

# 「セキュア量子基盤技術の研究」プロジェクト

研究代表者：横浜国立大学 堀切 智之

## 【基本構想】

本プロジェクトは、グローバル情報通信の無条件安全性獲得を基本目標に、それを可能にする量子通信の長距離化技術開発を実施する。特に長距離量子通信中継技術である、量子中継器の開発を、その要素技術となる量子もつれ光源・量子メモリ・波長変換システム・周波数安定化システムの各開発から統合まで実施することを具体的な目標とする。量子通信の長距離化とは、その基本リソースである量子もつれを、いかに長距離間で効率的に共有できるかが重要である。量子もつれが共有できれば、それをを用いた量子暗号通信（量子鍵配送）や量子状態事象を伝送する量子テレポーテーションが可能となる。さらに、遠隔地に配置された量子コンピュータ同士をつなぐ分散量子計算やクラウド量子計算の秘匿化（ブラインド量子計算）といった将来的に大きな期待を抱かれる技術群の基盤ともなる。

量子もつれ光源は量子もつれを離れた地点まで光ファイバーを用いて運ぶために必要である。また、量子メモリは送られてきた光（光子）の量子状態を一時保存しておくために用いる。さらに波長変換システムは、光ファイバーを低損失で長距離伝送するため通信波長帯（波長 1.5 マイクロメートル）に生成された量子もつれ光子を可視光帯（0.6 マイクロメートル近辺）にある量子メモリ波長に変換するために用いる。最後に周波数安定化は、量子もつれ光子が安定的に狭い遷移周波数幅を持つ量子メモリに吸収保存されるために必須の技術である。これら各要素を結合することが量子中継器の基礎になる。本研究では、その設計のもと各パートを開発し統合する。

## 1. 研究目的

プロジェクト2年目となる2020年度は、以下の各項目を重点項目として開発を実施した。

### (1) 量子もつれ光源の開発

量子中継器において光の量子状態を高レート・高効率伝送する量子もつれ光源が必要である。光ファイバー伝送後、伝送先中継ノードに設置される量子メモリへの高効率量子状態保存を可能にするためには、狭い量子メモリ遷移周波数幅に対応した、狭スペクトル幅量子もつれ光源が必要である。加えて該当スペクトルにおいて高い光子スペクトル密度をもつために、光共振器内で量子もつれ光子対発生を起こすシステムを採用する。これにより、量子メモリ結合効率100%を目指し、かつ低損失光ファイバー伝送可能な通信波長における量子もつれ光源を開発する。

### (2) 量子メモリの開発

量子中継器内に設置し、光量子状態を一時保存・再生する機能を持つ量子メモリ開発が必要である。中継器は、基本的に中継ノードの反対側からくる通信の送信側と受信側からの光子の量子状態を保存する。片側の光子が早く到着した場合、一時保存することによってもう片方の光子を待ち、タイミングを合わせて量子通信の必須要素であり量子中継器の目的である量子もつれ生成用の量子もつれ交換操作（ベル測定）を行うためである。本研究では、高スループット・長距離化へと重要な多重化通信量子メモリ開発を希土類添加物質を用いて実施する。

### (3) 波長変換技術開発

上記通信波長量子もつれ光源からの光子が、量子メモリ搭載中継ノードに届いても、量子メモリの吸収波長からの

隔たりが問題となる。そのため、多重化量子メモリ Pr:YSO の吸収波長およそ 606 nm に通信波長光子を波長変換するシステムが必要となる。その際、強い変換用励起レーザー由来のノイズが発生してしまうため、そのノイズ除去機構の搭載も重要になる。

### (4) 周波数安定化技術開発

量子メモリの遷移周波数幅は 10MHz 以下であり、通常光信号は長時間その程度の幅の中に居続けることができない。そのような周波数ドリフトをキャンセルし周波数を安定化するシステムをフィードバック制御により、各要素に実装する。

