

# 連続量光量子コンピュータに向けた光技術

従来のコンピューティング技術では計算困難な問題を計算できるコンピューティング技術として量子コンピュータへの期待が高まっています。光量子情報処理技術は光子の特性を反映して常温で高速な操作が可能で、「量子もつれ」と呼ばれる量子状態を大規模に実現できるため、大規模汎用量子コンピュータを実現する技術として期待されています。本稿では、NTTがめざしている光ファイバ通信技術を基にした光量子コンピュータへの取り組みと量子光源などの光技術の動向を紹介します。

はしもと	としかず	うめき	たけし
橋本	俊和	梅木	毅伺
かしわざき	たかひろ	いのうえ	あすか
柏崎	貴大	井上	飛鳥

NTT先端集積デバイス研究所

## はじめに

持続的に社会を発展させていくうえで、経済や気候変動、エネルギーなどの大規模な社会課題の解決や、これまでの知見を超えた物質や生命現象の発見など、より複雑な問題、より困難な問題を解決するために、計算機技術も持続的に発展していくことが求められます。「ムーアの法則」に代表される半導体技術も限界に近づきつつあるといわれており、新たな計算技術に対する期待が高まっている中で、量子の特性を使って計算を行う量子コンピュータは、従来のコンピュータでは現実的な時間では計算できない問題を計算可能にする計算機として注目されています。量子コンピュータにおいては、量子アルゴリズムを実行する計算の媒体として、超伝導やイオントラップや冷却原子、電子などで実現される量子性を持った物理的な状態、すなわち量子状態が用いられます。光の量子（光量子）を使った量子コンピュータも有力な候補の1つと考えられています。光

量子コンピュータの特徴として、①室温で動作すること<sup>\*1</sup>、②大規模な量子もつれを実現可能であること、③高速に動作可能であること、の3点が挙げられます。①は光量子本来の性質であるのに対して、②、③は光量子の持つ特性を活かして技術により実現させていく部分であり、NTTでは光ファイバ通信向けの光デバイス技術の適用により光量子コンピュータの実現をめざしています。本稿では、光量子コンピュータに向けたNTTの取り組みを紹介します。

## 連続量光量子情報処理と大規模な量子もつれ生成

多くの量子コンピュータでは2つ量子状態の重ね合わせを用いた「量子ビット」と呼ばれる物理的な状態を空間的に配置して、それらの状態の重ね合わせや量子的な相関（量子もつれ）を利用して量子情報処理を行います。それに対して、本稿で紹介する光量子コンピュータは、光の振幅の量子状態（光の振幅は複素数の連続値で表され

るのでそれを量子化したものは「連続量光量子」と呼ばれます）を基に、波の重ね合わせや干渉等がそのまま量子的な操作になることを利用して量子情報処理を行います。この方式では、パルス状の光量子状態を時間軸上に並べることが可能となり、空間的な配置に制限されることなく、大規模な演算が可能となります。また、大規模な演算を行うためには、量子状態としても大規模なもつれ状態が必要となりますが、光量子の波としての性質に由来してビームスプリッタ等の簡単なデバイスを使って比較的容易に大規模な量子もつれ生成が可能であることも連続量光量子を用いるメリットとなります。さらに、連続量光量子コンピュータでは、複素振幅の光の振幅の実部と虚部（複素平面上のcos成分とsin成分）を用いて表される直交位相振幅の重ね

\*1 光量子のエネルギー $\varepsilon$ を温度に換算すると $T = \frac{\varepsilon}{k_B} = 2.93 \times 10^4 \text{K}$  ( $k_B$ はボルツマン定数)であり、室温に対して十分高く安定した状態であることから室温で動作することが分かります。

合わせを用いるため、直交位相振幅変調を用いる光ファイバ通信におけるデジタルコヒーレント伝送等に用いられる多くの技術を適用することが可能となります(図1)。光ファイバ通信におけるコヒーレント伝送では、直交位相振幅変調として直交した成分(cos成分とsin成分)をそれぞれ変調して重ね合わせたレーザ光(コヒーレント光)を伝送し、局発光を干渉させて成分ごとの信号振幅を取得してデジタル信号処理により元の信号を再構成します。連続量光量子の場合も同様に直交位相振幅を用いますが、cos成分とsin成分の光を単純に足し合わせても量子状態の重ね合わせになりません。量子的な効果を得るためには、「スクイーズド光」と呼ばれる状態を用いる必要があります。コヒーレント光は不確定性原理によりcos成分とsin成分に対する揺らぎ(広がり)が同程度であるのに対して、広がりを意図的に偏らせたものがスクイーズド光です。図

