

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

2018年度採択研究課題

- (1) 大野 圭司（理化学研究所開拓研究本部 専任研究員）
シリコン技術に立脚した室温動作スピン量子ビット
- (2) 小関 泰之（東京大学先端科学技術研究センター 教授）
量子光源による超高感度分子イメージング
- (3) 宗宮 健太郎（東京工業大学理学院 准教授）
量子制御を用いたオプトメカ結合型調和振動子のマニピュレーション
- (4) 永長 直人（理化学研究所創発物性科学研究センター
グループディレクター・副センター長）
ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御
- (5) 長谷 宗明（筑波大学数理物質系 教授）
ダイヤモンドを用いた時空間極限量子センシング
- (6) 山本 倫久（理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー）
半導体非局在量子ビットの量子制御

2017年度採択研究課題（1年追加支援課題）

- (1) 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

2023年10月31日(火曜日)

2023年2月 研究者からの研究報告書に基づき研究総括による事後評価(1年追加支援課題)

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

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 名誉教授

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

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： シリコン技術に立脚した室温動作スピン量子ビット

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名

研究代表者

大野 圭司 (理化学研究所開拓研究本部 専任研究員)

主たる共同研究者

森 貴洋 (産業技術総合研究所先端半導体研究センター 研究チーム長)

森山 悟士 (東京電機大学工学部 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

本課題は、シリコンをベースにしたトンネル電界効果トランジスタにおいて、室温動作可能なスピン量子ビットならびに高感度磁気センサーを実現しようとする内容であった。熱的な影響を受け難い深い準位を利用するというアイデアは興味深かったが、室温でのスピン閉塞に基づくゼロ磁場ディップまでを実証したものの、量子ビット動作は 50 K に留まった。また、ゼロ磁場ディップを応用した室温での磁場センサーでは、20 マイクロテスラの地磁気レベルまでの感度を実現したが、既存デバイスに対する優位性を示すまでには至らなかった。

原著論文数は 8 件、講演数は 49 回(招待講演数は 26 回)、特許出願数は 0 件であった。

今後、地道な研究を積み重ねることにより、室温動作に向けた道筋を示すこと、また本 CREST で得られた知見を現状のシリコン系スピン量子コンピュータや量子センサーなどに活か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： 量子光源による超高感度分子イメージング

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名

研究代表者

小関 泰之 (東京大学先端科学技術研究センター 教授)

主たる共同研究者

合田 圭介 (東京大学大学院理学系研究科 教授)

安井 正人 (慶應義塾大学医学部 教授)

山下 真司 (東京大学大学院工学系研究科 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

本課題は、誘導ラマン散乱顕微鏡の感度を改善するため、光源に量子を用いた量子増強誘導ラマン散乱顕微鏡に関する内容であった。波長 840 nm 帯のパルススクイーズド光源の開発、スクイーズド光の高精度位相同期、スクイージングレベルを制限する要因の解明、また超低損失な顕微鏡光学系などを開発し、10 mW を超える高い光パワーのパルス光源を用いる領域で量子限界を超える感度を実現し、量子光源を用いることの優位性を実証した。また、生物学応用に向けてラマン検出可能な薬剤を開発し、誘導ラマン散乱のイメージング画像を取得した。

原著論文数は 43 件、講演数は 122 回(招待講演数は 48 回)、特許出願数は 2 件であった。

今後、さらなる研究の進展により標準量子限界の 5dB を十分に超える高感度化、本手法の生体試料への有効性の実証、さらに企業との連携などにより、量子増強誘導ラマン散乱顕微鏡がさらに発展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： 量子制御を用いたオプトメカ結合型調和振動子のマニピュレーション

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名

研究代表者

宗宮 健太郎 (東京工業大学理学院 准教授)

主たる共同研究者

宇佐見 康二 (東京大学先端科学技術研究センター 准教授)

小森 健太郎 (東京大学大学院理学系研究科 助教)

高橋 優樹 (沖縄科学技術大学院大学量子情報物理実験ユニット 准教授)

武田 和行 (京都大学大学院理学研究科 准教授)

松本 伸之 (学習院大学理学部 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

本課題は、光バネの量子制御と言う特徴的な技術を発展させ、巨視的量子力学の検証、重力波望遠鏡の高感度化、光検出 NMR の高感度化について検討した内容であった。光バネの量子制御に関しては、光バネの実部、虚部を操作することの原理的実証に成功した。巨視的量子力学の検証に向けてはミリグラムスケールの振り子における基礎研究が計画通りに推進された。重力波望遠鏡および光検出 NMR の高感度化に関しては、定量的な目標には到達しなかったが、周波数制御スキューズド光の実験に成功し、新しい懸架手法、フォノンニック結晶構造を用いた振動子、光検出 NMR 技術の改良など、さまざまな進展があった。

