

## 実社会応用へ向けた光量子技術のパッケージ化

研究代表者：武田 俊太郎 東京大学 准教授



### 1. 研究の背景と達成目標

光量子技術は、量子コンピュータ、大容量通信、超精密計測など次世代の多彩な情報処理を可能とする共通テクノロジーである。これまで計算・通信・計測など目的ごとに技術開発が進められてきたが、技術開発のハードルは高く、その導入障壁の高さが光量子技術のアプリケーションの可能性の芽を潰している状況にある。本研究では、あらゆる光量子情報処理の共通コア技術となる、量子レベルの光の発生・操作・検出という3要素に着目し、それらを様々な用途に汎用的に利用しやすい形にパッケージ化することを狙う。この目的のため、これら3要素を、ハードウェアは同じまま、プログラムを書き換えれば異なる動作をするような「プログラム可能」な形で実現することを目指す。さらに、パッケージ化された3要素を組み合わせ、連携させたプラットフォームを実現し、プログラムを変更しながら様々な量子情報処理ができることを検証する。このパッケージおよびプラットフォームは光量子技術を広く普及させ、その真の実用化・産業化を引き起こす起爆剤となることが期待される。

### 2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・世界で初めてプログラム可能な量子光発生器を開発し、プログラムを変更すれば同一セットアップのまま複数種類の量子光(スクイーズド光と、より量子性の強い単一光子状態や量子重ね合わせ状態の光)を発生できるシステムを実現した。これは、さまざまな光量子アプリケーションへと応用可能な汎用的な量子光源となり、将来的な光量子技術の共通コア技術となりうる。
- ・通信波長である1545nmにおいて、プログラム可能な量子光操作システムおよび量子光検出システムを開発した。これらはもともと波長860nmで量子計算向けに開発した独自技術をアップグレードしたものであり、通信波長へ変更したことで量子通信・インターネットへの応用可能性が広がった。
- ・上記の量子光の発生・操作・検出の3要素を組み合わせ、同期・連携させることで、世界初となる量子性の強い光を組み込んだプログラム可能な光量子情報処理プラットフォームの開発・検証に成功した。これは、量子計算・通信・計測など多彩な応用探索のテストベッドとなることが期待される。

### 3. 研究成果

本研究の目標は、図1(a)に示すプログラム可能な量子光発生器、量子光操作システム、量子光検出システムを個別に開発した上で結合・連携させ、プログラム次第で様々な光量子情報処理が可能なプラットフォームを実現することである。用いる光の波長は量子通信・インターネットへの応用も考慮して通信波長1545nmを選択した。本研究ではこの目標を最終的に図1(b)の構成で実現した。これは図2のように光学定盤上の自由空間光学系で構築されている。以下でその手法および結果について述べる。

まず、世界初となるプログラム可能な量子光発生器を開発した(図1(b)橙色部分)。従来の量子光発生器は、セットアップに応じてある決まった1種類の量子光のみを発生するものであり、汎用性に乏しかった。今回はそれをプログラム次第で複数種類の量子光が発生できるように構築した。発生可能な光の種類は、様々な光量子情報処理の基本となるスクイーズド光パルスと、より量子性の強いタイプの光パルス(単一光子状態や量子重ね合わせ状態)である。スクイーズド光パルスは導波路型光パラメトリッ

ク増幅器（OPA）によって常に発生することができ、一方で量子性の強い光パルスは別の OPA と超伝導光子検出器を組み合わせることでランダムなタイミングで発生させることができる。これらの光パルスのどちらを後段に出力するかを光スイッチによってプログラマブルに選択できるようにした。ここで、量子性の強い光パルスは、光子検出器が光子を検出したタイミングでのみ発生する。発生した光パルスを光スイッチで後段へ送るには、光スイッチの駆動タイミングをその光パルスの発生タイミング（光子検出器の検出タイミング）と同期させる必要がある。しかし、光子検出信号を受けてから光スイッチを動作させるまでの電氣的な処理には一定の時間がかかり、その間にも発生した光パルスは光の速度で進み続けるため、通常は光スイッチの駆動タイミングが間に合わない。そこで、光スイッチの手前に長さ 100m の光ファイバを挟み、光パルスの到着時刻を遅らせることで、光パルスの到着と光スイッチの動作のタイミングを合わせることに成功した。この結果、プログラム可能な量子光発生器が実現した。

