に向けての発展状況

量子情報技術は、量子暗号を除いてまだ基礎原理を実証できる系を広く模索している段階で、技術開発や実用の段階からは遠い。しかしながら、量子情報技術によって実現されると考えられている新しい原理による量子系の大規模シミュレータ等を含む強力な計算の仕組み、いわゆる量子コンピュータは、長期的には社会・経済に大きなインパクトを与えると考えられる。本領域の成果についても長期的な視点で考える必要がある。これらを踏まえると、本領域でいくつかの基礎理論、例えば濱田充の誤り訂正符号や小川朋宏の量子通信路の可逆性についての理論等で成果が得られたことは重要な意義がある。

一方、量子ビットの物理的な実装に関わる研究テーマの成果は、量子計算機実現のための要素技術として将来有用なだけでなく、広い分野に波及する技術となることが期待される。他分野への波及効果に関しては、例えば阿部真之の室温での原子操作・観測の技術は、各種の機能性材料の研究を大きく進め、新規材料の開発を通して社会・経済へ貢献することが期待される。同様に、趙福來による揺らぎの小さな電子ビームの発生や、遊佐剛による核磁気共鳴撮像素子に関する研究、松下道雄の極低温用レンズ等も、産業応用への高いポテンシャルを持っている。

## 2.3 その他の特筆すべき波及効果

新たな展開や科学技術イノベーションへの貢献について、他分野への量子情報の概念や技術の展開は予想以上に進んでいるといえる。人材のキャリアアップは非常に順調であり、例えば、さきがけ終了時にさきがけ研究者であった 3 名は、追跡調査時は韓国標準科学研究院責任研究員（趙福來）、ウィーン工科大学准教授（長谷川祐司）、東京大学准教授（宇佐見康二）となっており、国際的なキャリアアップが実現している。

新しい分野間の融合については、量子情報は物理学、数学、情報科学、半導体工学などの融合分野であり、量子情報の進展により、相互の結びつきが強まっている。例えば、物理学では、情報量や最適推定など情報科学で発達した概念を用いる研究が活発化している。

### 3. その他

「さきがけ」は研究テーマを公募して実施され、様々なバックグラウンドを持つ研究者が採択され、本研究領域を活性化させる大きな意義があった。また、研究者の半数弱が理論の研究者であったことは、活性化に寄与した一因であったが、一般に理論の研究では、国内外の研究者との交流が重要であるので、本研究領域においてもそのような交流を促す仕組みがあれば、研究のさらなる活性化に寄与したのではないか。いずれにせよ、研究者間の議論の機会が多く、ネットワーク形成の効果が高いのが「さきがけ」の特徴であり、本研究領域のように、幅広い分野の若手研究者が恩恵を受けられるように分野のバランスに配慮することが重要である。

以上