

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「グローバル量子ネットワーク」

## 研究終了報告書

研究期間 2016年 10月～2022年 3月

研究代表者：井元 信之  
(大阪大学量子情報量子生命研究セン  
ター 特任教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究課題では、量子コンピュータを含む次世代計算機に耐性のあるセキュアコミュニケーションをグローバルな規模で可能とする量子ネットワークに向けた基盤技術研究を行っている。我々は、このような研究を、2016年から「グローバル量子ネットワーク」と題して、世界に先駆けて開始した。その後、このような研究は、2018年には Science 誌において量子インターネットと題したレビュー記事が掲載され、欧州では「量子インターネットアライアンス」が組織され、2020年には、米国では DOE を中心に Quantum Internet Blueprint が取りまとめられ、法案化されたほか、大規模量子ネットワークの研究開発計画が欧米中で開始されるなど、グローバルに注目を集めている。このような「量子インターネット」を実現するためには任意のユーザー間に量子もつれを配信することが重要となる。現在の光ファイバー網を利用してこれを実現するためには、光ファイバーでの損失を抑制するだけでなく、光子を効率よく配信する「量子中継」が必要となる。

現在のネットワークでは光ファイバーでの光損失が少ない通信波長帯(1550 nm 帯)において、光増幅器を用いて長距離ネットワークを実現している。しかし、量子ネットワークでは光増幅器ではなく、量子中継が必要となる。その中核となる量子メモリを光ファイバー通信波長帯(1550 nm 帯)で動作させることで長距離化を可能にし、従来技術では数 km が限界である量子中継の基本ノード間距離を 100 km オーダーで可能にする技術を目指して研究を開始した。

量子メモリとして、100 km 伝送に必要なミリ秒程度の寿命を十分に達成できる冷却 Rb 原子に着目し、その量子状態を読み書きするための光子の共鳴波長 780 nm を 1550 nm 帯へ変換する量子周波数変換器を実現し、冷却 Rb 原子からの単一光子を 1550 nm 帯へ変換することに成功した。更に、あらゆる偏光状態に対応できる量子周波数変換器を開発し、冷却 Rb 原子と通信波長帯光子の量子もつれを実現した。当初の計画通り、NTT 実験グループの冷却 Rb 原子量子メモリおよび NICT グループの超伝導光子検出器を阪大グループに持ち込み、量子周波数変換器と組み合わせてシステム構築を行い、理論グループと共同で結果の解析を行い、これらの成果を得ることができた。また、同じ CREST 領域内の田中チームの早坂氏およびイギリスの Sussex 大学との共同で、トラップされたカルシウムイオンからの 866 nm の光子を 1550 nm 帯へ変換し、10 km ファイバー伝送に成功した。また、70 km 程度の送信が可能であるとの試算も得た。

これにくわえて、理論グループと連携により、阪大グループで「量子中継」の核となる「適応ベル測定」を光で実現する全光量子中継の原理を世界初で実証した。これには Physics World 誌に「Quantum internet comes closer」と題した記事が出るなど、重要な量子インターネット研究として世界的に認知され、米国の Quantum Internet Blueprint にも引用されている。また、世界的な新たな潮流の先陣を切る研究として、量子ネットワークの多重化手法を研究し、周波数多重化を用いた新たな手法を考案し、1400 モードにもなる大規模な多重化を実証した。さらに、超伝導光子検出器の高性能化、量子周波数変換器の高性能化および集積化技術の開発にも成功した。理論研究は、実験研究との連携以外にも最新の理論構築が大きく進展し、Twin-Field 量子鍵配送方式のセキュリティ理論の構築や CV 量子鍵配送における有限長の鍵生成の理論構築等に成功し、大きな注目を集めた。

本研究課題では「グローバル量子ネットワーク」と題して、量子インターネットの要素技術研究を行い、光通信、原子量子メモリ、超伝導光子検出器の総力を結集して、量子通信システムを構築に成功し、理論グループとも連携し、その評価を行うとともに、セキュリティ通信の理論構築に成功した。また、核となる量子中継の世界初の実証実験に成功し、日本だけでなく世界の量子インターネット研究を大きく前に進めた。

### (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. R. Ikuta, T. Kobayashi, T. Kawakami, S. Miki, M. Yabuno, T. Yamashita, H. Terai, M. Koashi, T. Mukai, T. Yamamoto, N. Imoto, “Polarization insensitive frequency conversion for an atom-photon entanglement distribution via a telecom network”, Nature Communications 9, 1997 (2018). [被引用数 53 調査日 2022 年 5 月 30 日]

概要:これまで偏光依存性のあった波長変換器をサニャック干渉計に組み込むことで、偏光無依存化した波長変換器を開発するとともに、冷却 Rb 原子も2モードで動作させ、冷却 Rb 原子量子メモリと通信波長帯光子のエンタングルメント生成を行い、高性能な超伝導単一光子検出器(SSPD)を用いて検出することで、その確認に成功した。この成果により、原子量子メモリが長距離量子通信に利用可能であることを示した。(本課題総力結集成果)

