

医療から宇宙観測に至るまで幅広い応用が期待できる計測やセンシングでも、量子技術の活用が期待されてきた。しかし、実際に計測技術として社会実装するためには、理論の検証だけでなく、デバイスや検出器などの開発が不可欠である。京都大学大学院工学研究科の竹内繁樹教授は、広帯域周波数量子もつれ光の光源を開発するとともに、それを組み込んだ量子光干渉断層計(量子OCT)を実現した。光子1つ1つを制御し、これまでにない高い精度で計測技術の確立を目指す。

量子計測

広帯域の強力なもつれ光源を開発

竹内 繁樹 Takeuchi Shigeki

京都大学 大学院工学研究科 教授
2016～2021年度CREST研究代表者

コメの非破壊観測で実績「さきがけ」の研究に没頭

汎用型量子コンピューターの開発にはまだかなりの時間を要するといわれているが、量子技術の中でも社会実装が先行している領域もある。その1つが量子計測だ。例えば、量子状態は外部からのわずかな影響でも壊れてしまうが、裏を返せば量子状態を見れば外部環境が変化したことを捉える高精度なセンサーに応用できる。こうした量子特有の性質を利用した革新的な計測技術の開発が見込まれている。

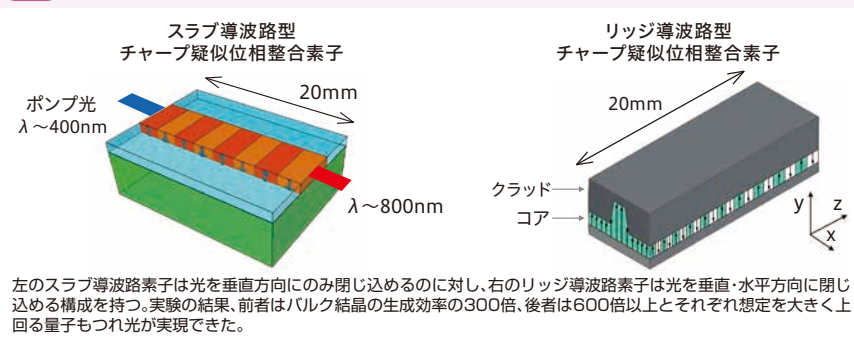
中でもCREST「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用」で研究代表者を務める京都大学大学院工学研究科の竹内繁樹教授は、量子もつれ光子を使った新たな量子光計測技術の確立を目指している。大学院で超伝導素子によるフォノンの発生・検出の研究を行い、量子デバイスの研究を志して1993年に三菱電機に入社。そこで最初に与えられた課題は「新研究テーマ」の探索、そして新事業探索の

一環として「初年度はコメに関連した研究もすること」だった。

全く縁の無いコメの研究だったが、炊飯過程の解明を決意した竹内さんは、コメ1粒が炊ける専用のガラスチューブやホルダーを自作した。「産学共同研究で当時日本に2台しかなかった核磁気共鳴(NMR)マイクロイメージング装置を利用させていただくことが叶い、コメ内部ででんぷんの糊化が進む様子を非破壊リアルタイムで観測することに成功しました」。コメの研究は、三菱電機の電気釜にある「うまみ炊きボタン」の実装にもつながった。

「量子とは一見何の関係もないようですが、核スピンの制御や位相緩和による高速イメージングを実現した経験が、今の研究にも役立っています」と語る。その後95年に、「新研究テーマ」として定めた光子を使った量子コンピューター開発を提案。史上最年少の27歳で「さきがけ」に採択され、念願だった量子研究に没頭する日々が始まった。「統括の吉森先生をはじめ素晴らしい先生方が結集され、たくさんの助言をいただきました。当時は制度がなかった海外滞在なども、支援いただきました」。そして、98年に世界初となる単一量子で

図1 「広帯域周波数もつれ光」光源の開発



左のスラブ導波路素子は光を垂直方向にのみ閉じ込めるのに対し、右のリッジ導波路素子は光を垂直・水平方向に閉じ込める構成を持つ。実験の結果、前者はバルク結晶の生成効率の300倍、後者は600倍以上とそれぞれ想定を大きく上回る量子もつれ光が実現できた。

の量子アルゴリズムを実証すると、その後も2つの光子のもつれ状態を維持したまま取り出す光子回路「量子もつれフィルター」や高輝度の単一光子源の開発など、着実に成果を重ねた。

社会のニーズに合わせた開発 眼底検査装置の高速化を達成

光子を実験的にも狙い通り扱えるようになってきた竹内さんが、次に狙いを定めたのは量子計測への応用だ。従来の光を使った計測では、高分解能で詳細に測定しようとする、強い光を当てる必要があるが、それでは試料が壊れてしまうため、弱い光で長時間かけて計測する他になかった。「光計測では、光量が多いほど精度は高まりますが、理論上、究極的には量子光を用いると古典光の10億分の1の光で同じ精度を実現できる可能性があります。そこまできなくとも、より短時間で高分解能の解析が可能になる可能性はあります」と説明する。

