

量子光干涉断層撮影で、世界最高体積分解能 4 フェムトリットルを達成 —グラフ理論を応用し、量子イメージング特有の「偽信号」も克服—

概要

電子や光子などの量子は、通常の物体とは異なった振るまいをします。その量子の個々の振るまいや相関（量子もつれ^(注1)）を制御することで、従来の計測技術の限界を超える光量子センシングの研究が精力的に進められています。特に、量子もつれ光を用いた「量子光干涉断層撮影（QOCT）」は、サンプル内の分散^(注2)の影響を受けないため、従来の光干涉断層撮影（OCT）を超える高い分解能を実現できる可能性があり、注目されています。しかし、技術的な困難さから、これまでの QOCT の体積分解能は $176\mu\text{m}^3$ （176 フェムトリットル）に留まり、さらに QOCT には「画像に現れる特有の偽信号^(注3)」の存在という課題もありました。

今回、京都大学大学院工学研究科の阿部尚文 特定研究員（研究当時）、堀野智康 同修士課程学生（研究当時）、川口蓉子 同修士課程学生（研究当時）、岡本亮 同准教授、竹内繁樹 同教授らの研究グループは、 $4.04\mu\text{m}^3$ （4.04 フェムトリットル）という、世界最高の体積分解能を持つ QOCT イメージングに成功しました。これは従来の QOCT の体積分解能を 43 倍と大幅に向上した分解能です。さらに、グラフ理論における「最大クリーク探索^(注4)」を用いた新しいアルゴリズムを開発し、QOCT の大きな障壁であった偽信号の高速な除去も実現しました。

本成果により、三次元的な微細構造の観測を、高分解能かつ非侵襲で行えるようになり、将来的に、材料科学や生命科学など、幅広い分野での活用が期待されます。

本成果は、2026 年 7 月 8 日以降に米国の国際学術誌「Optics Express」にオンライン掲載される予定です。

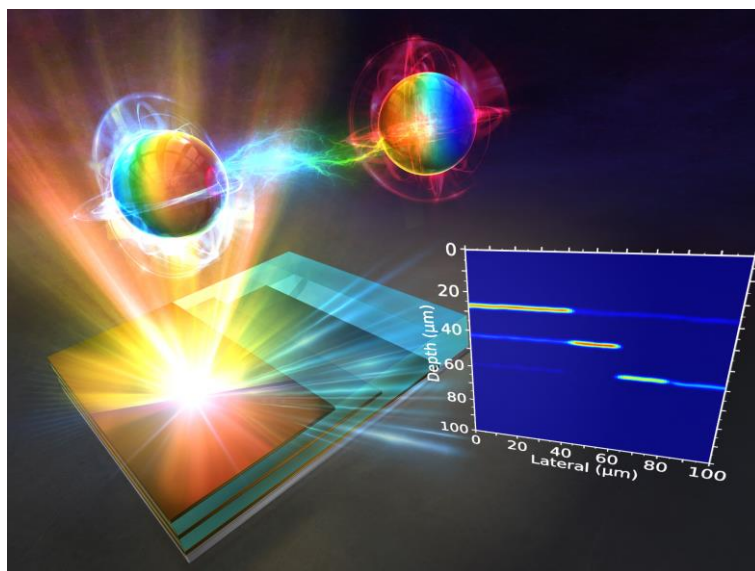


図 1 高分解能 QOCT のイメージ図

©京都大学工学研究科竹内研究室

1. 背景

電子や光子などの量子は、通常の物体とは異なった振るまいをします。その量子の個々の振るまいや相関（量子もつれ）を制御することで、飛躍的な計算能力を実現する量子コンピューターや、盗聴不可能な暗号を実現する量子暗号、さらに、従来の計測技術の限界を超える量子センシングなど、「量子技術」の研究が精力的に進められています。その中でも、光子は、長距離伝送が可能で、また室温でも量子状態が保存されるため、有力な担体です。特に、光のさまざまな波長（色）の対となった「周波数量子もつれ」光源の活用が注目されています。この周波数量子もつれ光を利用する、新たな光（ひかり）量子センシング技術が、量子光干渉断層撮影（QOCT）です。

従来から用いられている光干渉断層撮影（OCT）は、媒質の内部のどの位置で光が反射したかを、「光の干渉」によって検知することで、媒質内部の構造を画像化する技術です。眼科における眼底の観察などの医療診断や、工業製品の製造工程での検査などに広く普及しています。しかし、従来の OCT は光の「分散（物質を通過する際に波長ごとに速度が異なる現象）」の影響で分解能が劣化するなどの問題がありました。一方 QOCT は、周波数量子もつれ光子対の間での 2 光子量子干渉による信号を利用することで、一方のもつれ光の反射位置を検知します。この信号は、分散（厳密には偶数次）の影響を受けないため、分解能の劣化が生じず、極めて高い分解能の実現が期待できます。しかしこれまでは広帯域量子もつれ光の実現とその適切な集光が困難であったため、QOCT の体積分解能は $176\text{ }\mu\text{m}^3$ （軸方向分解能 $6.5\text{ }\mu\text{m}$ 、横方向分解能 $5.2\text{ }\mu\text{m}$ ）に留まっていました。

