



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

誤り耐性型量子コンピュータにおける

理論・ソフトウェアの研究開発

小芦 雅斗

東京大学 大学院工学系研究科



1. 研究開発プロジェクトの実施期間

令和2年12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

大規模な誤り耐性型量子コンピュータの実現を目指すムーンショットプログラムの中で、本プロジェクトは様々な専門分野の理論研究者を結集し理論・ソフトウェアの研究開発を行う。このような位置づけの研究開発プロジェクトが最大限に効果を発揮するために、本プロジェクトは、ハードウェアからソフトウェアまでの技術レイヤーを包含した誤り耐性型量子コンピュータのクロスレイヤー協調設計モデルの構築を軸に据えている。構築段階では様々なレイヤーの理論研究者の協業を促進するハブとして機能し、完成後は理論研究者のみならずハードウェアのプロジェクトにとっても有益な支援ツールとなる。3年目までに協調設計モデルの雛形を作り、5年目までに有益なツールとして使えるレベルに機能を充実させる。このようなモデル開発と並行して、様々な技術レイヤーにおいて、自由な発想により、誤り耐性型量子コンピュータを大規模化するためのハードウェア要求性能の大幅な低減につながるアイデアの創出を行う。

(2) 研究開発プロジェクトの実施概要

プロジェクトのハブのとなるクロスレイヤー協調設計モデルの開発については、プロジェクトの前半に、超伝導量子ビットを表面符号で符号化する主流の方式に焦点を絞り、誤り耐性型量子コンピュータを構成する様々なレイヤー全てを包含、連結したソフトウェア群を構築し、具体的に多体系のエネルギー推定問題を解くモデルを算出した。この雛形を用いて、必要となる物理量子ビット数や計算時間などの具体的な数値を得た。量子コンピュータが優位性を示す意味のある問題としては、従来よりも緻密な見積もりにも関わらずハードウェアの規模はより小さく済んでおり、結果の数字自体も有益な知見である。後半は、この雛形をもとに、超伝導量子ビット以外の多様な物理系への対応、より現実的な設定の導入、ベンチマークとなるアプリケーションの拡充、新しい成果の組み込みなどを行い、本格的なモデルへと拡張した。このモデルを使用し、所定の最適化のもとでハードウェア要求性能を算出し、ハードウェア開発の研究者にも共有することで、ロードマップの構築や主要課題の探索に役立てている。

雛形の段階から、クロスレイヤー協調設計モデルは大規模量子コンピュータの実現に向けた重要課題を浮き彫りにし、プロジェクトではその多くに対して技術レイヤーを跨ぐ解決策を見つけることができた。顕著な例では、現実的な実装に関わる課題に関して、表面符号の格子手術を1マイクロ秒のクロックで実行できる単一磁束量子(SFQ)回路によるデコーダーの設計(28th IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture にて発表)や、物理量子ビットのエラー率の不均一性の問題を上位レイヤーの回路設計で解決する手法(第28回アジア南太平洋設計自動化会議にて発表)を提案した。長い計算時間に関わる課題としては、バースト型のエラーの訂正を、ハードウェア

構成の大きな変更なしに、わずかなリソースの追加だけで行う手法を提案した (55th IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture にて発表)。また、表面符号の誤り耐性量子計算におけるロードストア型のアーキテクチャを提案し、わずか 3% の計算時間の増加で物理量子ビットを 40% 削減できることを示した (31st IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture にて発表)。

モデル開発と並行して、ハードウェアの制御手法の開拓、誤り訂正の手法の開拓、分散型構造の可能性の開拓、研究開発の支援ツールの整備など、誤り耐性量子コンピュータの実現に向けた理論研究からの貢献を多方面から行った。多くの成果のうち、顕著な3つの成果を以下に取り上げる。

表面符号に基づく FTQC では、ユニバーサルな量子計算に不可欠な T ゲート演算をエラーから保護するために、大きな時間・空間コストを払って魔法状態の蒸留を行うことがボトルネックとなっている。この問題の緩和のために、ゼロレベル魔法状態蒸留と呼ぶ新しい手法を提案した。従来の蒸留手法が論理量子ビット上で動作するのに対し、この手法では正方格子状に配置された物理量子ビットを直接使用する。従来の論理レベル蒸留に比べ、この新手法は蒸留にかかる時間・空間コストを大幅に低減する (PRX Quantum 2025)。

誤り耐性のより基礎的な課題として、解くべき問題のサイズ M が大きい極限で、FTQC の空間および時間のオーバーヘッドをどれだけ減らせるか、という問いがある。初期の FTQC では、空間も時間もオーバーヘッドが $\text{polylog}(M)$ のスケーリングを持つ。最近議論されている量子 LDPC 符号を使えば、定数の空間オーバーヘッドの FTQC を構築できることが知られていたが、時間オーバーヘッドは $\text{poly}(M)$ であった。本プロジェクトでは、連接符号に基づくアプローチを復興し刷新することにより、LDPC 符号と同じ定数空間オーバーヘッドを達成し、しかも時間オーバーヘッドを大幅に短縮できることを示した (Nature Physics 2024)。この時間オーバーヘッドスケーリングは従来型の $\text{polylog}(M)$ よりは大きいため、果たしてこの空間と時間のトレードオフを解消することが可能なかが原理的な疑問として残された。これについては、LDPC 符号による FTQC で定数空間オーバーヘッドと $\text{polylog}(M)$ の時間スケーリングが達成できることを証明し、肯定的に解決した。

FTQC の研究開発を長期にわたって持続する上で、FTQC が動作する規模と、NISQ コンピュータの規模との間に大きなギャップが存在することが課題となっている。これに対し、FTQC の既定アーキテクチャを変更し軽量化した、新しい early-FTQC アーキテクチャを提案した (PRX Quantum 2024)。さらに、このアーキテクチャが、数万物理量子ビットの規模で、意味のある問題を解く際に古典のスパコンに対して量子優位性を持つことを示した (Phys. Rev. X 2025)。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

