

研究領域「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」 事後評価（課題評価）結果

1. 研究領域の概要

本研究領域は、光科学、物性科学、ナノ構造・材料科学、情報科学に立脚して量子状態の高度制御の物理と技術を探求し、量子科学のフロンティアを開拓するとともに、新たな量子情報処理や従来性能を凌駕する素子・システム機能を実現することにより、社会の発展に資する革新的量子技術基盤を創出することを目的とします。本研究領域においては、量子状態制御の物理の探索とその技術展開をはかる「新しい源流の創出」と、将来の社会・産業イノベーションを牽引する量子技術の実装に向けた「革新的システム機能の創成」を二本柱として、研究開発を推進します。

研究の具体例としては、量子ドットや超伝導体などにおける多様な量子系の状態制御の高度化とその量子情報処理技術への展開、高度に制御された量子系による新しい量子融合素子や高感度センサー素子の実現、および巨視的量子効果や量子光学の高度な活用による超高精度計測技術の開発などが含まれます。さらに、将来の社会基盤の構築に資する革新的量子システム機能の実現やその集積化・統合化も目指します。

2. 事後評価の概要

2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

戦略的創造研究推進事業・CREST における事後評価の目的、方法、評価項目及び基準に沿って実施した。

2-2. 評価対象研究代表者及び研究課題

2017年度採択研究課題

- (1) 青木 隆朗（早稲田大学理工学術院 教授）
スケーラブルな光学的量子計算に向けた超低損失ナノファイバー共振器QED系の開発
- (2) 神成 文彦（慶應義塾大学理工学部 教授）
波長分割多重プログラマブル大規模量子シミュレータ
- (3) 小坂 英男（横浜国立大学大学院工学研究院 教授）
ダイヤモンド量子セキュリティ
- (4) 齊藤 志郎（日本電信電話（株）NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員・グループリーダー）
超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング
- (5) 仙場 浩一（情報通信研究機構未来ICT研究所 上席研究員）
超伝導量子メタマテリアルの創成と制御
- (6) 田中 歌子（大阪大学大学院基礎工学研究科 講師）
オンチップ・イオントラップによる量子システム集積化
- (7) 田中 雅明（東京大学大学院工学系研究科 教授）
強磁性量子ヘテロ構造による物性機能の創出と不揮発・低消費電力スピンドバイスへの応用

2-3. 事後評価会の実施時期

2022年11月24日（木曜日）

2-4. 評価者

研究総括

荒川 泰彦 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 特任教授

領域アドバイザー

香取 秀俊 東京大学大学院工学系研究科 教授
寒川 哲臣 日本電信電話(株) NTT先端技術総合研究所 常務理事／基礎・先端
研究プリンシパル
西野 哲朗 電気通信大学大学院情報理工学研究科 教授
野田 進 京都大学大学院工学研究科 教授
平山 祥郎 東北大学先端スピントロニクス研究開発センター 総長特命教授・
センター長
藤巻 朗 名古屋大学大学院工学研究科 教授
古澤 明 東京大学大学院工学系研究科 教授
山田 真治 (株) 日立製作所研究開発グループ 技師長
山本 喜久 NTTリサーチ量子計算科学研究所 所長

外部評価者

該当なし

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： スケーラブルな光学的量子計算に向けた超低損失ナノファイバー共振器 QED 系の開発

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

青木 隆朗（早稲田大学 理工学術院 教授）

主たる共同研究者

金本 理奈（明治大学 理工学部 教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている

○総合評価コメント：

光学的量子計算に向けたナノファイバー共振器 QED 系の開発において、超低損失化と言う重要な要素技術開発をほぼ目標通りに達成した。さらに、原子アンサンブルをトラップしたナノファイバー共振器 QED 系を接続して結合共振器の可能性を示し、複数個原子をトラップした状態で個々の原子にアクセスするなどスケーラブルであることの実証に実験面および理論面から取り組んだ。また、超低損失ナノファイバー共振器の副産物として低閾値 Brillouin レーザを実現した。

原著論文数は 14 件、講演数は 58 回(招待講演数は 19 回)、特許出願数は 7 件であった。加えて、本研究成果や有効な基本特許をベースにスタートアップを起業したことは高く評価される。