## 2. 研究成果

以下に挙げるのは、令和2年度の具体的な研究成果である。

### (1) 量子もつれ光源の開発

量子中継に用いる量子もつれ光源に必要な性能として、中継ノードで用いられる量子メモリとの結合効率が高いことがある。本研究で開発する多重化量子通信メモリ Pr:YSO はその励起準位間隔隔によって決定される最大のメモリ可能吸収領域幅約 5 MHz を持つ。よって、量子もつれ光源はそれよりも狭いスペクトル幅をもつ必要がある。本研究では 1 MHz を切るスペクトル幅を達成し、100%結合効率を目標とする。そのために、光共振器内での量子もつれ光の発生を利用した。

図1は、開発もつれ光源の実験系セットアップである。

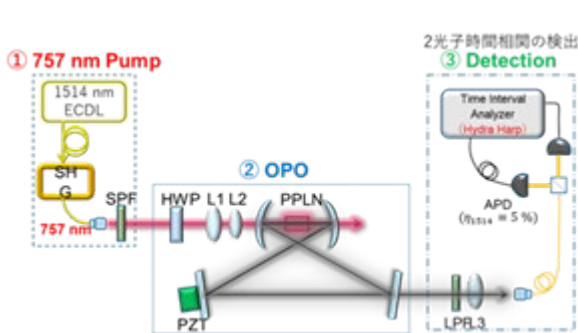


図 1：量子もつれ光源概略図。

まず、通信波長での量子もつれ光子対を生成するために、その倍のエネルギーを持つ光子（波長 757 nm）からなる励起レーザーを用意する（図中①）。その励起レーザーを図中②の光共振器に入射させ、量子もつれ光子対を生成する非線形光学媒質である周期極反転ニオブ酸リチウム（PPLN）を励起する。ここで確率的に通信波長 2 光子が生成される。PPLN は 2 つ直列に並んでおり、どちらの PPLN で生成されたかによって、2 光子が鉛直偏光か水平偏光をもつかが異なる。よってこれらの偏光を測定するまでは確定せず、2 つの偏光の重ね合わせである量子もつれ状態が生じる。これらの 2 光子は、共振器を周回したのち、いずれ右下の出力鏡から外に出ていく。図中③が、生成した 2 光子の検出系である。この検出系で 2 光子の時間相関を測定した結果が、図 2 である。

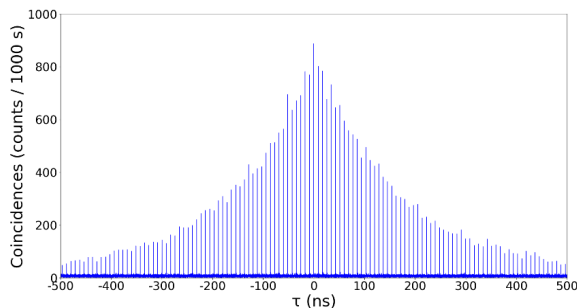


図 2：2 光子時間相関測定結果。横軸：2 光子時間差、縦軸：2 光子カウント数。共振器 2 光子源特有の楕構造が保存されている。

図の横軸は、共振器から 2 光子が出てきた時間差に対応している。中央の一番高いピークが同時に出来たことに対応する。各ピーク間隔は、共振器を 1 周するのにかかる時間であり、周回長を反映して約 8 ns となっている。これら楕で構成されている全体の包絡線は、共振器 2 光子の寿命となっており、この逆数が 2 光子の線幅となる。本研究で、我々は 1MHz を下回る線幅を達成した。この結果によると、共振器スペクトルにローレンツ関数を仮定した場合、90%以上の量子メモリ結合効率が得られることがわかった。

