



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

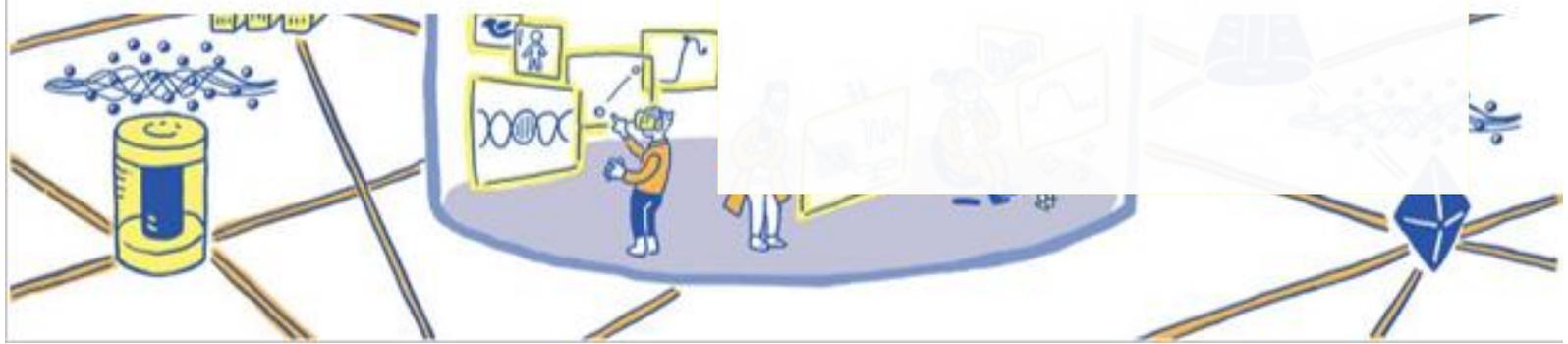
実施状況報告書

2023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、分散量子情報処理環境という本質的な機能が不可欠である。この環境は、単に多数の量子コンピュータを接続するだけでなく、それぞれの局所的な処理能力を有効活用しつつ、全体として一体的な量子アプリケーション実行が可能な体制を整える必要がある。具体的な開発要素としては、量子コンピュータ本体、量子コンピュータの通信インターフェース、そしてこれらを統合する量子通信ネットワークが求められる。特に、量子通信ネットワークは、ネットワークに接続された複数の量子コンピュータが大量の量子データをやり取りしても、全体の処理性能を低下させないように設計される必要がある。このようなネットワークの構築は、量子コンピューティングの分野における大きな挑戦であり、その成功が分散型量子コンピュータの実用化に向けた鍵となる。

本プロジェクトでは、特に3つ目の要素である量子通信ネットワークを中心に研究開発・実証を進め、2つ目の量子通信インターフェースにも取り組む。分散処理環境はネットワーク上に構築され、各量子コンピュータの計算力と、それらを繋ぐ量子ネットワークの通信力が全体の性能を左右する。このネットワークには、効率性、スケーラビリティ、負荷耐性、障害耐性が必要である。実用することを考えれば、メンテナンスの容易さといった運用性も重要である。

量子ネットワークの開発は、単なる直接接続を超え、高度な通信と処理能力の統合を可能にするため、物理的および論理的な設計が統合されたアプローチが必要である。量子ネットワークを支える物理的ハードウェアは、量子ネットワークを実現するために不可欠な要素である。論理面を支える量子ネットワークアーキテクチャは、複雑系であるコンピュータネットワークの性能を実質的に決定する要素であり、長期的に利用可能な要素であるため、その重要性は極めて高い。最高性能のハードウェア技術は技術進化と共に移り変わる可能性があるため、これにも注意が必要である。アーキテクチャの開発と実証には、小規模ネットワークのプロトタイプ実装と試験、および大規模ネットワーク環境での振る舞いを模擬するシミュレーションを通じて、スケーラビリティ、耐負荷性、耐障害性を検証することが含まれる。これにより、分散量子コンピュータ全体の処理性能を向上させる量子ネットワークを実現することが可能となる。また、量子情報の自由な流通を支える量子インターネットの実現にも寄与すると期待される。