さらに、QOCT は、もつれ光子が複数の反射面によって反射されうる場合に、本来反射面の存在しない場所に偽信号（アーティファクト）が生じることが知られています。高分解能化により、より詳細な構造を分析する際には、この偽信号の除去も大きな課題でした。

2. 研究手法・成果

今回我々は、光学系を工夫することで、広帯域な周波数量子もつれ光を生成する光源を実現しました。さらに、そのような広帯域もつれ光に対しても、収差（光の波長により、光の集光位置が異なる現象）が十分に抑制された光学系を設計・構築しました（図 2）。これにより、世界最高の $4.04\text{ }\mu\text{m}^3$ という体積分解能（軸方向分解能 $1.52\text{ }\mu\text{m}$ 、横方向分解能 $1.63\text{ }\mu\text{m}$ ）を実現しました（図 3）。この値は、従来の QOCT の体積分解能を 43 倍と大幅に向上した分解能です。また、この光分解能域においても、分散耐性を実証しました。実験では大きな光学分散を有する、セレン化亜鉛（ZnSe）の板を挿入した状態でも、解像度が劣化しない「自動分散キャンセル」が維持されることを確認しました（図 3 の a2, b2）。

さらに、さらに、グラフ理論における「最大クリーク探索」を用いた新しいアルゴリズムを開発し、QOCT の大きな障壁であった偽信号の高速な除去も実現しました。偽信号が「2 つの反射面の中点に現れる」という性質に着目し、これをグラフ理論における「最大クリーク探索」という数学的問題に帰着させることができることを着想しました。そしてこの着想に基づき、偽信号を特定し除去するアルゴリズムを考案しました。図 3 に示した実験データ（画像）に対して、一般的なノート PC で 0.2 秒程度（237 ミリ秒）という超高速で行うことに成功しました（図 3 の b1, b2）。従来の手法では数分必要としており、数百倍以上の高速化です。

3. 波及効果、今後の予定

4 フェムトリットルの世界最高の体積分解能をもつ QOCT を実現、またこの高分解能域において、分散耐性の実証にも成功しました。また、グラフ理論を応用した、高速な偽信号除去手法の開発にも成功しました。実現した分解能は、細胞レベルの微細構造を十分捉えることが可能な値です。今後は、量子もつれ光を生成する非線形光学デバイスの改良などで、撮像時間のさらなる短縮など、社会実装にむけた研究開発を加速します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)「量子もつれ光子対を利用した量子計測デバイスの研究」(JPMXS0118067634)、科学技術振興機構 (JST) ERATO「竹内超量子もつれ」(JPMJER2402)、同 CREST (JPMJCR1674)、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金(24H00195)などの支援を受けて実施されました。

<用語解説>

注1 量子もつれ：量子もつれ (Quantum Entanglement) とは、2つの異なるシステム間で関連した状態が2つ以上あり、それらが（量子において複数の状態が同時に成立する）量子重ね合わせ状態にあることを言います。

注2 分散（色分散 / 波長分散）：光が物質の中を進むときに、波長（色）によって光の進む速度が異なる現象のことです。

注3 偽信号（アーティファクト）：QOCT で主に多層構造の試料を測定した際に、実際には存在しない境界（界面）に、あたかも反射面があるかのような偽の信号が現れる現象を指します。

注4 最大クリーク探索：グラフ理論における代表的な最適化問題の一つで、与えられたネットワーク（グラフ）の中から「すべての頂点が互いに直接つながっている、最も大きなグループ（部分グラフ）」を見つけて出すタスクです。本研究では、この数学的手法を応用することで、本物の信号を偽信号（アーティファクト）から高速に分離することに成功しました。

<研究者のコメント>

量子もつれ状態は、シュレーディンガーの提唱から 100 年を迎えました。今後も、量子もつれをはじめとする量子の不思議な性質を利用した、従来の限界を超える技術の研究を、学生、スタッフと共に推進します。（竹内繁樹）

<論文題名と著者>

題 名：High-volume-resolution quantum optical coherence tomography imaging with efficient artifact removal（効率的なアーティファクト除去機能を備えた高体積分解能量子光コヒーレンス断層撮影）

著 者：阿部尚文（第一著者）、堀野智康、川口蓉子、岡本亮、竹内繁樹（責任著者）

掲載誌：Optics Express DOI：(未定)

