

戦略的創造研究推進事業 CREST
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」
研究課題「ダイヤモンド量子セキュリティ」

研究終了報告書

研究期間 2017年 10月～2023年 3月

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)

§1 研究実施の概要

(1) 実施概要

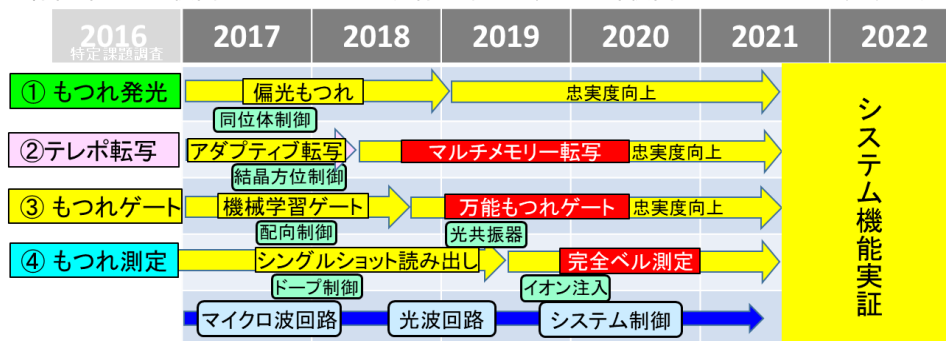
本研究は、超スマート社会の実現に不可欠な情報セキュリティを物理的に保障する、量子暗号通信の長距離化・多重化・高機能化を目的とする。従来の100 km以下の第一世代量子通信を1000 km級の第三世代量子通信に拡張するための量子中継による長距離化・多重化や、機器認証を量子的に行う量子認証による高機能化を目標とする。ダイヤモンド中の窒素空孔(NV)中心における光子と電子の自発的な量子もつれ発光・吸収を基礎とし、光子から核子への伝令付き量子テレポーテーション転写、電子と核子の誤り符号付きのホロミック量子ゲート、シングルショットによる核子間の完全な量子もつれ読み出し、炭素同位体配置の機械学習による量子認証などを行い、量子セキュリティの実用化に道を開くことをねらいとする。

当初計画(表1)に従い量子中継に不可欠な4つの基本機能①量子もつれ発光、②量子テレポーテーション転写、③量子もつれゲート操作、④量子もつれ測定の開発を並行して行い、全て完全ゼロ磁場下において偏光もつれ生成、マルチメモリ転写、万能もつれゲート、完全ベル測定などの当初目標を達成し、個別機能の高忠実度化を図った。また、システム機能実証として量子誤り訂正を実証した。さらに、発光吸収方式および単一光子干渉方式のシステム実証に挑戦した。

①量子もつれ発光では、NV中心のA₂励起状態からのゼロフォノン線発光を用い、発光した光子の偏光とNV中心に残した電子のスピンの間に量子的なもつれ状態を生成することに98%の忠実度で成功した。準共鳴励起により、非共鳴励起に比べて4倍程度の効率向上を図った。②量子テレポーテーション転写では、光子から炭素核子への符号付きの量子状態転写に忠実度94%で成功した。また、複数の炭素核子への選択的かつ排他的な量子状態転写を行うマルチメモリ転写にも成功した。さらに、通常は操作できない遠方の炭素核子への転写にも忠実度94%で成功した。③量子もつれゲートでは、誤り符号付きホロミック万能量子ゲートに成功した。電子や核子の単一量子操作に留まらず、電子-核子間の二量子もつれゲートにも成功した。また、電子のホロミック万能量子ゲートの忠実度を99.97%にまで向上するとともに、180 MHzの高速動作に成功した。さらに、通常は操作できない遠方の炭素と電子の量子もつれ生成にも成功した。同位体炭素配置の機械学習によるリアルタイム推定も行った。④量子もつれ測定では、二つの炭素核子間の量子もつれ状態をシングルショットで測定する完全ベル測定に忠実度90%で成功した。⑤システム機能実証では、量子もつれ生成と量子もつれ測定を組み合わせ量子誤り訂正の実証を行った。窒素と炭素同位体2つの3量子でビット反転および位相反転エラーに耐性を持たせた量子誤り訂正に忠実度83%で成功した。さらに、発光吸収方式と単一光子干渉方式のシステム機能実証実験にも挑戦し、実装可能性を示すとともに、両方式の性能比較と将来予測を行った。

またAIST、NIMSとの共同研究により、ダイヤモンド結晶成長における不純物濃度、炭素同位体濃度、結晶成長方位、NV配向、単一窒素イオン注入などの高精度制御を行うことで、世界最高級の99.99999999%に迫る不純物純度、99.998%の同位体濃縮、フリーエ境界の発光線幅15 MHzに迫る20 MHzのNV電荷安定性を達成し、微細マイクロ波アンテナによる量子ゲートの高速化とモノリシックSILによる発光吸収の高効率化を両立させたダイヤモンド量子中継素子の開発を行った。

