



# 光による量子コンピュータの実現に大きく迫る手法を開発

～従来の 100 億倍の誤り耐性～

## ポイント

- ・光を用いた量子コンピュータの実現には、量子ビットの誤り率を非常に小さくする必要があった。
- ・量子ビットの誤り耐性を最大限引き出す方法とノイズに強い量子ビットの配列法により、現在の技術レベルでも量子コンピュータを実現できる方法を開発。
- ・光を用いた量子コンピュータの現実的な構成法を世界で初めて明らかにした先駆的な研究であり、この分野の発展をさらに加速させることが期待される。

## 概要

北海道大学大学院情報科学研究科の富田章久教授、同博士後期課程の福井浩介氏、京都大学大学院理学研究科の藤井啓祐特定准教授らの研究グループは、光を用いた量子コンピュータを現在の技術レベルで実現させる方法を開発しました。

量子コンピュータ<sup>\*1</sup>は、量子力学の重ね合わせの原理を利用することで、素因数分解、分子の性質・化学反応のシミュレーションなどを現在のコンピュータより遙かに高速に処理できることが期待されており、世界各国で盛んに研究・開発されています。量子コンピュータの基本単位である量子ビットとしては、超伝導の磁束、電子のスピンなど様々な候補がありますが、本研究グループでは大規模な量子計算の実現に有利であるとされる光に注目してきました。しかし、光を用いた量子計算の実現には、370 兆回の演算当り 1 回以下の誤りしか許されず、現在の技術レベルでは達成が非常に困難でした。

これまでに本研究グループでは、光の性質を活用することで量子ビットに発生する誤りを訂正する能力を最大限引き出す方法「アナログ量子誤り訂正法<sup>\*2</sup>」を開発してきました（この研究成果は米国科学誌「Physical Review Letters」に 2017 年 11 月 3 日に掲載済み）。今回研究グループは、誤りの発生を極限まで抑えながら量子ビットを配列する方法<sup>\*3</sup>を新たに提案しました。また、アナログ量子誤り訂正法と量子ビットの配列法を組み合わせることで、約 1 万回の演算当り 1 回以下の誤りであれば量子計算が実現できるという、これまでの約 100 億倍誤りに強い方法を新たに開発しました。この誤り率は現在の技術レベルでも到達可能なことから、光を用いた量子コンピュータの実現に大きく近づくことができました。本研究は、光を用いた量子コンピュータの現実的な構成法を世界で初めて明らかにした先駆的な研究であり、この分野の発展をさらに加速させることが期待されます。

なお、本研究の一部は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業（さきがけ）の支援のもとに行われました。本成果は、米国科学誌「Physical Review X」に米国東部時間 2018 年 5 月 25 日（金）に掲載されました。

## 【背景】

量子コンピュータは量子力学の原理に基づいた重ね合わせ状態を利用する技術で、素因数分解、分子の性質・化学反応のシミュレーションなどを現在のコンピュータよりも遙かに高速に処理できることが期待されています。そのため Google, IBM, Intel や Microsoft などの世界的企業や各国の研究機関で、量子コンピュータの実現に向けた研究開発が盛んに行われています。

量子コンピュータを実現するためには、量子もつれ状態と呼ばれる量子力学的な相関関係を持つ状態を大規模に用意する必要があります。現在では、超伝導の磁束、電子のスピンなど様々な量子ビット候補において、より大規模な量子もつれ状態を作り出そうとする研究が盛んに行われています。光は、光波の振幅が任意の値をとることができる連続的な性質を利用する点が、他の量子ビット候補と異なっており、比較的簡易に量子もつれ状態を生み出すことができるため、近年非常に注目されています。

しかし、光波の連続的な性質を利用する量子コンピュータでは、発生する誤りを訂正することが不可能でした。そこで、2つの光波の状態を使ってデジタル情報を表すことで誤り訂正を行うことが考えられており、この手法は提案者の頭文字をとって GKP 量子ビットと呼ばれています。GKP 量子ビットは光波の連続的な性質を保っているため比較的簡易に量子もつれ状態を生み出すことができ、かつ誤り訂正が可能なことから、量子コンピュータの構成要素として最近注目されています。

これまでの GKP 量子ビットを用いた量子コンピュータでは、量子もつれ状態の大規模化の過程で誤りが発生しやすいという問題がありました。その結果、初めに用意しなければならない光波の振幅の精度（分散）は通常のレーザー光のノイズの 40 分の 1 以下としなければなりません。これは、370 兆回の演算当り 1 回以下の誤りしか許されないことを意味し、現在の技術レベルでは達成が非常に困難でした。