2. T. Walker, K. Miyanishi, R. Ikuta, H. Takahashi, S. V. Kashanian, Y. Tsujimoto, K. Hayasaka, T. Yamamoto, N. Imoto, M. Keller, “Long-Distance Single Photon Transmission from a Trapped Ion via Quantum Frequency Conversion”, Phys. Rev. Lett. vol. 120, 203601, 2018. [被引用数 59 調査日 2022 年 5 月 30 日]

概要:これまで、イオントラップを用いた量子コンピュータの研究は盛んに行われており、現在でも量子コンピュータの有力候補として超伝導と肩を並べる存在である。しかし、これを長距離通信に利用する試みはこれまでなかった。本研究では、量子周波数変換器をイオントラップからの単一光子に利用できることを初めて示し、従来到達できなかった 10km の長距離伝送に成功し、イオントラップにおいて、当時の世界最長記録を打ち立てた。また、特に改善がなくとも数 10 km 程度の単一光子の送信が可能であることを示した。(領域内他課題協力を含む国際協力成果)

3. Y. Hasegawa, R. Ikuta, N. Matsuda, K. Tamaki, H.-K. Lo, T. Yamamoto, K. Azuma, N. Imoto, “Experimental time-reversed adaptive Bell measurement towards all-photon quantum repeaters”, Nature Communications 10, 378 (2019). [被引用数 48 調査日 2022 年 5 月 30 日]

概要:量子情報通信をグローバルに実現するためには、量子中継の実現が重要となる。これまで、量子中継方式は多く提案されてきたが、すべての方式の核である「適応ベル測定」は実験的に示されていなかった。阪大グループは理論グループ(NTT, 富山大, トロント大)と協力して、この「適応ベル測定」を世界で初めて実現した。この実験において、これまで実現していなかった量子中継の基本原理を実現し、同時に全光量子中継の基本原理を初めて実現した。国際的に非常に激しい競争を勝ち抜いての世界初の実現は、インパクトが非常に大きい。(国際協力を含む理論グループと共著の阪大実験成果)

#### < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. K. Maeda, T. Sasaki, M. Koashi, “Repeaterless quantum key distribution with efficient finite-key analysis overcoming the rate-distance limit”, Nature Communications, 10, 3140, 2019. [被引用数 50 調査日 2022 年 5 月 30 日]

概要:量子通信プロトコルに関して、Twin-Field 量子鍵配送方式のセキュリティ理論の構築を行った。Twin-Field 方式は、中央受信局を信頼する必要がないため、2 者間距離が量子鍵配送の距離とみなせるが、従来の 200km 程度の限界をおよそ倍に延ばし、さらには一方向型の原理限界性能も超えると期待されていた。その完全なセキュリティ証明は未解決であったが、今回有限長の統計揺らぎも考慮した完全な証明により、現実的な時間内で一方向型の原理限界性能を超えることを示した[原著論文 5]。これにより量子暗号通信のさらなる応用が拓けた。

2. T. Matsuura, K. Maeda, T. Sasaki, M. Koashi “Finite-size security of continuous-variable quantum key distribution with digital signal processing”, Nature Communications 12, 252 (2021). [被引用数 21 調査日 2022 年 5 月 30 日]

概要:連続量(CV)量子鍵配送において、これまでに有限長のセキュリティの証明が出来ていたプロトコルは、送信機が光の複素振幅の連続値をガウス分布に基づいてサンプルするもので、デジタル信号処理でそのまま実装することはできなかった。本研究によって、デジタル信号処理で実装可能な連続量量子鍵配送の有限長のセキュリティを初めて解決した。本成果は Nature Communications 誌に掲載され、Editors' Highlights の Quantum 部門に選出された3)。

3. 特許出願 出願番号: 2019-037650 出願日: 2019/3/1

発明の名称: 光子検出装置

発明者: 竹内 尚輝、三木茂人、寺井弘高

出願人: 国立大学法人横浜国立大学、国立研究開発法人情報通信研究機構

概要:SSPD をアレイの研究開発において、冷凍機中の SSPD ピクセルを読み出すために用いることができるケーブル数には上限があるため、ピクセル数の増加は困難であるが、本発明は、少ないケーブル数で SSPD ピクセルの情報を読み出すことができるイメージセンサの構成方法を提供する。具体的には、SSPD と同じ低温中に置かれた超伝導回路が SSPD アレイの時空間情報をエンコードすることで、少ないケーブル数での読み出しを可能にする。本発明により、これまで困難であった近赤外での高感度イメージングが可能になり、バイオイメージングやレーザーセンシングの分野にブレイクスルーをもたらすと考えられる。

<代表的な論文>

1. R. Ikuta, T. Kobayashi, T. Kawakami, S. Miki, M. Yabuno, T. Yamashita, H. Terai, M. Koashi, T. Mukai, T. Yamamoto, N. Imoto, "Polarization insensitive frequency conversion for an atom-photon entanglement distribution via a telecom network", Nature Communications 9, 1997 (2018). [被引用数 53 調査日 2022 年 5 月 30 日]