原著論文数は 29 件、講演数は 124 回(招待講演数は 38 回)、特許出願数は 0 件であった。なお、本課題は ANR 連携であり、日仏合同シンポジウムの定期的な開催や若手研究者の交流などが行われ、日本とフランスとの国際的な研究協力体制が強化された。

今後、本 CREST を契機に始まったフランスとの協力関係が継続することや本成果をさらに発展させて重力波望遠鏡の高感度化に発展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： ナノスピン構造を用いた電子量子位相制御

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名

研究代表者

永長 直人 (理化学研究所創発物性科学研究センター
グループディレクター・副センター長)

主たる共同研究者

賀川 史敬 (東京工業大学理学院 教授)

十倉 好紀 (東京大学大学院工学系研究科 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

本課題は、ナノスピン構造に由来する巨大な創発電磁場について、理論と実験が共同研究した内容であった。ナノスピン構造に基づく創発インダクターを提案し、従来のスピン構造より短周期のRKKY相互作用によるナノスケールのスピン構造が $Gd_3Ru_4Al_{12}$ に形成されることを実験的に確認し、これをベースに創発インダクターを実験的に実証した。さらに、 YMn_6Sn_6 を使うことで室温での動作にも成功した。また、波動関数の反転対称性を崩すことによるダイオード効果の発現や反転対称性の破れた結晶におけるシフトカレントなどにも研究を展開した。

原著論文数は160件、講演数は230回(招待講演数は129回)、特許出願数は3件であり、ナノスピン構造に関して、多数の学術的に重要な成果をあげられた。

これまで基礎研究として優れた成果が多数出ているので、今後、本成果が実用的にも大きなインパクトを有するナノスピンドバイスに発展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： ダイヤモンドを用いた時空間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

研究代表者

長谷 宗明 (筑波大学数理物質系 教授)

主たる共同研究者

安 東秀 (北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 准教授)

重川 秀実 (筑波大学数理物質系 教授)

吉村 雅満 (豊田工業大学大学院工学研究科 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

本課題は、ダイヤモンド NV センターをチップに搭載した極限的なプローブ顕微鏡に関する内容であった。ダイヤモンド中の NV センターが有する反転対称性の破れに伴う非線形光学効果の発現を観測し、ダイヤモンド NV センターを組み込んだプローブチップを作製した。さらに、ナノプローブ顕微鏡システムを開発した。現状での E0 信号測定の分解能は、100 fs 以下の時間分解能、100-500 nm の空間分解能で、電界分布測定の可能性を示した。また、磁場に関しても高速で変化する信号を捕捉できることが示唆された。

原著論文数は 43 件、講演数は 180 回(招待講演数は 34 回)、特許出願数は 2 件であった。

今後、さらなる研究の進展により、古典限界を破る性能、応用面における本方式の明確な優位性を期待したい。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 半導体非局在量子ビットの量子制御

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名

研究代表者

山本 倫久 (理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー)

主たる共同研究者

江藤 幹雄 (慶應義塾大学理工学部 教授)

金子 晋久 (産業技術総合研究所物理計測標準研究部門 首席研究員)

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている

○総合評価コメント

本課題は、電子の波の性質を利用した非局在量子ビットという新たな概念に基づいた量子制御に関する内容であった。電子のチャンネル間のコヒーレント振動を量子ビットとして用いる研究を推進し、2量子ビットに向けた干渉実験を成功させた。さらに、電子間相互作用によるデコヒーレンスの影響を受け難い電子波束であるレビトンを用いても干渉実験に成功し、レビトンを用いた量子コンピュータの概念を提案した。また、物性物理として近藤雲の広がりを実証的に評価し、その形成メカニズムの解明や制御を実証した。

原著論文数は13件、講演数は100回(招待講演数は21回)、特許出願数は1件であった。なお、本課題はANR連携であり、日仏双方での研究活動を上手に活かして共同研究の成果をあげられた。

今後、重要な基礎研究と考えられるので継続的に研究を進めるとともに、既存の方法を用いた量子コンピュータの研究者とも交流しながら、本研究が新たなイノベーションに繋が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： 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 (2022 年度課題事後評価時) :

A+ 非常に優れている

○総合評価コメント

(2022 年度課題事後評価時のコメント)

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。

(2024 年 2 月追記)

1 年追加支援によって、これまでの結果を基に室温強磁性半導体に向けた基礎学理の構築、さらに新規な不揮発・低消費電力スピンドバイスの作製とスピン伝導特性、室温以上でのキュリー温度、超高速での磁化制御などを実現した。追加支援期間での原著論文数は 19 件、講演数は 60 回 (招待講演数は 19 回)、さらに特許出願数は 2 件であった。また、コロナ禍で中断されていたスピントロニクスと量子変換に関する国際ワークショップを開催し、半導体スピントロニクス分野に関する新たな展開を図られたことは、追加支援研究においても高く評価される。