目標6の全体的な研究開発プログラムにおいて、本プロジェクトは量子ネットワークの研究開発を通じて、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する役割を担っている。このプロジェクトは、他のプロジェクトで開発される量子コンピュータの大規模化を実現するための重要な要素である。見方を変えると、ムーアの法則は、単一システムの超高性能化が可能であるものの、その達成には相応の時間がかかることを古典コンピューティングの分野で示してきた。同様に、単一の高性能量子コンピュータの実現も長期を要すると考えられる。本プロジェクトでは、他のプロジェクトが実現する一定規模の量子コンピュータを、本プロジェクトが開発する量子ネットワークで接続することにより、分散型量子コンピュータの実現を目指す。このネットワーク化により、早期に大規模誤り耐性型量子計算を達成する。

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。項目5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、長期目標ならびに項目5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における具体的な課題解決に、項目1から4が努めている。この体制は、PMが課題推進者(以下、「PI」として項目5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 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項目 5 課題 2 を設定している。これらの取り組みにより、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体制を整えている。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

まず、量子ネットワークにおけるハードウェアの性能目標値を概算した。論理面を支えるアーキテクチャ領域においては、単一光子同士を干渉させるためにシビアである時間制約などの要件やデバイス性能を確認し、機能のハードウェア処理とソフトウェア処理の切り分けを整理し、RuleSet プロトコル仕様やモジュール間インターフェースの詳細文書を作成した。もつれの対応をノード間で確認する同期やリンクのノイズをモニタするアルゴリズム開発も行い、それでも発生する遅延の影響調査を実施した。

量子ハードウェア領域においては、プロトタイプ実装に用いる 2 光子干渉型量子ネットワーク向けの 3 ノード分のもつれ光源の立ち上げや、高速化に資する 1 光子-0 光子もつれ生成とその表面符号利用の理論手法の開発に成功した。量子周波数変換を信号雑音比に基づいて評価する新手法を導入して新たな重要パラメータを明らかにした。送受信された光子の位相を揃えるための通信経路ファイバーの安定化や、波長多重化に資する異波長ベル測定機能の実証、メモリ量子系や高効率に光子を放出・吸収させるための共振器を安定化するためのレーザー周波数の安定化に成功した。量子メカニカルメモリとトランスデューサの高性能化と評価を行う準備も整った。

これらと並行して、両領域に跨るシステム機能である、時間系の機能、干渉を起こすための光子のタイミング同期機構、光子スイッチなどのデバイス単位のプロトタイプ実装を開始した。分散処理システムを実証できるイオントラップ量子ノードの開発も設計を見出し調達と構築が進んでいる。実機の評価にも利用できるアプリの研究開発も進んでおり、分散処理可能であるか各個の量子コンピュータ単位で検証できるスキームの開発や、NISQ アルゴリズムのネットワーク化に成功し、要求される量子資源を明らかにした。

全体として、順調に進んでおり、予定を前倒ししている部分もある。遅れている部分もあるが、研究開発自体の本質的な困難性由来ではなく近年の量子研究熱の高まりによる品薄・納期遅れによる遅延であり、2024 年度に取り戻せる範囲となっている。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

本年度のプロジェクトマネジメントでは、PM 支援チームを増員すると共に、クラウドアプリを活用したコミュニケーション・情報/データ管理・タスク管理を強化し、プロジェクト運営を円滑に進めている。

国際的な情報発信と協力を重視し、研究者の育成にも力を入れている。実験家・理論家の枠にとらわれない量子情報工学者の育成が、日本が世界を牽引していくための鍵である。特にソフトウェア・ネットシステム領域においては、オープンソースでの研究開発や、IETF/IRTF 等のトップ国際会議での情報発信・議論により、プロジェクトの国際展開を進めている。

