

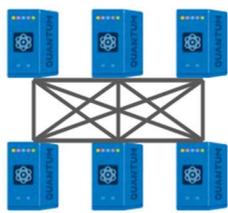
研究開発項目名

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

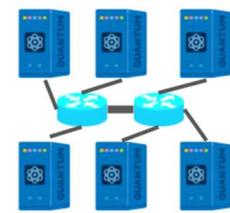
2023年度までの進捗状況

1. 概要

多数の量子コンピュータを量子ネットワークで結合して大規模化する際、その目的は、接続された量子コンピュータの性能ひいては分散量子計算の潜在能力を最大限に引き出すことです。そのためには、賢いネットワーク設計が重要です。通信がボトルネックとなって分散量子計算の性能を損なわないよう、プロトコルやアーキテクチャで保証すべき性質や性能を検討し、経路の切り替え機といった通信資源の使用順序などを適切に管理する必要があります。分散量子計算は量子もつれを事前配布できるといった分散古典計算とは根本的に異なる特性があり、古典での解決法をそのまま使うことができません。初期の分散量子計算機は性能に余裕がないため、量子メモリの効率的利用やエラー訂正などの工夫も求められます。



全結合はインターフェース部分のコスト大



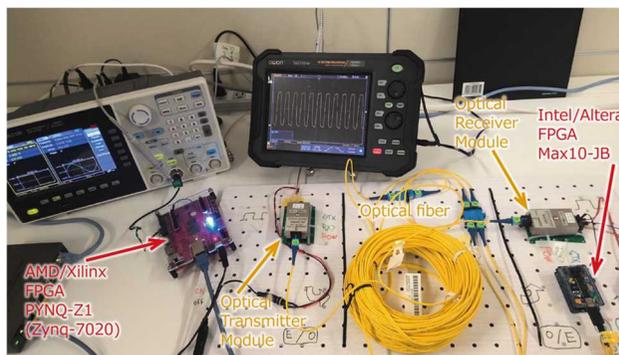
ネットワークではルーティングや使用順序の振り分けが必要

ネットワーク設計の自由度

本項目では、特にアーキテクチャ、プロトコル、古典制御の観点から賢いネットワーク設計を行うことを目的としています。実際のシステム設計とテストベッドでの計測に加え、対応するネットワークシミュレーションも駆使してシステムとして実際に実現できる性能がどのように決まるのかを明らかにしていきます。

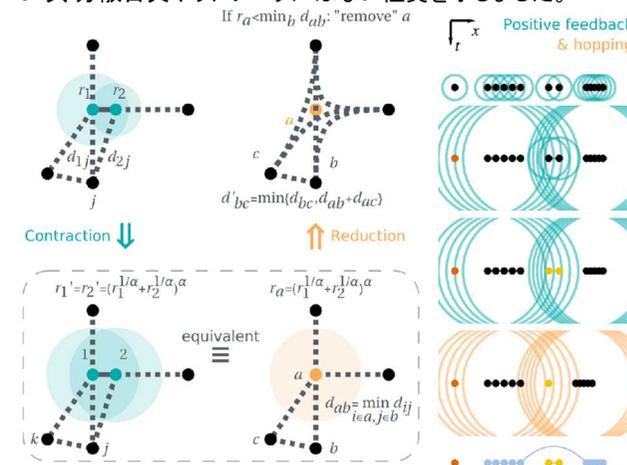
2. これまでの主な成果

2023年度の主要な成果は以下の通りです。①量子ネットワークにおけるハードウェアに求められる指標を算出し、光技術を用いたプロトタイプの実装を開始しました。②古典制御系のプロトタイプ実装を進めました。特に光子検出信号の高速高時間分解読み出し、高速信号処理、ノード間で低遅延通信の開発をすすめました。また、多数ノード間でのタイミング同期の効率的仕組みについても明らかにしました。下図は低遅延通信のプロトタイプです。③レイヤー・モジュール分割のプロトタイプ仕様を決め必要な機能や仕様の調整を行いました。また、量子信号のみを用いたパルス番号同期といったシステム実装を効率化するアルゴリズムも実装しました。④量子ネットワークシミュレーションパッケージ QuISP の機能を拡張するとともに、他の量子ネットワークシミュレーションパッケージ SeQUeNCe の開発チームと相互検証を始め、シミュレーションの信頼性向上を進めています。通信プロトコルの開発においては、通信開始、多重化、管理の方式についての仕様の文書化を進めています。