## 【研究手法】

これまで本研究グループは、光波の連続的な性質を活用することで量子ビットに発生する誤りを訂正する能力を最大限引き出す、アナログ量子誤り訂正法という手法を開発してきました。今回研究グループは、ノイズに高い耐性を持ち、実装面でも非常に有利なトポロジカル量子計算<sup>\*4</sup>という方式にアナログ量子誤り訂正法を適用しました。さらに、光波の連続的な性質を活用して量子ビットに誤りが発生した確率を予測する方法を開発しました。

## 【研究成果】

まず、予測された誤り発生確率を参照することによって、量子もつれ状態の大規模化過程で、誤りを起こした可能性の高い量子ビットを取り除く手法を提案しました。この、誤り確率の高い量子ビットを取り除く手法を、トポロジカル量子計算を実行するために用いられる量子もつれ状態の生成に応用し、誤りに強い大規模な量子もつれ状態を構築できることを理論的に確認しました。さらに、アナログ量子誤り訂正法をトポロジカル量子計算に適用した結果、振幅の精度（分散）が通常のノイズの 1/10 以下であれば量子コンピュータが実現できるということが理論的に明らかになりました。これによって、約 1 万回の演算当り 1 回以下の誤りまで許容できるようになり、これまでの方式と比べて約 100 億倍誤りに強い方式を開発することに成功しました。従来、アナログ量子誤り訂正法のトポロジカル量子計算への適用可否は明らかではありませんでした。トポロジカル量子計算の誤り訂正能力を最大限引き出すことが本研究で示され、アナログ量子誤り訂正法の有効性が証明されました。

## 【今後への期待】

今回開発した方式に求められる許容誤り率は現在の技術レベルでも到達可能なことから、本研究により、光を用いた量子コンピュータの実現に大きく近づくことができました。また本成果は、光を用いた量子コンピュータの現実的な構成法を世界で初めて明らかにした先駆的な研究であり、この分野の発展をさらに加速させることが期待されます。

## 論文情報

論文名	High-Threshold Fault-tolerant Quantum Computation with Analog Quantum Error Correction (アナログ量子誤り訂正法を利用し高閾値を実現する GKP 量子ビットを用いた耐故障性量子計算)
著者名	福井浩介 <sup>1</sup> , 富田章久 <sup>1</sup> , 岡本 淳 <sup>1</sup> , 藤井啓祐 <sup>2,3</sup> ( <sup>1</sup> 北海道大学大学院情報科学研究科, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> JST さきがけ)
雑誌名	Physical Review X (物理学の専門誌)
DOI	10.1103/PhysRevX.8.021054
公表日	米国東部時間 2018 年 5 月 25 日 (金) (オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学大学院情報科学研究科 教授 富田章久 (とみたあきひさ)

T E L 011-706-6521 F A X 011-706-6521 メール tomita@ist.hokudai.ac.jp

U R L <http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/hikari/index.htm>

## 配信元

北海道大学総務企画部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール kouhou@jimu.hokudai.ac.jp

## 【用語解説】

- \*1 量子コンピュータ … 現在使われているコンピュータは 0 または 1 の値をとるビットを基本に作られているが、量子コンピュータは 0 と 1 の重ね合わせ状態をとることができる量子ビットを用いて計算する。0 と 1 の場合の計算を同時に実行する超並列計算を行うことで、量子コンピュータはより高速に演算処理ができるとされている。
- \*2 アナログ量子誤り訂正法 … 連続的な性質を持つ光波の振幅を測定すると、連続的なアナログ値が得られる。光量子ビットでは従来、アナログ値をデジタル化して 0 または 1 の値を決定していたが、本研究グループではアナログ値の情報を参照して最も確からしい誤りのパターンを推定して量子誤り訂正符号の性能を向上する手法を提案しており、この手法をアナログ量子誤り訂正法という。アナログ量子誤り訂正法を用いると GKP 量子ビットは一般的なノイズ (白色ノイズ) に対して最大の誤り耐性を持つことが、本研究グループによって示されている。
- \*3 誤りの発生を極限まで抑えながら量子ビットを配列する方法 … 光量子ビットを測定したときに得られるアナログ情報から、その量子ビットにどれだけの確率で誤りが発生しているのか見積もることができる。これにより、大規模な量子もつれ状態をつくる過程において、誤りが発生していそうな量子ビットを取り除くことができる。この方法を使えば、トポロジカル量子計算で消費されるトポロジカルクラスター状態と呼ばれる大規模な量子もつれ状態を、高純度で構築することができる。

\*4 トポロジカル量子計算 … 量子情報は環境の影響によるノイズで破壊されやすいため、量子計算では、量子ビットに発生した誤りを訂正することが求められる。トポロジカル量子計算は、量子誤り訂正符号の中で物理的な実装が比較的簡易で、かつ誤り訂正能力が高いトポロジカル符号で量子情報を護りながら量子計算を行う方式である。