



ムーンショット目標 6

2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

終了報告書

スケーラブルで強靱な
統合的量子通信システム

永山 翔太

慶應義塾大学 大学院メディアデザイン研究科



1. 研究開発プロジェクトの実施期間

令和4年10月1日～令和7年11月30日

2. 研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

量子コンピュータの性能は発展し続けていくが、いつの時代にも、技術の発展度合いに起因する限界性能がある。分散型量子コンピューティングは、複数の量子コンピュータを接続することで、その時代の量子コンピュータの限界性能を超えた計算性能を実現するメカニズムである。この実現には、単に多数の量子コンピュータをネットワーク接続するだけでなく、それぞれの処理能力を統合的に活用し、全体として一体的な量子アプリケーションを実行可能にする分散量子情報処理環境の構築が不可欠である。そのような環境を実現するため、本プロジェクトでは、量子ネットワークコンポーネントの開発や、量子ネットワークのプロトタイプ実装・評価を行うと共に、それらから報告されるデータ等を基に、産業化可能な分散型量子コンピュータアーキテクチャを設計するための研究を実施した。PJ 開始時において分散型量子コンピュータアーキテクチャの研究は世界的にも未開拓で、その膨大なデザイン空間の中で適切な設計の特定はできない状態であったが、本プロジェクトの成果により、利用すべきデザインを得た。特に、大量の量子データを扱っても計算資源の競合による性能低下を起こしにくいという規模拡大の恩恵をトレードオフなく素直に享受できるスケーラブルな量子ネットワークの基本設計指針を得たことは、量子コンピューティングの未来と産業化に向けた大きな飛躍となった。このプロトタイプ開発で培った知見を活用して研究した、通信資源管理を伴う高信頼な量子コンピュータネットワークプロトコルの提案は、量子情報工学における世界最大の国際会議 IEEE Quantum Week においてアワードを受賞した。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

2020 年代に入り世界的に量子コンピュータ間インターコネクトへの関心が急速に高まる中、本プロジェクトでは、そのような量子インターコネクトのプロトタイプ開発環境を構築した。各項目において、量子ハードウェアやそれらを制御するデバイスといったコンポーネントの開発や、ネットワークに接続されたノード間の協調動作を制御するプロトコルやシステムの研究開発、アプリケーションを分散型量子コンピュータに適合させる研究による性能要件の精緻化を行い、これらの成果を統合してプロトタイプ開発と評価を行った。この統合実装・評価環境は川崎市が運営するビジネスインキュベーションセンターに設置し、産業化にスムーズに移行できる環境とした。

本プロジェクトの第一の重要成果は、量子コンピュータの大規模化に必要な量子インターコネクットの要件を明確化し、スケーラブルな接続構造の設計指針を提示したことである。ここでいう量子インターコネクットとは、個々の量子コンピュータを結ぶ物理的な通信路、ネットワークポロジ、量子もつれ生成・配送のプロトコル、経路制御、制御ソフトウェア、および誤り訂正された量子計算との接続が一体となった、分散型量子コンピュータのための相互接続基盤を指す。

その代表的な成果として、多数の量子コンピュータを低遅延・低損失・柔軟に接続する新規トポロジ“Q-Fly”を提案した。Q-Flyは、古典スーパーコンピュータ(HPC)分野のインターコネクット設計の考え方を踏まえつつ、量子ネットワーク固有の制約を考慮して設計された量子コンピュータ向けインターコネクットである。この検討を通じて、量子コンピュータ間の接続では、誤り確率や通信成功率だけでなく、光子損失、経路長、スイッチング構成、誤り訂正、通信需要、デバイス、制御プロトコル等が、分散量子計算全体の実行時間や資源効率に影響を与え、統合的に評価する必要があることを明確化した。これにより、将来の量子データセンターや分散型量子計算に向けて、量子コンピュータをどのような構造で接続し、どのような指標で設計・評価すべきかという課題に対し、具体的なアーキテクチャと評価観点を提示した。

この設計指針は、各項目で取り組んだ成果を集積して得られた。光ネットワーク技術については、ノード間量子もつれ生成とネットワーク制御を行う量子ルーターの実証を進めた。光スイッチにより接続先を動的に切り替えながら高忠実度なノード間量子もつれ生成に成功し、星型ネットワーク構成を基礎とする量子インターコネクットの実装可能性を示した。また、多ノード化に向けて、1 光子干渉技術に基づく低損失な多ノード間もつれ生成を基本とする基盤ネットワーク技術を実証した。

量子メモリについては、バッファリング/中継、多重化、配送、同期を支える技術として機能開発を進めた。これらの成果は、光ネットワーク上で生成された量子もつれを柔軟かつ効率的に利用するための基盤技術であり、将来のさらなる拡張を支えるものである。

さらに、上位レイヤープロトコルおよびアプリケーションについては、量子インターコネクットが量子コンピュータと協調動作して分散量子計算環境として機能するための理論・プロトコル・アーキテクチャ検討を進めた。複数の量子ノードから構成される分散型量子コンピュータ全体を一つの量子系として捉え、その量子性を評価するための理論的検討を行った。また、量子アプリケーションを分散的に実行するための研究を通じて、分散量子計算環境に必要となる上位レイヤープロトコル、資源管理、ノード間協調、アプリケーション実行アーキテクチャに関する知見を蓄積した。

PJ 実施中に、世界的にも量子コンピュータ間インターコネクットへの関心と投資は急速に高まった。IBMはCiscoと連携して量子コンピュータをネットワーク化する構想を公開した。IonQはスタートアップ企業Entangled Networks社等を買収し、量子コンピュータ間接続を自社のスケールアップ戦略に取り込んでいる。カリフォルニア工科大学(Caltech)のPreskill教授らが創業したOratomicの創業メンバーには量子インターコネクットの研究者も名前を連ねている。これらの動きは、量子コンピュータの大規模化において、複数の量子コンピュータを接続するネットワ

ーク技術が国際的な競争領域になりつつあることを示している。このようなムーブメントにさきがけて立ち上がった本プロジェクトは、多数の量子コンピュータをスイッチネットワークで接続するスケーラブルな量子インターコネクトをフルスタックで研究し、量子・デジタル、ハードウェア・ソフトウェアを統合するプロトタイプ開発を行い、シミュレーションによる現時点/将来での性能評価環境を構築し、Q-Fly トポロジーの発明、制御ソフトウェア開発などを一体的に推進し、世界を先導する成果を創出した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

本プロジェクトは延べ 200 人規模のプロジェクトメンバーが関わる多分野融合型の研究開発であり、これを効率的に推進するため、特に IT ビジネス向けのクラウドサービスを利用し情報共有・進捗管理・研究議論・ソフトウェア開発を一体的に支える運営体制を構築した。

国際連携については、令和 5 年度から米国ローレンス・バークレー国立研究所およびカリフォルニア大学バークレー校等から構成される米国学術ネットワークである QUANT-NET プロジェクトと協力関係を構築した。相互訪問や定期的な研究議論を通じて技術交流を進めた。更に、IEEE QCE (Quantum Week) においては複数年にわたって量子ネットワークエンジニアリングに関する国際ワークショップを共同開催して例年化し、国際的な研究コミュニティ形成も先導した。

広報・人材育成の面では、量子技術イノベーション拠点 (QIH)、Q-LEAP、MS 目標 6 等と連携してスプリングスクール・サマースクールを開催して若手研究者の育成し、アジア量子情報科学会議 (AQIS) サテライトワークショップの後援、日本物理学会でのシンポジウム開催、MS 目標 6 広報動画への出演、Nature 誌特集記事等への貢献等を行った。

本研究の成果を基にする民間企業との共同研究も複数実施している。

3. 研究開発プロジェクトの顕著な成果

(1) 目標達成に最も寄与する成果

本プロジェクトでは、拡張可能な量子通信ネットワークの基盤として、3 エンドノード+1 中継ノードからなる星型ネットワークのプロトタイプを実装した。本システムは、量子もつれ光源を含む量子光学系に加え、計測制御ソフトウェア、管理・監視システムを統合したものであり、光スイッチおよびベル測定回路を介して、任意の 2 ノード間でエンタングルメントスワッピングによりリモートもつれを生成できることを実証し、最大で 94% の高忠実度のもつれを生成した。さらに、モジュラ型量子計算機向け光インターコネクト Q-Fly、量子ネットワークの自動構成プロトコル、Bell 状態解析器プール向けスイッチング回路の最適設計を提案し、システムの大規模化に必要な設計指針を得た。加えて、チャネル選択型量子周波数変換や低雑音量子周波数変換を開発し、周波数多重・長距離化に向けた要素技術を高性能化した。これらにより、大規模で柔軟な分散型量子コンピュータネットワークの実現に向けた実証基盤を確立した。