低遅延通信装置

⑤大規模な量子ネットワークにおける量子メモリの機能の重要性を数値的に示しました。エンタングルメントを制御することで、分散量子ネットワークにポジティブなフィードバックをかけることができ、結果量子的なクラスターを広げることができるという、分散古典ネットワークにはない性質を示しました。



近接する量子メモリが協調することでクラスターが広がり遠方のノードにつながる様子

3. 今後の展開

引き続き、理論、実証、シミュレーションを組み合わせ賢いネットワーク設計を進め、大規模分散量子計算機の効率的な実現に向けて開発を進めていきます。特に、量子光通信技術、量子メモリ・中継技術、分散量子アプリケーションでの開発要素を通信プロトコルや古典制御技術を用いて繋ぎ合わせ、テストベッドを通信システムとして動かすことを目指していきます。また、他のプロジェクトとも連携し、大規模分散量子計算アーキテクチャの観点から今後の開発指針を得ることを目指していきます。

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

2023年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発項目では、量子コンピュータネットワークシステムの統合実証に向けて、主に量子ネットワークのハード面で求められる要素技術の開発を行っています。特に量子もつれ光を使って量子計算ノード間を量子的に接続するハード技術は分散型量子コンピュータ実現のための根幹技術のひとつであり、アーキテクチャ、量子メモリ、全体システム実証といった他の開発テーマと連携を密にとりながら研究開発を進めています。

技術的には2つのアプローチから研究に取り組んでいます。1つは、光子2つが量子的に干渉する「2光子干渉型」の量子もつれ光源の開発と、分散型量子コンピュータシステムの構築です。2光子型は比較的技術が確立している方式で、システム実証の開発テーマと連携し、本研究開発項目で開発された技術を実装した分散型量子コンピュータシステムの原理実証を進めています。

もう1つは、0光子（真空）と1光子の量子重ね合わせからなる「1光子干渉型量子もつれ光」を用いたネットワーク構築です。この方式は、位相同期など2光子に比べ高度な技術の開発が必要になりますが、光損失に耐性を持つ、波長多重型の量子メモリと親和性が高い、など優れたポテンシャルを持った次世代の量子光技術です。開発要素は多岐にわたっており、たとえば、1光子型量子もつれ光源、量子もつれ光源間の位相同期技術、量子もつれ交換方式、光子ルーティング法的设计などの研究をおこなっており、将来的なネットワーク実証を目指し研究開発に取り組んでいます。



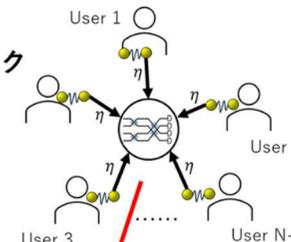
図1. 量子もつれ光実験系

2. これまでの主な成果

量子計算ノード間を量子もつれ光で接続する際、様々な技術的理由により光損失が生じます。このため、損失に耐性がある効率的な光接続の手法の開発が重要になります。また、3つ以上の複数のノード間を接続する場合、2者間の量子もつれでノードを1つずつ接続した方がよい場合や、多者間の量子もつれ状態を使って一気に接続した方がよい場合など、様々なケースが考えられます。本課題では、1光子干渉型の量子もつれの性質を使って、スター型の量子ネットワークにおいて2者間や多者間の様々な種類の量子もつれを、従来よりも効率的に（より光損失に強く）各ノードに配信、またはルーティングする新しい手法を提案しました（Phys. Rev. A 2023）。本手法は、線形光学素子からなる比較的小規模な光回路と光子検出器で構成され、現在の技術でも十分実現可能な方法です。本成果により、その設計指針が得られ、原理実証実験に向けた本格的な技術開発の取り組みが可能となりました。また、この手法を拡張していく際に必要になる量子もつれ光源間の位相同期技術や、量子メモリの波長と通信波長の間をつなぐ量子もつれ光源などの要素技術の開発にも成功しました。さらに、より簡便な2光子型量子もつれ光源を開発し、全体システム実証に必要なハードウェアを構築しています。これらの成果は、それ自体が新技術の実現であるとともに、プロジェ