表1. 提案書提出時の研究計画。黄矢印は代表機関（横浜国大）、緑枠部は分担機関（AIST・NIMS）、青矢印は代表と外部機関の協力による研究項目。



(2) 顕著な成果

＜優れた基礎研究としての成果＞

1. 量子テレポーテーション転写

概要: NV周辺の多数の炭素同位体を集積量子メモリとして利用すべく、NV中心の電子と結合した複数の炭素同位体のうち一つの炭素同位体への光の偏光状態のメモリ選択的な量子テレポーテーション転写に成功した。複数の炭素同位体の中から転写したい炭素同位体だけを電子ともつれた状態に予め用意することで、アダプティブなマルチメモリ転写の可能性を示した。本成果は*Nature Portfolio Journals*の*Communications Physics*に2019年に掲載された。

(備考) 本件に関してプレスリリースならびに文科省記者クラブにて記者会見を行い、日本経済新聞、日刊工業新聞など多くの記事が掲載された。そのニュースはScience誌の母体であるAAASが提供する世界最高峰のオンラインニュースサービスEurekAlert!において2019年の閲覧数ランキング世界第6位(掲載後半年間で約23万ビュー)の栄誉を獲得した。さらに、Nature誌の母体であるSpringer Natureの2019年のResearch Highlights16論文の一つに選出された。

2. ホロミック量子ゲート

概要: ダイヤモンド中でエラー耐性のある量子演算処理に成功し、室温万能量子コンピュータに道を開いた。ダイヤモンド中の電子や核子のスピンを量子ビットとして用い偏光制御したマイクロ波を用いて量子操作することで、操作エラーや環境ノイズに耐性のある万能なホロミック量子ゲート操作を実現した。室温かつ完全無磁場下でのスピン操作が可能となり、より汎用的な量子情報技術として発展が期待される。本成果は*Nature Communications*に2018年に掲載された。

(備考) 本件に関してプレスリリースを行い、日経新聞など多くの記事が掲載された。同時に、海外メディアサイトEurekAlert!、AlphaGalileoにも投稿を行い、8000件を超える総閲覧数(PV数)が発信後1か月以内にあった。

3. ホロミック光量子ゲート

概要: ダイヤモンド中の窒素空孔中心(NV 中心)に捕獲された単一電子スピンを、レーザー光を用い高速、高効率かつ高精度に量子ゲート操作を行うことに成功した。無磁場下で形成される独自のホロミックな量子ビットに対し、幾何学的に量子操作した点が高く評価された。本成果は*Nature Photonics*に2017年に掲載された。

(備考) 本件に関してプレスリリースを行い、日本経済新聞、日刊工業新聞など多くの記事が掲載された。

＜科学技術イノベーションに大きく寄与する成果＞

1. 量子誤り訂正

概要: 電子と光子の量子もつれ発光に成功した。また、集積量子メモリによる誤り耐性のある量子中継器を実現すべく、NV中心周囲の窒素と炭素同位体2つを用いた3量子の量子誤り訂正(Shor符号)に成功した。これらの成果は、いずれも*Nature Portfolio Journals*の*Communications Physics*に掲載された。

(備考) 本件に関してCRESTと大学の共同プレスリリースおよび記者会見を行い、日本経済新聞をはじめ多数のニュース報道があった。

2. 光シュタルクゲート

概要: 光シュタルク効果を用いた光ランダムアクセス量子メモリの原理実証に成功した。光を量子ビットの選択的なアクティブ化、非アクティブ化のランダムアクセス制御に使用し、量子制御

はマイクロ波およびラジオ波で行う新しい手法(光アドレス量子ゲート)を考案した。これにより高空間分解能と高忠実度が両立できることを実験で実証した。本成果は*Nature Photonics*に2022年に掲載された。

(備考) 本件に関してCRESTと大学の共同プレスリリースおよび記者会見を行い、日経新聞をはじめ多数のニュース報道があった。

3. 光電流検出

概要: ダイヤモンド結晶中の電子スピンの状態を、光電流検出という電氣的な手法で読み出すことに成功した。従来の手法に比べて単一のスピン状態を室温で容易に検出でき、ナノ空間分解能をもつ磁気センサなど量子センシングデバイスへの応用が期待される。また、ここで実施したダイヤモンド試料作製法は単一 NV 中心を表面極近傍に形成するユニークな手法である。本研究は独・ウルム大学、筑波大学などとの共同研究である。本成果は *Science* に掲載された。

(備考) 本件に関してプレスリリースを行った。

< 代表的な論文 >

1. 量子テレポーテーション転写

概要: NV 周辺の多数の炭素同位体を集積量子メモリとして利用すべく、NV 中心の電子と結合した複数の炭素同位体のうち一つの炭素同位体への光の偏光状態のメモリ選択的な量子テレポーテーション転写に成功した。複数の炭素同位体の中から転写したい炭素同位体だけを電子ともつれた状態に予め用意することで、アダプティブなマルチメモリ転写の可能性を示した。

Kazuya Tsurumoto, Ryota Kuroiwa, Hiroki Kano, Yuhei Sekiguchi and Hideo Kosaka*,
“Quantum teleportation-based state transfer of photon polarization into a carbon spin in Diamond”,
Communications Physics (Nature Portfolio Journals), **2**, 74 (2019), DOI: 10.1038/s42005-019-0158-0