更に、量子もつれの質を決定する忠実度測定のため量子状態トモグラフィを実施し、理想的な量子もつれであるベル状態との忠実度 90%を得た（図 3）。

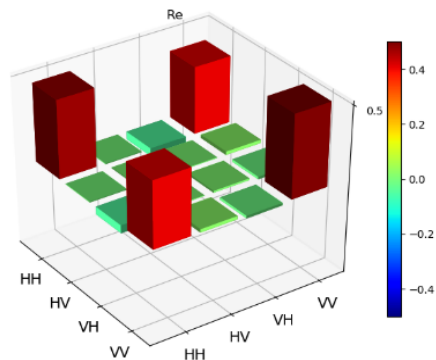


図 3. 量子状態トモグラフィ結果。（実部のみ掲載）。

(2) 量子メモリの開発

Pr:YSO 結晶を多重化量子通信用量子メモリとして開発すべく、単一光子信号の確定時間保存・再生実験を実施した。1 パルス当たり平均光子数を 1 程度まで弱めたレーザー光を入力にもちいた。Pr:YSO の吸収スペクトルに楕上の吸収スペクトルを生成するため、制御レーザーの周波数変調をほどこし、レーザー周波数において吸収飽和が起きてそれ以上吸収されない状態「ホールバーニング」領域を生成した。この透明領域に、鋭い吸収スペクトルピーク群をつくることで、時分割多重量子メモリとしての機能が獲得できる。

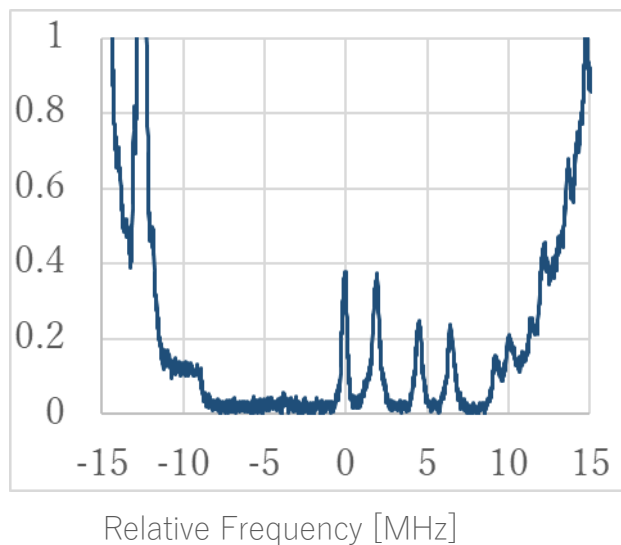


図 4：Pr:YSO 吸収スペクトルに生成された楕構造。縦軸：吸収係数 (arbitrary unit.)、横軸：周波数。

図 4 に量子メモリ結晶 Pr:YSO に生成された幅およそ 15MHz の透明領域とそこに形成された楕構造を示す。この楕構造をまたぐスペクトルを持つ光信号が入射し吸収されると、いずれかの楕で吸収される状態の量子力学的重ね合わせになり、その場合楕間隔周波数の逆数時間で元の状態にもどる、つまり入射光子が再生放出されることになる。つまりここで再生時間が確定されたメモリ機能を持たせることができる。この楕構造をより集密にしてい

時分割多重度を大幅に増やせるし、かつこのような楕円構造のある透明領域を Pr:YSO の広い吸収スペクトル内に大量につくことで、波長分割多重能力獲得も可能である。

続いて、本研究では単一光子信号受入れ能力実証の為、単一光子レベルに弱めたレーザー光を、Pr:YSO 結晶に入射、その後楕円間隔の逆数時間で再生されるフォトンエコー信号を単一光子検出器で測定した (図 5)。

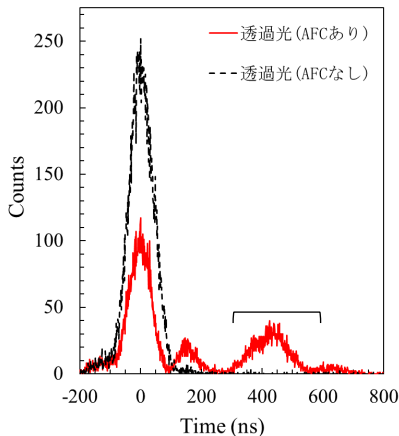


図 5: 単一光子レベルフォトンエコー測定結果。横軸: 時間 (ns), 縦軸: 単一光子検出器カウント数。

図 5 黒プロットは吸収スペクトルの操作をせずに透過光のみ見た場合であり、みやすさのため赤線と原点を合わせてある。赤プロットは吸収スペクトルに楕円構造を生成した場合で、時間 0 のピークは、吸収されず透過した光、400 ns 付近のピークが吸収されフォトンエコーとして再生された光である。黒プロットの積分値との比較から、吸収再生効率は約 10%程度であった。これにより単一光子信号の一定時間保存・再生能力を実証できた。