クト内の様々な開発テーマを支える基本要素技術となっています。

スター型量子ネットワーク



提案する光量子回路

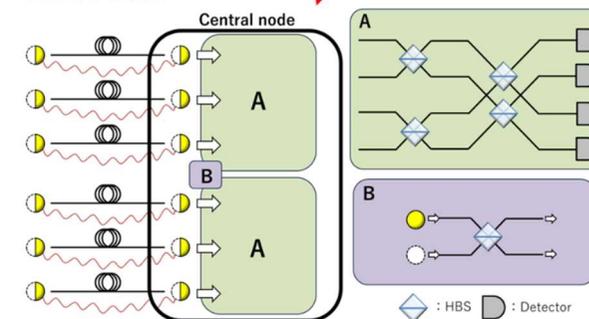


図2. スター型ネットワークでの量子もつれの配信手法

3. 今後の展開

引き続き、2光子干渉方式の開発を進め、プロジェクト全体のシステム実証実験に貢献します。さらに、次世代方式として1光子干渉型の様々な要素技術開発し、本格的な分散型量子コンピュータに必要な量子ネットワークの技術を探求します。

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

2023年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発項目では、光・マイクロ波などの電磁波と物質の量子系間の変換およびそれに基づく量子中継の研究開発を実施しています。

開発技術は、可視域の光子結合する量子メモリ系希土類添加物 Pr:YSO やルビジウム原子、マイクロ波と結合する量子メカニカルメモリ、そして量子メモリと光をつなぐ周波数安定化や量子トランスデューサ技術などです。これらの開発は、量子メモリ間の量子もつれ生成とそれに続く量子中継、超伝導量子コンピュータと量子通信の接続へとつながります。

2. これまでの主な成果

量子中継ネットワークに向けた多重化量子メモリ開発

多数の Pr イオンドープされた結晶の吸収スペクトルに量子メモリ領域を複数生成することで、多重性の獲得を進めた。図のように複数の量子メモリ領域を作成し、かつ2つの量子メモリからの再生光子の周波数モードによる量子干渉性の有無の測定とそれによって周波数多重ベル測定機能へつながる事を示しました。

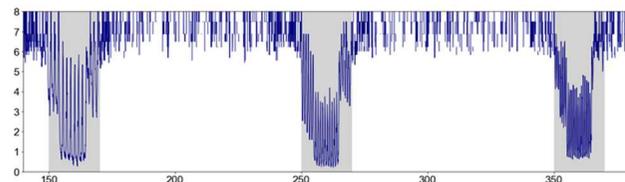


図 1 : Pr:YSO 吸収スペクトルに作成された3つの量子メモリ領域

中継用量子メモリ光源安定化技術の開発

量子中継において量子メモリと結合するために周波数安定化が必要な光源の安定化技術開発を進めました。特に今年度は、波長変換用励起レーザー安定化用2倍波の発生と評価、通信波長レーザー安定化用3倍波の発生と評価を実施しました。

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

Rb 原子を補足する磁気光学トラップを作成し、補足原子数の評価を実施した。また低損失ミラーをもちいた光共振器の構築を実施し、フィネスなどの特性評価を行い、さらに共振器安定化用光源・メモリ書き込み・読み出し光源の安定化に成功しました。

量子メカニカルメモリの開発

開発にあたり、ファブリケーションの最適化や、メカニカルメモリの時間の向上、量子トランスデューサ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を行った。³He 温度におけるオプトメカニカルデバイスの評価のため He 冷凍機を導入しました（写真1）。



写真1: 導入した³He 冷凍機

また量子トランスデューサ用リブ型光導波路の内部損失改善のため、CMP プロセス導入により表面荒れの減少を達成しました。（写真2）

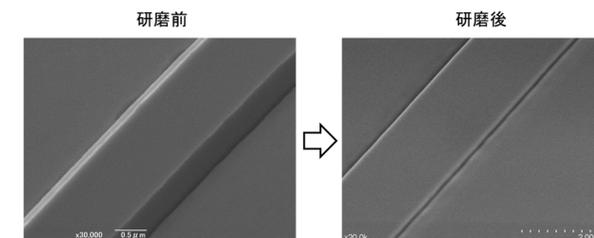


写真2: 表面研磨された光導波路

そして、メカニカルメモリ時間の向上をめざした研究では、光デバイスと同じチップ上に作製できる圧電薄膜上のメカニカルメモリを開発しました（写真3）。



写真3: メカニカル共振器

3. 今後の展開

開発している量子メモリや周波数安定化技術を導入した量子メモリ間もつれの実証をふくむ量子中継技術へと発展させていきます。また量子メカニカルメモリ・量子トランスデューサの開発を通じて、超伝導量子コンピュータの量子通信環境との接続へと進めます。

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

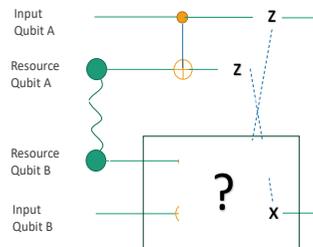
2023年度までの進捗状況

1. 概要

2022年度に完成した量子性評価理論をもとに、当プロジェクト目標達成であるテストベッドに関してその量子性を評価するための実験で実施するための実験手順の特定および必要な理論解析・数値解析を行った。また、2023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を行った。他項目の課題推進者と継続的に情報を交換し、テストベッドネットワークに実装可能な運用プロトコルやアプリが必要とする実装要件の整備を行った。分散型量子コンピュータにおいて、局所性に着目することで、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。また量子計算との統合に向けて、量子センサ、NISQ 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、断熱量子計算における断熱的条件の実験的検出、を行った。

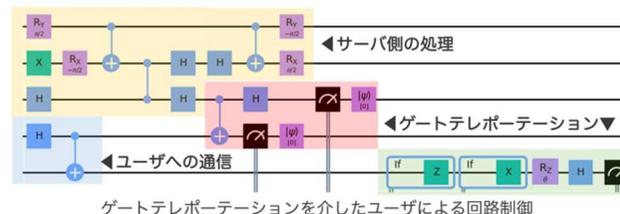
2. これまでの主な成果

(1) 2022年度に完成した量子性評価方法が、最も基本的な量子計算ネットワークに対して適用可能なことを検証した。当該年度では、評価法を当プロジェクト内で実施されることが想定される実験に適用することを念頭に、実験グループと協議し、評価法を実験で実装するための具体的な手順を特定した。その実験によって到達されると予測される量子性の評価を数値計算などを用いて算出した。



(2) 分散型量子アプリの運用プロトコル整備

分散型量子アプリケーションのプロトコル整備として、秘匿型変分量子計算アルゴリズムの量子ネットワークでの運用手法を設計した。各ノードをユーザやサーバに見立てたプロトコル設計とコストの定量的分析を通じ、将来の量子ネットワークアプリケーションの運用解析に貢献することが期待される。

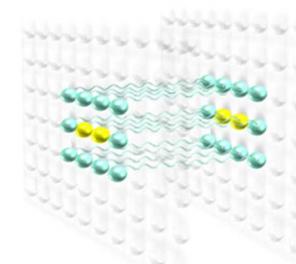


(3) テストベッドネットワークに適合したアプリ設計

テストベッドネットワークに適合可能な分散量子情報処理シミュレータの実装・運用を進めている。このシミュレータはハードウェアから抽象回路まで量子通信の多層構成を網羅的に取り扱ったアプリとなっており、今後の新規参加者の速やかな知識・技術習得への活用も想定している。

(4) 量子ネットワークにおける分散配置された量子センサと量子コンピュータのダイナミクスの解析について、量子アルゴリズムの局所的な性能を評価した。特に、分散型量子コンピュータで virtual distillation を効率的に実装する方法を提案し、量子

通信の光子損失による影響を軽減する手法を開発した。



(5)量子計算との統合に向けた量子センサ及びNISQの効率化に関する研究では、少数の量子ビットを使用しエラーが少なくdepthも浅い状態での新手法を開発した。特に、窒素空孔中心でAC磁場を検出する方法や、KPOを用いた量子機械学習の表現能力を高める技術、及び断熱量子計算の断熱的条件を実験的に計測する新たな方法を提案した。