(2) 代表的な論文

“Q-Fly: An Optical Interconnect for Modular Quantum Computers”, D.Sakuma et al., arXiv:2412.09299 (2024)

概要: モジュラ型量子計算機を効率的に接続する光インターコネクト「Q-Fly」を提案した。古典 Dragonfly トポロジーに着想を得つつ、光子損失を支配する光路長とスイッチ損失を考慮した全層解析を導入。量子プロセッサ、通信路、共有 Bell 状態解析器プール、そしてリソーススケジューラを統合した評価基盤を整備し、また 3 ノード試作機による物理実証で工学的課題を抽出した。データセンター規模の分散量子計算におけるベースライン設計として位置づけられる成果である。

“Automatic Configuration Protocols for Optical Quantum Networks”, A. Taherkhani et. al., 2025 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), Albuquerque, NM, USA, 2025, pp. 1263–1273, doi: 10.1109/QCE65121.2025.00141.

概要: 量子ネットワーク実験で従来手作業に依存していた、もつれている光子の対応関係を同定する仕組みおよび物理リンクの検出を自動化するプロトコルを提案した。古典 MAC アドレス相当の量子ネットワーク識別子の検討から、上位のトポロジー発見・リンク品質モニタリング・リソース命名・ルーティングへの拡張可能性まで理論的に整理した。その結果として将来これらの機器・装置の接続台数が増えた時にも、人手によるものではなくシステムによる管理・制御を可能にすることができ、ネットワークの拡大が容易になると共に信頼性のあるものになる。本論文は IEEE QCE Quantum Week の量子ネットワーク&量子通信部門において第 2 位の論文賞を受賞した。

M. Koyama, C. Yun, A. Taherkhani, N. Benchasattabuse, B. O. Sane, M. Hajdušek, S. Nagayama, and R. Van Meter, “Optimal Switching Networks for Paired-Egress Bell State Analyzer Pools,” IEEE QCE 2024, pp. 1897–1907 (arXiv:2405.09860).

概要: 量子ノードから放出される光子をペアにして Bell 状態解析器へ割り付けるスイッチング回路の最適設計を理論的に与えた。任意の入力2点を再配置可能かつノンブロッキングで隣接出力ペアへ送る平面構造として、 N 入出力に対し $\{N(N-2)/4\} \sim \{N(N-2)/2\}$ 個の 2×2 スイッチ素子で実現可能であることを示した。シリコンフォトニクス実装と整合する設計であり、損失とクロストークの抑制に直接寄与する。本成果に基づき特許第 7789330 号を取得した。

Shota Nagayama, Toshihiko Sasaki, Akihito Soeda. Backcasting Perspectives on Services of Future Quantum Internet. 2024 IEEE International Conference on Quantum Software (QSW), Shenzhen, China, 2024, pp. 12-18,

概要: 将来の量子インターネットが提供すべき具体的なサービスやアプリケーションを想定し、そこから逆算して必要となるソフトウェア・アーキテクチャやモジュール間インターフェースの要件を定義した。古典インターネットの発展モデルを参考にしつつ、量子特有の機能(量子もつれ等)を効率的に利用するためのレイヤー構造を提案し、将来的な通信プロトコル設計の基盤となる指針とプロジェクトの出口戦略を定義した。

Naphan Benchasattabuse, Michal Hajdušek and Rodney Van Meter, Architecture and protocols for all-photonic quantum repeaters, Proc. IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) DOI: 10.1109/QCE60285.2024.00217

概要: 大規模な相互接続型量子コンピュータを構築するには、量子リピーターを用いる方法もある。全光子リピーターは量子コンピュータ同士を高速で接続できるが、計算用のベル対生成には提案されていなかった。本稿では、全光子リピーターとメモリベースのリピーターおよびエンドノードをシームレスに連携させる方法と、そのための具体的なプロトコルを提供した。また、高速シミュレーションによる性能評価のために、明示的な状態生成と忠実度導出も提供した。IEEE QCE 2024 Best Paper Award 2nd Place

Satoshi Yoshida, Akihito Soeda, Mio Murao, "Reversing Unknown Qubit-Unitary Operation, Deterministically and Exactly," Physical Review Letters 131(12) (2023 年 9 月 19 日). 査読有り。

概要: 未知の量子操作を誤差なく反転させるための数学的条件を明らかにした。量子プロセスモグラフィのような多大な資源を要する手法に頼らずとも、特定の目的(操作の反転や評価)に特化することでリソース削減が可能であることを示唆しており、本課題の評価理論の着想に大きく寄与した。

"Localized Virtual Purification", Hideaki Hakoshima, Suguru Endo, Kaoru Yamamoto, Yuichiro Matsuzaki, Nobuyuki Yoshioka, Physical Review Letters 133(8) 1-7 2024 年 8 月 22 日

概要: 量子コンピュータ間に距離がある場合、相互作用が困難となるため、局所性を利用した効率的なノイズ除去が重要となる。本研究では、近未来量子コンピュータ上の量子シミュレーションを対象に、量子多体系の局所性を活用したノイズ除去・冷却手法を提案した。観測する

局所物理量の近傍の量子ビットにエンタングル測定を制限することで、従来の大域的な purification に伴う指数的な測定コストを抑制できることを理論・数値計算により示した。

J. C. A. Casapao, A. G. Maity, N. Benchasattabuse, M. Hajdušek, R. Van Meter, and D. Elkouss, “Disti-Mator, an entanglement distillation-based state estimator”, Communications Physics 8, Article 461, 2025.

概要: 本論文では、ノイズのあるエンタングルメント蒸留プロトコルからの測定統計を使用してベル対角状態パラメータを推定する方法を示した。これは、別途トモグラフィ手順を必要とせずに精製プロトコルからエンタングルメント品質の情報を抽出するというプロジェクト目標にも合致している。

(3) 代表的な特許

特許第 7789330 号(P7789330)「量子スイッチングシステム、制御方法及びプログラム」、令和 7 年 12 月 22 日登録、JST「ムーンショット型研究開発制度」課題に基づく早期審査対象出願

4. 研究開発プロジェクトの実施内容および成果

(1) 研究開発項目1: 強靱で大規模な通信網を実現する新しいネットワークアーキテクチャ・プロトコルの開発

研究開発課題1: 量子通信アーキテクチャ・プロトコルに関する研究開発
実施内容:

本課題(JPMJMS226C-101)は、永山 PJ「スケーラブルで強靱な統合的量子通信システム」のネットワーク階層を担う課題として、量子通信ネットワークのアーキテクチャ、リンク／ネットワーク層プロトコル、および分散量子計算と整合する論理層プロトコル設計を、理論・シミュレーション・小規模実装の3方向から統合的に実施した。研究開発は、(a) 物理層に近いハードウェア要件・スイッチング回路の最適化、(b) 中位のリンク層・ネットワーク層プロトコル、(c) 量子誤り訂正符号と接続する論理層プロトコル、および(d) ネットワーク末端ノードとなる量子計算機の誤り耐性アーキテクチャ、の4つを階層的に位置づけて進めた。これらは互いに独立した成果ではなく、データセンター規模での分散量子計算機を統合的な光インターコネクト「Q-Fly アーキテクチャ」として実現するという共通の上位目標のもとで設計することができた。研究開発項目内の他課題との相互関係としては、本課題で整備したネットワーク仕様・自動構成プロトコル・スイッチング回路は、項目2(量子光通信技術)で開発される波長変換器・もつれ光子源、項目3(量子メモリ・量子中継)で開発される量子メモリおよびリピータ、項目4(分散量子アプリケーション)で開発されるアルゴリズム・スケジューラを、一貫した通信システムとして接続するための上位設計を提供する。特に Bell 状態解析器プール周りのスイッチング設計(特許第 7789330 号)と自動構成プロトコル(QCE 2025 QNET ベストペーパー2位)は、項目2・3のハードウェア成果をテストベッド化する上で必須の基盤となっている。論理層の Entanglement Ejection プロトコルおよび中性原子量子計算機向けの消失誤り耐性方式は、項目4の分散量子アプリケーションが対象とする論理量子ビット間操作と項目2・3の物理層成果を結びつける役割を担っている。研究開発期間中、これらの成果は理論論文・国際会議論文・査読誌掲載・特許登録という幅広い形で結実した。