今後、本提案による光学的量子計算としてのスケーラビリティを発展させ、分散型量子計算への優位性が実証されれば、大きなインパクトとなる。また、超低損失ナノファイバー共振器の様々な分野への波及効果も期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 波長分割多重プログラマブル大規模量子シミュレータ
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）
研究代表者
神成 文彦（慶應義塾大学 理工学部 教授）
主たる共同研究者
武岡 正裕（慶應義塾大学 理工学部 教授）

3. 事後評価結果

○評点：

B やや劣っている

○総合評価コメント：

超短パルスレーザーの幅広い周波数帯を活用し、周波数モード間の量子相関形成を大規模かつプログラマブルに実現することで、量子演算に用いることを目指してきた。波長多重化には2モードスクイーズドパルスの並行生成まで成功し、プログラマブル化にはゲートパルスの波形整形技術を確立し、周波数上のボゾンサンプリングの原理実証などに成功した。一方、周波数モードでのボゾンサンプリングのアプローチは挑戦的であったが、既存のハード技術では広い周波数域を用いるための群速度分散補償や超短パルスレーザーの高精度な制御が困難であったことなどにより、大規模化、周波数域の量子干渉実験、マルチモードスクイージング制御技術などが未達であった。このため、本方式の有効性を顕著に示す実験結果は得られなかった。

原著論文数は11件、講演数は59回(招待講演数は19回)であった。

今後、これまでの研究過程で得られた知見を基に成果の論文化や知財化を期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ダイヤモンド量子セキュリティ
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）
研究代表者
小坂 英男（横浜国立大学 大学院工学研究院 教授）
主たる共同研究者
加藤 宙光（産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター
上級主任研究員）
寺地 徳之（物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 主席研究員）

3. 事後評価結果

○評点：

A+ 非常に優れている

○総合評価コメント

量子暗号通信の長距離化・多重化・高機能化のために、ダイヤモンド NV センターを用いて、完全ゼロ磁場下での発光・吸収方式による量子中継システムの要素技術を検討した。高い忠実度での量子もつれ発光や量子ゲート操作、テレポーテーション転写、¹³C 核スピンなどを利用した量子もつれ形成と検出、さらには量子誤り訂正など、量子中継に必要な要素技術を目標通り実現した。また、基盤技術となるダイヤモンド NV センターの作製技術や素子化技術も開発した。

原著論文数は 50 件、講演数は 173 回(招待講演数は 55 回)であり、ハイインパクトなジャーナルに多数論文を出版し、学会やプレスリリースでの成果発表も大変積極的に行われた。

今後、もつれ生成レートの高効率化や NV センターの集積化においては知財化についても注力していただき、企業との連携や他事業などを通して、本成果の量子インターネットに向けたさらなる発展を期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

齊藤 志郎 （日本電信電話（株） NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員・
グループリーダー）

主たる共同研究者

小野 行徳 （静岡大学 電子工学研究所 教授）

近藤 康 （近畿大学 理工学部 教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている

○総合評価コメント

超伝導磁束量子ビットを用いた高感度な磁気センサーに関しては、 20 スピン/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を実現し、 $1-7$ スピン/ $\sqrt{\text{Hz}}$ へも目途を立てた。また、高空間分解能化に関しては、素子サイズを大幅に凌ぐ空間分解能の実現を可能とし、二次元マッピングに向けた素子を作製した。現状では単一スピンの検出にあと一歩及ばないが、応用面では脳内の鉄イオンに対する ESR 測定例として鉄イオン添加ニューロンの磁化測定、極低温での微小領域の温度測定、さらに新たな展開として超伝導量子ビットで発生するデコヒーレンスの原因となっている量子 2 準位系の 2 つの要素の識別技術開発にも成功している。

原著論文数は 33 件、講演数は 102 回(招待講演数は 24 回)、特許出願数は 1 件であった。今後、知財にも注力しながら、量子センシングのさらなる高感度化・高分解能化を進め、本量子センサーの他の計測手法に対する優位性やキラーアプリケーションを示すことを期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 超伝導量子メタマテリアルの創成と制御
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）
研究代表者
仙場 浩一（情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 上席研究員）
主たる共同研究者
越野 和樹（東京医科歯科大学 教養部 准教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている

○総合評価コメント：

「深強結合」「窒化物超伝導」等の新しい物理現象、材料、デバイスを積極的に用いて、新奇な量子機能の探索が行われた。深強結合領域の研究では、ジョセフソン接合を辺共有した超伝導磁束量子ビットと LC 共振回路の量子結合系で世界トップレベルの深強結合領域を実現し、巨大な光シフトを観察した。また、深強結合に関連する理論研究でも非古典性、安定性、3 光子下方変換などに関して成果が得られた。ただし、量子メタマテリアルの創成には至っていない。一方、並行して進められた NbN 超伝導量子ビットの研究では、コヒーレンス時間を大幅に増大するなど材料系としての優位性を示す重要なデータが得られた。

原著論文数は 13 件、講演数は 99 回(招待講演数は 24 回)、特許出願数は 2 件であった。

今後、NbN が既存技術の蓄積した Al 系に比べてどこまで優位になるか、また深強結合系のメカニズム等を明らかにしてインパクトのあるデバイス創成にチャレンジすることを期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： オンチップ・イオントラップによる量子システム集積化

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

田中 歌子（大阪大学 大学院基礎工学研究科 講師）

主たる共同研究者

関根 徳彦（情報通信研究機構 テラヘルツ研究センター 室長）

早坂 和弘（情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 副室長）

3. 事後評価結果

○評点：

B やや劣っている

○総合評価コメント

従来型イオントラップでは実現不可能な量子システムを目指し、可搬型光クロック、新奇量子システム、デバイス等を検討した。可搬型光クロックに関しては、複数個のイオンによる信号増強を含めた小型化、さらに光源や光学系の 19 インチラックサイズへの格納を実現した。ただし、可搬型光クロックの安定度は、まだ目標より 1 桁足りておらず、今後の課題として残された。一方、イオントラップの集積化による新奇量子システムやデバイスに関しては、微細加工技術を用いて複数イオンの二次元配置やその間隔制御に成功し、オンチップ・イオントラップと結合する光集積回路や小型パッケージ技術を開発した。これらは、将来的に新規量子システムの構築につながる可能性がある。

原著論文数は 8 件、講演数は 69 回（招待講演数は 18 回）であった。

今後、知財にも注力しながら、可搬型光クロックやイオントラップ技術についてはいくつかの応用が考えられるので、さらなる性能向上や実証実験により本研究成果の論文化や応用展開を期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 強磁性量子ヘテロ構造による物性機能の創出と不揮発・低消費電力
スピンドバイスへの応用

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

田中 雅明 （東京大学 大学院工学系研究科 教授）

主たる共同研究者

ファム ナム ハイ （東京工業大学 工学院 准教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A+ 非常に優れている

○総合評価コメント

半導体スピントロニクス材料・デバイスに関して、縦型・横型スピン MOSFET を開発し、GaMnAs での非常に小さい電流によるスピン軌道トルクでの磁化反転に成功し、Fe 系ナローギャップ半導体での p 型、n 型両方における室温を超える強磁性転移温度を実現した。さらに、非磁性半導体と強磁性半導体のヘテロ構造において巨大な磁気抵抗効果の発現、また、これらを組み合わせたヘテロ構造での新しい磁気輸送現象の発見など、多くの課題で当初計画をほぼ上回るレベルで達成された。特に Fe 系ナローギャップ半導体は、これまでの強磁性半導体の定説を覆した結果であり、新しいメカニズムを提唱したことは基礎研究として高い評価に値する。

原著論文数は 97 件、講演数は 434 回(招待講演数は 94 回)、特許出願数は 1 件であり、半導体スピントロニクスに関して、多数の学術的に重要な成果をあげられた。

現状、基礎研究として優れた成果が出ているので、今後は知財にも注力しながら、強磁性半導体の学理構築、高性能・高機能な新デバイスの実現、さらにはそれを通じた新産業への貢献を期待したい。