PRESS RELEASE

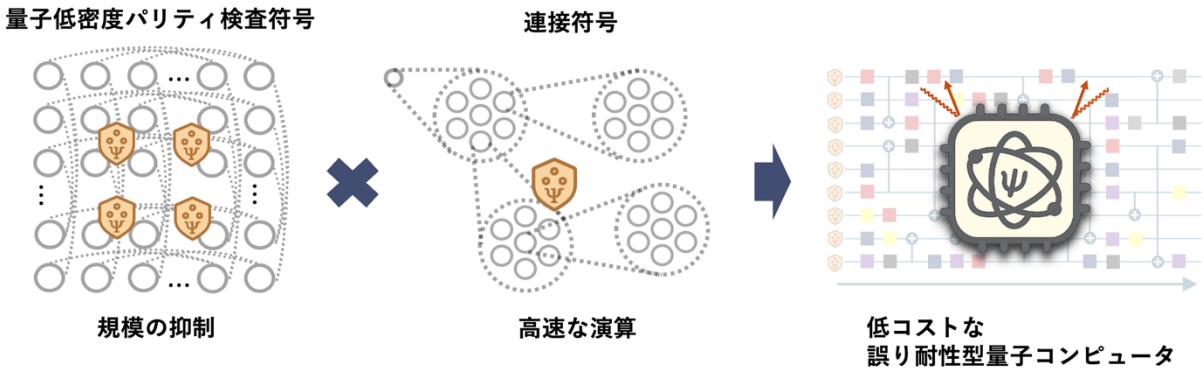
東京大学
Nanofiber Quantum Technologies, Inc.
科学技術振興機構（JST）

量子コンピュータの規模と計算速度のジレンマを解消

――誤り耐性量子計算のコストを大幅に削減する新提案――

発表のポイント

- ◆ 大規模な量子コンピュータの実現には、エラーを訂正しながら計算を進める誤り耐性量子計算の仕組みが不可欠です。しかし、その実装において、使用する量子ビット数（規模）の増大と計算速度の低下を同時に抑えることは両立困難な課題とされてきました。
- ◆ 本研究では、2 種類の量子エラー訂正符号を組み合わせたハイブリッド誤り耐性方式を提案しました。この方式により、量子コンピュータの規模の増大と計算速度低下のジレンマを解消し、両者を同時に抑制できることを理論的に証明しました。
- ◆ この成果は、世界的に開発が進む量子コンピュータの誤り耐性化コストを大幅に低減し、その実現を加速させる基盤技術としての幅広い応用が期待されます。



2 種類の量子エラー訂正符号を用いて規模の抑制と高速な計算を実現する誤り耐性型量子コンピュータ

概要

東京大学大学院工学系研究科の田宮 志郎 客員研究員と小芦 雅斗 教授、および同大学大学院情報理工学系研究科の山崎 隼汰 准教授は、誤り耐性型量子コンピュータの性能を左右する規模と計算速度のジレンマを解消する新しい理論を確立しました。

量子コンピュータの計算に用いる量子ビット（注 1）は、ノイズの影響を受けやすいことが知られています。そのため量子エラー訂正符号（注 2）という技術でエラーから量子ビットを守りながら計算を進めることが不可欠です。しかし、従来の方式では、使用する符号の種類によって規模か計算速度のどちらかを犠牲にする必要があり、両立が困難でした。そこで本研究では、情報の保持効率に優れた量子低密度パリティ検査符号（注 3）と、演算の実行に適した連接符号（注 4）を組み合わせたハイブリッド方式を提案しました。また、この方式の解析のために「部分回路縮約」という手法を新たに開発しました。この手法を用いることで、本方式が、使用する量子ビット数の増大を大幅に抑えつつ、計算速度の低下も従来手法と同レベルに

抑えられることを厳密に証明しました。この成果は、実用的な量子コンピュータ実現のハードルを下げる道筋を示すもので、世界的な開発競争が続く量子コンピュータの新たな設計指針となることが期待されます。

発表内容

量子コンピュータは通常のコンピュータと比較してある種の計算問題を高速に解く能力が期待されていますが、その最小単位である量子ビットはノイズに弱く、エラーが発生しやすいという根本的な問題があります。そのため、大規模な計算には、発生したエラーを計算途中で訂正しながら処理を進める「誤り耐性量子計算」が不可欠です。

誤り耐性量子計算では、量子エラー訂正符号という技術を用いて、計算に使う量子ビット（論理量子ビット）を、ノイズの影響を受けやすい実際のデバイスに並べた多数の物理量子ビットの組み合わせとして構成することでエラーから保護します。このとき、量子コンピュータの規模に直結する、1 つの論理量子ビットを保護するために必要な物理量子ビットの数と、計算速度に直結する、誤り耐性化の一連の処理によって生じる計算の遅延の比率を可能な限り小さくすることが重要です。

この規模と計算速度は、使用する量子エラー訂正符号に左右されます。例えば、近年注目される量子低密度パリティ検査符号は、少ない物理量子ビットで多くの情報を保護できる（＝規模の増大を抑えられる）符号ですが、その複雑な構造から計算を行うのが難しいという弱点があります。一方、古くから知られる連接符号は、構造のシンプルさから計算の実行速度は高いものの、情報を保護するためには多くの物理量子ビットを必要とします。このように規模の増大と計算速度の低下は、両方を同時に理想的なレベルで抑えることが困難でした。

そこで本研究では、この 2 種類の量子エラー訂正符号を適材適所で活用するハイブリッド方式を採用しました（図 1）。具体的には、情報の保持効率に優れた量子低密度パリティ検査符号を用い、苦手とする計算については、実行を加速する効果を持つ補助的な量子の状態を、高速な連接符号を用いて生成するという役割分担です。

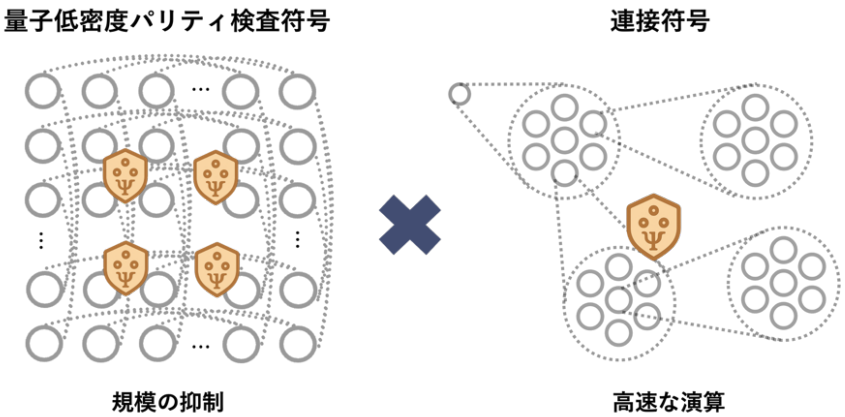


図 1：本研究の提案方式で用いる 2 種類の量子エラー訂正符号の模式図

量子低密度パリティ検査符号（左）は、少ない物理量子ビットで多くの論理ビットを保護できる（規模の増大を抑えられる）という利点がありますが、構造が複雑で演算に時間がかかります。一方、連接符号（右）は単純な入れ子構造を持ち、高速な演算が得意な反面、多くの物理量子ビットを必要とします。本ハイブリッド方式は、情報の保持に量子低密度パリティ検査符号を、演算の実行に連接符号を用いることで両者の長所を活かし、規模の増大と計算速度の低下を同時に高いレベルで抑えることに成功しました。

本方式の性能解析にあたっての主要課題は、動作原理の異なる 2 つの符号を組み合わせた複雑な回路において、エラーの伝播（でんぱ）と計算結果への影響を統一的に評価することでした。そのために、使用する符号の種類を問わず、巨大な回路を機能ごとの部品に分割し、各部分のエラー特性を個別に評価することで回路全体のエラー確率を厳密に導き出す「部分回路縮約」という新たな解析手法を開発しました。

その結果、本研究で生まれた誤り耐性量子計算の方式が、規模の増大を大幅に抑制しつつ、計算速度の低下を連接符号と同レベルに留められることを厳密に証明しました。この成果は、誤り耐性型量子コンピュータ実現に向けた長年の課題を克服し、その開発に不可欠な理論基盤を提供するものです。

発表者・研究者等情報

東京大学
大学院工学系研究科
田宮　志郎　客員研究員
兼：Nanofiber Quantum Technologies, Inc. Research Scientist
小芦　雅斗　教授

大学院情報理工学系研究科
山崎　隼汰　准教授
研究当時：同大学大学院理学系研究科　助教
兼：Nanofiber Quantum Technologies, Inc. Principal Research Scientist

論文情報

雑誌名：Nature Physics
題　名：Fault-tolerant quantum computation with polylogarithmic time and constant space overheads
著者名：Shiro Tamiya*(corresponding author), Masato Koashi, Hayata Yamasaki
DOI：10.1038/s41567-025-03102-5
URL：https://www.nature.com/articles/s41567-025-03102-5

研究助成

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）ムーンショット型研究開発事業 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」（プログラムディレクター（PD）：北川勝浩 大阪大学 量子情報・量子生命研究センター センター長） 研究開発プロジェクト「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」（プロジェクトマネージャー（PM）：小芦雅斗 東京大学 大学院工学系研究科 教授（課題番号：JPMJMS2061）、および同 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」研究領域（研究総括：富田 章久）における研究課題「高速な量子機械学習の基盤構築」（課題番号：JPMJPR201A）および「量子・古典の異分野融合による共創型フロンティアの開拓」研究領域（研究総括：井元信之）における研究課題「高速な定数空間オーバーヘッド誤り耐性量子計算の理論基盤」（課題番号：JPMJPR23FC）、および日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（KAKENHI）（課題番号：JP23KJ0521、JP23K19970）の支援を受けて実施しました。

〈ムーンショット研究開発プロジェクト PM コメント〉

大規模な量子コンピュータを実現するためには、発生するエラーを訂正しながら計算する仕組みが不可欠で、実際の装置開発を進めるハードウェアの研究と、その方向性を指し示すための理論研究が両輪で進められています。これまでにも、より少ない量子ビット数でエラーに対処する手法が提案されてきましたが、どれも計算速度の劣化という代償を伴っており、このジレンマが本質的な限界なのかも不明でした。今回の提案により、計算規模が大きくなる極限で、計算速度の劣化を抑えながら少ない量子ビット数で量子計算を実行できることが厳密に証明されたことになります。この成果は、実際の装置開発を進める上でも、効率的な誤り耐性量子計算が可能だという確かな道標を与えるという意味で､大きなインパクトがあると考えています。

用語解説

（注 1）量子ビット

量子コンピュータで扱う情報の最小単位です。通常のコンピュータの情報の最小単位であるビットが「0 か 1」のどちらか一方だけをとるのに対し、量子ビットは、「0」と「1」の重ね合わせ状態をとることができます。この重ね合わせ状態は量子力学特有の性質で、量子コンピュータはこの重ね合わせの状態を巧みに制御することで高速な計算を実現します。しかし、量子ビットはノイズの影響を受けやすく、正しい計算結果を得るにはエラーの影響を排除する仕組みが必要になります。

（注 2）量子エラー訂正符号

ノイズに弱い物理量子ビット（ハードウェア上で実装される量子ビット）を多数束ねて、エラーに強い理想的な情報単位である論理量子ビットを作り出すための技術です。たとえば、「0」の情報を「000」と複数のビットで記録するのと同じ原理です。仮に 1 つのビットがエラーで「1」に変わっても、多数決で元の「0」に訂正できます。量子エラー訂正符号も同様に、多数の物理量子ビットで情報を冗長化することで、量子の世界で起こる複雑なエラーの検出・訂正を可能にします。

（注 3）量子低密度パリティ検査符号

量子エラー訂正符号の一種で､エラーを発見するための「検査」の構造に特徴があります。個々の検査はごく少数の物理量子ビットのみを対象とし、また個々の物理量子ビットも少数の検査にしか関与しません。この性質により、効率的なエラー訂正が可能になります。近年では、少ない物理量子ビットで多くの論理量子ビットを保護できる（＝符号化率が高い）符号が発見されており、情報の高効率な保持に適しています。しかし、構造が複雑なため、保護した論理量子ビット上で演算を行う際は計算速度が低下しやすいとされています。

（注 4）連接符号

比較的単純な量子エラー訂正符号を入れ子構造のように再帰的に組み合わせることで、エラー訂正能力を高める手法です。例えば、7 個の物理量子ビットで 1 つの論理量子ビットを保護する符号（1 つのエラーを訂正可能）があるとします。2 つ以上のエラーも訂正できるようにするため、今度はその「7 量子ビット符号」自体を 1 つの単位とみなし、それをさらに 7 つ集めて符号化します（合計 7×7=49 物理量子ビット）。このように入れ子の階層を深くするほど、エラー訂正能力は飛躍的に高まります。この単純な入れ子構造のおかげで論理量子ビットへの演算を

高速に行うのが得意ですが、情報を保護するために多くの物理量子ビットが必要となり、情報の高効率な保持には適していません。

問合せ先

〈研究内容について〉
Nanofiber Quantum Technologies, Inc.
Research Scientist　田宮　志郎（たみや　しろう）

東京大学大学院工学系研究科
教授　小芦　雅斗（こあし　まさと）

東京大学大学院情報理工学系研究科
准教授　山崎　隼汰（やまさき　はやた）

〈機関窓口〉
東京大学大学院工学系研究科 広報室

東京大学大学院情報理工学系研究科 広報室

Nanofiber Quantum Technologies, Inc. 管理部

科学技術振興機構 広報課

〈JST 事業に関すること〉
科学技術振興機構（JST） ムーンショット型研究開発事業部
藤井　健視（ふじい　けんじ）