成果:

本課題ではマイルストーンとして、(i) データセンター規模の光インターコネクトアーキテクチャの確立、(ii) Bell 状態解析器(BSA)プールへの光子割り付け回路の最小構成設計、(iii) 量子ネットワークの自動構成プロトコルの整備、(iv) 表面符号上の論理-論理 Bell 対生成プロトコルの設計、(v) end-node 量子計算機の誤り耐性方式の確立、の5項目を設定した。最終成果として、Dragonfly 位相を量子ネットワーク向けに再解釈し、複数トポロジー・共有 BSA プール・リソーススケジューラを統合した光インターコネクト「Q-Fly」を設計し、3ノード試作機により低層工学課題を実機で体系化した(項目2、3との連携)。BSA プールへの光子割り付けについては、平面構造で rearrangeable / non-blocking な最小スイッチ構成を、N 入出力で $\{N(N-2)/4\} \sim \{N(N-2)/2\}$ 個の 2×2 スイッチ素子で実現可能であることを示し、特許第 7789330 号として登録された。運用層では光子検出の物理特性を用いたノード-TDC(時間-デジタル変換器)接続の自動同定および物理リンクの自動検出方式を開発し、IEEE QCE 2025 において QNET ベストペーパー2位を受賞した。論理層では、State Injection と Remote Lattice Surgery の中間に位置する決定論的プロトコル「Entanglement Ejection」を提案し、SI1000 ノイズモデルでしきい値直下の領域でポストセレクションを要さず従来 injection と同等以下の論理エラー率を達成した(項目4との連携)。end-node 誤り耐性層では、中性原子量子計算機の累積消失誤りに対し、コード変形で論理量子ビットを正常な原子配列へ逐次転送する k-shift 消失回復方式を提案し、論理エラー率の大幅改善をシミュレーションで実証した(項目2、3との連携)。以上を結合し、Q-Fly

上で BSA スイッチング・自動構成・論理-論理 Bell 対生成・end-node 誤り耐性が連続する 5 階層の通信システム設計を統合的に整備した。

課題推進者:永山翔太(慶應義塾大学・株式会社メルカリ、令和 6 年度まで)、寺元健太郎(株式会社メルカリ、令和 7 年度から)

研究開発課題2:古典システム・プロトコル実装

実施内容:

本課題では、強靱で大規模な量子通信網を実現するため、古典ネットワークの OSI 第2層、すなわちデータリンク層に相当する機能を量子ネットワーク上で実現するための古典システムおよびプロトコルの検討と実装を行った。隣接ノード間で特定の通信相手を指定して通信するための基本構造を検討した。具体的には、量子データと制御情報を分離する二重スタック構造、光ファイバーの物理分離、周波数分離、時間分割による制御情報伝送、さらにもつれ光子に制御情報を担わせる単一スタック構造について比較検討した。また、量子通信実験に不可欠な高精度時刻同期とタイムスタンプ取得のため、電光・光電変換系、光ファイバー伝送系 White Rabbit、ルビジウム原子時計、FPGA ベース TDC を組み合わせた実験基盤を構築した。なお、本研究開発課題の推進においては、研究課題 1(量子通信アーキテクチャ・プロトコルに関する研究開発)の優れた研究者陣との密接良好な協調関係が常に保たれていたことを付記しておきたい。

成果:

量子リンクプロトコルの古典側実装に必要な要素技術として、小型・低コストな FPGA ベース TDC を実装し、遅延線方式によりピコ秒級の時間分解能を得る見通しを示した。特に、PYNQ-Z1/Z2を用いた実装では、2 チャンネル観測、連続イベント取得、観測データの解析ワークフローを整備し、キャリブレーション後に平均約 18 ps 相当の分解能を確認した。また、White Rabbit とルビジウム原子時計を用いた高精度クロック同期基盤を導入し、複数装置間での周波数同期・位相同期・伝送路長補正に向けた実装方針を明確化した。さらに、BSA のタイミング調整問題を解析し、同期カスケードを避けるため、BSA 側で量子チャネルの光路を調整する方式が有効であることを示し、国際会議で発表した。加えて、古典制御への依存を低減する量子データリンク層 QDLL および量子インバンド制御、ESyM の可能性を整理し、次段階の量子通信アーキテクチャ設計に接続する成果を得た。

課題推進者:大野浩之(金沢大学)

研究開発課題 3:モジュール間インターフェースの研究開発

実施内容:

インターフェース初期設計と役割分担の整理として、光学系ハードウェア、高速古典システム、通信プロトコル間での役割分担を調整した。また、ルールセットに基づく再帰的な量子インターネットワーキングの枠組みについて検討を開始した。インターフェース詳細設計文書の作成とプロトコルの改良として、テストベッド実動に向けた仕様の詳細化を実施した。将来の量子インターネットサービスを想定したバックキャスティング的な要件定義、および量子ネットワークにおける Bell 状態測定器(BSA)のスケラブルなタイミング調整・同期アルゴリズムの構築を行った。さらに、アプリケーションからの競合要求に対するネットワークリソース割り当てアルゴリズムの最適化を行った。

令和 6 年度には Q-Fly アーキテクチャの検討として、Q-Fly アーキテクチャを対象に、性能を決定する要素の洗い出し、スイッチ構成方法による性能変化の評価、および方針の違いによって要求される送受信情報の要件定義を実施した。

成果:

インターフェース初期設計と役割分担の整理の成果として、システム動作を「経路決定とリソース予約」「回線のパラメータ推定と位置合わせ」「周期ずれ計測」「実データ蓄積」の 4 段階に分類し、各ノード(CPU、FPGA、物理系)の連携関係を可視化したインターフェース図を策定した。

インターフェース詳細設計文書の作成とプロトコル改良の成果として、システム全体図に基づく各コンポーネント(Application Software, Network Protocol, Hardware Driver 等)間の通信 API や接続方式を網羅した「改訂版インターフェースの詳細文書」を完成させた。また、提案したスケーラブルなタイミング同期手法やバックキャスティングに基づくサービス要件定義について、2024 年の IEEE QSW および IEEE QCE 等の主要な国際会議にて論文発表を行った。

Q-Fly アーキテクチャ検討の成果としては、検討結果を次期詳細設計文書へ反映する作業を進めていたが、令和 7 年(2025 年)1 月末日の課題推進者移籍に伴い、作業途中で本研究開発課題を終了することとなった。

課題推進者:佐々木寿彦(東京大学)

研究開発課題 4:1000 台規模のデータセンター遅延のネットワークプロトコル・オペレーション手法の研究開発

実施内容:

本研究課題の目標は、1,000 ノード以上に拡張可能な量子マルチコンピュータおよびデータセンターネットワーク向けのソフトウェアとプロトコルアーキテクチャを開発し、単一の共有計算を実行するための最大規模の構成をサポートすることである。プロトコル仕様の策定、アーキテクチャ概念の考案、古典および量子ハードウェアの開発、テストベッドネットワークソフトウェアの開発、そしてネットワークシミュレーションを通じてこれを実現した。

成果:

プロトコルと仕様:

ネットワークのデバイスレベル動作を制御するプロトコルを開発した。インターネット研究タスクフォース(IRTF)において、データセンター規模のネットワークに焦点を当てた 2 つのネットワークプロトコルアーキテクチャ仕様が現在インターネットドラフトとして審議されている。全光リンクとマルチホップパスの構築、およびそれらの古典的な制御に関する新しいアプローチを開発した。量子ネットワークにおけるエラーの効率的な管理について、研究開発課題 6 の Elkouss グループと共同研究を行った。光スイッチング Q-LAN およびデータセンターネットワークにおける多重化制御のための新しい手法を開発した。

アーキテクチャ:最も重要な成果は、グループに編成された光スイッチングベル状態アナライザを用いて多数の量子ノードを接続する Q-Fly ネットワークトポロジーの発明である。解析の結果、Q-Fly アーキテクチャは数万個のノードをサポートできることが示された。実用的な限界はグループ光スイッチの損失によって決まり、性能は光路長と偏光調整によって制限される。Q-Fly およびその他のデータセンターネットワークトポロジーで動作するアプリケーションの潜在的な性能を開発し、解析した。