また任意時間メモリのための実験系構築を始め、スピンフリップを起こしメモリ時間を伸ばすための AC 磁場、および DC 磁場によって超微細遷移の不均一幅を狭め数 ms 以上のメモリ時間を得るための磁場印加システム開発を開始した。

### (3) 波長変換技術開発

通信波長量子もつれ光源からの光子は光ファイバー中を数 km から数 10km 伝送したのち、量子中継ノードにて量子メモリに量子状態保存される必要がある。その過程で多重化量子メモリ Pr:YSO のメモリ波長 606nm に波長変換を施す必要がある。本研究では、通信波長もつれ光子 (1514nm) から量子メモリ波長 (606nm) に高効率変換する波長変換システム構築を実施した。

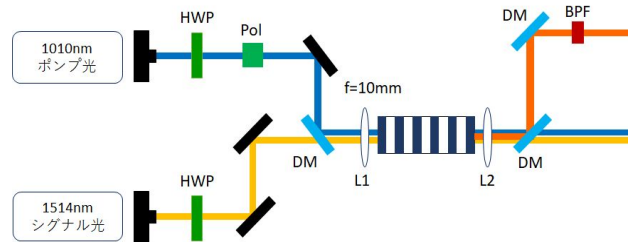


図 6: 波長変換実験系。

図 6 はその実験系であり、1514nm シグナル光を 1010nm ポンプ光によって 606nm に波長変換する系である。変換デバイスは周期分極反転ニオブ酸リチウム導波路を用いている。光ファイバーコア系と同程度の幅 (<10 マイクロメートル) の導波路内にシグナル光とポンプ光を結合すると、疑似位相整合条件を満たす (エネルギー保存則および運動量保存則が満たされる) 光が生成される。この場合それが 606nm の光である。強いポンプ光を用いた場合、ほぼ 100%近い内部変換効率を得ることが可能であり、変換された光は右上の光路から取り出され、測定される。

図 7 が波長変換効率測定結果である。ポンプ光パワーおよそ 300mW で最高効率 60%以上を達成した。現在の PPLN 導波路であれば内部変換効率は 100%近くを得られることがわかっているが、数マイクロメートル四方の端面をもつ導波路への入力効率を 100%に近づけることが難しい点、またポンプ光とシグナル光が内部でモードが完全に一致していないと変換されない点などから、効率低下が生じる。しかしながら、60%は世界的にもトップレベルの数

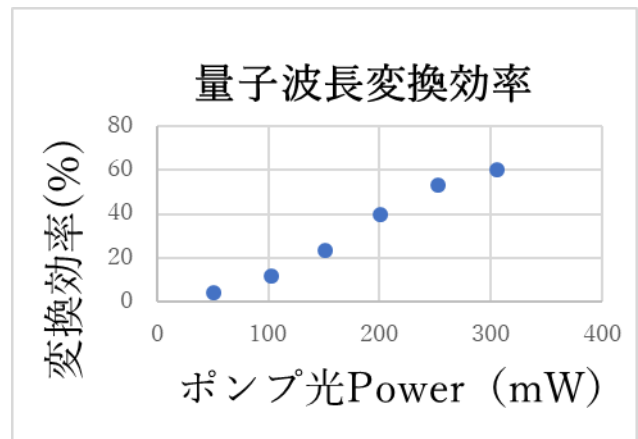


図 7: 波長変換効率測定結果

値である。

また、波長変換時に主にポンプ光由来で生じるノイズを除去するフィルタリングシステム開発を開始した。波長変換は、数百 mW のポンプ光 (光子数にすると 1 秒当たり  $10^{18}$  個程度) と単一光子レベルのシグナル光 (1 秒当たり  $10^6$  個程度以下) という極めて強度の異なる 2 つの光が寄与するため、ポンプ光自身のみによる非線形光学過程 (パラメトリック下方変換やストークス散乱など) によって通信波長にノイズ光が生じ、そのノイズと元のポンプ光がさ