概要:これまで偏光依存性のあった波長変換器をサニャック干渉計に組み込むことで、偏光無依存化した波長変換器を開発するとともに、冷却 Rb 原子も2モードで動作させ、冷却 Rb 原子量子メモリと通信波長帯光子のエンタングルメント生成を行い、高性能な超伝導単一光子検出器(SSPD)を用いて検出することで、その確認に成功した。この成果により、原子量子メモリが長距離量子通信に利用可能であることを示した。

2. T. Walker, K. Miyanishi, R. Ikuta, H. Takahashi, S. V. Kashanian, Y. Tsujimoto, K. Hayasaka, T. Yamamoto, N. Imoto, M. Keller, "Long-Distance Single Photon Transmission from a Trapped Ion via Quantum Frequency Conversion", Phys. Rev. Lett. vol. 120, 203601, 2018. [被引用数 59 調査日 2022 年 5 月 30 日]

概要:これまで、イオントラップを用いた量子コンピュータの研究は盛んに行われており、現在でも量子コンピュータの有力候補として超伝導と肩を並べる存在である。しかし、これを長距離通信に利用する試みはこれまでなかった。本研究では、量子周波数変換器をイオントラップからの単一光子に利用できることを初めて示し、従来到達できなかった 10km の長距離伝送に成功し、イオントラップにおいて、当時の世界最長記録を打ち立てた。また、特に改善がなくとも数 10 km 程度の単一光子の送信が可能であることを示した。

3. Y. Hasegawa, R. Ikuta, N. Matsuda, K. Tamaki, H.-K. Lo, T. Yamamoto, K. Azuma, N. Imoto, "Experimental time-reversed adaptive Bell measurement towards all-photon quantum repeaters", Nature Communications 10, 378 (2019). [被引用数 48 調査日 2022 年 5 月 30 日]

概要:量子情報通信をグローバルに実現するためには、量子中継の実現が重要となる。これまで、量子中継方式は多く提案されてきたが、すべての方式の核である「適応ベル測定」は実験的に示されていない。阪大グループは理論グループ(NTT, 富山大, トロント大)と協力して、この「適応ベル測定」を世界で初めて実現した。この実験において、これまで実現していなかった量子中継の基本原則を実現し、同時に全光量子中継の基本原則を初めて実現した。

国際的に非常に激しい競争を勝ち抜いての世界初の実現は、インパクトが非常に大きい。

## §2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 「阪大」グループ

研究代表者: 井元信之 (大阪大学量子情報・量子生命研究センター特任教授、大阪大学名誉教授)

研究項目

・量子通信システム

#### ② 「NTT 実験」グループ

主たる共同研究者: 向井哲哉 (日本電信電話株式会社NTT物性科学基礎研究所・量子光物性研究部、主任研究員)

研究項目

・冷却原子量子メモリの開発

#### ③ 「NICT」グループ

主たる共同研究者: 三木茂人 (国立研究開発法人情報通信研究機構・フロンティア創造総合研究室、主任研究員)

研究項目

・高効率・低雑音を兼ね備えた光子数識別器の開発

#### ④ 「東大」グループ

主たる共同研究者: 小芦雅斗 (東京大学工学研究科、教授)

研究項目

・光による原子集団の制御測定理論と量子通信プロトコルの開拓

#### ⑤ 「富山大」グループ

主たる共同研究者: 玉木潔 (富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授)

研究項目

・量子暗号プロトコル提案・理論的解析

2018 年まで、以下のグループも理論グループとして参加。「さきがけ」に採択のため、「阪大」グループの研究参加者として参加。

#### ⑥ 「NTT 理論」グループ

主たる共同研究者: 東浩司 (NTT 物性科学基礎研究所・量論 G・特別研究員)

研究項目

・量子通信プロトコル提案・理論的解析

### (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

本研究チームで開発される量子周波数変換器、量子メモリ、超伝導光子検出器および理論研究の成果は、他の多くの物理系に対しても利用できる大きな広がりを持ったものである。すでに、同じ CREST 領域の田中チームの主たる共同研究者である早坂グループとの共同研究により、Ca<sup>+</sup>イオンとの共同研究も行い重要な研究成果を得ている。また、同じ CREST 領域で Cs 原子を用いた共振器 QED 系の研究を行う青木チームとの連携も進めた。その他の物理系とも十分に連携が可能で、国内のネットワークの拡大に努めている。海外においても Ca<sup>+</sup>イオ

ンとの共同研究としてイギリスのサセックス大学の Matthias Keller 教授との研究がある。理論的な研究としては量子暗号の大家であるカナダトロント大の Hoi-Kwong Lo 教授との連携など着実にネットワーク形成を行っている。現在、民間 IT 企業との量子インターネットに関する連携計画もコンソーシアム設立に至り、今後の拡大に期待が持てる状況である。NICT グループの SSPD も我々以外からも引っぱりだこになって来た。