ハードウェアとソフトウェア:グループスイッチの設計を開発し、特許を取得した。量子ネットワークテストベッドコンポーネントの低レベル制御のための新しいソフトウェアパッケージを 2 つリリースした。エンタングル光子ペア光源の構築と調整において共同研究を行い、スイッチングと測定データ処理を管理するための制御ソフトウェアを開発した。

シミュレーション:上記のタスクで使用する複数のシミュレーションパッケージを開発した。

課題推進者:Rodney Van Meter(慶應義塾大学)

研究開発課題 5:スケーラブルな量子通信ネットワーク・エッジアーキテクチャの研究開発

実施内容:

ボソニック符号や表面符号等多様な量子誤り訂正符号を用いた量子通信ネットワークの性質を解析し、その性能を評価した。また、量子ネットワークシステムとしての設計や評価を可能にする評価方法の定式化とネットワークの評価を行った。

成果:

ボソニック符号や表面符号、ハイパーグラフプロダクト符号など、様々な量子誤り訂正符号を用いて、量子通信ネットワークの性質と性能を評価することで、スケーラブルな量子通信ネットワークの設計指針を明らかにした。特に、物理的量子ビットと符号化された論理量子ビットの両方において光の損失から量子情報を守る効率の良い方法やパラメータ領域を数値的に明らかにした。また、量子ネットワークやプロトコルの量子的な性質の理解にとどまらず、量子ネットワークシステムとしての設計や評価を可能にする量子ネットワーク評価方法の定式化と量子ネットワークの評価は、量子通信のエッジネットワークとさらにネットワーク全体の設計に必要となる指針を与える。

課題推進者:根本香絵(沖縄科学技術大学院大学)

研究開発課題6: 短期的な分散量子システム向けのリソース認識プロトコル

実施内容:

本研究課題では、近未来の量子通信ネットワークおよび分散量子システムにおいて、限られた量子メモリ、有限のエンタングルメント生成レート、ノイズを含む局所操作といった制約を考慮しながら、エンタングルメントを効率的に生成・精製・評価するための理論的・数値的手法を開発した。特に、 n 個の不完全なエンタングル状態から k 個の高品質なエンタングル状態を得る一般的な精製プロトコルについて、グラフコードおよび Clifford 操作に基づく構成・評価手法を整備した。また、精製プロトコルの測定結果を利用して入力状態の性質を推定する手法を開発し、精製と状態評価を統合的に扱う枠組みを構築した。さらに、量子リピーターチェーンやより一般的なネットワーク構造において、どの精製・中継プロトコルが有効であるかを効率的に探索・評価するため、ヒューリスティック最適化手法の導入を検討した。特に、評価コストの高いリピータープロトコル探索に対してベイズ最適化を適用し、離散的なプロトコル空間を効率的に探索する方法を開発した。これにより、ハードウェアパラメータやノイズモデルに応じたプロトコル選択を可能にする、リソース認識型の評価基盤を整備した。

成果:

本研究課題では、近未来の量子通信ネットワークで実行可能なエンタングルメント精製プロトコルの設計・評価に関する複数の成果を得た。第一に、グラフコードを用いた n -to- k エンタングルメント精製プロトコルの体系的な構成法を示し、異なる精製プロトコルを数値的に比較するための基盤を構築した。第二に、精製プロトコル中の測定統計から Bell 対の状態パラメータを推定する Dist-Mator 手法を開発し、エンタングルメント精製が必要な状況において、追加的なトモグラフィの負担を抑えつつ状態評価を行えることを示した。第三に、量子リピータープロトコルの探索にベイズ最適化を適用し、ヘテロジニアスなリピーターチェーンにおける鍵生成レート評価およびプロトコル最適化の方法を提案した。これらの成果により、限られた量子リソースを前提とする短期的な分散量子システムに対して、精製、状態推定、リピータープロトコル評価を統合的に扱う理論的・数値的ツールを確立した。

課題推進者:David Elkouss(沖縄科学技術大学院大学)

研究開発課題7: 超伝導量子コンピュータのスケーラブルな光通信アーキテクチャ

実施内容:

本研究は SimPy を基盤とした離散イベントシミュレータを構築し、エンタングルドフォトンソース、ベル状態アナライザ、単光子検出器に加えて光学遅延線、スペクトルフィルタ、偏光コントローラ、自由空間リンクをモジュール化した。フォトンソースは実測 1550 nm 光源の帯域と位相条件を取り込んだジョイントスペクトル振幅サンプリングでスペクトル幅とエネルギー保存残差を 0.3 nm 未満に抑制し、検出器はバイアス電流依存の効率と暗部カウント率を経験的関数で表現、商用 NbN SNSPD と比較して平均絶対誤差約 1.95 % を実現した。成果:

モジュール単体の検証で、フォトンソースの中心波長・FWHM・相関係数は実測と 0.6 % 未満の誤差で一致し、検出器の飽和効率・暗部カウント率・ジッタも許容範囲内で再現した。システムレベルでは Q-Fly プロトタイプを忠実に再現し、干渉可視性、スワッピング可視性、FWHM、タイミング分散がすべて実測と 3 % ~ 11 % の誤差に収まった。これにより理論と実測のギャップを 30 % ~ 40 % から 3 % ~ 10 % に縮小し、デバイス変動がネットワーク性能に与える影響を定量的に評価できる基盤を提供した。

課題推進者: 谷本輝夫(九州大学)

(2) 研究開発項目 2: 量子光の精緻な制御を可能にする量子光通信技術

研究開発課題1: 量子光通信の高性能化技術の開発

実施内容:

本研究課題では、2 光子干渉に基づく量子もつれ光ネットワーク実現に向けて、テストベッド構築のための光学系全体の設計および光学回路の構築を行った。また、量子周波数変換器の信号雑音特性の改良や、周波数多重光量子ネットワークに適応した量子周波数変換の開発など、要素技術の高性能化に向けた研究を行った。

成果:

量子もつれ光源を 3 ノード分準備し、これらが接続された光スイッチ回路およびその後段に設置されたベル測定回路によって、任意の 2 ノード間で量子もつれ状態を生成できることを実証した(項目 5 との連携)。また、周波数多重光量子通信に基づくネットワーク型量子コンピュータ構築に向けて、特定の波長光子を任意の周波数に選択的に変換する量子周波数変換器の開発や、周波数多重光子から任意の単一周波数光子を選択的に変換可能な量子周波数変換器の開発を行った。

課題推進者: 生田力三(大阪大学)

研究開発課題2: 損失に強い量子光通信技術の研究開発

実施内容: 複数の離れた量子コンピュータ間を効率的に光接続するネットワークの手法と技術について、理論・実験研究を実施した。特にスター型の光ネットワークを想定し、通信路の損失に対して耐性があり、さらにベル状態だけでなく多体エンタングルド状態を量子コンピュータ間に配信するような手法の開発を行った。損失耐性を持たせるため、光で通常用いられる偏光光子等の 2 光子干渉型のエンタングルメントではなく、光子の有無の重ね合わせである 1 光子干渉型のエンタングルメントをベースとした技術開発を行った。

成果: 損失のある通信路で構成されたスター型ネットワークにおいて、中央で 1 光子干渉の量子回路による拡張されたベル測定を行うことにより、GHZ 状態、W 状態等の多体のエンタングルメントを、単純に伝送するよりも高い効率で伝送する新しい手法を提案し、その有用性を理論的に示した。また、1 光子で構成された W 状態の密度行列を局所微弱光との干渉により簡便に評価する手法を考案し、その原理を実験的に実証した。さらに、1 光子干渉型の量子もつれ交換により、量子中継 1 つ分のレート損失のスケールリングを実現できることを実験的に実証した。加えて、偏光光子と光子の有無の異なる自由度からなるハイ

ブリッドエンタングルメントを生成する技術確立し、これを1光子干渉型の量子もつれ交換と組み合わせることで、いわゆる2光子型の偏光もつれ光子対を量子中継1つ分のレート損失スケールで伝送することに初めて成功した。

課題推進者:武岡正裕(慶應義塾大学)

研究開発課題 3: 量子光通信の位相同期・安定化技術の開発

実施内容:

本研究開発課題においては、量子光通信のための位相の精密同期・安定化技術の開発を行った。すなわち、分散量子計算のために離れた量子ノードにおいて、互いのレーザーの位相同期を確立するための技術開発を行った。そのために必要な狭線幅レーザーの開発、異なる波長を用いたファイバー長制御手法の提案、実証を行った。