< 参考図表 >

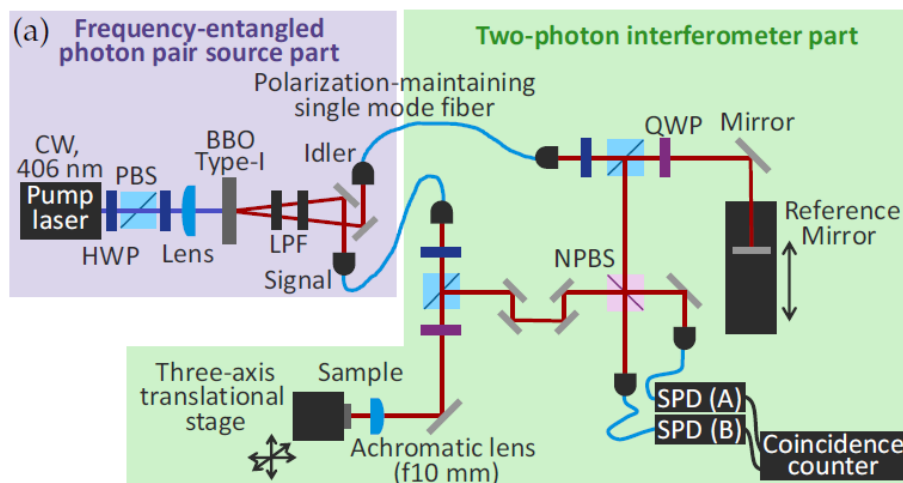


図2 実験装置の模式図。紫色の背景で示した部分において、広帯域の周波数もつれ光子対を生成する。緑色の背景で示した2光子量子干渉計の部分において、光子対のうち一方はサンプル内部で反射された後無偏光ビームスプリッター(NPBS)に入射する。他方の光子は、参照ミラーで反射された後に NPBS に入射し、それらの光子の間で生じる2光子量子干渉の結果を、2台の光子検出器(SPD)での同時検出イベントとして記録する。

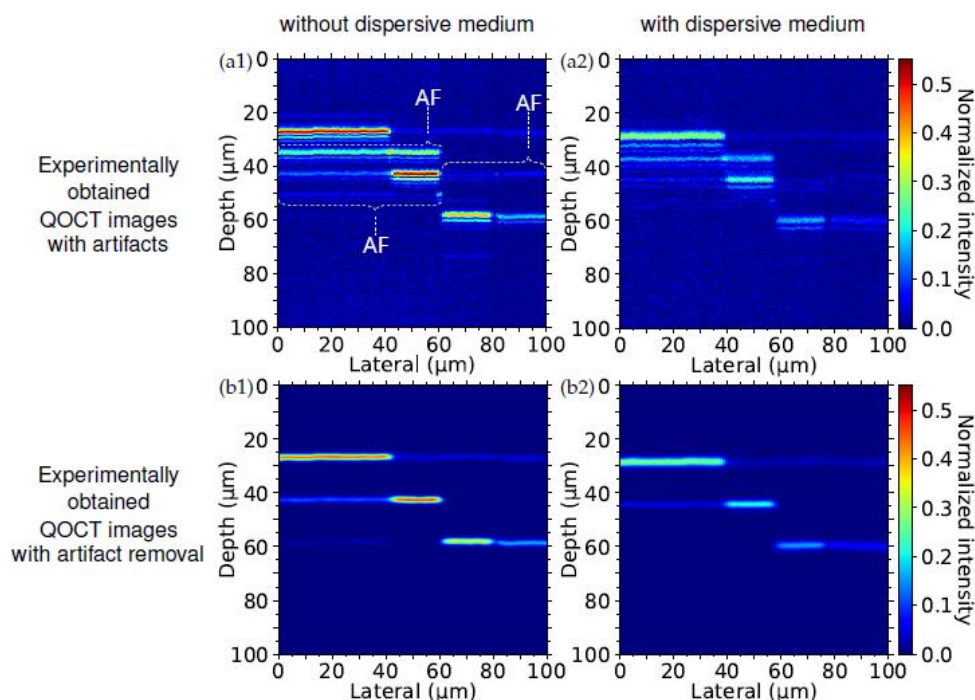


図 3 QOCT による断層像。(a1,2) 分散媒質を(a1)挿入しない場合および(a2)挿入した場合に測定された、QOCT 断層像。(a1)において、各偽信号(アーティファクト)は「AF」として示されている。(a2)では、偽信号は(a1)と同様の位置に現れている。(b1,2)最大クリーク探索を用いた提案アルゴリズムにより、(a1,2)の偽信号が、適切に除去・再構成されている。