知財戦略としては、本プロジェクトで研究開発しているモジュール間インターフェース仕様を公開し、オープンイノベーションを推進してプロジェクト外との協調や成果の外部展開を進める一方で、各モジュールの内部実装について自由に知財を取得する方針を継続している。

広報とアウトリーチについては、38 件の招待講演(国内 17 件、国際 21 件)などを通じて情報発信を行い、分野・業界横断的に実施した。また、日本物理学会に第 78 回年次大会においてシンポジウムを開催し、200 名程度の聴衆を集める満室となった。さらに、PM が JST のムーンショット広報動画企画「未来を訊く」にフィーチャーされた。

日本では量子デバイスのサプライチェーンに懸念があることが分かった。これは本プロジェクトに限った問題ではなく、日本全体として解決を模索すべき本質的課題と認識した。

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: 量子ネットワークにおけるハードウェアに求められる性能は、この量子ネットワーク上で分散量子計算を実行する際に必要となる誤り確率から計算されるべきである。この誤り確率を持つ量子もつれを入力として、分散スタビライザー・状態挿入・量子もつれ蒸留・量子誤り訂正などのスキームを実行し、分散量子計算を実行する。2023 年度には、既存研究の結果を取りまとめ、ハードウェア性能の目標値を決定した。また、目標値を緩和し得るアイデアが出たため、2024 年度以降にも、目標値に関する研究を継続する。本課題に取り組むにあたり、量子ネットワークの同期メカニズムのスケラビリティに関する研究を実施した。この研究にあたり、課題 1-3(量子ネットワークモジュールインタフェース)・1-4(スケラブルネットワークオペレーション)・2-1(量子光学)との議論を元に検討すべき事項を明らかにし、初期検討を行った。以降の思考実験を課題 1-2(古典システム)に引き継いだ。

PI: 永山 翔太(株式会社メルカリ)

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: 2023 年度初めは 2022 年度から続けているアーキテクチャや各研究開発項目の要求性能から古典制御系に求められる性能の決定について、各研究開発項目の要求性能についてヒアリングを行い、検討を続けた。その上で、古典ハードウェアの全体設計を予定どおり開始した。性能決定作業の最終局面が延長しているため、結果的に全体設計は性能決定作業と実施時期が一時的にオーバーラップすることになった。具体的には、まず最も単純な、電光変換モジュール、シングルモード光ファイバ、光電変換モジュールからなる、単純だが重要な実験系を構築して性能測定を行なった。

この実験系は、今後重要になる TDC(超高速事象に対してタイムスタンプを記録する機構。この機構は、Time-to-Digital Converter(日本語ではタイムデジタイザ)と呼ばれる)実験の一部である。次に、TDC 本体の基本形を FPGA を用いて実装する試みに着手した。

項目1課題1及び項目1課題 3 が連携することにより、実験系の構築についての構想が進展し、一部は実際に構築作業に移行した。さらに BSA(Bell State Analyzer)のタイミング調整問題に関する古典制御部分のアーキテクチャ・プロトコルの設計を行った。

PI: 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

当該年度実施内容: 2023 年度は、光学系ハードウェア、高速古典システム、通信プロトコルの実装に向けて仕様の詳細について調整した。

今年度は各要素の実装が進んできているので、それに合わせて各要素の仕様の詳細化と調整を行った。また実際にテストベッドを動かすにあたって必要な要素を確認し、それがハードウェアとして対処すべきなのか、ソフトウェアとして対処できるのかを整理し、ソフトウェアで対処できる場所はソフトウェアで対処できるようにした。具体的には、ノード間での通信を行うためには信号の同期が必要になり、単純には同期のための(古典)信号を追加で生成して送受信するというハードウェア上の工夫が必要になるが、微弱な量子信号のやりとりだけでそれが実行できるようなアルゴリズムを考案し、実装して動作することを確認した。

通信プロトコル部分では、それまでの実装ではアプリケーションからの競合的な要求に対処するため、ネットワークリソースのスケジュール割当てに無駄があり、ネットワークが稼働していない時間が数割存在したが、そのような無駄がなるべく発生しないようなアルゴリズムを考案し、ネットワークシミュレーションで実際に数%以下になることを確認した。