成果:

外部の環境ノイズから隔絶された安定な環境下におかれた光共振器に半導体レーザーの光を安定化することで、sub-kHz の線幅をもつレーザーを実証した。実現したレーザーを用いて 1 km の長さファイバーを介してつながる二つの量子ノードのマスターレーザーを位相同期させることに成功した。

また、量子通信用波長とは異なる波長を用いてファイバーノイズをセンシング、安定化するアイデアを提案し、実証した。

その他、当初の研究計画になかった成果として、二光子対発生用のポンプレーザーの開発し、セシウム原子を用いた周波数安定化、およびファイバーコムへの位相同期を実証することに成功した。

課題推進者:赤松大輔(横浜国立大学)

研究開発課題 4: 希土類量子メモリと量子光通信との光インターフェースの開発

実施内容:

量子コンピュータ研究開発の抜本的な加速・強化のためには、「分散計算力」の高い大規模ネットワーク化が必要不可欠であり、本研究課題では、光インターフェースとなる光共振器・デュアルバンド光子ペア量子光源の研究開発を行った。項目 5 との連携でのスケラブルなネットワークアーキテクチャに向けた光量子インターフェースハードウェアに昇華させるため、必要な設計として、量子メモリとの接続を前提とし更に光ファイバーネットワークでの低損失性も持たせられるよう、光子ペアの波長や線幅を調整する必要があり、そのための研究開発を行った。

成果:

狭線幅かつデュアルバンドの光インターフェースの開発に成功し、防振台の無い実地環境での評価を達成した。具体的には、共振ピークの取得、2 波長共振の達成、100 秒以上の共振の維持、位相整合条件による強誘電体結晶の長さ決定(mm の位まで)、強誘電体結晶の光共振器への導入、多重化デュアルバンド 2 光子の検出、線幅の決定評価(10 MHz 以下を実証)、結晶温度の最適化といった、当初設定された目標を達成する成果が達成された。さらに、統合的量子通信システムの実装のために、複数台の実装を行うことで、その再現性を示すことに成功した。

課題推進者:新関和哉(LQUOM 株式会社)

(3) 研究開発項目 3: 量子信号の中継・変換を実現する量子メモリ・量子中継

研究開発課題 1: 中継用量子メモリ・光インターフェースの研究開発

実施内容:

多重化量子メモリの開発を実施した。とくに希土類添加物質 Pr:YSO の不均一広がりおよそ 10 GHz の領域に、制御レーザーによる光アクセスを通じメモリ領域を生成し、任意時間保存時間延長および周波数多重度の開発を実施した。さらに周波数多重ベル測定に向けた機能の研究を実施した。

成果：

本課題ではマイルストーンとして、保存時間 $> 100 \mu s$ の実装、多重度 30 以上の実装、異波長チャンネル間ベル測定機能の獲得を設定した。最終的な成果として、保存時間 $100 \mu s$ 秒以上、多重度 50 以上、また異波長チャンネル間の Hong-Ou-Mandel 干渉観測によるベル測定につながる機能、および 100 MHz 分解能をもつシングルショット分光機能の開発を達成した。これらの得られた要素技術の成果を結合し、周波数多重度 80 以上の量子メモリおよび光子源による結合を達成した。

課題推進者：堀切智之(横浜国立大学)

研究開発課題2: 中継用量子メモリ光源安定化技術の開発

実施内容：

本研究開発課題では、偏波保持ファイバーを用いた高信頼性光コムを開発すると同時に、レーザー周波数安定化の新しい手法を開発し、ヨウ素安定化によって量子中継用各種レーザー光源の周波数安定化を実現する。ヨウ素安定化方式で実現される光周波数基準は光コムの周波数基準となる GPS 信号よりも周波数安定度が良いので、量子メモリ Pr:YSO 用の各種光源をより高性能で安定化することができる。

成果：

1010 nm 波長変換レーザーにヨウ素安定化を施した結果、周波数安定度が < 1 kHz であることを達成した。さらにこの周波数安定化スキームから、Pr:YSO 量子メモリに対応した、3 オクターブの周波数にわたるレーザー周波数制御の新しい手法が生まれた。1548 nm 光子伝送用レーザーに周波数安定化を施した結果、周波数安定度が < 1 kHz であることを達成した。偏波保持ファイバーを用いた高信頼性光コムに電気光学変調器などの速い制御ポートを導入し、光コムの繰り返し周波数をより周波数安定度の良い光周波数基準に位相同期することができた。さらに、2 台の光コムによる相対線幅評価の結果、開発した光コムの相対線幅が観測リミットの 1 Hz 以下であることを確認した。

課題推進者：洪鋒雷(横浜国立大学)

研究開発課題 3: スピン波によるもつれ光子発生の確実性向上に関する研究開発

実施内容：

原子スピン波 QED 系を用いた高読み出し確率のバッファ付き量子もつれ光源の実装に向けた技術開発を行った。原子冷却系、メモリ・光子インターフェース、単一光子測定系の構築を行い、メモリの初期化を含む原子スピン波量子メモリへの書き込み・読み出しプロセスの統合的な動作を確認し、メモリ読み出し効率の定量的な評価を行った。また、原子集団が持つ多自由度を活用したメモリ操作の多重化に向け、音響光学偏向器を用いた多重書き込み・読み出し用の光学系を構築した。

成果：

原子スピン波と光子を結合させる光共振器および共振器安定化用光源、光子を検出する単一光子測定系、そして原子集団の初期化から書き込み光照射、光子検出までのメモリ書き込みプロセスから成る、原子スピン波 QED メモリを用いたバッファ付き量子もつれ光源の実現に必要な主要要素を構築し、量子メモリへの書き込み・読み出しプロセスが統合的

に動作することが確認できた。この時のメモリ読み出し効率は 0.1 であった。また、最大 18 モードの独立な書き込み・読み出しが可能な多重化用光学系を実現した。

課題推進者：丹治はるか(電気通信大学)

研究開発課題 4-1: 量子メカニカルメモリの開発

実施内容：

ヘリウム冷凍機内での光・音波デバイス実装に向けての開発を実施した。低温環境下で電気および光配線を可能にするジグの開発、ならびにデバイスチップへの光導入のためのグレーティングカプラのテストを行った。

成果：

ヘリウム冷凍機への光導入ポートを作り入出力のテストを行った。また SAW 回路では実際 $T=300\text{mK}$ での測定を行い、超伝導化した SAW 回路の性能向上が測定された。共振器のサファイア基板上のニオブ酸リチウム薄膜の光回路へのグレーティングカプラによる光入出力が確認された。低温環境でのデバイス測定には至っておらず、マイルストーンの変換効率 $\eta = 1 \times 10^{-5}$ は達成されなかった。マルチモーダルな光・音波導波路系におけるブリルアン散乱の測定では、異なるモード間の選択則の違いや、異なる音波モードによる散乱スペクトラが各々のモードで分離される形で計測された。これらのマルチモーダルを、前方および後方散乱で包括的に観測し理論との比較をした。これらの高い整合性を確認するとともに、マルチモード導波路オプトメカニクスにおける重要な基礎測定を行った。

課題推進者：山崎歴舟(国際基督教大学)

研究開発課題 4-2: 量子メカニカルメモリの開発

実施内容：

本研究開発では、量子メカニカルメモリおよび量子トランスデューサーの実現に向け、薄膜ニオブ酸リチウム(LN)を用いた光集積回路および電気光学変調器の設計・試作・評価を行った。低損失光導波路形成に向けた微細加工プロセスの最適化、高 Q リング共振器の作製、さらにマイクロ波から光への広帯域変換を担う TFLN 広帯域 EOM の開発に取り組んだ。