次に、プログラム可能な量子光操作システムおよび量子光検出システムを開発した（図 1(b)青色・緑色部分）。量子光操作システムは波長 860nm において独自のループ型の光回路を用いて開発した経験があり、これを波長 1545nm に刷新した。この光回路では、ループ内にある可変透過率ミラーの動作によってどのような光操作（ユニタリ変換）を行うか選択できる。この可変透過率ミラーは図 2(b)に示すポッケルスセルによって実現され、ポッケルスセルへ送る電圧信号を変えることで実効的にミラー透過率を切り替えられる。また、プログラム可能な量子光検出システムには、光の振幅成分を測定するホモダイン測定器を採用した。ホモダイン測定器は測定したい光と別の参照光（ローカルオシレーター光）を干渉させて振幅を測定するが、参照光の位相を電気光学変調器によって制御することで、どのような振幅成分（例えば、振幅の  $\cos$  成分や  $\sin$  成分など）を測定するかを切り替えられるようになった。

以上の要素技術を統合して同期・連携させ、図 1(b)のシステムを完成させた。このシステムは、プログラムによって、どのような量子光を発生させ、どのような操作を行い、どのような測定をするかを選択することができ、様々な量子情報処理を実現可能である。今回は動作のデモ実験として、量子性の強い光パルス 1 個にスクイーミング操作（光の振幅の  $\cos$  成分を増幅し、 $\sin$  成分を減衰させる操作）を最大 3 ステップまで種類を変えながら行う実証実験を行い、期待通りの操作が行われていることを確認した（図 3）。さらに、光パルスの強い量子性を示す特徴が、2 ステップの操作の後まで保たれていることも確認し、操作のエラーで失われやすい量子性を維持できるレベルの高い精度で実行できていることも示した。今回、量子性の強い光パルスで様々な量子情報処理ができるプラットフォームの実現が世界初であることはもちろん、実際に量子性の強い光パルスに対して 3 ステップもの操作を行ったのも世界で初めてとなる。この結果は PRX Quantum 誌で発表[8]するとともに、我々の研究のマイルストーンになる成果としてプレスリリースし、多数のメディアに取り上げられた[13]。

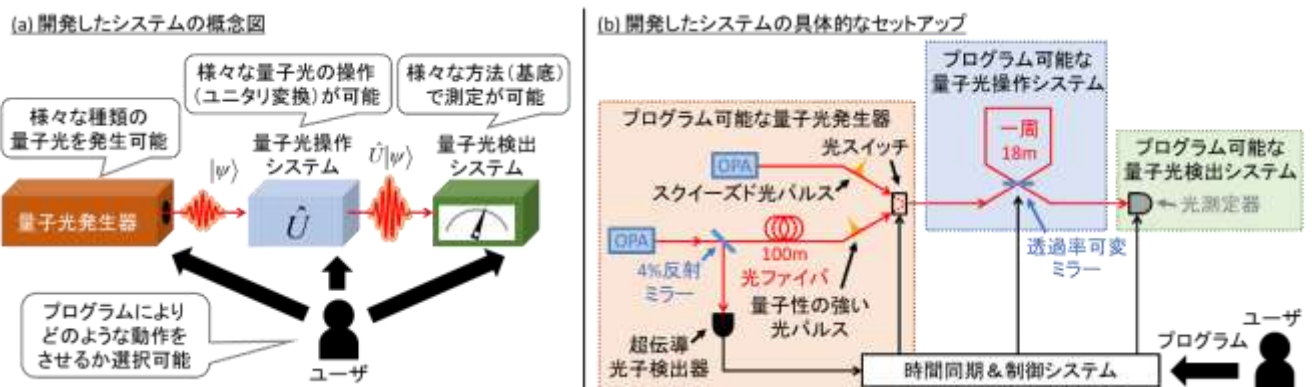


図 1：開発したシステムの概念図と具体的なセットアップ

#### 4. 今後の展開

今回、量子レベルの光の発生・操作・検出の各要素をプログラム可能な形で実現し、それらを連携することで世界初となる量子性の強い光を用いた汎用的な光量子情報処理プラットフォームの開発・検証に成功した。このシステムは、ハードウェアは同じまま、プログラムを変更して異なる動作をさせればさまざまな量子情報処理を行うことが可能であり、量子計算・通信・計測など多彩な応用探索のテストベッドとなることが期待される。たとえば、従来扱えなかった量子性の強い光パルスを用いた高度な演算の実装や、量子計算に必須の量子誤り訂正処理の評価、さらには最適化や機械学習などの量子アルゴリズム、大容量量子通信など、量子アプリケーションの探索を大きく加速させるものである。