またインターフェースの詳細設計文書を作成した。

PI: 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内ネットワークを想定したプロトコル・オペレーション手法の研究開発

当該年度実施内容: 本プロジェクトで開発した Quantum Internet Simulation Package (QuISP) で実行されるシミュレーションによって、システム開発のためのデータネットワークにおけるいくつかの重要な設計選択をするための検討・調査を可能にし、そしてこれは将来的な広域ネットワークや衛星通信ネットワークへ拡張する場合の利用も期待できる。また量子相互接続ネットワークアーキテクチャとプロトコルの標準化に向けた重要な初期段階の仕様を明らかにした。これによって最終的には相互運用性のある仕様と、ネットワークを使用するアプリケーションのための安定したプラットフォームを提供できるようになる。そしてテストベッドネットワークへの実装と量子ハードウェアとの統合に向けて、シミュレータを使用して設計および評価されたいくつかの主要なプロトコルの実世界での実装、量子ハードウェアのデバイス制御、および量子マルチコンピュータ用のスイッチングシステムの設計を行った。

PI: 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

当該年度実施内容: 本年度はネットワークのエッジ側での量子的な振る舞いを、クラスター間のエンタングルメントの性質から解析し、ノード間のエンタングルメント精製プロトコルによって、実効的なクラスターを大きくすることができることを示した。ネットワーク上の遅延については、量子計算への影響とその解決方法を調べた。複数の接続パスがある場合の遅延の影響を数値的に解析し、影響を数値的に求めるとともに、有効なパラメータ領域を

示した。また、エンタングルメント精製と平均精製のジョイント最適化をおこなう数値パッケージを開発した。さらに、エンタングルメント精製プロトコルの結果がワナー状態を特徴化できることを示し、この方法がノイズ化においても有効で、安定して機能することを示した。

PI: 根本 香絵(沖縄科学技術大学院大学)

(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

当該年度実施内容: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た3ノード分の光子対源の立ち上げを行った。課題1-3、5-1らと連携することで量子もつれ交換の実装やタイミング同期についての議論を行った。量子周波数変換については、変換効率だけでなく信号雑音比に基づく性能評価法を行い、量子的な変換器として重要なパラメータを明らかにした。また変換光のみを共振器に閉じ込めた量子周波数変換器が従来の変換器を上回る信号雑音比を達成できることを理論的に明らかにし、このモデルが正当性を実験的に確かめた。その他、高密度波長多重光源の時間分解測定のための超伝導単一光子検出器を導入し、ジッターの性能を確認した。後者2つの実施項目については、山本俊PJとの連携により円滑に研究が実施できた。

PI: 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

当該年度実施内容:実験環境を整備し、パルス光源、超伝導単一光子検出器を導入した。非線形結晶(PPLN)から生成した光子対から伝令付き単一光子を生成し、これをビームスプリッターで分割して1光子-0光子エンタングルメントを生成する系を構築した。さらに同じ結晶をもう一つ使って差周波発生により光子と同一波形を持つ参照光を生成し、これを用いて局所的な測定のみで生成したエンタングルメントの密度行列を評価することに成功した。また、GHZ型多体エンタングルメントを効率的に配信する手法を考案し、数値解析によりその有用性を示すとともに、分散型表面符号に応用する手法を提案した(本研究は、項目4メンバーと連携して実施した)。

PI: 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

当該年度実施内容:光共振器を設置するための真空装置を組み立て、音響遮蔽箱の中のパッシブ除振台の上に設置した。熱放射シールドの温度コントロールが可能であることを実証した。ファイバー長を制御するシステムを開発し、実証した。具体的には、レーザー光をファイバーに伝搬させた後に、もう一台のレーザーに位相同期した。その上で同じファイバーを伝搬させ、二つのレーザーの位相が一致するようにファイバー長(光路長)を調整