成果：

薄膜ニオブ酸リチウム(LN)を基盤とする光集積・電気光学デバイス技術確立し、量子メカニカルメモリおよび量子トランスデューサーに資する複数の成果を得た。まず、LN 光導波路の低損失化に向け、電子線リソグラフィおよびドライエッチング条件を最適化した。特に、レジスト形成条件やエッチングガス条件を改善することで、滑らかな側壁を有するリブ型光導波路を形成し、難加工材料である LN において高品質な微細加工を実現した。次に、このプロセス技術を用いて 800 nm 厚の薄膜 LN 上にリング共振器を作製し、導波路幅や結合条件を最適化することで Q 値 10^5 級の光共振回路を実現した。これは、トランスデューサーにおける光場の閉じ込めを強め、変換効率向上に寄与する基盤成果である。さらに、広帯域 EOM の開発では、進行波型 TFLN 変調器において 5 mm 長デバイスで 220 GHz を超える電気 6dB 帯域を確認し、マイクロ波からサブテラヘルツ帯まで対応可能な電気光学変換の可能性を示した。加えて、EO 周波数領域イコライザを集積した変調器により、 >100 GHz 帯域、低 V_π 、低光損失を両立する実装モジュールを実現し、200 Gbaud を超える高速光信号生成にも成功した。これらの成果は、マイクロ波で書き込み光で読み出す量子メモリや、量子波長変換器として機能する量子トランスデューサーの高効率化・広帯域化に直結する重要な基盤技術である。

課題推進者：山口祐也(情報通信研究機構)

研究開発課題 4-3: 量子メカニカルメモリの開発

実施内容:

メカニカルデバイスを用いた長寿命なメモリ開発のため、表面弾性波共振器の損失原因の解明と、光との高効率変換のための共振モード体積微小化に取り組んだ。

成果:

バルク材料に関してはサブ GHz帯において 1 ms の長寿命共振器を実現できた。光と弾性波を両方閉じ込めることができる薄膜材料においては 2GHz 帯で 10 μ s の寿命を達成した。本研究で対象とした薄膜材料においては表面弾性波共振器のブラッグミラーにおける散乱による損失が支配的であることを明らかにした。

共振モード体積の微小化のために、集束型の共振モードを持つ共振器を薄膜材料を用いて開発した。波面を共振器中心で回折限界付近まで収束させることでモード体積微小化で生じる回折損を抑制しながら平面方向で 2 μ m まで弾性波ビーム半径の極小化を達成した。また波面を収束させることで生じる不要な高次共振モードを抑制する特殊な電極構造を理論的に提案し、その有効性を実験的に実証した。

課題推進者: 佐々木遼(理化学研究所)

(4) 研究開発項目 4: 量子情報の分散環境が可能とする分散量子アプリケーション

研究開発課題 1: 分散処理環境における量子性とその応用研究

実施内容:

現状のネットワーク技術の根幹構成要素である TCP/IP に相当するものが他の項目を通じて形成されてくるのを踏まえて、既知の物理理論・量子情報理論の知見を応用し、大規模分散量子計算を実現するために必要な量子アプリケーション(以下、アプリ)を作成するための基礎理論の構築および量子アプリそのものの構築を実施した。

成果:

令和4年度にリンク1本・単一1量子ビット計算機を対象とした量子性評価理論を完成させ、従来のトモグラフィを経由しない効率的な評価手法の基盤を築いた。令和5年度には、この理論を実際の実験系へ適用するための具体的な手順を特定し、数値解析を用いて実験で到達可能な量子性の予測値を算出した。本理論をリンク1本・2台の計算機からなる2ノード量子ネットワークへと拡張し、ネットワーク全体の品質を包括的に評価する手法を確立した。さらに、リンクを形成するベル状態の忠実度推定を組み込むことで、ノード内の操作エラーと通信路の品質を分離して評価する、より現実的かつ堅牢な量子ネットワーク性能評価の方法論を提示した。これらにより、既存の量子プロセストモグラフィに比べ、実験資源を大幅に削減しつつ、遠隔 CNOT ゲートの実装精度を定量的に評価可能な理論を構築できた。最終年度の令和7年度は、この理論に基づき、当プロジェクトが目指す多数の量子ノードから構成される量子ネットワークのテストベッド上でどれだけ量子性が発揮できているかを評価するための量子アプリケーションを考案した。

課題推進者: 添田彬仁(国立情報学研究所)

研究開発課題 2 分散処理プロトコルとユースケースの研究開発

実施内容:

分散処理環境におけるアプリケーション(以下、アプリ)に必要な運用環境全般の整備を推進した。特性の異なる複数のアルゴリズムを対象としたプロトコル開発、アプリの性能と所要リソースを議論するためのフレームワーク設計、テストベッドネットワークに適合する分散型アプリの設計、運用プロトコルおよび実装要件の詳細化、各アプリの要求リソースの定量化を行った。また、誤り耐性量子計算(FTQC)における物理量子ビットオーバーヘッドの削

減手法、および量子インターネットのアプリケーション層を下位層へ透過的に接続するプロトコル設計にも取り組んだ。他項目の課題推進者と継続的に連携し、テストベッドネットワークおよび将来の量子ネットワーク設計に適合した研究開発を推進した。

成果:

令和 4 年度には、プロトコル開発の対象とする特性の異なる複数のアルゴリズムを選定し、運用要件を分類するとともに、アプリの性能と所要リソースを議論するためのフレームワークを設計した。令和 5 年度には、テストベッドネットワークに適合した分散型アプリの設計のため、他項目の課題推進者と継続的に情報交換を行い、実装可能な運用プロトコルおよびアプリの実装要件を整備した。令和 6 年度には、誤り耐性量子計算における表面符号の物理量子ビットオーバーヘッドを通常配置の約 3/4 に削減する Dense Packing 手法について、具体的なコード変形手順とフック誤り回避型 CNOT ゲートスケジューリングを提案し、回路レベルのモンテカルロシミュレーションにより、符号距離の増加と物理誤り率の低下に伴って通常の表面符号と比較して低い論理誤り率を達成できることを実証した。あわせて、量子インターネットのアプリケーション層を下位層へ透過的に接続する RuleSet 生成フレームワークを構築し、アプリ要求から RuleSet 配布までの通信手順、必要情報、ならびに新たな Rule および中間表現を体系的に整備するとともに、状態機械および量子ネットワークシミュレータ QuISP によりその妥当性を検証した。最終年度となる令和 7 年度には、各アプリの要求リソースの定量化を進めるとともに、より先進的なネットワークにおける将来のアプリケーション設計とその効率的な運用方法の整備を行い、テストベッドおよび将来の量子ネットワーク設計に適合した研究開発を完成させた。

課題推進者:佐藤貴彦(慶應義塾大学)

研究開発課題 3:分散環境を用いた量子アプリケーションの理論提案

実施内容:

分散配置された量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子センサを量子ネットワークで接続することで実現される新しい量子情報処理の応用を理論的に研究した。具体的には、分散型量子コンピュータにおける入力情報の埋め込み方法が量子アルゴリズムの性能に与える影響を解析し、NISQ デバイスおよび FTQC を想定した量子機械学習の性能評価を行った。また、量子多体系の局所性を利用した効率的なノイズ除去・冷却手法を検討した。さらに、量子センサで取得した情報を古典情報に変換せず量子状態のまま量子コンピュータへ入力する手法や、量子シミュレータで得られた量子状態を重ね合わせを保持したまま量子コンピュータへ転送する手法を検討した。加えて、分散型量子ネットワークを用いた秘匿性を持つ量子アプリケーションについて、近未来の NISQ デバイスでの実装可能性を考慮しながら、理論的・数值的に解析した。

成果:

量子機械学習において、長距離相互作用を含むハミルトニアンを用いて入力データを埋め込むことで、局所ハミルトニアンを用いる場合に比べて表現能力が向上することを示した。具体的には、データアップロードに用いるハミルトニアンのエネルギー固有値の性質に由来するフーリエ成分の数を比較し、長距離相互作用を含む場合にはフーリエ成分が指数関数的に増加することを数値計算により確認した。また、量子多体系の局所性を利用することで、大域的な purification 操作を局所操作で置き換えられる条件を理論的に示し、その有効性を数値計算で検証した。さらに、量子センサで取得した情報を量子状態のまま量子コンピュータへ入力する手法により、位相板の識別性能を向上できることを示し、空間的相関を持つ量子センサネットワークが分離可能な量子センサより高い識別性能を示すことを解析的に明らかにした。量子シミュレータで得られた量子状態を量子コンピュータへ転送する手法では、基底エネルギー推定に必要な回路 depth を削減できることを示した。加え

て、分散型量子ネットワークを量子センサと接続することで、個別データを秘匿したまま統計量のみを直接取得する手法を提案し、量子フィッシャー情報量の解析により、個別データの情報は消失する一方で統計量に関する情報は有限に残ることを示した。
課題推進者:松崎雄一郎(中央大学)

(5) 研究開発項目 5:技術を統合・実証していくテストベッド・統合実装

研究開発課題 1:光技術による量子通信ネットワークの統合的実証

実施内容:

星型トポロジーネットワークは(リングトポロジー系を除く)全てのコンピュータネットワークの基本形となるため、星型トポロジー量子ネットワークをスケーラブルに実現できるかは、分散型量子コンピュータの実現可能性の試金石となる。この実現可能性を検証するため、本課題では、3 エンドノード+1 中継ノードからなる星型ネットワークを光技術でプロトタイプ実装した。このプロトタイプ実装には、各項目から提供される量子・古典、ハードウェア・ソフトウェアに跨るコンポーネントや技術を統合した。本課題で構築した検証環境において、ノード間量子もつれ生成及びそのネットワークサイズの拡張も含めた物理的な検証および拡張時に欠かせないプロトコルやシステムソフトウェア等の動作検証を行った。また、本プロジェクトで発案した、大量の量子データを扱っても計算資源の競合による性能低下を起こしにくい多端接続の恩恵を素直に受けられるスケーラブルな量子インターコネクト”Q-fly”の基本ブロックのプロトタイプ実装と評価も行った。

成果:

3 ノード+1 スイッチノードからなる星型ネットワークをプロトタイプとして開発し、マイルストーンで予定していた簡易統合試験を実施できた。その結果、量子ネットワークプロトコルに従って生成された量子もつれの忠実度がプロジェクトのマイルストーンとしている忠実度を超え最大で 94%の高忠実度を持っていることを確認した。これをもって 4 ノード光ネットワークにおける全体システムの動作実証も完了した。そしてこの高忠実度および生成レートを維持管理するための方法論および向上させていくための技術的改善の見通しを得た。

課題推進者:永山翔太(慶應義塾大学)

研究開発課題 2:量子ネットワークシステム実証実験のためのイオントラップ量子ノードの開発(高橋 PJ 連携)

実施内容:

本研究では、量子通信システムの実装実験に利用するイオントラップ量子ノードの開発を目的として、イオントラップ装置、蛍光捕集系、レーザー系の設計・調達・構築を段階的に進めた。特に、遠隔量子もつれ生成に向けて重要となるイオン蛍光の高効率捕集を主眼に据え、コンパクトかつ将来的な量子ネットワーク統合実証にも対応可能な実験系の構築を行った。まず、イオントラップ量子ノードの基盤となる実験系として、表面電極型イオントラップの設計を行った。トラップ電極については、基板表面から約 100 μm の位置にイオンを捕獲できる表面電極パターンを有する電極チップを設計・調達した。また、このチップを超高真空環境下で固定・運用するため、アルミ製固定治具や配線系を整備するとともに、ステンレス製真空容器を選定・調達した。設計に際しては、将来的に複数のイオントラップ量子ノードを配置した量子通信システムの統合的実証を見据え、小型で拡張性の高い構成を目指した。本研究課題における重要な技術課題の一つは、捕獲イオンから放射される蛍光の高効率捕集である。このため、開口数(NA)0.65、作動距離 10 mm の長作動距離対物レンズを選定し、真空槽外部からイオン近傍まで接近させて蛍光捕集および撮像を

行う光学系を構築した。この構成により、真空窓越しに顕微鏡観察が可能であることを確認した。蛍光捕集系については、単に撮像するだけでなく、捕集した蛍光を光ファイバへ高効率に導入することも目標とした。イオンを点光源とみなした場合、NA 0.65 の光学系による分解能は約 400 nm となり、このスケールが撮像倍率 1 倍時のイオン像サイズに対応する。そこで、結像レンズの焦点距離を適切に選定することで、イオン像サイズを光ファイバのモード径へ適合させる設計を行った。利用する光ファイバおよび結像レンズの組み合わせを検討した結果、イオン蛍光を光ファイバへ約 89 % の効率で結合可能と見込まれる設計を得て、必要部品を調達した。さらに、この蛍光捕集系を利用して 2 光子干渉方式による遠隔量子もつれ生成レートの見積もりを行った。その結果、理論上約 80 Hz の生成レートが期待されることが分かった。この値は、現在報告されている世界最高水準である 128 Hz に迫る値であり、本研究で構築した蛍光捕集系が量子ネットワーク実験において十分有望であることを示している。ただし、これはあくまで設計値であり、実際の系では光検出器量子効率や光学損失などの影響を受けるため、さらなる高効率化が必要である。それでも、例えば 1 Hz 程度の生成レートであっても量子ネットワーク実証実験には有用であると考えられる。その後、前年度までに構築した蛍光捕集系、イオントラップチップ、およびレーザー系を統合し、実際のイオン捕獲実験を実施した。本研究ではストロンチウムイオンを対象イオン種とし、405 nm、422 nm、461 nm、1092 nm の各レーザーを、トラップチップ表面から約 100 μm 離れた捕獲位置へ照射した。蛍光観測系として、カメラによる撮像および光電子増倍管 (PMT) による光子計数を用いた結果、複数のストロンチウムイオンが実際に捕獲され、レーザー冷却されている様子を確認した。加えて、捕獲されたストロンチウムイオンからの蛍光をマルチモード光ファイバへ導入する実験も行った。ファイバ出力後に波長フィルタおよび光電子増倍管を配置して測定した結果、イオンが捕獲されている場合にのみ PMT 信号が増大することを確認した。また、自由空間光学系において問題となっていた背景雑音が、ファイバ導入により飛躍的に低減されることも確認された。

成果:

イオントラップ量子ノードとして光接続が可能となるよう光子を高効率に収集できる顕微鏡系の設計と構築、イオントラップ系の構築及び構築したイオントラップ系によるストロンチウムイオンの捕獲とレーザー冷却に成功した。捕獲したストロンチウムイオンからの蛍光を上述の顕微鏡系を用いて観測することにも成功し、さらにストロンチウムイオンの蛍光をマルチモード光ファイバに導入したうえで観測し、信号雑音比が改善することを確認した。これをもって光接続に有用なイオントラップ量子ノードの作製を行ったといえる。

課題推進者: 長田有登(大阪大学)

5. プロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

代表機関機能として、下記を実施した。

- **PM 活動・代表機関:** 慶應義塾大学
- **慶應義塾大学メディアデザイン研究科 永山研究室内に支援チームを構築:** 補佐 2 名、事務担当 2 名で構成。
- **学術研究支援三田本部:** 知財関係支援。
- **日吉事務室学術研究支援担当:** 手続き支援。
- **WIDE プロジェクトとの連携:** コンピュータネットワークの実現に関する助言・支援。
- **SFC コンソーシアム量子インターネットタスクフォース(QITF)との連携:** 産学連携やアウトリーチ、課題推進者間の連携。
- **慶應グローバルリサーチインスティテュート 量子インターネットセンターとの連携:** 2022 年 5 月設立の全学組織。QITF の慶應部分。テストベッド環境など、研究環境において連携。センター長(Van Meter)、副センター長(武岡)。
- **慶應グローバルリサーチインスティテュート サイバー文明研究センターとの連携:** 960~70 年代に世界初の運用可能な分散型コンピューティングシステムの構築に取り組み今日の全てのスーパーコンピュータやインターネットの基礎を築いた故 Prof. David Farber (2026 年 2 月逝去)との議論を含む、ネットワークアーキテクチャなどに関する助言・支援。
- **クラウドサービスを活用し、効率的なプロジェクトマネジメントを行った。** 日常的に Slack、Notion 等を連絡および情報共有の手段として活用し、PM・課題推進者間ならびに課題推進者同士のスムーズなコミュニケーションを実現した。

この他、会議体として、下記を実施した。

- **運営会議(期間中 3 回・JST および全研究開発機関):** 本プロジェクトの方針決定など管理運営に関する会議。方針決定のため通常審議を 1 回、課題推進者・研究開発機関の追加・変更のためメール審議を 2 回実施した。
- **全体会議(期間中 6 回・課題推進者傘下のメンバー含む):** 成果の共有、進捗確認、国内外の動向共有、共同開発の検討などを目的とする会議。必要に応じて互いの課題や分野への理解を深めるための会合としても開催した。
- **課題推進者会議(期間中 6 回・PM および課題推進者):** 主にプロジェクト単位での計画やマイルストーンの調整、課題の把握を目的として実施した。
- **サイトビジット(期間中 11 回・PM および PI):** PM が各 PI の研究拠点を訪問し、個別課題の計画に対する進捗の把握と懸念点の解消に努めた。
- **個別会議(随時・関係者):** 特段の研究相談や、人材育成・知財・産学連携・アウトリーチ・国内外連携・事業化など。必要に応じてオフサイトで実施した。