今回開発したシステムはあくまでプロトタイプであり、発生・操作・検出のバリエーションや行える量子情報処理の規模も限定的である。今後はまず各要素技術を個別にアップグレードすることで、あらゆるアプリケーションに応用可能な万能型のパッケージへと拡張することを狙っていく。さらに、それらを段階的に結合しスケールアップしていくことで、究極的には、計算・計測・通信などあらゆる光量子技術を統合的に処理できるプラットフォームが実現し、光量子技術のポテンシャルを最大限まで引き出すことができると期待される。

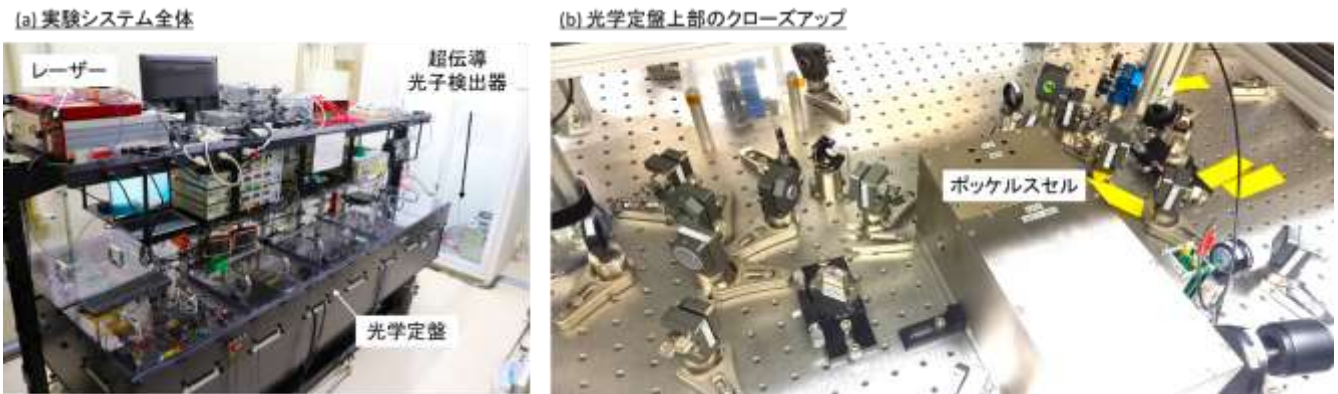


図 2：実験システムの写真

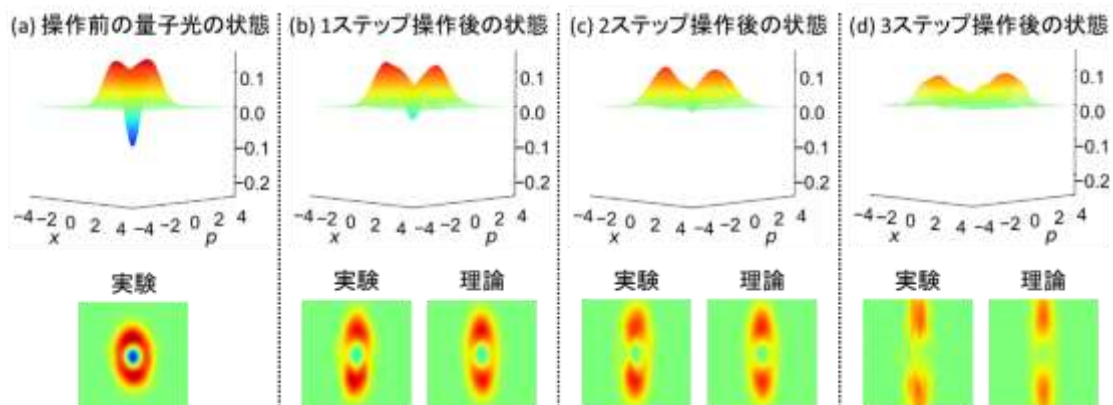


図 3：量子性の強い光パルスにスクイーミング操作を複数ステップ行った実験結果

操作の精度や質を評価するため、操作前と後の光パルスの振幅の  $\cos$  成分 ( $x$ ) と  $\sin$  成分 ( $p$ ) の疑似確率分布を表す Wigner 関数  $W(x, p)$  を測定し、3次元プロットで示した。Wigner 関数の負の領域はその光の強い量子性を表し、2 ステップ操作後にこれが残っていることは、操作が高い精度で行われていることを示す。下の図は Wigner 関数を上方から見た 2 次元プロットで、実験結果と理論予測がよく一致している。



## 5. 発表実績

### 【論文】

- [1] H. Tomoda, T. Yoshida, T. Kashiwazaki, T. Umeki, Y. Enomoto, S. Takeda, “Programmable time-multiplexed squeezed light source,” *Optics Express* **31**, 2161 (2023)
- [2] K. Yonezu, Y. Enomoto, T. Yoshida, S. Takeda, “Time-Domain Universal Linear-Optical Operations for Universal Quantum Information Processing,” *Physical Review Letters* **131**, 040601 (2023)
- [3] Y. Enomoto, K. Anai, K. Udagawa, S. Takeda, “Continuous-variable quantum approximate optimization on a programmable photonic quantum processor,” *Physical Review Research* **5**, 043005 (2023)
- [4] K. Anai, Y. Enomoto, H. Omura, K. Nagano, K. Izumi, M. Endo, S. Takeda, “Quantum-enhanced optical beat-note detection beyond 3-dB noise penalty of image band,” *Optics Express* **32**, 19372 (2024)
- [5] K. Anai, S. Ikehara, Y. Yano, D. Okuno, S. Takeda, “Continuous-variable quantum kernel method on a programmable photonic quantum processor,” *Physical Review A* **110**, 022404 (2024)