まず「屈折率」や「厚み」の違いによる光の経路差を検出し、透明な試料の観察に用いられる微分干渉顕微鏡の照明光として、量子もつれあい状態の光子対を利用する「量子もつれ顕微鏡」を開発・実現すると、原子100個程度の厚みが検知できることを実証した。その後、量子もつれ光を利用した光計測のさらなる可能性を探ったところ、眼底検査などで網膜の断層画像を撮影する光干渉断層計(OCT)が浮上したという。

OCTは眼底の観察に広く用いられているほか、製造ライン中での検査などにも活用されている。一方で、既存OCTでは、眼球組織などの媒質中を通過する際に、光の進行速度が波長により異なるため、分解能が大きく低下するという問題があった。しかし、量子もつれ光を光源として利用する量子OCTでは、分解能劣化がないと理論的に考えられていた。

竹内さんらは世界最大の周波数帯域を持つ量子もつれ光を実現し、基礎的な実験で既存OCTの分解能記録の0.75マイクロ(マイクロは100万分の1)メートルを上回る0.54マイクロメートルという高い分解能を達成可能であることを示した。また、量子OCTでは分散の影響をほとんど受けないことも確認した。「期待通り高分解能の量子OCTができましたが、画像1枚撮るのに8時間もかかりました」と笑う。広い周波数帯域で存在できる量子もつれ光子対の生成量が不足していたためだ。

これでは実用化は難しい、と2016年に立ち上がったCRESTで、より強力な量子もつれ光源の実現、そして革新的な量子光計測技術の確立を目指した研究を開始した。より効率的に量子もつれ光を発生させるため、光を平面的に閉じ込めたスラブ導波路型チャープ疑似位相整合素子、ならびに水平・垂直方向にも閉じ込めたリッジ導波路型チャープ疑似位相整合素子の開発を進めた。

その結果、スラブ素子でバルク結晶の生成効率の300倍、リッジ素子でも同600倍以上という、2種類の高効率量子もつれ光源を開発した(図1)。さらに、開発した量子もつれ光源のほか、超伝導光子検出器を利用した高速計数システムを組み込んだ量子OCTを開発し、高分解能を維持しながら、画像取得時間を約90秒と300倍以上の高速化を実現した。

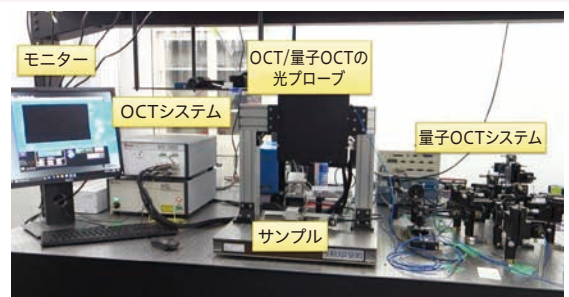
さらに、量子OCTシステムを既存OCTに組み込んだハイブリッドOCTシステム

も試作した(図2)。「ハイブリッド化することにより、分解能は高くないものの速度の点で優位な既存OCTで目的のサンプルを広い領域で観察した後、特に高分解能で観察したい場所を狙って量子OCTで精査することが可能になります」と竹内さんはハイブリッドOCTシステムの有用性を語る。

研究チームの成果は、学術分野だけにとどまらない。科学技術イノベーションへの貢献では「オンチップ超広帯域周波数量子もつれ光源の実現と制御技術」が挙げられる。研究チームは、シリコンと有機ポリマーのハイブリッドデバイスとして、オンチップ高非線形性リング共振器とオンチップ高周波数変調器を新規開発した(図3)。この光源により量子センシング、量子通信装置の飛躍的な小型化が期待される。今後、理論の実証や社会実装に向けた耐久性の向上など、さらなる深化を期待したい。

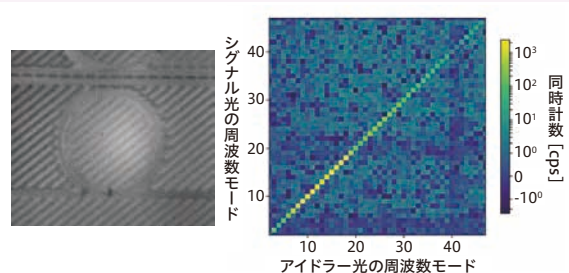
(TEXT:森部次次、PHOTO:石原秀樹)

図2 ハイブリッドOCTシステム



既存のOCTシステムに量子OCTを組み込んだ、高速・高分解能のOCTハイブリッドシステム。通常の分解能でのスキャンを古典OCTで高速広範囲に実施し、特定の箇所をOCTによる超高分解能断層撮影を行う。

図3 広帯域オンチップ量子もつれ光源



オンチップリング共振器による世界最大の帯域とモード数をもつ量子もつれ光源を実現した。開発した窒化ケイ素(SiN)オンチップリング共振器は直径約300マイクロメートル(左)。グラフの縦軸はシグナル光の周波数モード、横軸はアイドラー光の周波数モードを示している(右)。これらがちょうど一致したところで、量子もつれ光子対が発生していることがわかる。オンチップリング光源から発生したもつれ光子対としては、世界最大の帯域となる全幅100ナノ(ナノは10億分の1)メートルを実現した。