研究開発プロジェクトの展開

本プロジェクトにおいては、以下のような研究開発課題の追加が行われた。いずれもプロジェクト遂行上の必要性だけではなく、プロジェクト間連携の強化や国際的プレゼンスの向上に寄与するものであった。

- 令和 6 年度に項目 1 課題 6 が追加された。
量子ネットワークにおける各コンポーネントの通信性能を正しく認識し結果に応じてネットワークの挙動を最適化することが、高効率に分散処理を行い続けるための重要な

アプローチであると考えられ、そのようなネットワーク制御に利用できるリソース認識手法・評価手法の開発を意図した追加となる。

- 同年度中に項目 1 課題 7 が追加された。
- 量子トランスデューサと光の通信経路の fidelity をモデリングし、誤り訂正の Protokol を実行した場合のスループット・遅延についてシミュレーションを用いて明らかにすること、通信相手が超伝導量子ビットの場合とそれ以外のデバイスの場合のそれぞれの条件において Protokol や経路上に現れる要求を明らかにすること、超伝導量子コンピュータにおけるスケーラブルな光通信アーキテクチャを実現するための極低温環境に必要な古典エレクトロニクスのスケーラビリティを調査することを意図した追加となる。
- 令和 6 年度に課題推進者となった David Elkouss 氏(沖縄科学技術大学院大学(OIST))は量子ネットワーク研究で著名なデルフト工科大学の PI を前職とする研究者である。同課題推進者の追加を通し、その知見が本研究プロジェクトでの活用を図った。令和 5 年度から継続的にローレンス・バークレー国立研究所・カリフォルニア大学バークレー校などの合同チームから構成され、米国エネルギー省(DoE)の大型 PJ となっている QUANT-NET プロジェクトと、量子ネットワークアーキテクチャのオープン領域における協力関係を進展させた。同プロジェクトは量子ネットワークテストベッドプロジェクトである。同プロジェクトはアーキテクチャ設計の指針として通信ではなく分散処理を重要視しており、本プロジェクトの指針と合致した。
- QUANT-NET プロジェクトの責任者らを令和 7 年 3 月に日本に招き、本プロジェクトや、WIDE プロジェクトの他、日本のコンピュータネットワークに携わっている研究者や技術者との闊達な議論を行った。
- シカゴ大学と、量子ネットワークシミュレーターの相互検証を引き続き実施している。お互いのシミュレーションの妥当性や正当性の検証と向上に大いに貢献しており、機能強化においても役立っている。
- 本プロジェクトに取り組む中で得られた公知情報や課題感をもとに、株式会社メルカリが大阪大学 ELSI センターと共同研究を行った。この結果、同 ELSI センターから量子技術の ELSI に関するノートが複数公開された。令和6年度には、OIST にて開催した本プロジェクトの全体会議に大阪大学 ELSI チームを招待し、同会議内で量子技術とその社会課題の啓蒙・普及方法について実演を交えながら発表いただいた。

(2) 研究成果の展開

- 希土類量子メモリに関しては、参画機関の株式会社 LQUOM が継続的に事業化を推進している。
- Q-Fly を中心とする量子インターコネクトなどの研究成果を社会実装するためのスタートアップ企業「量子インターネットイノベーション株式会社」を 2025 年 3 月 31 日付けで立ち上げた。本企業の目的はスケーラブルな量子コンピュータネットワークを実現することであり、具体的には本研究で培われた量子光スイッチや量子ネットワーク、その制御システムを社会実装し、世界中で利用されることを目指している。
- グローバル展開としては、国際会議・国際的コミュニティ形成への貢献を通しての展開戦略を重視して活動した。このような活動は、「論文採択を含めたプレゼンスの向上、意義あるカンファレンス等の我が国への招致、国際的な研究動向等に相通じた我が国研究コミュニティの発展と世界的な貢献にとって重要である(出典:サイバーセキュリティ研究・産学官連携戦略ワーキンググループ最終報告)」ことから、継続して押し進めることとした。

- QUANT-NET プロジェクトやシカゴ大学の研究者らと合同で、量子コンピュータネットワークのテストベッド開発やそのエンジニアリングについて議論する BoF を IEEE QCE24 で、ワークショップを QCE25 にて開催した。同ワークショップの第二回開催が QCE26 で採択された。本ワークショップでは本 PJ の PM、QUANT-NET の代表者、Cisco 等の研究者を始め、量子ネットワークの重要ステークホルダーが登壇して一同に会し、若手研究者も含めて国際的に議論し、コミュニティ形成を行う場となっている。
- 永山 PM、添田 PI、Hajdusek メンバーが、トップカンファレンスである IEEE Quantum Week (IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering) の QNET Technical Paper Track Committee を務めた。
- 永山 PM、添田 PI、谷本 PI らが、小芦 PJ と連携して AQIS2025 のサテライトワークショップ Workshop on Fault-Tolerant Quantum Computer System Architecture を開催した。本プロジェクト内で発生した各技術および知財については、事業化や社会実装を前提とした利用を促進していく。
- 研究開発項目 1 課題 3(モジュール間インターフェース仕様)ならびに課題5(プロトコル)を中心としてそれぞれ設計した。モジュール間インターフェース仕様ならびにプロトコル仕様に関する成果は公開するものとし、これら自体では知財を取得せず、オープンイノベーションに供する。これらは IETF/IRTF の QIRG リサーチグループにて発表を始めている。我々が作成した仕様を元にする研究開発への世界的誘致を進めている。
- プロジェクト実施期間中、知財戦略として本プロジェクトで重視すべき研究領域・技術領域の洗い出しと特定を行った。
- 国際動向の調査には特に力を入れており、IBM が Cisco と連携して量子コンピュータをネットワーク化する構想や、IonQ によるスタートアップ企業 Entangled Networks 社や Qubitekk 社等の買収、Caltech の Preskill 教授や量子インターコネクト研究者らが創業した Oratomic、英国の量子インターコネクトスタートアップ Nu Quantum 等の動向について、当該研究グループや企業等から発表された論文の精査も含めて継続的な動向調査を実施している。
- ネットワークシステムを拡張していくためには現状の光学定盤上に組み立てられている光学系を何らかの形でデバイスに集積していく必要があったことから、世界的にも大規模で数多くの微細加工技術を研究開発している IMEC(Interuniversity Microelectronics Centre, ベルギー)を視察した。

(3) 広報、アウトリーチ

- **学術誌 ムーンショット特集記事への取材協力:** Nature 誌のムーンショット目標 6 特集記事にて、PM が取材協力した記事(<https://www.nature.com/articles/d42473-023-00441-w>)が公開された。
- **広報動画への出演:** PM が未来を訊く(https://youtu.be/vn_tOnLxzEQ?si=HX27SoXKoRBFPPyT)に出演し、本プロジェクトの広報を行った。
- **ホームページの公開:** 本プロジェクトの特設サイト(<https://sniq.org>)を開設し、広報に利用した。
- **講演依頼への対応:** プロジェクト期間中、複数の企業・団体から講演依頼があり、PM・PI をはじめとしたメンバーが登壇し、一般向けの広報を行った。
- **ワークショップ開催:** IEEE QCE、AQIS や IETF 等の学会において、PM らがワークショップを主催し、若手研究者の育成を図るとともに研究者に向けた広報を行った。

(4) データマネジメントに関する取り組み

クラウドを活用し、各種データについてデータアクセス権限を設定することで、円滑な協力とデータマネジメントの両立に努めた。研究開発プロジェクト終了後についても、公開可能なデータに関しては継続して展開し、広く活用を促す。

6. 研究開発プロジェクト推進体制図



知財運用会議 構成機関と実施内容

PM、JST、各研究開発機関と PM の招聘する有識者で構成した。

令和7年度までに1回開催し、プロジェクト成果の確認と終了後の知財取扱いについて確認した。

運営会議 実施内容

令和7年度までに3回程度開催した。全課題推進者で構成し、本プロジェクトの方針決定や課題推進者・研究開発機関の追加など、管理運営に関する内容を取り扱った。

項目会議 実施内容

随時開催。PM・各項目の代表者ほかで構成し、各項目でのプロジェクト推進上の課題の共有や、シンポジウムを開催する際の大枠の決定などを行った。