3. 今後の展開

より複雑な分散型量子計算システムの研究に焦点を当て、遠隔 CNOT ゲートの実装のための量子性を評価する。過去の Choi 演算子を応用した手法が有用であり、さらにベル状態の忠実度を評価して量子ネットワークの全体的な性能を高める。また、分散型量子アルゴリズムについては標準化とテストベッドネットワークで実装・運用を目指し、これまでの研究成果を基に、より詳細なコスト定量化・プロトコル開発を推進する。さらに、分散型アーキテクチャの性能評価やエラー耐性の向上を目指し、量子センサを組み込んで新たなアプリケーションの提案も進める。これらの取り組みにおいて他項目の研究者との連携を一層強化し、緊密な情報交換を行う。

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

2023年度までの進捗状況

1. 概要

本プロジェクトの要でもあるこのテストベッドは将来的には大学・国立研究所・企業等の研究機関に利用してもらい、量子コンピュータネットワークに関するハードウェア・ソフトウェアを実際に移動するネットワークに導入して試験・実証することを可能とし拡張性のある研究・開発を行う拠点となることを想定して開発を進めています。特に実現したいことが2点あり、「量子光学・光技術を統合・システムエンジニアリングして拡張性のあるネットワークシステムを作ること」及び「実際にこの量子ネットワークシステムで複数の量子コンピュータを接続して1つのコンピューティング環境として分散型量子計算を実行可能にすること」です。接続する量子コンピュータの種類は将来的には任意の種類ものを接続できるようにすることを想定しており、プロトタイプとして光接続しやすいイオントラップ型量子コンピュータが接続できるよう研究を進めています。

10量子ビット： 2^{10} = 約1000個の候補の中から解を高速に見つけ出す

もっとたくさん使いたい！

量子ネットワーク化！
=「量子データ」で繋ぐ

10+10量子ビット： 2^{20} = 約100万個の候補の中から解を高速に見つけ出す

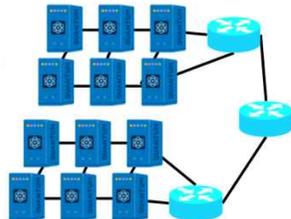


図1. テストベッドで実現する分散型量子コンピュータ

2. これまでの主な成果

2022年度から本プロジェクトは開始され2023年度にかけて何もない部屋から始まった拠点整備・基盤作りが完了(図2)し、他の項目で研究開発された技術のこのテストベッドへの導入が始まりました。



図2. 開始当初(2022年10月)(左)と現在(2023年3月)(右)

現在では3つのもつれ光子対生成ノードとそれらから任意の2ノードを選択して接続するためのベル測定を行う原理実証のための量子ネットワークを開発しており、それぞれのノードや機器をソフトウェアによる制御・監視ができるように開発を続けております。(図3)



図3. 開発した量子ネットワークシステムの構成 (左)ベル測定を行うためのハードウェア構成 (右)制御・運用するためのソフトウェア構成

現在は量子ネットワークの通信リソースであるもつれ光子対の生成と評価を行っております。

光接続可能な量子ノードをテストベッドに導入することを見据え、量子ネットワーク向けのイオントラップ量子ノードの開発も進めています(図4)。

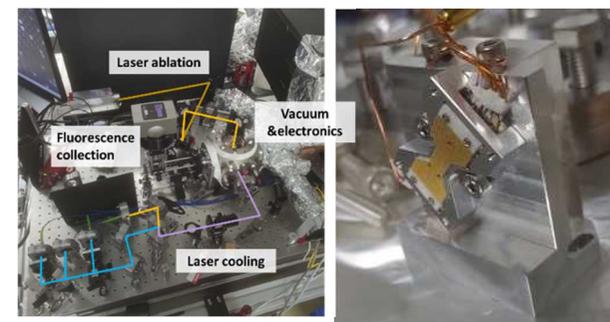


図4. (左)開発中のイオントラップ量子ノード(右)イオン捕獲のための電極チップ

3. 今後の展開

光技術を用いて量子コンピュータを物理的・論理的に相互接続し、スケラブルで負荷耐性・障害耐性もある強靱な量子コンピュータネットワークシステム・アーキテクチャを実証します。これを通して、多数の量子コンピュータでネットワークを形成し、一つの大きな分散処理システムとして機能させることを目指します。

他のプロジェクトで開発された量子コンピュータや量子インターフェースも導入できることを想定しており、より大きな量子コンピュータネットワークシステムを形成し、誤り耐性がある量子計算が実行できることを目指します。