2. ホロミック量子ゲート

概要: ダイヤモンド中でエラー耐性のある量子演算処理に成功し、室温万能量子コンピュータに道を開いた。ダイヤモンド中の電子や核子のスピンを量子ビットとして用い偏光制御したマイクロ波を用いて量子操作することで、操作エラーや環境ノイズに耐性のある万能的ホロミック量子ゲート操作を実現した。室温かつ完全無磁場下でのスピン操作が可能となり、より汎用的な量子情報技術として発展が期待される。

Kodai Nagata, Kouyou Kuramitani, Yuhei Sekiguchi, and Hideo Kosaka*,
“Universal holonomic quantum gates over geometric spin qubits with polarised microwaves”,
Nature Communications, **9**, 3227 (2018), DOI: 10.1038/s41467-018-05664-w

3. 光シュタルクゲート

概要: 光シュタルク効果を用いた光ランダムアクセス量子メモリの原理実証に成功した。光を量子ビットの選択的なアクティブ化、非アクティブ化のランダムアクセス制御に使用し、量子制御はマイクロ波およびラジオ波で行う新しい手法(光アドレス量子ゲート)を考案した。これにより高空間分解能と高忠実度が両立できることを実験で実証した。

Yuhei Sekiguchi, Kazuki Matsushita, Yoshiki Kawasaki, and Hideo Kosaka,
“Optically addressable universal holonomic quantum gates on Diamond spins”
Nature Photonics, **16**, 662-666 (2022), DOI:10.21203/rs.3.rs-1461563/v

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 横浜国大(YNU)グループ(ダイヤモンド素子評価)

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)

研究項目

- ・量子もつれ発光の開発
- ・量子テレポーテーション転写の開発
- ・量子もつれゲートの開発
- ・量子もつれ測定の開発

② 産総研(AIST)グループ(ダイヤモンド素子化技術)

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)

研究項目

- ・素子化技術の開発
- ・ドーピング・フェルミレベル制御

③ 物材機構(NIMS)グループ(ダイヤモンド結晶成長)

主たる共同研究者: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)

研究項目

- ・NV配向制御ダイヤモンド結晶成長
- ・炭素同位体濃度制御ダイヤモンド結晶成長
- ・ダイヤモンド単一窒素イオン注入

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

国内外の研究者との連携によるネットワーク形成

- ・デルフト工科大学Delft University of Technology
集積量子メモリの最適量子操作に関する共同研究
関口助教が2018年に1か月間滞在。
- ・ミュンヘン工科大学Technical University of Munich
ダイヤモンド光共振器作製に関する共同研究
2名の教授が横浜国立大学量子情報研究センターの招へい教授に着任。
小坂代表が2018年に2日間滞在。
- ・ウルム大学Ulm University
ダイヤモンド中の多様な色中心探索に関する共同研究
1名の教授が横浜国立大学量子情報研究センターの招へい教授に着任。
倉見谷特別研究員が2018年に1か月間滞在。
寺地主席研究員が光電流を用いた単一NV中心のスピン状態観測に関する共同研究
において試料の提供。
寺地主席研究員がUlm大で作製したアンサンブル状にNV中心を持つ試料に関して試料
の評価で協力。
- ・ザールランド大学Saarland University
ダイヤモンド中の多様な色中心探索に関する共同研究
1名の教授が横浜国立大学量子情報研究センターの招へい教授に着任。
- ・メルボルン大学The University of Melbourne
ダイヤモンド磁気センシング感度向上に関する共同研究
寺地主席研究員がスピニコヒーレンスが長くなる¹²C濃縮高純度試料の提供。

- ハッセルト大学Hasselt University

寺地主席研究員が表面近傍に単一NV中心を形成した¹²C濃縮高純度試料の提供。

- フランス原子力・新エネルギー庁CEA

寺地主席研究員がスピンコヒーレンスが長くなる¹²C濃縮高純度試料の提供。

企業業界との連携・共同開発

- 株式会社東芝

総務省委託研究で連携。

量子中継器の多光子量子もつれ光源に関する研究開発

- 日本アイ・ビー・エム株式会社

ダイヤモンド量子コンピュータのIBMが開発したQiskitを用いたクラウド公開についての支援。

- 古河電気工業株式会社

総務省委託研究で連携。共同研究契約を締結し、受託研究費ならびに研究員2名を受け入れ。量子中継器の波長多重量子もつれ光源および波長変換モジュールに関する研究開発。

- 住友電気工業株式会社(ダイヤモンド結晶成長に関する共同開発)

共同研究契約を締結。CRESTに研究参加者として一部参加。研究員1名を受け入れ。

- セイコーインスツル株式会社

ダイヤモンドソリッドイマージョンレンズ作製に関する共同開発。

- NTTアドバンステクノロジー株式会社

ダイヤモンドソリッドイマージョンレンズ作製に関する開発。

- 株式会社オプトクエスト

量子中継器の構成部品のモジュール化に関する開発。