研究開発プロジェクトの推進については、運営会議のほか、主要な課題推進者と随時その方策について検討を重ねた。研究開発体制については、令和3年4月に当初の体制を整えた後も、様々な状況の変化に対応して強化すべき点を見定め、期間中に計4名の課題推進者を追加した。うち1名は、数理科学分野を対象とする公募を経て採用したも

のである。研究成果の展開については、有効なオープンクローズ戦略について検討を重ね、公開部分についてはその効果を最大化するための整備に予算を配分した。広報・アウトリーチ活動については、ワークショップの主催のほか、PM および課題推進者がスクール、講演会、イベントなどに講師として参加し、プロジェクト活動の周知に努めた。データマネジメントについては、データマネージメントプランに基づき、適切なデータ管理に務めた。

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

FTQC の包括的な数値モデルの構築を世界に先駆けて開始し、超伝導量子ビットを表面符号で符号化する主流の方式についての雛形モデルの構築を手始めに、超伝導量子ビット以外の多様な物理系への対応、より現実的な設定の導入、ベンチマークとなるアプリケーションの拡充、新しい成果の組み込みなどを行い、本格的なモデルへと拡張した。このモデルを活用し、FTQC の様々な課題解決を行うとともに、プログラムのハードウェア開発の研究者にも共有することで、ロードマップの構築や主要課題の探索に貢献している。また、その基幹部分を公開した。

また、自由な発想に基づく理論的アプローチの複数の成果は、FTQC の研究分野に高いインパクトをもたらしたと考えている。ゼロレベル魔法状態蒸留の考え方は、その後 Google に取り上げられ、魔法状態栽培と呼ばれるプロトコルへと発展した。小さな符号の接続に基づく定数空間オーバーヘッド FTQC の発見は、それまで専ら大きな LDPC 符号により議論されていた空間効率に優れた FTQC の分野のトレンドを変え、接続符号に再び焦点を当てる契機となった。アーキテクチャレベルでの革新によって NISQ コンピュータと FTQC のギャップを埋めるアプローチは、アルゴリズム改良に集中している early FTQC 研究の中で高い独自性を発揮している。

(2) 代表的な論文

Nobuyuki Yoshioka, Tsuyoshi Okubo, Yasunari Suzuki, Yuki Koizumi, Wataru Mizukami, “Hunting for quantum-classical crossover in condensed matter problems”, npj Quantum Information **4**, 45 (2024).

クロスレイヤー協調設計モデルを用いて、物性分野におけるハミルトニアン基底エネルギー計算に必要な必要リソースを定量的に算出した。さらに、現代の計算機に対する優位性を示すために必要な問題サイズや FTQC の要求性能を明らかにした。本研究で得られた定量的なサイズはその後のリソース推定の論文で広く用いられているだけでなく、ハードウェア開発における定量的なゴールの指標として用いられている。また、本研究で開発された性能見積もりのプログラムは一般に利用できるように拡張し、Quration というライブラリとしてオープンソースソフトウェアとして公開されている。従って、FTQC の理論の詳細を知らずとも、入力となるプログラム、物理系に関するプロファイル、最適化プロセスなどシステムの一部を変更した際に、どのように性能が変化するかを容易に検証できるようにした。

T. Itogawa, Y. Takada, Y. Hirano, and K. Fujii, “Efficient Magic State Distillation by Zero-level Distillation,” PRX Quantum **6**, 020356 (2025).

本論文では、魔法状態蒸留の大きなオーバーヘッドを削減するため、論理レベルではなく物理レベルで高忠実度の論理魔法状態を生成する「ゼロレベル蒸留」を提案した。正方格子上の最近接 2 量子ビットゲートで実装可能な誤り耐性のある回路を構成し、従来法に比べ 1/10 程度（表面符号の 1 論理量子ビットを構成する物理量子ビット数程度）の空間リソースを用いて高い忠実度の魔法状態を生成できることを示した。本研究は、その後の Google による魔法状態栽培へと発展し、魔法状態生成コストの大幅な削減につながった。

R. Toshio, Y. Akahoshi, J. Fujisaki, H. Oshima, S. Sato, and K. Fujii, “Practical quantum advantage on partially fault-tolerant quantum computer,” *Physical Review X* **15**, 021057 (2025).

本論文では、STARアーキテクチャを前提として、特に微小回転角に対する連続回転ゲートの論理エラーを低く抑える手法を構築した。これにより、従来はコストが大きかった微小回転を多用する量子シミュレーションが現実的となり、ハバード模型に対する量子位相推定を数万量子ビット規模で実行できることを示した。その結果、古典計算機を上回る実用的な量子優位性が得られることを具体的に示した。

Hayata Yamasaki and Masato Koashi, “Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation,” *Nature Physics*, **20**, 247 (2024).

接続符号の新しい形態として、1論理量子ビットの同じ符号を何度も接続する従来手法と異なり、複数論理量子ビットの異なる符号を接続する手法を考案し、デコード等に要する古典計算の時間を考慮してもなお、閾値が存在することを解析的に示した。この手法では、空間オーバーヘッドが定数であるだけでなく、時間オーバーヘッドが既存の LDPC 符号の定数空間オーバーヘッド手法の $O(\text{poly } M)$ から大きく改善し、 $O(\exp(\text{polylog}(\log M)))$ に収まることを示した。この成果は、LDPC 符号のアプローチに比べて注目度が低かった接続符号のアプローチに再び光を当てるものと言える。

Shiro Tamiya, Masato Koashi, Hayata Yamasaki, “Fault-tolerant quantum computation with polylogarithmic time and constant space overheads,” *Nature Physics*, **22**, 27 (2025).

量子 LDPC 符号のデコーダーの既知の性質を全体回路に適用する理論的技法として、FTQC の部分回路の性質を全体回路に反映させる部分回路還元手法を開発し、古典計算の時間を考慮してしきい値定理を初めて証明した。さらに、様々なレベルの最適化の結果、空間オーバーヘッドが定数であり、時間オーバーヘッドが $O(\text{polylog } M)$ であることを示した。これは、FTQCの初期の手法が持つ時間・空間ともに $O(\text{polylog } M)$ のスケーリングから、空間オーバーヘッドを定数にしても、時間オーバーヘッドのスケーリングが不変である、つまり、これまでの手法で常に現れていた空間と時間コストのトレードオフが、実は解消可能であることを示す初めての成果である。

(3) 代表的な特許

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:クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

研究開発課題1-1:クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

実施内容:

クロスレイヤー協調設計を可能にするための研究開発を行った。誤り耐性量子計算機を効率的に設計し開発するためには、技術的なレイヤーを跨って誤り耐性量子計算機を評価し最適化するための基盤が必要となる。本課題では、課題1-1-2および1-1-3と協力し、これを実現するクロスレイヤー協調設計モデルを実現すべく、代表的な技術を組み合わせることでまず基礎的な設計を緻密化し、その中で明らかになった実現上の課題を解決する理論的な研究、および、設計や最適化を可能にするソフトウェアの開発に取り組んだ。とくに、量子デバイス、計算機アーキテクチャ、システムソフトウェアの領域において、現実的な環境で動作する量子誤り訂正の実装方法の提案、計算機設計指標となる各種パラメータの評価、効率的な誤り耐性量子計算機のプログラムの検証と最適化などを行った。さらに、現代の計算機と性能を比較し量子優位性を得るための要求

性能を定量的に明らかにした。

成果：

クロスレイヤー協調設計を可能にするための研究開発を実施し、誤り耐性量子計算機の全体設計を緻密化するとともに体系的な定量評価を可能にした。全体設計の緻密化に際して生じた実装上の課題を解決する理論を提案するとともに、現代の計算機との定量的な比較に基づく量子優位性のための要求性能の評価を行った。

課題推進者：徳永裕己(北海道大学)

研究開発課題1-2:クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

実施内容：

クロスレイヤー協調設計を可能にするための研究開発を行った。誤り耐性量子計算機を効率的に設計し開発するためには、技術的なレイヤーを跨って誤り耐性量子計算機を評価し最適化するための基盤が必要となる。本課題では、課題1-1-1および1-1-3と協力し、これを実現するクロスレイヤー協調設計モデルを実現すべく、代表的な技術を組み合わせてまず基礎的な設計を緻密化し、その中で明らかになった実現上の課題を解決する理論的な研究、および、設計や最適化を可能にするソフトウェアの開発に取り組んだ。とくに、回路設計の観点から誤り耐性量子計算機の実現性を改善するための各種研究を実施した。具体的には、時間や空間的なばらつきを持つ現実的なデバイスで動作する量子誤り訂正の制御方法を提案した。また、回路設計における EDA ツールの考え方をもとに、誤りに耐性のある量子誤り訂正符号の論理操作を自動的に設計、最適化する手法を提案した。これにより、手動での緻密な制御や最適化を行うことなく体系的に効率的な誤り耐性量子計算機を設計することに貢献した。

成果：

クロスレイヤー協調設計を可能にするための研究開発を実施し、誤り耐性量子計算機の全体設計を緻密化するとともに体系的な定量評価を可能にした。東京大学は回路設計の観点から誤り耐性量子計算機における現実的なノイズの振る舞いの汎用的な抑制手法の提案と、誤り耐性量子計算の設計の最適化を数理的な最適化問題に落とし込むことによる、計算機設計の自動化を実現した。

課題推進者：小芦雅斗(東京大学)

研究開発課題1-3:クロスレイヤー協調設計モデルの開発と拡張

実施内容：

クロスレイヤー協調設計を可能にするための研究開発を行った。誤り耐性量子計算機を効率的に設計し開発するためには、技術的なレイヤーを跨って誤り耐性量子計算機を評価し最適化するための基盤が必要となる。本課題では、課題1-1-1および1-1-2と協力し、これを実現するクロスレイヤー協調設計モデルを構築すべく、代表的な技術を組み合わせて基礎的な設計を緻密化し、その中で明らかになった実現上の課題を解決する理論的な研究、および設計や最適化を可能にするソフトウェアの開発に取り組んだ。とくに、第三者がクロスレイヤー協調設計モデルを利用できるようにするためのソフトウェアを開発し公開するための研究開発に取り組んだ。具体的には、クロスレイヤー

協調設計モデルを利用可能にするためのソフトウェアの構造や仕様を決定し、開発を行うとともに、マニュアルの整備などを行った。これを他のムーンショットプロジェクトと共有し、アプリケーションの体系的な評価や、量子誤り訂正に関する基礎的な実験を実施した。また、今後のムーンショットでのさらなる拡張を見据え、誤り耐性を備えた通信や分散計算を実現するためのプロトコルの設計や評価を行った。

成果：

クロスレイヤーでの協調設計を可能にするための研究開発を実施し、誤り耐性量子計算機の全体設計を緻密化するとともに、体系的な定量評価を可能にした。理化学研究所は主にソフトウェア開発の観点から、本課題で得られた成果を第三者が利用できるようにするためのソフトウェアの設計と開発を行った。また、これをもとに、ムーンショットの他プロジェクトとの連携を確立した。

課題推進者：鈴木泰成(理化学研究所)

(2) 研究開発項目2:誤り耐性型量子コンピュータのハードウェア制御法の開発とその性能解析

研究開発課題1-1:量子ビットをベースとする要素技術の研究開発

実施内容：

半導体量子ビットの測定、ゲート操作の定量的な評価を行なった スピン量子ビット測定の忠実度・測定反作用・熱流ダイナミクスを解析するとともに、スピン閉塞機構の理解を進展させた。加えて、超放射・超吸収系における熱輸送の普遍則と量子デバイスの熱特性を明らかにした。電気双極子スピン共鳴による高速スピン操作の忠実度限界とデコヒーレンス機構を解析し、非線形駆動およびSi特有の谷自由度の影響を明らかにした。さらに、Si/Ge 正孔量子ビット系におけるスピン-軌道相互作用と g 因子の役割を評価した。

成果：

測定の反作用に伴う熱の出入りに関する知見と相互作用する量子系に出入りする熱流の普遍的上限を見出した。さまざまな非線形性を持つ電気双極子スピン共鳴では、マイクロ波強度の増大が位相緩和を伴う可能性があることを指摘した。

課題推進者：都倉康弘(筑波大学)

研究開発課題1-2:量子ビットをベースとする要素技術の研究開発

実施内容：

真に有用な量子コンピュータの実現には、複数の超伝導量子プロセッサを、光子を用いて量子的に接続する「分散型」量子コンピュータが必須と目されている。研究期間の前半には、そのための鍵となる技術である、超伝導量子ビット-伝搬マイクロ波光子量子ビット間の決定論的相互作用の実現方法について、理論面から研究開発に取り組んだ。研究期間の後半には、各ノードでの量子情報を効率よく保持するために、導波路との結合レートを大きく変化させられる可変結合器の実現方法について、理論面から研究開発に取り組んだ。

成果：

周波数に量子情報をエンコードしたマイクロ波光子量子ビットを、超伝導量子ビットに一回反射させることで、両者間の量子状態交換 (SWAP ゲート) が起こることを実証する実験手法を理論面から提案し、実際に確認した。また、ガルバニック結合を活用して、共振器－導波路間結合レートを4桁にわたって制御可能な可変結合器を提案した。

課題推進者: 越野和樹 (東京科学大学)

研究開発課題2: 調和振動子モードをベースとする要素技術の研究開発

実施内容:

本課題では、大規模な誤り耐性量子計算の実現に向け、光によるボソニックコードを用いた誤り耐性型量子計算方式の研究を実施した。特に、GKP code を中心として、Cat code、単一光子等の複数のボソニック符号を対象に、状態生成、誤り訂正・復号、ボソニック符号のハイブリッド化手法の検討を進めた。また、ボソニック符号状態の生成から誤り耐性量子計算アーキテクチャまでを一体として評価するため、効率的な数値シミュレーション手法と理論モデルの開発を進めた。また、誤り耐性量子計算の基礎的な課題として、解くべき問題のサイズ M が大きい極限で、空間および時間のオーバーヘッドを削減する手法の探求を行った。

成果:

光 GKP 状態の生成手法、光子数識別器を用いたボソニック符号状態生成の効率的な探索手法、GKP 符号を用いた誤り耐性量子計算の性能改善手法と効率的な復号方式を開発した。さらに、GKP 符号と Cat 符号、単一光子などを組み合わせたハイブリッドボソニックコード方式を検討し、誤り耐性閾値、光子ロス耐性、リソースコストの観点から有望な符号構成を明らかにした。これらの成果により、ボソニックコードの特性を活かした誤り耐性量子計算アーキテクチャの設計指針を得るとともに、将来的な大規模量子計算に向けた基盤技術を構築した。また、誤り耐性量子計算の基礎的な課題については、接続符号に基づくアプローチと LDPC 符号に基づくアプローチのそれぞれについて、オーバーヘッドスケールングの大幅な改善に成功した。

課題推進者: 小芦雅斗 (東京大学)

研究開発課題3: デバイス研究推進のためのソフトウェア技術開発

実施内容:

In this project we developed a substantial new version of our popular library QuTiP, the Quantum Toolbox in Python. To enable QuTiP to become one of the most popular in the world we enabled support for complex data formats like Google's JAX and Nvidia's CuQuantum, developed a quantum information processing package to support noisy pulse-level simulations, added new solvers (including a non-Markovian method), and developed a new optimal control library.

成果:

QuTiP is now one of the most popular toolkits for modelling quantum computers in the world, seeing an increase during this project of more than 3.5 downloads. We published three papers documenting the new feature set developed in the remit of this project, and

saw QuTiP's use grow across research and educational fields. The extensive backend development, and support for powerful GPU libraries, will enable us, in the next years, to push QuTiP to the forefront of high-performance computing, and see its use on high-performance platforms, like Fugaku and Fugaku-next, grow substantially.

課題推進者: Nori, Franco (理化学研究所)

(3) 研究開発項目3: 誤り耐性型量子コンピュータの性能改善のための量子誤り訂正法の開発とその性能解析

研究開発課題1: 新たな量子誤り訂正方式の開発

実施内容:

本課題では、量子誤り訂正の低レイヤー改善と量子計算アーキテクチャの刷新の両面から、実用的な誤り耐性量子計算に必要な理論・ソフトウェア技術の研究開発を行った。前半では、量子ビット接続性を低減する量子誤り訂正方式、フラッグ情報を活用する復号法、イジング模型に基づく汎用復号法、コヒーレントノイズを含む大規模シミュレーション技術を開発した。

後半では、協調設計モデルから得られた知見を踏まえ、Clifford 演算に連続位相回転ゲートを基本ゲートとして加えた STAR アーキテクチャを提案・高度化するとともに、T ゲートベースの既存方式に対しては魔法状態蒸留のオーバーヘッドを大きく削減するゼロレベル魔法状態蒸留法を提案した。これにより、本課題は誤り訂正符号、復号、計算モデル、非 Clifford 資源生成までを見通した統合的な研究として展開された。

成果:

本課題により、STAR アーキテクチャを提案し、その改良によって連続回転ゲートの論理エラーの回転角依存性を改善することで、ハバード模型などの物性物理ターゲットだけでなく、量子化学計算を含む実用的問題に対しても、数万量子ビット規模で量子優位性が期待できる道筋を示した。また、T ゲートベースの既存の誤り耐性量子計算に対しては、ゼロレベル魔法状態蒸留を提案し、魔法状態蒸留の空間・時間オーバーヘッドを大きく削減する新たな方向性を示した。

加えて、イジング模型を用いた汎用復号法、カラー符号の閾値改善、コヒーレントノイズを含むシミュレーション技術、接続性を低減する誤り訂正方式などを通じて、誤り耐性量子計算の設計・評価基盤を前進させた。とりわけゼロレベル魔法状態蒸留は、その後の魔法状態栽培という研究潮流の先駆けとなる成果であり、誤り耐性量子コンピュータの実現に向けた重要な指針を与えた。

課題推進者: 藤井啓祐 (大阪大学)

研究開発課題2: 誤り耐性量子計算に必要なミドルウェアの設計

実施内容:

本課題では、フォールトトレラント量子計算のミドルウェアに必要となる、論理ゲート表現、論理量子回路の圧縮、量子論理ゲートの実装、量子誤り訂正符号の復号、効率的な量子誤り訂正符号について、異なる符号ファミリーを対象に課題の明確化と新しい手法の開発を行なった。符号ファミリーでは、フォールトトレラント量子計算に重要と考えられる、

表面符号ファミリーと qLPD 符号を主に扱い、それぞれの符号で異なる実装方法を議論した。また、量子誤り訂正符号の実装方法、論理ゲート特性、量子誤り訂正符号の復号など、一連の課題を系統的に議論することで、ミドルウェア層における課題と指針を明確化した。

成果:

論理量子回路の圧縮にともなう計算時間のオーバーヘッドを見積もるため、論理量子ゲート回路表現を特定の問題へ帰着させる形で定式化できることを示した。この表現上で最適化問題を平面直交 3SAT と呼ばれる特定の問題に多項式時間で帰着させ、3D トポロジカル量子回路最適化のサブセットが NP 困難であることを示した。

非クリフォード論理量子ゲートに着目し、CCZ ゲートをトランスバーサルに実装できる量子誤り訂正符号実装に着目し、その振舞いを明らかにした。このノイズに対する振舞いに基づき、量子誤り訂正符号の効率の良い復号方法を提案した。この復号方法は古典誤り訂正で確立されているフリップに基づく。従来は、フリップを用いる古典誤り訂正符号は量子誤り訂正符号へ拡張できないと考えられていたが、本成果では、デコーダーにランダム性を導入することで、有限の確率でこれらの「訂正不能」エラーを訂正できるようになり、現象論的ノイズの下で閾値約 5.5%を得た。これは、この符号における最大閾値に近く、デコーダーの計算時間も従来の $O(n^3)$ から $O(n)$ (並列化の場合は $O(1)$) へと改善できることを示した。また、効率的な量子誤り訂正符号として、新しい qLPDC 符号ファミリーを示した。回路レベルのノイズのシミュレーションでは、同程度の距離の表面符号と同程度の誤り抑制効果を、約 1/5 の物理量子ビット数で実現できることが示された。これらミドルウェアにおける諸要素を実装系の中で統合的に議論した。

課題推進者: 根本香絵 (沖縄国際大学)

研究開発課題3: 高レート符号を用いた誤り耐性量子コンピュータアーキテクチャの開発
実施内容:

課題推進者提案の多超立方体符号について、従来の $[[6,4,2]]$ に加え、 $[[4,2,2]]$ も組み合わせた全パターンの性能を数値シミュレーションで評価し、最適な構成を探索した。また、符号化器の改良にも取り組んだ。多超立方体符号のシンドローム測定に必要な大きなオーバーヘッドを削減できるように、ゲージ演算子を導入して部分系符号にした多超立方体符号を提案するとともに、本符号専用の復号器の開発に取り組んだ。別の高レート符号として、 $[[30,6,5]]$ シンプレクティック・ダブル符号に関する研究を行い、効率的なゼロ状態の符号化器の開発に取り組んだ。それを用いて論理 CNOT ゲートの性能を数値シミュレーションで評価し、3つのナイーブな符号化器を用いた場合と比較した。また、本符号の任意状態符号化器の開発にも取り組んだ。

成果:

多超立方体符号において $[[6,4,2]]$ と $[[4,2,2]]$ のすべての組み合わせを調べた結果、レベル 3 ではレベル 1 に $[[6,4,2]]$ を、レベル 2 と 3 に $[[4,2,2]]$ を使った場合が、レベル 4 ではレベル 1 と 2 に $[[6,4,2]]$ を、レベル 3 と 4 に $[[4,2,2]]$ を使った場合が最も高性能であることを明らかにした。また、レベル 3 の符号化器に必要なオーバーヘッドを従来に比べて 60%削減することに成功した。多超立方体符号を部分系符号にした新符号に関し

ては、ニューラルネットワークを利用することで本符号専用の復号器を開発し、既存の復号法を凌駕する性能を確認した。[[30,6,5]]シンプレクティック・ダブル符号に関しては、新たに開発した効率的な符号化器を用いた論理 CNOT ゲートの性能を3つのナイーブな符号化器を用いた場合と比較し、最も少ないオーバーヘッドで最良の論理エラー率を達成できることを確認した。本符号の任意状態符号化器の開発も成功した。

課題推進者:後藤隼人(理化学研究所)

(4) 研究開発項目4:分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの研究開発

研究開発課題1:分散型構造を持つ誤り耐性型量子コンピュータの研究開発

実施内容:

本課題では、分散型構造を持つことで初めてスケールアップが可能な物理系を用いた量子計算や、モノリシックで開発が進む量子計算機の結合による更なるスケールアップの可能性を明らかにすべく、分散型の誤り耐性量子計算の基本設計の同定に取り組んだ。分散量子計算は通信部と演算部から構成されるが、本課題では特に、演算部の詳細に依らずに動作するユニバーサルな通信部の設計に着手した。より具体的には、(1)離れた量子プロセッサが量子通信路によりポイント・ツー・ポイントで結ばれている場合に、プロセッサを結びつけるための分散用基本スキームの提案や、(2)量子通信路によって複数の量子プロセッサが結ばれている量子ネットワークが与えられた際に、そのネットワークトポロジーや量子通信路の詳細に依らずに、任意の2つのプロセッサを最小コストで結ぶプロトコルの提案を行った。

成果:

空間的に離れている量子プロセッサに CNOT ゲートを施すことが出来れば、それらのプロセッサは量子的に接続され、一つの大きな量子プロセッサとして機能する。その離れた量子ビットへの CNOT ゲート実装のために、配るべきリソースが量子もつれである。従って、分散量子計算の通信部が担う基本タスクは、離れた量子プロセッサへの量子もつれ供給となる。

本課題では分散用基本スキームとして、量子ビットと量子もつれ状態にあるコヒーレント状態を、損失通信路を通じて伝送することで、離れた量子ビット対に一種類のエラーしかもたない量子もつれを供給する方式を考え、それらの方式が与え得る量子もつれの産出レートの原理限界を導出した。その結果、遠隔非破壊パリティ測定に基づく量子もつれ供給が最適な選択であることが明らかとなった。また、量子もつれ生成方式が十分効率的な場合、従来必要とされた「量子もつれ蒸留」なしに分散量子計算を行う方が効率的で優れた設計である可能性を見出した。

他方、現在のコンピュータは通常、通信用に設計されたインターネットプロトコルを使って接続されている。同様に分散量子計算においても、インターネットプロトコルの量子版に相当する「量子インターネットプロトコル」が、離れた量子プロセッサを接続するための基本ツールとなる可能性がある。本成果では、そのような量子インターネットプロトコルの礎となるアイデアを提案した。具体的には、任意トポロジーの量子ネットワーク上の2ノード間に、ネットワークサイズに依らずに需要に応じた定数エラーの量子もつれを供給するために、サブネットワークを最小コストで接続する方法を提案した。これは、1次元ネ

ネットワークに対する量子中継理論や接続量子誤り訂正符号の一般化に相当し、汎用性が高い。

課題推進者: 東浩司 (NTT)

研究開発課題2: 異種量子システムエリアネットワークの分散型誤り訂正の研究開発

実施内容:

Over the past five years, we have advanced distributed fault-tolerant quantum computing through protocol design, simulation, and hardware-aware optimization. We executed extensive resource estimations for Hamiltonian simulations using Cirq, defined distributed quantum error correction (QEC) RuleSets, designed optimal switching networks, modeled cosmic-ray error avoidance and developed fault-tolerant implementations of a qRAM. We created detailed circuits for optimization and other simulation circuits. Our results were published multiple peer-reviewed papers for Physical Review Letters, IEEE Quantum Week, and QCNC 2026, while fostering international collaborations with NICT, the Chicago Liang group, and researchers in Thailand.

成果:

These efforts provided a solution to the critical issue of catastrophic cosmic ray events in quantum computers, without which long computations are impossible. They provide fault-tolerant and resource-efficient implementation of quantum RAM (qRAM), as well as significantly optimized resource allocation and reduced cross-layer vulnerabilities in quantum networks. Our system-independent solution employs a distributed error correction scheme to address chip-level catastrophic errors, which have long been seen as obstacles to performing useful computational tasks on practical quantum processors. Additionally, we utilize an innovative hybrid hardware-software approach to tackle catastrophic cosmic ray events. By introducing pieceable bucket-brigade schemes, we have significantly reduced the overhead associated with fault-tolerant quantum RAM (QRAM). Ultimately, these concrete architectures pave the way for scalable quantum multicomputer deployments.

課題推進者: Van Meter, Rodney (慶応義塾大学)

研究開発課題3: 分散型量子コンピュータの物理アーキテクチャの研究開発

実施内容:

本課題では、光接続による分散型量子コンピュータの新しい物理アーキテクチャの探索に関する理論研究を実施した。具体的には、離れたイオントラップ量子ビット間の光接続の効率を最大化するための数値最適化手法の開発や、量子メモリ間の新しい光接続手法の開発などを行った。さらに開発した手法を分散型の量子誤り訂正アーキテクチャに応用し、量子誤り訂正を含めた詳細な数値シミュレーションによる性能評価を行った。

成果:

離れたイオントラップ量子ビット間において、光接続により量子もつれを共有する系につ

いて、その効率を最大化するようなイオンの励起パルス波形を数値的に探索した。その結果、時間軸で左右の広がり異なる非対称ガウス波形という比較的シンプルな励起パルス波形で、生成される量子もつれの生成レート・フィデリティのトレードオフ曲線を準最適化できることを数値的に示した。また、光接続により効率的に多体量子もつれ状態を配布する手法を提案し、その優位性を理論解析により明らかにした。さらに、同手法を分散型量子コンピュータのアーキテクチャに適用し、分散型量子誤り訂正符号の性能向上に資することを数値シミュレーションにより明らかにした。

課題推進者:武岡正裕(慶応義塾大学)

(5) 研究開発項目5:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

研究開発課題1-1:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

実施内容:

本課題では、誤り耐性型量子コンピュータが実現した際の重要な応用である量子暗号、量子ネットワークに関し、量子計算の検証、量子優位性の証明、量子暗号プロトコルの構築を行った。古典検証者と量子実行者の非対称性を軸に、QMA のゼロ知識、NISQ 計算の出力検証、proofs of quantumness、量子コミットメント・署名・公開鍵暗号・鍵リリース・認証付き消去を検討し、量子状態を用いる新しい暗号機能とその限界を明らかにした。

成果:

主要成果として、QMA に対する古典検証可能 NIZK、量子コミットメント・署名が一方向関数なしでも成立し得ること、OWSG/EFI/one-way puzzles 等の含意関係、量子公開鍵暗号の改ざん耐性、認証付き消去・certified everlasting security、一方向性関数からの量子公開鍵暗号の構成を行った。

また、IV-PoQ を導入して一方向関数から量子優位性を構成し、さらに IV-PoQ と古典的に安全な one-way puzzles の同値性を示すことで、量子優位性に完全な暗号的特徴付けを与えた。

課題推進者:森前智行(京都大学)

研究開発課題1-2:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

実施内容:

本課題では、符号構造と性能の関係の解明に向けて、既知の非スタビライザ型量子誤り訂正符号である RHSS 符号、SSW 符号、SSSZ 符号の3つ符号の性能検証を行った。大規模量子計算において補助量子ビットの状態準備での利用が考えられる SSW 符号については、既知の符号化回路をもとに検証を進め、必要な物理量子ビット数などを算出した。符号化回路が知られていない他の二つの符号については、その構成に取り組んだ。

成果:

実用的な非スタビライザ型符号の開発において、符号空間には、SSW 符号が持つ自己相補性のような、符号化回路の構成が見通しやすい構造が必要であることが分かり、今後の開発において検討すべき符号構造の指針が得られた。

課題推進者:杉山太香典(東京大学)

研究開発課題1-3:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

実施内容:

本課題では、誤り訂正符号、測定、ゲート実装、量子情報復元、量子誤り緩和などの量子情報処理に対して、対称性が課す原理的制限を統一的に解析する理論基盤を構築することに挑んだ。具体的には、非対称性のリソース理論、情報幾何、最適輸送、量子 Fisher 情報などの手法を用いて、対称性が、測定精度、量子チャンネル実装精度、誤り訂正などの量子情報処理の能力をいかに制限し、その制限を対称性の破れがどのように和らげるかを定量的に解析した。また、この解析に必要となる非対称性のリソース理論における状態変換理論の基礎を整備し、必要な数理的手法を揃えることを行なった。

成果:

連続的対称性のもとで行われる任意の量子情報処理が満たすべき普遍的制限を発見した。この結果により、Eastin-Knill 型の量子誤り訂正符号に対する制限、Wigner-Araki-Yanase 型の測定制限、保存則下でのゲート実装制限を、一つの枠組みから統一的に理解できるようになった。さらに、この結果を得た際の数理的手法を応用することで、Wigner-Araki-Yanase 定理を連続スペクトル・非有界保存量を含む一般的状況へ拡張し、また任意の量子誤り緩和手法に対する普遍的サンプリング下界、および Gibbs 保存操作の実装に必要な量子コヒーレンスコストを明らかにした。さらに、これらの成果を一般の量子チャンネル実装に対するリソースコスト解析へと拡張し、様々な量子情報処理の実装可能性を、対称性とリソースコストの観点から評価する理論基盤を構築した。また、非対称性のリソース理論における状態変換理論を整備し、量子 Fisher 情報、Fisher 情報行列などの量が、状態の非対称性を特徴づける基本量として機能することを示した。これらの成果は、関連する Physical Review Letters 4 報を含む多数の論文として発表され、量子情報分野の主要国際会議である QIP においても期間内に 4 件の talk 採択を得た。

課題推進者:田島裕康(九州大学)

研究開発課題1-4:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

実施内容:

本課題では、量子ダイナミクスの加速・減速理論である Fast-forward 法を基盤として、スケラブル量子ビット系における高精度制御および Level crowding 問題の解決に向けた理論研究を推進した。また、異なる時間発展軌道間を接続する新たな制御概念を検討し、従来の Fast-forward 法より広範な量子ダイナミクスへ適用可能な手法の開発を行った。これにより、超伝導量子ビット系における不要なポピュレーション遷移の抑制や Level crowding 問題への応用可能性について理論的に検討した。また、Kerr-cat 量子ビットにおける残留 ZZ 結合の抑制と高速 2 量子ビットゲートの両立を目的として、準位縮退を活用した新たな制御手法について理論的に研究した。量子ビット間相互作用に起因する不要な ZZ 結合は量子ゲート精度低下の要因となるが、エネルギー準位構造を超伝導回路により設計することで、その影響を低減する手法について検討した。さら

に、高速かつ高忠実度な 2 量子ビットゲートの実現に向けた制御パラメータ設計および制御プロトコルの検討を行った。

成果:

Fast-forward 法を基盤として量子ダイナミクスの加速と減速を統一的に扱う新たな制御概念「inter-trajectory traveling」を提案し、従来手法では対象外であったパラメータ領域での柔軟な制御を可能にした。また、異なる時間発展軌道間を接続する枠組みを導入することで、スケーラブルな量子ビット系における不要なポピュレーション遷移の抑制や Level crowding 問題の解決に向けた理論的指針を与えた。

さらに、Kerr-cat 量子ビットに対して準位縮退を利用した制御手法を提案し、残留 ZZ 結合の低減と高速・高忠実度な 2 量子ビットゲートの両立が可能であることを理論的に示した。これにより、誤り耐性量子コンピュータの実現に向けた高精度量子制御技術の基盤を構築した。

課題推進者:増田俊平(産業技術総合研究所)

研究開発課題1-5:誤り耐性型量子コンピュータの新規手法・応用の萌芽的研究開発

実施内容:

本課題では、量子回路の最適化に用いられるツールである ZX カリキュラスの背後にある数理論的立場から明らかにし、トポロジーや位相的場の理論との関係を用いることで具体的な量子ゲートを構成すると同時に、ユニバーサルな量子計算の可能性について議論した。

成果:

量子回路の最適化に用いられる ZX カリキュラスの背後にある数理的構造として Frobenius-Hopf 代数に注目し、その量子群からの実現、具体的な量子ゲートの構成、ユニバーサルな量子計算の可能性について論じた。また Frobenius-Hopf 代数の一般化としてフュージョン代数(非可逆対称性)を議論し、非可逆対称性により守られた相の分類やその具体的構成について新たな結果を得た。

課題推進者:山崎雅人(東京大学)

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

- ・東京大学工学系研究科に PM 支援体制チームを構築した。事務系統は研究科の支援を受けた。
- ・研究開発プロジェクトの推進に関する重要事項について必要な連絡及び調整を行うため、運営会議を設置した。運営会議の構成は、PM を議長とし、参加機関等(代表機関、研究開発機関および JST)を参加者とする。運営会議では、研究開発プロジェクトの推進に関する重要事項について必要な連絡や、課題推進者/研究開発機関追加の承認などを行った。主要な課題推進者4名とは頻繁にオンラインミーティングを開き、プロジェクトの方向性等について議論を重ねた。

- ・課題推進者の研究の進捗状況の把握に努めた。

研究開発プロジェクトの展開

- ・令和2年12月に10名の課題推進者により研究を開始した。令和3年度から新たに課題推進者3名を加え、本プロジェクトの研究開発体制を整えた。令和4年度には、分散型量子コンピュータの可能性を追求する項目4に、具体的な物理系の解析からボトムアップ的にアプローチする課題推進者を追加することで、この項目を強化した。同時に、ムーンショット内のハードウェアプロジェクトとの連携も強化された。令和6年度からは、量子誤り訂正法の開発を行う項目3に当該分野において高い実績を持つ課題推進者を1名追加した。令和7年度には、項目1に新たな課題推進者、参画機関を加え、知財戦略上の自由度を広げた。
- ・ムーンショット目標6を明示した形で、数理科学的アプローチを用いた研究開発の公募(横断的支援(数理科学)研究開発課題公募)が行われた。採用された1名は令和4年度途中より項目5の課題推進者として本プロジェクトに加え、数理科学的視点からの研究を強化した。
- ・理論研究である本プロジェクトでは、参画研究者と世界各地の機関の研究者との間で活発な共同研究を進めた。

(2) 研究成果の展開

- ・項目1で開発しているクロスレイヤー協調設計モデルは、各レイヤーの最新の知見を取り込むことでその価値が高まるため、プロジェクト外からも最新の知見がこのモデルに組み込めるモジュールとして提供される流れを生むためには、オープン化が望ましい。一方、プロジェクト内で生まれた知見には、一部クローズにすることで競争力を生むものがあるという側面も見逃せない。このような複雑な状況下で、有効なオープンクローズ戦略について随時検討を継続している。
- ・項目1で開発しているクロスレイヤー協調設計モデルのソフトウェア群を、広い範囲で活用できる形にすることが望まれるが、そのために必要なリファクタリング、ドキュメント整備などは、かなりのマンパワーが必要となる。項目1の参画研究者が直接それを担当すると、その分だけ研究開発に注力する時間が減るため、研究力のある人員に時間を割かせるのは得策ではない。そこで、令和4年度から業務委託という形で開発稼働を拡充し、実用的なソフトウェアの実現を狙うこととした。

(3) 広報、アウトリーチ

- ・令和3年10月に「誤り耐性型汎用量子コンピュータを支える理論と数理科学の視点」をテーマにオンラインのワークショップを主催し、本プロジェクトの課題推進者・参加研究者4名が数理科学的な視点を交えて量子コンピュータに関連する理論研究についての講演を行った。同時期に開始された数理科学の研究提案の公募に合わせたものであるが、講演の中にチュートリアルを設けて、広範囲の参加者を想定したプログラムとした。

- ・令和5年4月には、数理科学分科会主催の「誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けた数理科学ワークショップ」に協力し、「ムーンショット目標 6 からの事例紹介及び質疑応答」のセッションで本プロジェクトの若手研究者 2 名が講演を行った。100 名を超える参加があり、アンケートで 9 割以上が大変満足または満足と回答。さらに想定を超える50名以上から講演資料の事後リクエストがあった。
- ・量子技術に関する国際シンポジウム QI2023、国際ワークショップ AQIS2024 Satellite Workshop などに協力し、招待講演者の招聘などを行った。令和5年度には、Nature 誌にプログラムの特集記事を掲載するにあたり、Partner Contents の記事作成を行った。
- ・その他、PM および課題推進者が、数百人規模の一般参加のスクールに講師として参加し、初学者向けの量子情報の講義を行った。また、高等学校や、化学系の企業の方々が出席する研究会、防衛装備庁の技術シンポジウムなどで PM が講演し、様々な立場の方々へのこの分野の周知に努めた。直近では、日本未来科学館において、展示「量子コンピュータ・ディスコ」の総合監修を課題推進者が務め、PM が令和7年9月のトークイベントに出席した。

(4) データマネジメントに関する取り組み

本プロジェクトでは、プログラムコードがデータマネジメントの主な対象となっている。データマネジメントプランに基づき、適切なデータ管理に務めた。QuTiP 関連のコードについては、公開されている。クロスレイヤー協調設計モデル関連のコードについては、基幹部分について最近公開した。データの公開の取り扱いについては、とくに、企業の参画機関におけるポリシーを尊重しつつ、研究成果の効果的な展開を行う方策の検討を重ねている。

6. 研究開発プロジェクト推進体制図

