



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

実施状況報告書

2024 年度版

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 大学院政策・メディア研究科



1. 当該年度における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

プロジェクトの課題

分散型量子コンピュータの実現には、単に多数の量子コンピュータを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。その実現には、量子コンピュータ本体、通信インターフェース、量子通信ネットワークの 3 要素が求められる。特に、量子通信ネットワークは、大量の量子データを扱っても全体の性能低下を起こさない効率性、スケーラビリティ、耐障害性、および運用性が必要となる。

本プロジェクトでは、特に量子通信ネットワークを中心として研究開発を進め、通信インターフェースにも取り組む。ネットワークの構築に際しては、物理的ハードウェアと論理的アーキテクチャを統合的に設計し、小規模なプロトタイプの実装試験および大規模なシミュレーションを通じて性能検証を行う。このような開発により、分散量子コンピュータの処理性能向上を実現し、さらに量子情報が自由に流通する量子インターネットの構築にも寄与する。

本プロジェクトは、研究開発プログラム全体に対して分散型量子コンピュータの実用化に必要な基盤技術を提供し、他のプロジェクトにおいて開発される量子コンピュータのネットワーク化による早期の大規模誤り耐性量子計算の実現を目指している。

体制

本プロジェクトは、長期的な目標である量子メモリと光技術の両方を利用した量子通信システムの原理と技術の統合的な実証に向けて、各個別課題に着実に取り組む体制を構築している。研究開発項目 5 の課題 1 では、この長期目標を目指し、まず光技術による量子通信システムの原理・技術実証を目指している。そして、項目 1 から 4 は長期目標ならびに項目 5 の課題 1 からバックキャストして考えた、これらを構成する専門領域の具体的な課題の解決にあたる。プロジェクトの体制は、PM が課題推進者（以下、「PI」）として項目 5 の課題 1 を取りまとめ、各 PI が各々の専門性を活かしてこれに貢献する形になっている。

項目 5 の課題 1 で実証したシステムを用いて、イオントラップ量子コンピュータの接続と分散量子計算の実証を目指すため項目 5 の課題 2 を設定している。以上の取り組みにより、量子コンピュータネットワークの統合的な実証に向けた進行、分散量子計算の実証、個別領域での技術開発が同時並行で行われるよう体制を整えている。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

量子ネットワークテストベッドの構築と初期実証

量子コンピュータのスケーラビリティに関するボトルネックを解消するため、分散型量子処理システムの実証を進めた。具体的には、光量子リンクプロトコルのプロトタイプ実装を完了し、複数タイプの量子メモリ(1 光子/2 光子干渉、偏光/Fock、光中継/メモリ中継)を整理・推進するとともに、量子ルーター(量子スイッチ)の基本原理を実証した。さらに、量子コンピュータ間での量子リンクを介した計算速度の定量的な解析を実施した。

量子コンピュータ性能の定量的指標の策定

FTQC を想定し、FLOPS/LINPACK のように標準化可能な性能評価指標の提案を行った。これは分散量子システムの実際の運用環境に即した、包括的かつ定量的な指標設計を目的としている。

研究開発の詳細

研究開発項目1:新ネットワークアーキテクチャ・プロトコル開発

量子ネットワークの実証に向け、ハードウェア指標の最終的な定式化に着手するとともに、量子リンクプロトコルの古典的側面の実装を開始した。モジュール間インターフェース仕様を詳細化し、1000 ノード規模のシミュレーション拡張を通じて実装に向けた研究を進めた。また、ノイズ低減技術や動的ネットワーク設計指針を明確化し、異なる精製プロトコルの性能比較を数値解析によって実施した。

研究開発項目2:量子光通信技術の高度化

量子もつれ光ネットワークのラボ内実証に成功し、高速な量子ルーターの原理実証を進めた。また、光共振器におけるレーザー周波数安定化・狭線幅化を達成し、ノード間の周波數位相同期の実験を実施した。さらに、デュアルバンドの 2 光子発生系の構築を実現した。

研究開発項目3:量子メモリ・中継技術の推進

希土類を用いた量子リンクおよび中継技術の原理実証に成功し、量子メモリの保存時間延長に関する技術開発を行った。加えて、原子スピン波 QED メモリの開発を進め、超伝導量子ビット通信を支援するオプトメカメモリの設計を行った。