らに波長変換を起こし量子メモリ波長に現れてしまう(図8参照)。したがって、このノイズを除去することが信号雑音比向上に重要となる。

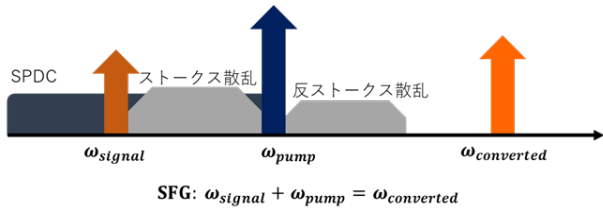


図8：波長変換におけるノイズ源。ポンプから発生するストークス散乱光やパラメトリック下方変換(SPDC)光がシグナル光の通信波長にも生じてしまう。

このノイズを除去するには、周波数フィルタリングを用いる。図8の概念図からわかるように、ノイズは非常に広い帯域(>THz)にわたるため、周波数領域を狭めて測定すれば大幅に減少させることが可能である。一方本研究で開発する量子もつれ光源はおよそ1MHz程度の線幅をもつため、それに近い幅のみ透過するフィルタを用意できれば、ノイズは当初より6桁程度以上減少させられると見込める。そのために、量子メモリとしても用いるPr:YSOをフィルタ用結晶として用意し、その吸収率の高さを利用し、また制御レーザーで飽和させることでもつれ光子のスペクトルにおいてのみ透明領域を作り出すことで、ノイズ除去フィルタを作成することにした。

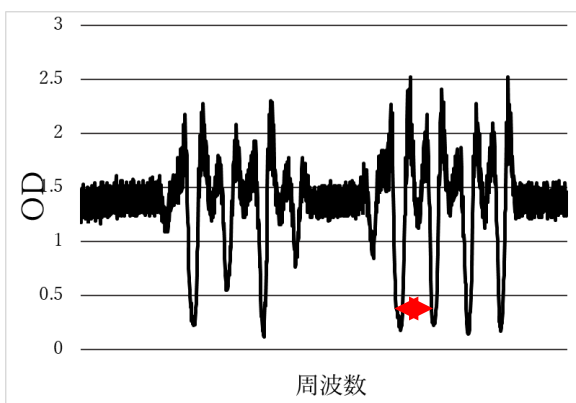


図9：ノイズ除去用フィルタ結晶に生成された吸収スペクトル。

図9がPr:YSOに生成された吸収スペクトルである。縦軸は吸収率に対応し、0に近いほど透明である。横軸は周波数である。下方向への鋭いピーク群は、116MHz間隔(赤矢印)で形成されており、共振器量子もつれ光源の周波数間隔と一致する。ここでは10本以下の透過ピーク生成にとどまっているが、より透明度を上げたピークを多数形成することで、波長変換におけるノイズを除去するシステムとして実装する予定である。

(4) 周波数安定化技術開発

量子メモリとなる吸収スペクトル領域は5MHz以下であり、量子もつれ光源の線幅がそれ以下である必要だけでなく、中心波長がその領域に安定的に存在し続けなければ、長期の量子通信に用いることができない。そのためには、量子もつれ光源(励起レーザーおよび共振器)、波長変換ポンプレーザー、量子メモリ制御レーザーのそれぞれの周波数を安定化させておく必要がある。

本研究では、量子もつれ光源励起レーザー、量子メモリ制御レーザーは光周波数コムへの相対周波数ロックにより、波長変換ポンプレーザーはヨウ素吸収線への周波数ロックを用いて安定化達成した。