1(b)では、この広がりを点線の楕円として表しています。このスクイーズド光を基に量子的な操作を行い計算するのが連続量光量子コンピュータです。スクイーズド光源(量子光源)から出射されたスクイーズド光のパルス(図1(b)中の球)は光ファイバ中を伝搬し、ハーフミラーとして機能するビームスプリッタにより量子光源から出力されたスクイーズド光パルスが分けられて、同時に異なるスクイーズド光パルスが重ね合わされた状態が実現されます。この状態は量子力学的にもつれた状態であり、光パルスを時間的にずらし、さらにビームスプリッタで混合を繰り返すことにより時間領域でもつれた巨大な状態が生成されます<sup>(1)</sup>。この巨大なもつれた状態を基に、ゲート型の量子計算と同等であることが知られている測定型量子計算<sup>\*2</sup>を実行します。測定型量子計算は大変興味深い計算方法ですが、ここでは連続量光量子コンピュータに向けた光技術とし

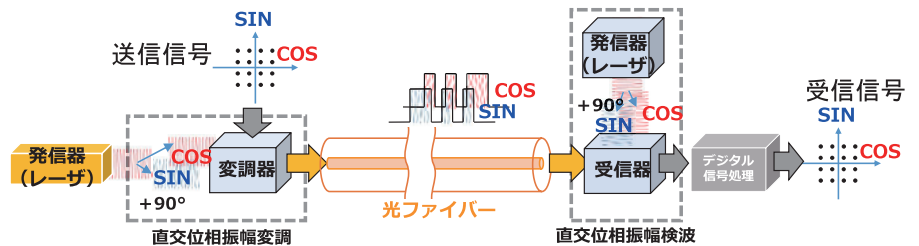
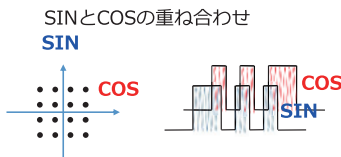
て、連続量光量子コンピュータで必要になる技術と光ファイバ通信の技術との対応関係をみていきます。

### 連続量光量子コンピュータへの光ファイバ通信技術の適用

光ファイバ通信と連続量光量子コンピュータの対応と相違点を表に示します。連続量光量子で任意の量子計算を行うのには、①スクイージング操作、②光の分波器(ビームスプリッタ)、③位相シフタ、④変位操作(光変調器)、⑤3次位相ゲートがあればよいことが知られています<sup>(2), (3)</sup>。②~④

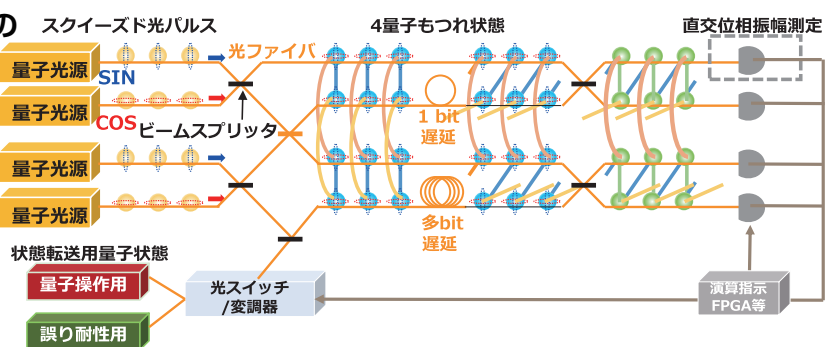
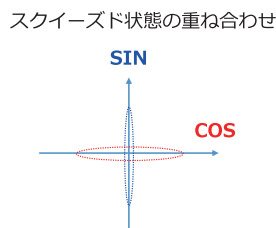
\*2 測定結果を基にその後続くパルスに対して射影測定(射影方向を変化させるという)を繰り返すことで量子演算と同等の操作を実現する量子計算の手法であり、量子回路モデルで表された回路を量子ゲートで実現する計算手法と同等であることが知られています。射影測定は直交位相振幅測定で入射する状態や参照状態を変えることにより、特定の状態成分を出力として得る方法です。典型例としては「ベル状態」と呼ばれる量子もつれた状態の成分を抽出するベル測定があります。

#### COS, SIN 成分の振幅を複素平面上の点として表示



(a) 光ファイバ通信 (デジタルコヒーレント伝送)