研究開発項目4:分散量子アプリケーションの展開

単一ノード環境向けに開発された量子性評価理論を、複雑な 2 ノード量子ネットワークへと拡張した。さらに、テストベッドネットワーク向けに分散型量子アプリケーションの設計を行い、量子コンピュータの性能評価および量子センサとの結合アーキテクチャ設計を実施した。

研究開発項目5:テストベッド・統合実装

3 エンドノード以上からなる星型ネットワークの構築を完了し、イオントラップシステムに蛍光捕集系を統合して実証実験を行った。

以上の研究成果により、量子ネットワークの実用化に向けた基盤技術を大きく前進させることができた。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

本プロジェクトでは、慶應義塾大学に PM 補佐と事務職員による支援体制を構築し、研究活動の統制と進捗管理を強化した。PM を議長とする会議体で方針決定や課題推進者の追加などを遂行し、課題ごとの進捗把握も項目会議や現地視察で行った。研究開発は QUANT-NET プロジェクトとの連携や国際標準化団体での活動を通じて国際連携を強化している。また目標6の他プロジェクトとも連携して超伝導量子技術との融合を推進している。インターフェース仕様はオープン仕様として GitHub で管理し、オープンイノベーションと競争を両立。ELSI 活動ではメルカリ社と大阪大学の連携を継続し、社会課題への対応を進めた。世界を代表する大規模ファウンドリである IMEC 視察や日本企業との連携による光学モジュールの開発も進み、新設ベンチャーによる事業化戦略も展開中である。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(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

当該年度実施内容: 2024 年度は、前年度に引き続き量子ネットワークの実用化に向けた研究を深化させた。具体的には、ハードウェアエラー確率と論理エラー確率の追加シミュレーションを行い、エラー確率や光子ロス率、繰り返しレートなどの主要パラメータについて精密な評価を完了した。これにより、実際の運用環境における閾値指標を確立し、ハードウェア性能の最適化に寄与した。さらに、基本的な量子通信プロトコルの設計を具体化し、実際のシナリオに即したプロトコルの実装モデルを構築した。このプロセスにおいて、量子通信中に発生する可能性のあるエラーや障害に対する具体的な対応策を定め、プロトコルの信頼性向上を図った。

課題推進者: 株式会社メルカリ 永山翔太

研究開発課題2: 古典システム・プロトコル実装

当該年度実施内容: 量子リンクプロトコルの実装にあたり、リンクレイヤの構成について以下の2方式の検討を進め実装に取り組んだ。

- ・空間(回線)分割方式
- ・単純時分割方式

次に、リンクレイヤを実現するための過程で必須となる高精度時刻記録技術については、FPGAを用いたTDC (Time-to-Digital Converter) の実装を進め、さらに、複数のTDCの時刻を同期または時差を精密に把握する機構として、Dragonfly型時刻同期方法(TidyFly)の検討を開始した。

課題推進者: 金沢大学 大野浩之

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

当該年度実施内容: インターフェースの調整について、今年度は特にQ-Flyアーキテクチャの検討を行った。特に、その性能がどのような要素できまり、スイッチの構成方法でどのような性能の変化があるのか、その場合に方針の違いによってやりとりしなければいけない情報は何かについて検討した。

課題推進者: 東京大学 佐々木寿彦

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

当該年度実施内容: We made significant progress on all four fronts: architecture, protocols

and specifications, hardware integration, and software. Our primary accomplishment of the year is the development of the Q-Fly architecture and its first physical demonstration, incorporating advances in all four work areas. Q-Fly uses optical switches, and is capable of scaling to tens of thousands of nodes when sufficiently large optical switches are available. The experimental demonstration (developed with the Ikuta PI team) has several nodes, each with independent, distributed control. The experiment involved the development of software infrastructure for executing experiments, analyzing data, and securely and reliably deploying software updates to the classical controllers. Drafts of several specifications were completed or are in progress: defining timing regimes and establishing proper layering in quantum networks, and MEAS, OSW and EPPS nodes. Lower-level device control software for devices such as rotatable quarter-wave plates were completed and packaged into a unit called PnPQ (plug-n-play quantum), which we expect to release as open source. We developed architectural advances including procedures for incorporating repeater graph state-based devices with nodes with memory. We created the architecture for a silicon photonic chip suitable for small groups of nodes. In software, we continued development of algorithms for purifying quantum states and combining purification with state analysis. We also worked on multiple levels of the problem of scheduling single large jobs and multiple smaller jobs on a Q-Fly network and related network architectures.