することに成功した。

PI: 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

当該年度実施内容:本課題は、希土類量子メモリと効率的に結合(すなわち量子メモリへの保存と読み出し)できる光子の高効率での生成を目的としている。2光子発生理論を本研究開発にかかる物理量を用いて解析することで、強誘電体結晶のパラメータを取得した。本年度ではその結晶やプログラムを用いて選定した物品群を用いて光学系組み上げを行い、共振器の性能評価に至る部分まで研究開発を達成した。具体的にはまず量子メモリ波長のレーザーを用いて光共振器実装を行い共振ピークを取得した。次に通信波長のレーザーを用いて、2波長両方の共振ピークが得られる実験系を実装した。次に共振器出力信号をサーボコントローラに接続し、Pound-Drever-Hall法により共振器長安定化を行い、2波長の共振器透過光強度が強い一定値に安定化されていることが確認できた。上記一連の成果に関する過程は研究開発項目2の全員と、研究開発項目3研究開発課題1の推進者に共有され、極めて順調に進捗していると考えられる。

PI: 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: 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:Pr:YSOをもちいた多重化量子メモリ開発を実施した。特にPr:YSOの不均一幅内に多数の量子メモリ領域生成のため、電気光学変調器および音響光学変調器による高速光周波数制御システムの構築およびメモリ領域の生成を実施し、周波数多重度を確認した。任意時間量子メモリの開発に関しては、保存時間延長に向けたダイナミカルデカップリングシステムの実装を進め、あわせて効率向上のための制御レーザーの狭線幅化、ラビ周波数の改善を実施した。周波数多重量子中継に重要な異波長間ベル測定機能の開発に向け、複数の周波数チャンネルを用意し、それら間でのチャンネル同定機能、周波数フィルター機能、および周波数シフト機能の実装を進めた。その結果、異なる周波数チャンネル間での量子干渉性(Hong-Ou-Mandel干渉)観測に成功した。周波数多重性の獲得に関しては、その周波数間隔が研究開発項目2研究開発課題4において開発される共振器2光子源の自由スペクトル間隔と一致するように調整し、光子と量子メモリ間の周波数多重化による結合効率を最大化するように設計している。また研究開発項目3研究開発課題2および研究開発項目2研究開発課題3とは、周波数安定化および位相同期の開発に関して、本課題にて開発されるPr:YSO量子メモリによる量子中継システムと整合する設計となるよう緊密に連携をとっている。

PI: 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

当該年度実施内容:

1010 nm 波長変換レーザーから発生した2倍波の光パワーを評価した。レーザーの周波数雑音および強度雑音の評価を行った結果、レーザーの周波数安定化に支障がないことがわかった。レーザー周波数安定化を行った結果、十分な周波数安定度が得られた。また、光子伝送用レーザーの3倍波を発生させその光のパワーを評価した。光子伝送用レーザーの周波数雑音評価を行った結果、レーザーの周波数安定化に支障がないことがわかった。

PI: 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

当該年度実施内容:磁気光学トラップ中に捕捉した原子数を評価したところ、十分に多くの原子を捕捉できていることを確認した。また、低散乱損失ミラーを用いて光共振器を構築し、フィネスを評価した。さらに、共振器安定化用光源を構築しその安定化に成功した。またメモリ書き込み・読み出し用光源についても周波数の安定化に成功した。

PI: 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-1

当該年度実施内容:量子メカニカルメモリの開発に当たっては山口, 佐々木, 山崎, の3人1チームで取り組んでおり、それぞれファブリケーションの最適化(山口 PI), メカニカルメモリの時間の向上(佐々木), 量子トランスデューサ機能における変換効率の向上を目指した測定環境の構築や設備の整備(山崎 PI)と分担している。山崎の担当している測定環境の構築や設備の整備については、3月末にHe3冷凍機が導入されたことで、アルミを用いた超伝導回路のテストが行える環境が整いつつある。また、既存のEOMを用いて上記の変換効率において光-マイクロ波, およびマイクロ波-光変換を行った場合の微小信号測定が現在の測定器で可能かなどのテストを行った。

PI: 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-3

当該年度実施内容:量子メカニカルメモリの開発に当たっては山口, 佐々木, 山崎, の3人1チームで取り組んでおり、それぞれファブリケーションの最適化(山口 PI), メカニカルメモリの時間の向上(佐々木), 量子トランスデューサ機能における変換効率の向上を目指した測定環境の構築や設備の整備(山崎 PI)と分担している。山口の担当では量子メカニカルメモリとして使用するための超伝導オプトメカニカルデバイスに必要な光共振器性能を実現すべく、微細化ファブリケーションの最適化と、EBリソグラフィおよびドライエッチング時に生じる光導波路デバイスの微小な荒れ

構造を滑らかにするための研磨プロセスに関する検討と検証を行った。

PI: 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-3

当該年度実施内容: 量子メカニカルメモリの開発に当たっては山口, 佐々木, 山崎, の 3 人 1 チームで取り組んでおり、それぞれアプリケーションの最適化(山口 PI), メカニカルメモリの時間の向上(佐々木), 量子トランスデューサ機能における変換効率の向上を目指した測定環境の構築や設備の整備(山崎 PI)と分担している。佐々木の担当しているメカニカルメモリ開発について、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微小モード体積を持つメカニカルメモリデバイスを開発した。新たに光学イメージング系や低温マイクロ波測定系を構築してデバイスの評価を行い、作製したデバイスが設計通りの微小体積を持つ共振モードを有していることを明らかにした。

PI: 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

当該年度実施内容: 2022 年度に発見した1リンク・単一1量子ビット計算機からなるノードが遠隔 CNOT ゲートを実装するための少数のパラメータで十分評価できることが判明したため、そのパラメータを想定される実験条件において測定するための方式を特定した。

PI: 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

当該年度実施内容: (項目4課題3において開発された)ブラインド NISQ とも呼ばれる量子通信を介してパラメータを秘匿した変分量子計算アルゴリズムを対象に、運用プロトコルの整備を行った。同アルゴリズムを量子インターネットアプリケーションに必要な要件に基づいて再設計し、プロトコル設計を行うことで秘匿型変分量子計算の初期コストと運用コストを定量的に分析した。アルゴリズムの運用プロトコルを、他項目で構築するテストベッドネットワークに適合させ、実装・運用可能なアプリ設計を推進している。項目内および他項目の PI たちとの情報交換を継続的に進めている。アプリの運用コストが定量化され、実装に必要な環境(実験系・ソフトウェア機能)の洗い出しや要求される量子資源の詳細について議論が可能となった。

PI: 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

当該年度実施内容:分散型量子コンピュータにおいて、局所性に注目することで、高効率にエラーを除去する方法を提案した。具体的には virtual distillation に必要な2量子ビットゲートの回数を減らすことで、分散型量子コンピュータに適した手法の提案を行った。また、量子センサ、NISQ、量子アニーリングに関して、比較的少数の量子ビットで実行可能な有用なアプリケーションを理論的に提案した。具体的には、高効率なAC磁場センサの検出法の提案、少ない量子ビット数で高い表現能力を持つ量子機械学習の提案、量子アニーリングにおける断熱的条件の実験的検出、を行った。

PI: 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

当該年度実施内容:量子通信ネットワークの全体像の解明は、実用的な量子情報処理基盤を実現するために避けられない課題である。量子通信ネットワークシステムの統合実証に取り組むことで、これを解明し、分散量子コンピュータアーキテクチャに資する量子ネットワークアーキテクチャの開発を目指す。本年度は昨年から行なっていたテストベッド環境整備を完了した。また、量子ネットワークシステムの初期実証に必要となる3エンドノード+1中継ノードの星型ネットワークのプロトタイプを、研究開発項目1、2の成果を反映して設計・計画し、構築を開始した。この中で、実装する光学系の構築・調整・評価を開始し、量子通信システムのアーキテクチャ・プロトコル・ソフトウェアの実装を開始した。実際にもつれ光子対のエンタングルメント状態の忠実度の評価が行える状態になった。実装時において対処すべきデバッグ要素が光学系において発見され、また、動作時に折衝すべき要素の発見・整理も進んでおり、テストベッドにおける量子通信システムのプロトタイプ開発が順調に進捗している。