#### スクイーズド状態の複素平面状の広がり (COS, SIN 成分) として表示



(b) 連続量光量子コンピュータ

図1 光ファイバ通信と連続量光量子コンピュータの構成の模式図

表 光ファイバ通信と連続量光量子コンピュータの対応と相違点

	光ファイバ通信	連続量光量子コンピュータ
動作	デジタルコヒーレント伝送 (大きな分散を補償)	測定型量子計算 (大きな量子もつれを使った計算)
信号や情報を表す空間	コヒーレント光(搬送波) × 直交位相振幅	スクイーズド光 × 直交位相振幅
搬送波の生成	レーザ光源(コヒーレント光源)	量子光源(スクイーズド光源)
信号生成・演算操作	直交位相振幅変調器 ビームスプリッタ 位相シフタ 変位操作(変調器)	連続量量子ゲート ビームスプリッタ 位相シフタ 変位操作(変調器) スクイージング操作 3次位相ゲート
信号復調・出力	直交位相振幅検波	直交位相振幅測定

※赤字は相違点

は、従来からある古典光学で用いられる素子であり、光通信においてもよく使われる光部品です。また、直交位相振幅測定は光ファイバ伝送の直交位相振幅検波と同じ構成で実現されます。残りは①のスクイージング操作と⑤3次位相ゲートであり、光量子コンピュータを実現するために、これまでの通信デバイスの単なる延長ではない技術が必要とされます。

スクイーズについては、光ファイバ通信におけるレーザ光源のように、連続量光量子コンピュータの出発点となる量子光源としても用いられる重要なデバイスです。スクイーズド光は通信には使われてきませんでした。スクイージングはパラメトリック増幅の1つの動作状態で、パラメトリック増幅は、位相感応増幅状態用いるとノイズを増加させない理想的な光アンプ技術として提案されています。実際の光通信システムに適用するには大きな非線形性が必要となるためこれまで実用化が困難と考えられてきましたが、NTTで研究開発を進めてきた導波路型の

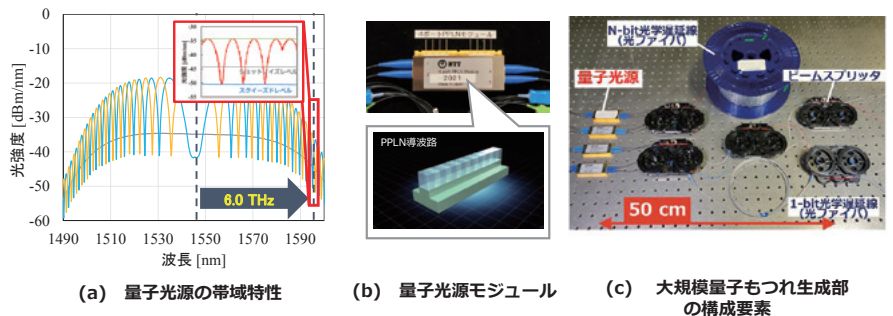


図2 量子光源モジュールとファイバ型連続量光量子コンピュータ(大規模量子もつれ生成部の構成要素)

PPLN (Periodically Poled Lithium Niobate) 技術により大幅に特性が向上し、大容量伝送の中継に適用可能であることが実証されています<sup>(4)</sup>。NTTではこれをスクイージングに用いて量子光源モジュールを実現しています。図2は量子光源モジュールとファイバ型デバイスを連結して構成した連続量光量子コンピュータの大規模量子もつれ生成部です。量子光源モジュールは導波路型のPPLNを採用しており、PPLNにより増強された非線形変換効率を、導波路構造による光の閉じ込めにより、さらに増強させて、共振器中

で光を往復させて結合長を稼ぐ必要をなくすることで6 THzという広帯域性を実現しています。また、スクイージング光の揺らぎの圧縮の非対称性を示す指数であるスクイージングレベルとしても6 dBを実現しており、共振器を用いないタイプのスクイーズとしては世界最高レベルの特性を実現しています<sup>(5)</sup>。この広帯域性は光ファイバ伝送と同様に多くの量子パルスの収容を可能にします。実際に、このモジュールを用いて、時間スロットに任意の量子状態をパルス生成可能であることが示されています<sup>(6)</sup>。最後に残された⑤の



図3 連続量光量子コンピュータのロードマップ

3次位相ゲートについては、現状の光デバイスでの実現は難しく、量子テレポーテーションを応用した非ガウス型量子測定により生成する手法など<sup>(7)</sup>が提案されており、今後実証されていくものと期待されています。