課題推進者: 慶應義塾大学 Rodney Van Meter

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
当該年度実施内容: ノイズを低減する方法として、ボソニックコードのクラスに属する光子を用いた論理量子状態を用いて量子中継システムの評価とその改良を行い、実装方法を比較した。パフォーマンスと実現性を両立させることは非自明なため、実現性の高いキャットコードに中継基地に量子メモリを追加することで、システムパフォーマンスを数桁向上できることを示した。ボソニックコードのクラスター状態についても同様に解析し、量子メモリのコヒーレント時間と2量子ビットゲートの精度を決定し、高い実現可能性を示した。遅延が伴うネットワークの動的構造の設計指針を得るため、ネットワーク上での量子通信を評価した。異なる伝送効率を持つチャネルと、状態を保存するために使用される量子メモリの有限なコヒーレンス時間の影響を考慮してネットワークを分析した。現在の技術レベルを考慮し、初期情報を異なるパスに分散するための最適な構成を決定した。さらに、時間遅延が送信された状態の忠実度に与える影響を最小限に抑えるプロトコルを提案した。

課題推進者: 沖縄科学技術大学院大学 根本香絵

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

当該年度実施内容: We developed novel tools for distilling bipartite and multipartite states.

The new tools have direct application with near term devices. They also allowed us to evaluate the feasibility of the highly modular approach for implementing the surface code establishing a new benchmark for experiments in terms of the ratio between memory lifetime and Bell pair generation rate. In order to reduce the experimental requirements of these architectures, we have started investigating in collaboration with Takeoka's group a method for direct generation of GHZ states that can be used for simpler implementation of highly modular quantum computers.

課題推進者: 沖縄科学技術大学院大学 David Elkouss

研究開発課題7: 超伝導量子コンピュータのスケラブルな光通信アーキテクチャ

当該年度実施内容: 文献調査や関連課題へのヒアリングを通して、極低温超伝導量子ビットと光量子通信を用いた誤り耐性通信パターンのベースライン定義と、その通信に必要となる構成要素の各種性能指標を設定、調査した。

課題推進者: 九州大学 谷本輝夫

(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

当該年度実施内容: 昨年度立ち上げた光子対源を用いて、これらを相互接続する量子もつれ光ネットワークの実証を行った。光子対源には、PPLN 導波路内で生じるタイプ2の自発的パラメトリック下方変換 (SPDC) に基づく偏光エンタングルメントを用いた。もつれ忠実度は90%前後であった。これを3つ準備し、エンドノードA、B、C、として用いた。このうち任意の2ノードを接続するための光スイッチ、干渉のための光遅延回路、ベル測定器を有する中間ノードを配置し、ノード間を光ファイバーで接続した。実際に量子もつれ交換を行ったところ、エンドノード間で得られた2光子状態の忠実度はいずれも60%以上であり、確かに量子もつれ状態にあることが確認された。遠隔制御された光スイッチや遅延回路制御により任意の2ノード間で量子もつれ交換が実証でき、これにより本年度のマイルストーンは達成されたといえる。本成果は、永山PI、バンミーターPIらとの共同研究として論文文化した (arXiv)。

課題推進者:大阪大学 生田力三

研究開発課題2: 損失に強い量子光通信技術の研究開発

当該年度実施内容: 昨年度に開発した 1 光子-0 光子エンタングルメント光源をもう 1 台作製し、これらを用いて提案する量子ルーターの原理実証に取り組んだ。空間光学系でこれを構築し、伝送路中に損失は ND フィルターを挿入し伝送損失を様々に変えることで、損失に対するエンタングルメント伝送レートのスケーリングを実験的に計測した。また、将来的な実験の拡張に向けてフィードバック制御によるアクティブな位相安定化技術を開発し、これを導入した。さらに、1 光子-0 光子エンタングルド光は局所測定自由度が低いという問題点を解決するため、作製した光源に微弱コヒーレント光を補助光として加えることで、偏光光子と 1 光子-0 光子のハイブリッド重ね合わせ光源へと改良を行った。これらを用いて原理実証実験を実施し、従来のエンタングルメント交換によるエンタングルメント配信よりも強い損失耐性を持つことを実験的に実証することに成功した。生田 PI との共同研究として論文化を進めている。

課題推進者: 慶應義塾大学 武岡正裕

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

当該年度実施内容: 本研究開発においては、長距離のファイバー長を安定化するために、10-100Hz レベルの安定度を実現するレーザーを構築する予定である。初年度から2年度にかけて真空装置、熱シールド、光共振器の設計を行い、本年度では RIO レーザーを光共振器に結合し、その誤差信号から狭線幅化を行う予定であった。しかし、光共振器に汚れが付着していたため光共振を見る事に時間がかかり大幅に計画が遅れてしまった。本年度では、まず、真空装置内に設置した光共振器に RIO レーザーの光を結合させることを試みた。その結果、共振モードを観測することに成功した。一方、クリーニングを行っている間に周波数安定化に必要なロックサーキットの設計、作成を行った。今後、観測した共振モードに RIO レーザーを安定化する予定である。

課題推進者: 横浜国立大学 赤松大輔

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

当該年度実施内容: 昨年度までに行った結晶長の計算や光共振器の調整をもとに、光共振器内部に強誘電体結晶を導入することで、多重化デュアルバンド 2 光子の発生・検出を行った。共振信号をもとにしたフィードバック制御を組み合わせることで、共振器長の制御による共振維持を行い、これらの要素を組み合わせることで線幅の評価が

達成された。また、項目 5 への接続として、実地環境を想定した環境における共振ピーク、2 光子相関、線幅についても同様に評価を行い、ラボ環境と遜色なく信号を取得できることが示された。

課題推進者:LQUOM 株式会社 新関和哉

(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:量子中継ネットワークに向けた多重化量子メモリ開発

当該年度実施内容:多重化量子メモリの保存時間延長のため、ダイナミカルデカップリングの開発を実施した。その結果、2 ミリ秒を超える保存時間延長を達成した。また 25 年度達成予定だった多重度 30 以上を 24 年度中にあわせて達成した。

課題推進者:横浜国立大学 堀切智之

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

当該年度実施内容:1548nm もつれ光子伝送用レーザーの 3 倍波発生をさせ、得られた 516 nm の光を使ってヨウ素分子の飽和吸収分光を行った。その結果、線幅が 1MHz 以下のヨウ素分子超微細構造が観測された。それに基づくレーザー周波数安定化を行った結果、周波数安定度<1kHz が達成された。また、偏波保持ファイバーを用いた高信頼性光コムの開発を行い、光コムのキャリアエンベロープ周波数検出および位相同期を実現した。

課題推進者:横浜国立大学 洪鋒雷

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

当該年度実施内容:単一光子検出器を含む単一光子測定のための光学系を構築した。また、メモリ書き込みのための原子の量子状態の初期化プロセスを実行した。

課題推進者:電気通信大学 丹治はるか

研究開発課題4-1:量子メカニカルメモリの開発-1

当該年度実施内容:量子メカニカルメモリの開発は、課題 4-1、2、3(山崎、山口、佐々木)が連携をして光-マイクロ波変換を伴った量子トランスデューサーの開発を行っている。本課題では、He3 冷凍機内におけるデバイスの光・マイクロ波測定装置の立ち上げ、および 300mK 環境における SAW 共振器の測定、LC 共振器の測定、また光ファイバーの導入と光配線のテストを行った。特にマイクロ波測定ではこれまで常温だった SAW 共振器の低温下の性能評価が行え

たことで、今後のデバイス開発に示唆を与える測定結果が得られている。

課題推進者:国際基督教大学 山崎歴舟

研究開発課題4-2:量子メカニカルメモリの開発-2

当該年度実施内容:量子メカニカルメモリの開発は、課題 4-1、2、3(山崎、山口、佐々木)が連携をして光-マイクロ波変換を伴った量子トランスデューサーの開発を行っている。本課題では他の競合研究機関と同様にニオブ酸リチウム(LN)の原理的な性能限界を引き出せていない現状を打破するべく、ファブリケーションプロセス条件の最適化と必要に応じて加工プロセスの追加が必要と考え、検討を進めた。具体的には EB レジストのポストアニールプロセスについてその条件を見直し、また化学機械研磨による表面平滑化処理の後工程も行った。電子顕微鏡による物理形状評価においてその平滑性改善が確認できているが、実デバイスにおける光伝搬損失低減が実現されているかどうかについては未確認であり、引き続き取り組む予定である。