PI: 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

当該年度実施内容:蛍光捕集系としては開口数の大きな対物レンズにより蛍光を捕集し、それを光ファイバに導入するためにモード径を調節する必要がある。イオンが真空槽の内側、対物レンズが真空槽の外側にあることを考慮し、10mmの長作動距離かつ開口数が0.65と大きく、0.7mmのガラス厚補正の施された対物レンズを選定した。この0.7mmのガラス厚の真空窓が市販されていないため、イオン蛍光の波長422nmにおける反射防止コーティングを施したガラス板を調達したうえで、リエントラントビューポートを自作し、調達した対物レンズを用いてこのガラス窓ごしに顕微鏡動作が可能であることを確認した。イオン蛍光の光ファイバ導入に利用する

光ファイバと結像レンズの選定を行い、イオン蛍光の光ファイバへの結合に成功するような設計を見出し、部品を調達した。

PI: 長田 有登(東京大学)

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 支援チームを構築している。事務処理システムについては、研究科の支援を受けている。
- PM 補佐 1 名、事務職員 1 名を新規採用し、計 PM 補佐 2 名、事務職員 2 名という体制に拡大して運営している。
- 研究拠点としているかわさき新産業創造センターで借用している居室を約 100 平米追加した。これによって理論・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スペースが拡大された。実際に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きた。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行っていく。一方でそういった人達が異なる背景を持つがゆえに衝突しないよう、ルール整備も必要と考えており、2024 年 1 月には実験室利用の諸注意を関係各位に周知するための研修会を独自開催した。
- 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ている。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、習慣を持つ秘書等を介して円滑にコミュニケーションを取っている。
- 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会議を開催するよう各 PI に指示し、項目によるが 2-3 ヶ月に一度から毎月の頻度で開催された。必要に応じて 1on1 会議も引き続き実施している。
- 2023 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: 大野浩之 PI(項目 1-2)
 - 慶應義塾大学: Rodney Van Meter PI(項目 1-4)
 - 大阪大学: 生田力三 PI(項目 2-1)
 - 慶應義塾大学: 武岡正裕 PI(項目 2-2)
 - 横浜国立大学: 赤松大輔 PI(項目 2-3)
 - 横浜国立大学: 堀切智之 PI(項目 3-1)
 - 横浜国立大学: 洪鋒雷 PI(項目 3-2)
 - 電気通信大学: 丹治はるか PI(項目 3-3)
 - 情報通信研究機構: 山口祐也 PI(項目 3-4)
 - 国立情報学研究所: 添田彬仁 PI(項目 4-1)
 - 東京大学: 長田有登 PI(項目 5-1)
- 2023 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。
 - プロジェクト中間評価を受けての今後の対応方針

- 知財フローの精緻化
- 通信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ている。2023 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。来年度以降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

- 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で合意した。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の相互検証を実施している。お互いのデバッグや機能強化において役立っており、シミュレータの妥当性や正当性の向上に貢献している。
- 2024 年 3 月に開催された American Physics Society March Meeting (米国物理学会 3 月会議) で Van Meter PI (項目 1-4)が行った招待講演をきっかけに、米国の量子コンピュータネットワークや量子コンピュータアーキテクチャの研究者による本プロジェクトのテストベッド拠点への訪問予定やセミナーなどが決定した。

● プロジェクト連携による加速

- 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 との連携を開始した。まずは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ための研究に取り組む。本研究プロジェクトからは、量子ネットワークや分散量子情報処理に関する知見を持ち寄る。本プロジェクトとしては、物理系の違いに由来して適切なアーキテクチャに差異が出ないか、また、逆に、違いがあろうとも共通点が出ないかなど、単一の物理系を超えた論点も検討する。この論点は、アーキテクチャ研究において重要である、機能の抽象化に資する。