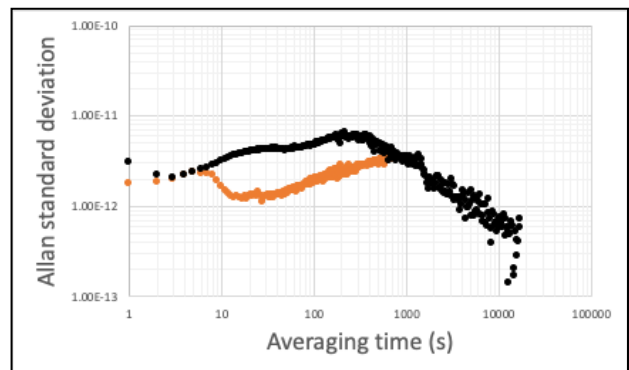


図10：通信波長レーザーの周波数安定度測定結果。黒：基準となる光コムの安定性。オレンジ：レーザーの安定度。光コムに非常に良く追従し、光コム自体の安定度から、十分なことがわかる。

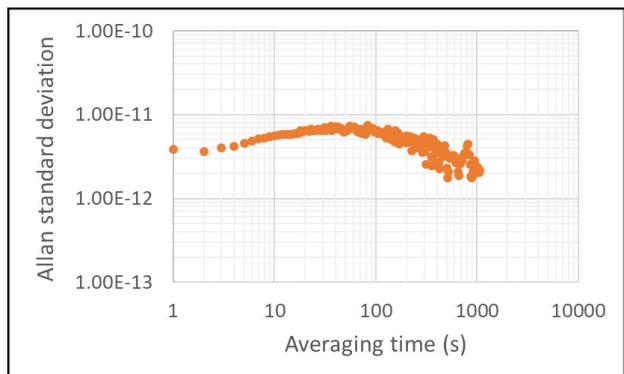


図11：1010nmレーザーの周波数安定度測定結果。

図10および図11は、例としてそれぞれ通信波長レーザー(量子もつれ光源励起レーザー)および1010nmレーザー(波長変換励起レーザー)の周波数安定度測定結果である。縦軸はアラン分散という安定度の指標であり、 $10^{-10}$ というのは光周波数が数百THzであることから、およそ数10kHz程度の安定度に相当する。我々は5MHzの領域内に安定化したいわけなので、十分な安定度を得られたことがわかる。量子通信への実装には、長時間にわたる安定化が必要であるが、それが可能なことも横軸の時間からわかる。

(5)2 光子源と波長変換システムの結合

最後に、開発した量子もつれ光源を長距離光ファイバー

伝送し、そののちに波長変換して量子メモリに吸収保存できるかたちにするところまで進んだことを示す。

狭線幅量子もつれ光源からの 2 光子を 10 k m 長の光ファイバー伝送し、量子中継ノードと見立てた光ファイバー出口で波長変換デバイスに入射し、606 nm の光子に変換した。ここでは波長変換前には偏光が確定している必要があるため、量子もつれ性には着目せず偏光を確定して実験を実施した。

波長変換後の 2 光子時間相関測定結果が図 12 であり、波長変換および 10 k m 伝送後でも明確な 2 光子時間相関を得ることに成功した。

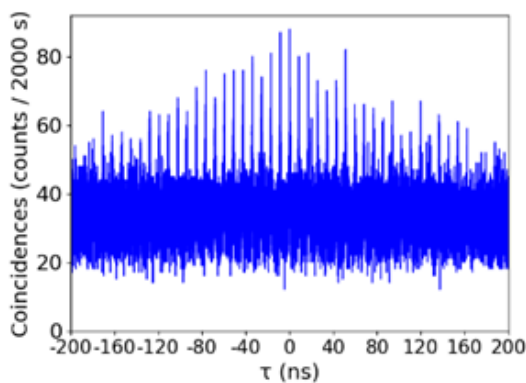


図 12 : 光ファイバー伝送+波長変換後の 2 光子相関。

図 12 において、比較的大きなノイズフロアが生じている。この主な要因は波長変換時にポンプ光由来で生じるノイズと考えている。

### 3. まとめと今後の展望

量子中継器に必要な各要素（量子もつれ光源、量子メモリ、波長変換、周波数安定技術）の開発を進めた。量子もつれ光源は、通信波長・1MHz を下回る線幅・高い忠実度 (>0.9) という、長距離伝送・量子メモリとの高効率結合量子通信に必要な要素を満たす成果である。

量子メモリは、単一光子信号の確定時間メモリ機能の実証まで進み、今後は保存・再生効率の向上、任意時間メモリ機能の実装へと進む計画である。

波長変換は効率 60%以上を得られ、周波数安定化は各要素の安定化に成功した。今後は、波長変換は効率そのものの改善よりもノイズ除去システムの充実に進み、周波数安定化に関しては各要素の相対周波数安定化によるもつれ光源とメモリ周波数との長時間安定結合へと進む。

通信波長 2 光子のメモリ波長への変換及び 2 光子性の確認ができたので、今後は量子メモリとの結合へと進む。

## 業 績

### 【原著論文】

1. Kazuya Niizeki, Daisuke Yoshida, Kou Ito, Ippei Nakamura, Nobuyuki Takei, Kotaro Okamura, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, Tomoyuki Horikiri  
Two-photon comb with wavelength conversion and 20-km distribution for quantum communication  
Communications Physics, 3, 138 (2020)
2. Daisuke Yoshida, Kazuya Niizeki, Shuhei Tamura, Tomoyuki Horikiri  
Entanglement distribution between quantum repeater nodes with an absorptive type memory  
International Journal of Quantum Information, vol18, No.05 2050026(2020)

### 【総説】

1. 堀切智之, 新関和哉, 中村一平  
長距離量子通信実現のための量子中継技術の研究開発  
電子情報通信学会 (IEICE) 通信ソサイエティマガジン「B plus」, 2020 年秋号, No54, 133-141.

### 【書籍】

### 【口頭発表】

1. Kazuya Niizeki, Daisuke Yoshida, Ko Ito, Ippei Nakamura, Nobuyuki Takei, Kotaro Okamura, Ming-Yang Zheng, Xiu-Ping Xie, Tomoyuki Horikiri  
Two-photon Comb with Wavelength Conversion for Long-distance Quantum Communication  
CLEO Pacific Rim Conference 2020, August 2020, Virtual Conference
2. 新関和哉, 吉田大輔, 伊藤洸, 中村一平, 武井宣幸, 岡村幸太郎, Mingyang Zheng, Xiuping Xie, 堀切智之  
長距離量子通信に向けた 2 光子源のスペクトル制御と波長変換  
日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン開催
3. 中村一平, 池田幸平, 洪鋒雷, 堀切智之  
原子周波数コム型量子メモリの高性能化に向けた補助光共振器によるレーザー線幅狭窄化  
日本物理学会 第 76 回年次大会, 2021 年 3 月, オンライン開催
4. 吉田大輔, 都野智暉, 万浪香子, 中村一平, 洪鋒雷, 堀切智之  
希土類イオン添加結晶を用いた微弱光パルスのシング

ルショット分光

第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 2021 年 3 月, オンライン開催

5. 宮下拓士, 近藤健史, 池田幸平, 吉井一倫, 堀切智之, 洪鋒雷  
AFC 量子メモリ結合に向けたレーザーの周波数安定化  
第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 2021 年 3 月, オンライン開催
6. 都野智暉, 万浪香子, 吉田大輔, 郷治侑真, 池田幸平, 洪鋒雷, 中村一平, 堀切智之  
希土類イオン添加結晶を用いた量子メモリの保存時間の向上、及び任意時間読み出しに向けたシーケンス開発  
第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 2021 年 3 月, オンライン開催
7. 万浪香子, 都野智暉, 吉田大輔, 伊藤洸, 新関和哉, 宮下拓士, 近藤健史, 洪鋒雷, 中村一平, 堀切智之  
希土類イオン添加 結晶量子メモリを用いた通信波長光の単一光子レベルフォトンエコー観測  
第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 2021 年 3 月, オンライン開催

### 【特許】

- (1) 国内特許出願 0 件
- (2) 国外特許出願 0 件