課題推進者:情報通信研究機構 山口祐也

研究開発課題4-3:量子メカニカルメモリの開発-3

当該年度実施内容:量子メカニカルメモリの開発は、課題 4-1、2、3(山崎、山口、佐々木)が連携をして光-マイクロ波変換を伴った量子トランスデューサーの開発を行っている。本課題では長寿命なメカニカルメモリ開発を進めるべく、今年度には光デバイスと共存させることができる薄膜材料を用いた高周波メモリデバイスの高品質化に取り組んだ。これまでの研究で得ることができた知見を元に、材料方位の変更やデバイス構造の改善、さらに 300mK の極低温環境下での評価に取り組み、前年度までと比較して Q 値の大幅な改善を達成した。

課題推進者:理化学研究所 佐々木遼

(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

当該年度実施内容:2単一量子ビットノード&1リンクの理論を元に、具体的な評価手法を検討した。量子性を活用していることを統計的かつ数学的に保証するための手法を複数選定し、それらの利点・欠点を評価した。単一量子ビットノードの実機は当テストベッドには計画期間終了までに実装されなかったため、実機での実証を待たずに、近未来中(2030 年まで)に実現される蓋然性が高い単一量子ビットノードの物理的・システムの要件を複数件想定しつつ、それぞれ

について本課題が目指す量子性活用プロトコルが実装可能なように準備した。その結果、テストベッドを物理系として、その振る舞いを記述する数理論を用いて、実際に実行可能かつ量子性を活用する量子プロトコルを提案した。

課題推進者: 国立情報学研究所 添田彬仁

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

当該年度実施内容: 将来的な分散型量子アプリケーション・ネットワークの自律運用を想定し、既に課題1-4などで整備・提案が行われてきた下層プロトコルとアプリケーション運用プロトコルの統合を行った。また、テストベッドネットワーク環境で運用可能なアプリ設計の整備前年度に開発した秘匿型の量子計算手法を課題2-2などとの議論を通じてテストベッドに適合する形での設計を行った。また、複数のアプリケーション開発も推進しており、項目4内での継続的な議論によってノウハウを持ち寄る形での設計を行っている。

課題推進者: 慶應義塾大学 佐藤貴彦

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

当該年度実施内容: 分散型量子コンピュータにおいては離れた量子ビット間の2量子ビットゲートの実行が難しい。そのために、局所性を用いることで、より効率的に計算を行う方法を検討した。また、局所性を利用することで、2量子ビットゲートを行う回数を減らす手法を開発した。これらのプログラムを完成させた。また、量子センサで取得した情報を量子機械学習させることで、量子デバイスの性能を向上させる方法を考案した。そのための数値計算プログラムを完成させた。また、量子アニーリングにおいて、単一の量子操作だけでエラーを抑制するような手法を提案した。またニューラルネットワークの概念を用いることで、depth が浅い状況でもエラーを減らして事項のできる NISQ 向けの変分アルゴリズムを提案した。

課題推進者: 中央大学 松崎雄一郎

(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

当該年度実施内容: 昨年度行った設計をもとにテストベッドにおいて、検証すべき量子ネットワークシステムを実際に構築した。スケーラブルな量子通信ネットワークを検証する最小単位である3つのエンドノードと1つのスイッチノードからなる星型ネットワークを構成した。

課題推進者: 慶應義塾大学 永山翔太

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

当該年度実施内容: 昨年度構築した蛍光捕集系を組み込む形でイオントラップ系を構築した。これを用いてストロンチウムイオンのレーザー冷却と捕獲を試み、成功した。光電子増倍管において検出された蛍光量は開口数の高い蛍光捕集系を用いたため期待通りに増加した。