● モジュール間のプロトコルやインタ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と設定し、課題推進者間の競争としている。

○ELSI の取り組み

- 本プロジェクトの参加機関である株式会社メルカリが大阪大学 ELSI センターと共同で取り組んだ研究成果がムーンショット目標 6 の ELSI シンポジウムで発表され、自由討論にトピックを提供した。
- 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ももとに、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ている。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ている。

(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する。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 2023 年度から開始した。

○ 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む。

■ 2023 年度には、一部のソフトウェアを上記 GitHub 上で公開した。

■ 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っており、2024 年度以降も継続発展させていく予定である。

○ 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する。これにより、プロジェクト成果の最大化を図る。

■ 2023 年度には、2024 年 3 月に豪州ブリスベンで開催された IETF/IRTF において、実機開発で重要と考えられる物理現象や、その物理現象を扱う機能のタイムスケールについての議論を発信した。タイムスケールに依存して当該機能をソフトウェア処理とハードウェア処理のどちらで実現すべきか切り分けが決定する。この整理に基づくオープン仕様を公開した。

■この戦略の効果を最大化するため、上述の米国 QUANT-NET プロジェクトと連携を合意した。

○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する。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する。また、モジュール開発の自由競争を促す。

■2023 年度には、出願の手続きについて代表機関である慶應義塾大学学術研究支援部知的資産担当と連携し、成果公表のフローと衝突なくまた円滑に出願ができるフローを検討・作成した。2024 年度ではこのフローを適用できるよう、プロジェクトにおいて知財運用会議を開催し決議を取る予定である。

○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ている。

○グローバル展開戦略

- PM 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 に就任した。このような活動は、「論文採択を含めた存在感の向上、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。(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)
- 米コロンビア大学において開催されたワークショップ QuNet'23 にて Van Meter PI が量子ネットワークにおけるアーキテクチャ設計についての研究内容を基調講演広報した。
- 2024 年 3 月 16 日から 22 日で開催された IETF119 において、ソフトウェアエンジニア向けに量子コンピュータネットワーク開発の現状と物理層からアプリケーション層の範囲それぞれについて特に時間領域の制御や多重化のために必要なソフトウェア開発の課題について紹介した。

○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 が事業化を進めている。
- 株式会社メルカリを中心に、本プロジェクトの成果を元にしたベンチャー企業の起業の検討を進めている。
- テストベッド拠点として利用しているかわさき新産業創造センターの協力を得て、量

子コンピューティング EXPO に参加し、企業と議論した。特に社会実装やテストベッドの拡張に向けて重要である半導体デバイス・線材・化学材料メーカーと情報共有を行った。

(3) 広報、アウトリーチ

- 東北大学にて開催された日本物理学会第 78 回年次大会において本プロジェクトでシンポジウム「量子コンピュータネットワークの科学」を日本物理学会と共催し、本プロジェクトを紹介するとともに量子コンピュータネットワークの実証そのもの及びそれに必要な技術や知識について複数の研究者による講演を企画した。目算でも 200 名程度の学生・若手研究者・シニア研究者まで広い層の参加者にご参加いただけた。
- PM が JST の MS 広報動画「未来を訊く」に出演し、本プロジェクトを非研究者層にも広くアピールした。
- Nature 誌の MS 特集記事の一部として PM が取材を受け、本プロジェクトを紹介した。
- 本プロジェクトの専用ウェブサイト開設について、公開するコンテンツの検討が完了し、公開に向けて作成を進めている。
- 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ている。

(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務めている。

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。

2023年度は開催すべき事由がなかった。

運営会議 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。

取りまとめ役会議 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	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	17	22	39
口頭発表	18	17	35
ポスター発表	8	15	23
合計	43	54	97

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	19	19
(うち、査読有)	0	19	19

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	1	0	1
書籍	1	0	1
その他	0	1	1
合計	2	1	3

受賞件数		
国内	国際	総数
1	0	1

プレスリリース件数
0

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
4