- [6] D. Okuno, T. Yoshida, R. Arita, T. Kashiwazaki, T. Umeki, S. Miki, H. Terai, M. Yabuno, F. China, S. Takeda, “Time-domain programmable beam-splitter operations for an optical phase-sensitive non-Gaussian state,” *Physical Review A* **110**, 023706 (2024)
- [7] H. Tomoda, A. Machinaga, K. Takase, J. Harada, T. Kashiwazaki, T. Umeki, S. Miki, F. China, M. Yabuno, H. Terai, D. Okuno, S. Takeda, “Boosting generation rate of squeezed single-photon states by generalized photon subtraction,” *Physical Review A* **110**, 033717 (2024)
- [8] T. Yoshida, D. Okuno, T. Kashiwazaki, T. Umeki, S. Miki, F. China, M. Yabuno, H. Terai, S. Takeda, “Sequential and Programmable Squeezing Gates for Optical Non-Gaussian Input States,” *PRX Quantum* **6**, 010311 (2025)

### 【学会発表】（国際学会の招待講演からの抜粋）

- [9] S. Takeda, “Programmable Photonic Quantum Computing in the Time Domain,” bigQ Symposium on Quantum Information Science 2022, Denmark, April 28, 2022
- [10] S. Takeda, “Time-multiplexed programmable continuous-variable photonic quantum computing,” SPIE Quantum Communications and Quantum Imaging XXI Conference, USA, August 21, 2023
- [11] S. Takeda, “Programmable Continuous-Variable Photonic Quantum Computing in the Time Domain” The 16th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Korea, August 5, 2024

### 【特許】

なし。

### 【その他】

- [12] プレスリリース「3 個の光パルスで様々な計算ができる 独自の光量子コンピュータを開発 ー日本発「究極の大規模光量子コンピュータ」のプロトタイプを実現ー」2023 年 7 月 26 日  
<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2023-07-26-001>
- [13] プレスリリース「光量子計算プラットフォームに世界で初めて量子性の強い光パルスを導入 ースパコンを超える光量子コンピュータへ突破口ー」2025 年 1 月 17 日  
<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2025-01-17-001>