課題推進者: 大阪大学 長田有登

3. 当該年度の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

- 慶應義塾大学政策・メディア研究科に、PM 補佐 2 名、事務職員 2 名からなる PM 支援チームを構築し運営した。事務処理系統については、研究科の支援を受けた。
特に PM 補佐については拡大する課題間連携およびテストベッド構築にもプロジェクト全体として対応できるようにすべく、PM 補佐のうち一名は実験やソフトウェア開発の研究管理に対応できるようにし、もう一名は通常の管理業務専任できるようにすることで PM 補佐それぞれの担当を分け業務の効率化を行った。
- 前年度居室を追加借用した効果もあり、研究拠点であるかわさき新産業創造センターにおいて理論・ソフトウェア・システム・ハードウェアの研究者や技術者が一堂に会して議論や実際に開発する機会が拡大した。少なくとも週に一度は集まって議論することが標準となっている。スケーラブルなシステムを開発していくためにこのように異なる背景や研究領域や技術領域を持つ人間が自然と集まれる事が重要であると考えており、今後もそういった人材達が過ごしやすい・集まりやすい環境作りを継続した。他方、拠点内においてルール整備の必要性が高まったことから、2024 年 6 月に実験室利用の諸注意周知を含む、安全管理研修会を開催した。
- ビジネス用のクラウドメッセージアプリを用いて日常的にコミュニケーションを取っており、進捗の把握・議論・連絡・調整などを円滑に行った。そのようなアプリケーションを利用する習慣がない PI については、秘書等を介して円滑にコミュニケーションを取った。
- 各研究項目の進捗を確認し、問題・課題を吸い上げ、解決するために項目ごとの打ち合わせを開催するよう各課題推進者に指示し、項目によるが平均して一ヶ月に一度以上の頻度で開催された。必要に応じて 1on1 も引き続き実施した。
- 2024 年度には、PM によるサイトビジットを実施し、研究環境の視察及び研究進捗の確認や問題の把握を行った。
 - 金沢大学: 大野 PI(項目 1-2)
 - 沖縄科学技術大学院大学: 根本 PI(項目 1-5)、Elkouss PI(項目 1-6)
 - 慶應義塾大学: Van Meter PI(項目 1-4)、武岡 PI(項目 2-2)、佐藤 PI(項目 4-2)
 - 国際基督教大学: 山崎 PI(項目 3-4)
 - 国立情報学研究所: 添田 PI(項目 4-1)
 - 中央大学: 松崎 PI(項目 4-3)
 - 大阪大学: 生田 PI(項目 2-1)、長田 PI(項目 5-2)
- 2024 年度には、プロジェクト遂行上の諸問題や研究方針について議論するため、PM を議長とする課題推進者会議を必要に応じて都度複数回開催した。主な議題は以下の通りである。
 - ネットワークプロジェクトにおける 2024、2025 年度マイルストーンについての PD への提案内容検討
 - 2025 年度以降のプロジェクトの方針検討
- プロジェクト運営に関する重要事項についての調整と合意のために、PM を議長とする運営会議を設置した。2024 年度は課題推進者の追加を議題として同会議を開催した。来年度も実施規約の改定など、必要に応じて実施する。

研究開発プロジェクトの展開

● 研究開発の加速

○ 世界の研究者の知の結集

- 2023 年度から引き続きローレンス・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る米国 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。
- 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。お互いのデバッグや機能強化において役立っており、シミュレーターの妥当性や正当性の向上に貢献している。
- QUANT-NET プロジェクト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ワークショップの開催を目的に、IEEE QCE24 に応募し、採択された。
- 同チームにシカゴ大学の研究者を加え、同様の量子ネットワークシステムのエンジニアリングに関するワークショップ開催をめざし、IEEE QCE25 へ応募し採択され、2025 年度に開催予定である。
- QUANT-NET プロジェクトの責任者らを 2025 年 3 月に日本に招き、本プロジェクトや、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。

○ プロジェクト連携による加速

- 2023 年度に超伝導量子コンピュータの分散システム化の研究を PM が発起し、小芦 PJ・山本(剛)PJ との連携を 2024 年度も継続して発展させた。単一の超伝導量子コンピュータに光接続機能を持たせる研究に取り組むために本 PJ の課題推進者として計算機アーキテクチャの専門家である九州大学の谷本准教授を加えた。超伝導量子コンピュータに光通信アーキテクチャを組み込むことを実現するために極低温環境における古典エレクトロニクスのスケーラビリティを検討した。また、量子計算の理論面やシステムアーキテクチャの連携を進めており、2024 年度には共著論文がトップカンファレンスで発表された。
- モジュール間のプロトコルやインターフェースをオープン開発する協調領域と設定する一方で、モジュール内実装を競争領域に設定し、課題推進者間の競争とした。

● ELSI の取り組み

- 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。
2025 年 3 月、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 チームを招待した。同会議内では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

- 知財戦略・グローバル化戦略・オープン/クローズ戦略・競争戦略について統合的に戦略化。
 - 基本戦略
 - 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。
 - 2023 年度には、作成済み/作成中のオープン仕様をソフトウェア開発環境のデファクトスタンダードである GitHub 上でのソフトウェア開発及び管理を開始した。
 - ソフトウェアも、オープンソースソフトウェアとすることで世界展開を見込めるものや、世界の研究者からの開発への貢献が見込めるものは、オープンイノベーションに供し、世界の研究者を本プロジェクトに巻き込んだ。
 - 2023 年度から、一部のソフトウェアを上記 GitHub 上で公開している。
 - 今後携わる研究者・エンジニアが増加することを想定し、異なる背景や技術力を持っていても可能な限り均質な品質を生み出せるようにソフトウェアエンジニアの教育や継続的インテグレーション/継続的デリバリー&デプロイ(CI/CD)ができる環境の構築を行なった。2025 年度以降も継続発展させていく予定である。
 - 2024 年度には作成したソフトウェアの機能や仕様のマニュアル作成を開始した。将来的には Python のソフトウェアライブラリである PyPI に登録し、Python を使う人であれば誰でも容易にインストールして使ってもらえるようにすることを目指した。
 - インターフェース/プロトコル仕様の世界的公開とIETF/IRTF等の国際会議等での活動により、世界中の研究開発者が、本プロジェクトのインターフェース/プロトコル仕様を利用することを促進した。これにより、プロジェクト成果の最大化を図った。
 - 2025 年 3 月にタイ・バンコクで開催された IETF122 にて量子計算におけるデータセンターネットワークの重要性、および本プロジェクトで開発中のネットワークシステムプロトタイプ、

スイッチアーキテクチャについて情報共有した。

- 成果の最大化を目的に、上述の米国 QUANT-NET プロジェクトとの連携で合意に至った。

- 各モジュールの実装は、上述のインターフェースに従いつつ、内部実装については自由に知財を取得することとした。これにより、同種モジュール間のコンパチビリティや、異種モジュール間のインターオペラビリティを担保した。また、モジュール開発の自由競争を促した。

○ 技術動向調査

- 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。
- 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。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。

○ グローバル展開戦略

- 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。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」ことから、継続して推し進めることとした。(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)

○ 事業化戦略

- 希土類量子メモリに関して、参画機関の株式会社 LQUOM が事業化を進めた。
- Q-fly を中心とする研究成果を社会実装するためのスタートアップ企業を 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。

(3) 広報、アウトリーチ

- 本プロジェクトの広報用として、専用ウェブサイト(<https://sniq.org>)を公開した。PM が日常的に量子分野・情報通信分野等の各種コンソーシアム、研究会、技術イベントの講演に招待されており、本プロジェクトやムーンショット目標 6、特に量子ネットワーク関連プロジェクトについて広報した。

(4) データマネジメントに関する取り組み

クラウドを活用しており、各種データについてデータアクセス権限を設定し、円滑な協力とデータマネジメントの両立に努めた。

データの詳細は【様式 408】データマネジメント報告書.xlsx を参照

4. 当該年度の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

各課題推進者と PM 支援チームで構成する。

2024 年度は開催すべき事由なし。

運営会議 構成機関と実施内容

半年に一回開催する。全課題推進者で構成し、本プロジェクトの方針決定など管理運営に関する内容を取り扱う。

項目会議 実施内容

週一回開催する。PM・各項目の代表者ほかで構成する。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う。

5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT 含む)	国内	国際
未登録件数	2	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	2	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	8	12	20
口頭発表	32	27	59
ポスター発表	7	18	25
合計	47	57	104

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	36	36
(うち、査読有)	0	36	36

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	0	0	0
書籍	0	0	0
その他	0	1	1
合計	0	1	1

受賞件数		
国内	国際	総数
1	1	2

プレスリリース件数
3

報道件数
1

ワークショップ等、アウトリーチ件数
7