### まとめと今後の展望

連続量光量子コンピュータを構成する要素の多くが光ファイバ通信に使われる技術が適用可能であり、新たに必要になる技術についても、光ファイバ通信で培った技術を発展させることで実現されつつあります。今後はこれらを連続量光量子コンピュータシステムとして実現していくことも重要な課題です。連続量光量子コンピュータで実行する測定型量子計算では、測定した結果を瞬時に測定器や量子状態の転送系に伝えて実行することが必要となります。また、量子アルゴリズムを実機に反映するためにはミドルウェア等も重要になってくることから、電子制御やソフトウェアといった量子や光だけに閉じない技術開発を進める必要があります。NTTでは図3に示すように、2030年に光ファイバ型の連続量光量子コンピュータの実現を、さらには、2050年に光量子コンピュータのチップの実現をめざしています。デバイスについても、特性面ではまだ十分なものとはいえない状況です。大規模な量子

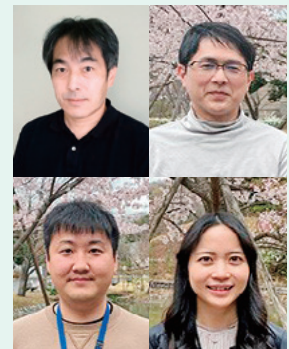
もつれ状態はGKP符号と呼ばれる量子状態を用いることで誤りを修正可能であることが知られていますが、GKP符号で修正可能な誤り範囲に収め、さらに実用的なものを実現するためには現状よりも数dB高いスクイジングレベルが求められます<sup>(8)</sup>。それ以外にも、構成するすべての光部品における損失は量子状態に対するノイズ源となることから、究極的な低損失が求められます。これらはデバイス技術においてチャレンジングな課題ではありますが、連続量光量子コンピュータの実現という大きな目標を原動力として、光技術そのものをさらに発展させ、光ファイバ通信と同様に量子コンピュータに爆発的な発展をもたらすことをめざしていきます。

本研究成果は東京大学古澤研究室との連携によるものです。また、本研究の一部は、JST、ムーンショット型開発事業、JPMJMS2064の支援を受けたものです。

### 参考文献

- (1) W. Asavanant, Y. Shiozawa, S. Yokoyama, B. Charoensombutamon, H. Emura, R. N. Alexander, S. Takeda, J. Yoshikawa, N. C. Menicucci, H. Yonezawa, and Akira Furusawa: "Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state," *Science*, Vol. 366, No. 6463, pp. 373-376, Oct. 2019.
- (2) L. Seth and S. L. Braunstein: "Quantum computation over continuous variables," *Physical Review Letters*, Vol. 82, No. 8, Feb. 1999.

- (3) S. L. Braunstein and P. V. Loock: "Quantum information with continuous variables," *Reviews of modern physics*, Vol. 77, No. 2, 2005.
- (4) T. Kobayashi, S. Shimizu, M. Nakamura, T. Umeki, T. Kazama, R. Kasahara, F. Hamaoka, M. Nagatani, H. Yamazaki, H. Nosaka, and Y. Miyamoto: "Wide-Band Inline-Amplified WDM Transmission Using PPLN-Based Optical Parametric Amplifier," *IEEE JLT*, Vol. 39, No. 3, pp. 787-794, Feb. 2021.
- (5) T. Kashiwazaki, T. Yamashima, N. Takanashi, A. Inoue, T. Umeki, and A. Furusawa: "Fabrication of low-loss quasi-single-mode PPLN waveguide and its application to a modularized broadband high-level squeezer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 119, 251104, 2021.
- (6) K. Takase, A. Kawasaki, B. K. Jeong, T. Kashiwazaki, T. Kazama, K. Enbutsu, K. Watanabe, T. Umeki, S. Miki, H. Terai, M. Yabuno, F. China, W. Asavanant, M. Endo, J. Yoshikawa, and A. Furusawa: "Quantum arbitrary waveform generator," *Science Advances*, Vol. 8, No. 43, 2022.
- (7) K. Miyata, H. Ogawa, P. Marek, R. Filip, H. Yonezawa, J. Yoshikawa, A. Furusawa: "Implementation of a quantum cubic gate by an adaptive non-Gaussian measurement," *Physical Review A*, Vol. 93, No. 2, 022301, 2016.
- (8) K. Fukui: "High-threshold fault-tolerant quantum computation with the GKP qubit and realistically noisy devices," *Phys. Rev. X*, Vol. 8, No. 2, April 2019.



(上段左から) 橋本 俊和/ 梅木 毅  
(下段左から) 柏崎 貴大/ 井上 飛鳥

夢のコンピュータである光量子コンピュータの実現を光ファイバ通信で培ったデバイス技術を発展させて近い将来に引き寄せて、未来に貢献できればと考えています。

### ◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所  
企画部研究推進担当  
TEL 046-240-2022  
FAX 046-240-4328  
E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp