

# 新開発の量子もつれ光源により、 世界最大の超広帯域量子赤外分光を実現 —広帯域赤外分光の小型・高感度化に貢献—

## 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<sup>※1</sup>)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。特に、量子もつれ光を用いた「量子赤外分光<sup>※2</sup>」は、可視域の光源と検出器のみで、赤外域の分光が可能になり、物質や分子の鑑別に幅広く利用されている赤外分光<sup>※3</sup>装置の大幅な小型化・高感度化・低コスト化が期待される技術として注目されています。しかし、これまでは、量子もつれ光の帯域が赤外域で狭い範囲(1 $\mu\text{m}$ 以下)に限られており、量子赤外分光の帯域を制限していました。

今回、京都大学大学院工学研究科の田嶋俊之 特定研究員、向井佑 同助教、岡本亮 同准教授、竹内繁樹 同教授らの研究グループは、島津製作所の徳田勝彦 主任研究員らの研究グループと共同で、波長 2 $\mu\text{m}$ ~5 $\mu\text{m}$  という広い波長域で赤外光子を発生する超広帯域量子もつれ光源を開発、それを用いた量子赤外分光に世界で初めて成功しました。今後、さまざまな物質の鑑別同定が、スマートフォンのカメラなどにも利用されているシリコン光検出器<sup>※4</sup>を用いた、小型で高性能な量子赤外分光装置により可能となり、医療やセキュリティ、環境モニタリングなどで活用されることが期待されます。

本成果は、2024年1月12日時現地時間に米国の国際学術誌「*Optica*」にオンライン掲載されました。

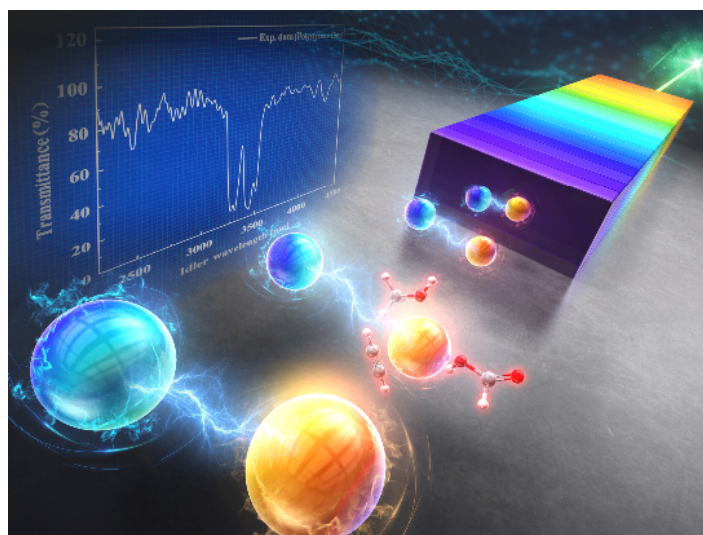


図1 今回実証した、超広帯域量子赤外分光のイメージ図

## 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、有力な担体であり、光子の量子的な性質を利用する「光量子センシング」の研究が進められています。

光量子センシングの中でも、最近「量子赤外分光」が注目を集め、精力的な研究が進められています。赤外分光法は、物質中の分子の種類を特定する方法として、化学・生命科学・医療から環境モニタリングや工業生産など、幅広い分野で利用されています。ただし、従来一般に用いられているフーリエ変換型赤外分光装置(FTIR)では、発熱体を光源として利用していること、また赤外域の検出器における雑音の問題などが、装置のさらなる小型化・高感度化を妨げていました。量子赤外分光は、可視域と赤外域に発生する「周波数量子もつれ光子対<sup>\*5</sup>」を利用することで、一般に用いられているシリコン光検出器と可視域の光源のみを用いて赤外分光を行うことが可能となり、装置の飛躍的な小型化や高感度化が期待されます。

しかし、これまでは、量子もつれ光の帯域が赤外域で狭い範囲(1 $\mu$ m以下)に限られていたことが、量子赤外分光の帯域を制限していました。以前に我々は光子対の波長を変化させ掃引する手法による広帯域量子赤外分光を報告していましたが、「広帯域」と「高分解能」を両立するのが困難という課題がありました。

## 2. 研究手法・成果

今回私たちは、赤外域で広い周波数帯域にわたり量子もつれ光を生成できる「チャープ擬似位相整合素子<sup>\*6</sup>」を独自に開発、2 $\mu$ m~5 $\mu$ mという広い波長域にわたる量子赤外分光に世界で初めて成功しました。

今回開発したチャープ擬似位相整合素子の概念図を図2(左)に示します。擬似位相整合素子は、周期的に素子の分極が反転した構造を持っています。擬似位相整合素子から発生する量子もつれ光の光子対の波長の組み合わせは、その分極反転周期で決まります。従って、分極反転周期を少しずつ変化(チャープ)させることで、広い帯域に渡って量子もつれ光子対を発生させることができます。私たちは、マグネシウム添加定比タンタル酸リチウム(MgSLT)と呼ばれる物質に対して、図2(左)のようにチャープ擬似位相整合構造を設計・製造しました。この素子の右端からレーザー光を入射すると、左端から可視光子と赤外光子の対である量子もつれ光が発生します。図2(右)は、発生した量子もつれ光の可視光子を分光器で測定した結果です。下の軸が測定された可視光子の波長、上の軸がそれに対応する赤外域の波長です。この結果、2 $\mu$ m~5 $\mu$ mという超広帯域赤外光子に対応する可視光子が発生していることを確認しました。

実験装置の概要を図3に示します。可視域の励起レーザー光をチャープ擬似位相整合素子に入射すると、上述の通り、可視光子と赤外光子からなる量子もつれ光が発生します。この量子もつれ光を、波長フィルターにより赤外光子と、可視光子および励起光に分離したのち、それぞれ鏡で反射させ、再びチャープ擬似位相整合素子に入射します。このとき、量子干渉<sup>\*7</sup>により、それらの2つの経路長に応じて発生する可視光子の量が増減します。赤外光子側の反射鏡の位置を変化させながら得られた干渉縞<sup>\*7</sup>をフーリエ変換することで、私たちが以前開発した量子フーリエ変換赤外分光法<sup>\*8</sup>により、赤外域のスペクトルを算出しました。

図4 溶融石英ガラス(図4(a))、ポリスチレンフィルム(図4(b))、エタノール(図4(c))といった無機・有機の多様なサンプルに対して得た、赤外スペクトルを示します。可視の光源と検出器を用いて取得した量子赤外分光(実線)は、従来のFTIRの結果(赤点線)とよく一致しており、超広帯域でかつ高い分解能でスペクトルを取得できていることが分かります。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究では、スマートフォンなどで用いられているシリコン光検出器によって、赤外吸収スペクトルを、世界最大となる2～5 μmの広帯域にわたり、従来の赤外分光装置に匹敵する分解能で取得できることを示しました。この成果は、赤外分光装置の飛躍的な小型化や高感度化にむけた非常に重要なステップです。将来的には、電池で動作するコンパクトで高性能な赤外分光装置を実現され、これまでオンサイトでは困難であった、環境モニタリングや、医療、セキュリティなど様々な分野への波及が期待されます。また、本成果で開発した超広帯域量子もつれ光源などの基盤技術は、量子赤外分光だけでなく赤外域の量子イメージング、さらには将来の量子コンピューターの実現にも寄与することが期待できます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、主として文部科学省光・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」）（代表者：竹内繁樹、JPMXS0118067634）等の支援を受け実施いたしました。

#### <用語解説>

※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相関した状態が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。1935年にアインシュタインとボーアが、その存在について議論を闘わせたことが有名ですが、現在ではさまざまな量子技術の重要なリソースとして利用されています。

※2 **量子赤外分光**：重ね合わせやもつれ合いといった量子力学特有の性質を利用して、古典的計測技術の限界を越える量子センシング技術の一つ。時間・空間的に隔てられた光子対生成過程間の干渉現象を利用することで、量子もつれ光子対（下記項目参照）を形成する光子の一方（測定用光子）に対して生じる光吸収、位相遅延などの情報を、相関を持つもう一方の光子（検出用光子）の発生数変化として読み取ることが可能になります。測定用光子、検出用光子がそれぞれ赤外・可視領域の波長をもつように光子対を発生させることで、可視の光計測を通した赤外分光を行うことができます。

※3 **赤外分光**：分子による赤外線吸収波長（スペクトル）は、主としてその分子の固有振動数にもとづくので、分子が異なればその赤外吸収スペクトルも必ず異なります。この事実を利用して、赤外吸収スペクトルによって物質の同定、定性分析などを行なうことができます。化学物質の分析同定に、幅広く様々な分野で利用されているほか、環境モニタリングやセキュリティでも活用されています。

※4 **シリコン光検出器**：シリコンは、代表的な半導体としてパソコンのCPU、メモリなどの集積回路に利用されています。0.4～1.1 μmの波長の光に対する光検出素子としても利用することができ、その例として、今回の研究で利用したフォトダイオードの他、集積回路作成技術を利用してスマートフォンなどに搭載されているカメラに利用されるCMOS光センサが挙げられます。ただし、1.1 μmより長い波長の光は検出できません。

※5 **量子もつれ光子対**：2つの光子が、偏光や周波数などに関して特定の相関に関して重ね合わせ状態にある

ものです。量子赤外分光法においては、2つの光子のエネルギー(あるいは周波数)の総和が常に一定となる様な、「周波数もつれ」をもつ光子対が利用されます。例として、「一方の光子の波長が677nmで、他方の光子の波長が2500nm」という状態と、「一方の光子の波長が725nmで、他方の光子の波長が2000nm」という二つの状態が量子かさねあわせ状態にある場合があります。

※6 **擬似位相整合素子**：用いる物質の分極を周期的に反転させることで運動量保存則(位相整合)を実現、光の波長を変換する素子のことをいいます。

※7 **量子干渉、量子干渉縞**：実験装置のところの説明にあるように、量子もつれ光子対の発生する複数の物理過程(プロセス)が、どちらで発生したのかを区別ができない場合、それらの物理過程の間で量子力学的な干渉(量子干渉と呼びます。)が生じます。今回の実験は、赤外光子の反射鏡の位置を掃引すると、その量子干渉が、反射鏡の位置によって強め合う、あるいは弱め合う場合を交互に繰り返すことになり、その結果検出された可視光子数をプロットすると、図4(a)-(c)の挿入図のような特徴的な振動波形がえられ、これを「量子干渉縞」と呼びます。これは、通常の「光の干渉」による干渉縞とは異なります。

※8 **量子フーリエ変換赤外分光法(量子FTIR)**：我々のグループが、2021年に提案および実証した、量子赤外分光法で、QFTIRと名付けています。それまでの量子赤外分光法では、量子もつれ光子対のうち、可視光子を、可視分光器により分光しその波長を特定することで、対応する赤外光子の波長を推定していましたが、可視分光器が大型であること、また可視分光器の分解能により、量子赤外分光の分解能が制限されるなどの問題がありました。QFTIRは、単一画素のシリコン光検出器で実装ができること、その分解能はQFTIR装置内の赤外光子の反射鏡の掃引距離を変えることで任意に高めることができること、さらに従来のフーリエ変換赤外分光(FTIR)では困難であった、屈折率スペクトルも取得可能である、などの特長を有しています。

※9 **分子振動**：分子の中では、それを構成する原子や、その小さな集団(原子団)が、バネのように働く力で結合し、それらは振動しています。この振動数は、結合する力の大きさや、原子・原子団の質量に応じて定まります。

#### <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まもなく100年を迎えます。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)

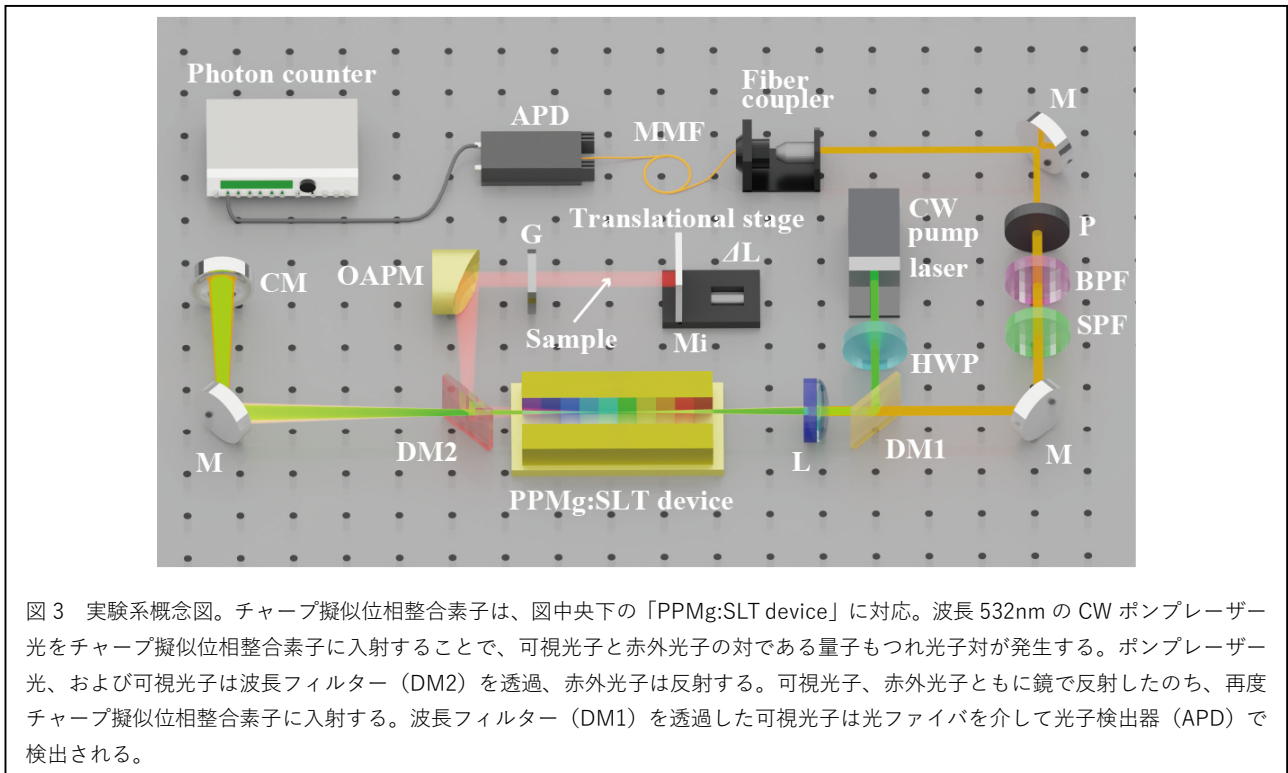
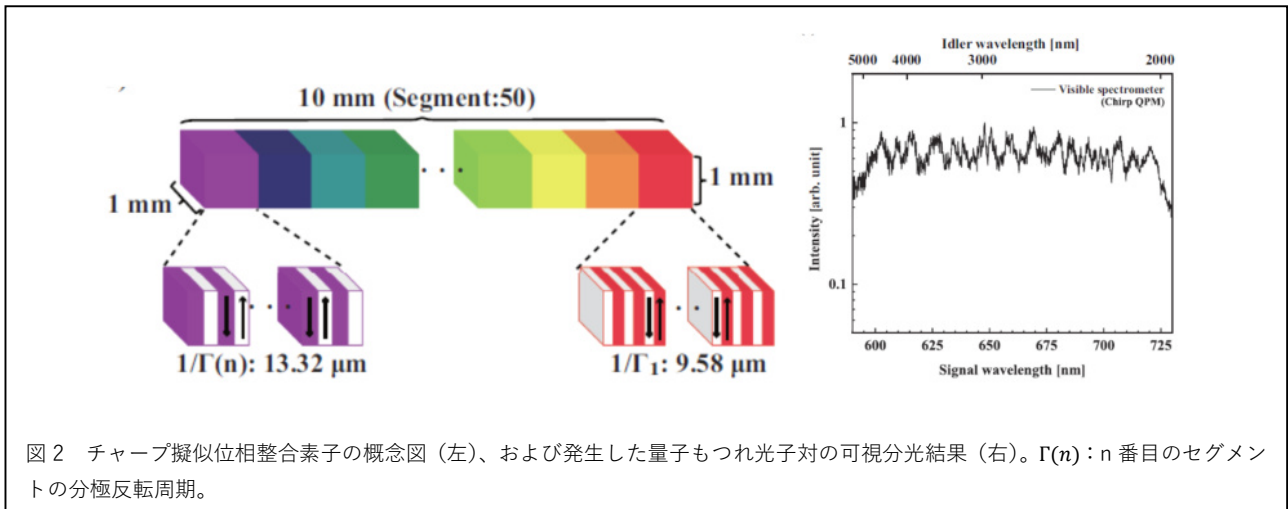
#### <論文タイトルと著者>

タイトル：Ultra-broadband quantum infrared spectroscopy  
(超広帯域量子赤外分光)

著者：田嶋俊之(京大)、向井佑(京大)、荒畑雅也(京大)、小田哲秀(京大)、久光守(島津製作所)、徳田勝彦(島津製作所)、岡本亮(京大)、竹内繁樹(京大)

掲載誌：Optica DOI: 10.1364/OPTICA.504450

<参考図表>



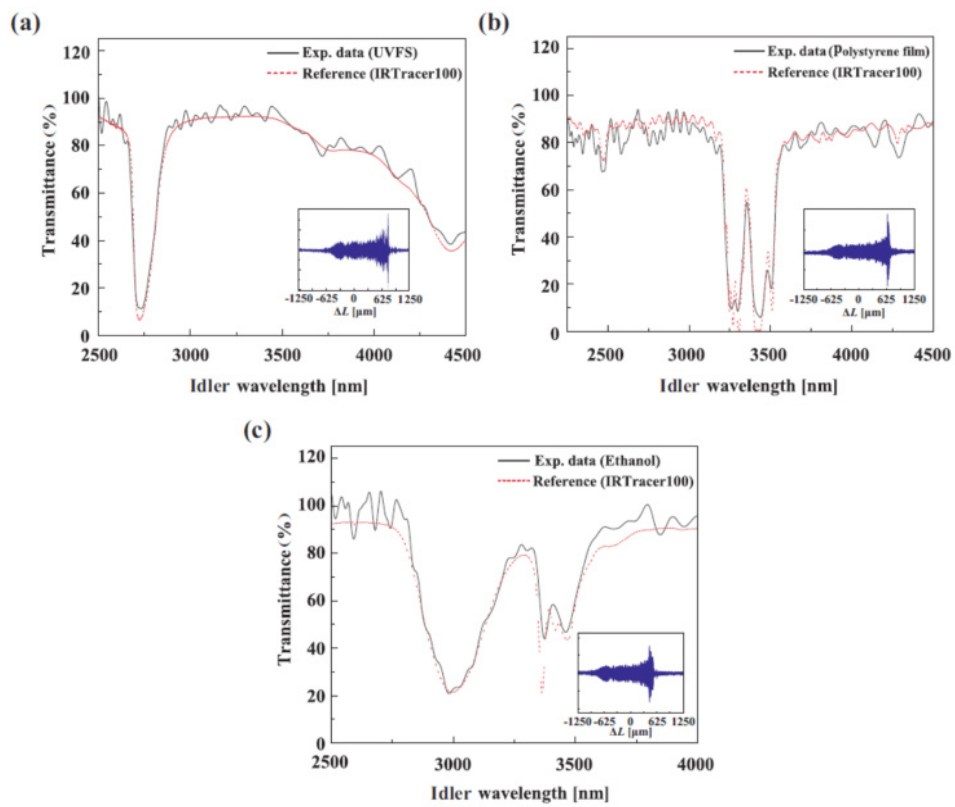


図4 本量子 FTIR 装置で得られた、広帯域赤外吸収スペクトル。それぞれ、熔融石英ガラス(a)、ポリスチレンフィルム (b)、およびエタノール(c)の分光結果。