

# 研究報告書

## 「量子光学技術を駆使した生物系を含んだ散逸と量子の研究」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研究者: 加藤 真也

### 1. 研究のねらい

本研究のねらいはさがけ研究に先立って実現した光ファイバー共振器を用いた共振器量子電気力学(CQED)系の技術を発展させ、少数の制御性の高い量子系と環境を模した外部変調が協調動作するような実験システムを構築し、それらの間の関係を研究することである。その発想の起点には近年大きな進展を見せている光合成光捕集系を始めとした生体環境内の量子性に関する研究がある。そこでは一般に量子性が見られるとは考えられなかった生物内環境でも、光合成システム内の光エネルギー輸送といった特定の機能に於いて分子振動といった環境を巧みに利用することで単一励起レベルでの高効率輸送が実現していることが調べられてきた。具体的な光合成分子を対象とした研究は世界中で精力的に進められているが、分子配置といった構造や結合強度といったパラメータを系統的に制御した実験は天然の既に完成している分子群を対象に行うことは難しい。そこで実際の分子を用いたトップダウンと呼べる研究とは逆に、個々の量子系を接続しながら実験を行うボトムアップ型のアプローチを試みるというのが本研究のねらいである。

具体的には、単一の CQED 系として動作することが確認された独自システムを拡張し、連結光共振器とそれらに結合する冷却原子からなる装置を開発する。低損失で複数の CQED 系を結合させた実験は世界でも例がないことから、量子光学の実験としても非常に重要である。それに加え、連結された個々のノードに対する操作技術を開発することで、系の特徴とエネルギー伝搬の物理の間の関係を系統的に研究することを目指す。本研究は量子情報処理を目指した研究とは目指す方向性が大きく異なる点も重要である。量子状態の保持や制御の品質が最重要課題である量子情報処理の研究とは異なり、その視点ではむしろ排除されるべき量子系同士の不均一な接続や、外界からの変調、ノイズの混入に着目する点が大きな違いである。それらを制御して導入するという点に於いては既存の量子情報処理実験よりも難易度の高いものになるが、孤立量子系では実現しない機能が周囲の環境を巻き込むことで発現する可能性は、量子機能を考える上で環境を含めたより広い視点に立った知見をもたらすと期待される。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究は複数台の CQED 系を光ファイバーで相互接続し、それぞれの装置に変調や個別の特徴を持たせる。その上で全体としての光エネルギー伝搬の性質が個々の特徴に応じてどのように変化するかを調べる。その目標に向けてまず取り組むべき課題は2台の CQED 系を作製し、それらが低損失に接続できることを示すことである。そこで、高性能な光ファイバー共振器を含む装置2台を新たに設計し、実験に必要なレーザー冷却装置もそれらに合わせて独立に制御できるものを構築した。光共振器として接続するためには、光ファイバー部分を接続するだけでは不十分で、

共振器の偏光モードの整合や共鳴周波数の制御、共振器ミラーの反射率制御等の技術が必要で、それらも全て装置に組み込んだ。その結果、世界で初めて CQED 系を低損失に相互接続し、連結された光共振器の共振器モードと離れた装置内に局在する原子集団の結合の観測に成功した(論文1)。次の課題は、実際の光合成分子系にあるような複雑な接続トポロジーを再現するために、分岐や合流といった接続を可能にするスプリッタ・コンバイナの実現があげられる。そこで、市販のスプリッタを先の2共振器のシステムに追加する実験と、より高性能なスプリッタの自作システムの開発の両方を行った。市販のものを用いた実験では挿入損失の問題はあったが、新しく観測可能になった共振器モードを用いた実験に成功した(論文2)。自作システムに関しても、市販品よりも高性能なスプリッタが作製可能になったことを示した。高性能スプリッタの作製が可能になった点は任意分岐比のスプリッタの実装を可能にし、今後の研究で重要な基盤技術の実現に成功したと評価できる。さらに、連結された共振器の透過性能の外部変調に対する応答についての実験も行った。同種の実験がすでに報告されていたが、そこでは外部変調の帯域に関する考察が不足しており、系の特徴的な応答時間に対する本質的な議論が欠けていた。それに対し CQED 系を応用し原子の状態制御を活用することで、変調の帯域幅を大幅に引き上げることに成功した。その結果、外部変調によって連結共振器系の振る舞いが変化する様子を、理論計算と実験の両面で議論し、それらが整合することを示した。この結果も接続された系の結合の条件や外部操作によって全体の性質が変化する様子を系統的に研究が可能であることを示したという点で重要な成果といえる。

## (2) 詳細

以下では、本研究期間中の主要な成果3点について詳細を説明する。

### 研究テーマ A「2台の CQED 系の低損失接続」

本研究では CQED 系を複数接続したシステムを構築することを目指している。CQED は光共振器とそれと結合する2準位原子からなる量子システムである(図1a)。それらの相互接続であるが、接続部での損失によって確率的に2つのユニット間を光子が伝搬している形の実現例が挙げられる程度で、系全体でコヒーレントに振る舞う低損失接続は実現していなかった。つまり、2台の CQED 系を低損失接続するだけでも技術的には大きな挑戦といえる。そういった状況に対して、本研究では独自の全光ファイバー共振器を用いた CQED 系(図1b)を応用することで低損失相互接続を実現した(論文1)。

このデバイスは CQED 系を構成する光共振器中の光子が常に光ファイバーの導波路中に存在するという特徴を持つ。従って、光ファイバー共振器に連なる光ファイバーをそのまま相互接続することで、原子と相互作用する光子を自由空間に取り出さずにユニットからユニットへと伝搬させ、システムを拡張していくことが可能になる。研究期間

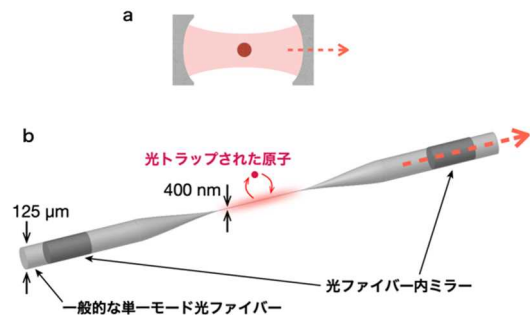


図1 CQED 系の模式図。a. 一般的によく用いられる対向した凹面鏡からなる共振器を用いた CQED 系の模式図。中央の点は共振器と結合する原子を現す。b. 本研究で用いる光ファイバー共振器を用いた CQED 系の模式図。原子は細く加工された部分(直径 400 nm)で共振器中の光と相互作用する。

中の最初のテーマとして、この低損失接続を実際の装置で実現することに取り組んだ。

全光ファイバー共振器を用いた CQED 系は、光共振器に対し、レーザー冷却され、光トラップされたセシウム原子が結合する形で構成される。本研究では現実的な装置規模に抑えるためにレーザー光源から光共振器を内側に含む真空装置までを一貫して最適設計し、一般的なレーザー冷却実験に用いられる装置に比べると格段にコンパクトな装置を開発した(図2a)。また、CQED 系として成立するためには非常に高い共振器性能を要求されるが、それを確実に満たす光ファイバー共振器の作製技術も確立した。こうして独立して動作可能な装置(CQED ユニット)を2台開発し、それらの間を光ファイバーで接続する実験を行った。

原子が結合しない場合、2つの Fabry-Perot 型共振器を低損失な導波路で結合しているので、全体としては3個の共振器が連結していることになる(図2b)。実験でも偏光を含めた条件を適切に設定することで、連結共振器のノーマルモードに対応する3個のピークを持つ透過スペクトルが得られた(図2c 青線)。さらに両端の共振器に原子を結合させた場合のスペクトルを図2c に示す(赤線)。原子がない場合に比べ、中央のピークが分裂し、両脇のピークはそれぞれ周波数軸上で外側にシフトしている様子がわかる。定性的には3個の共振器のノーマルモードが離れた2地点の原子集団とそれぞれ結合し、その相互作用を反映してスペクトルが変化していると言える。連結共振器内の非局在化したモードと離れた2地点の原子の結合は、接続部の光ファイバーの長さを変更することでよりその特徴が明らかになる。図2d にあるように連結共振器のノーマルモードは連結部分の共振器からの寄与の有無で  $c_{\pm}$  と  $d$  の二種類に分けることができる。特に、 $d$  は連結部からの寄与がないために、その共鳴周波数は連結部の詳細に依存しない。従って、例えば連結部の光ファイバーの長さの変更という系全体から見たら大きな変化に対しても変化はしな

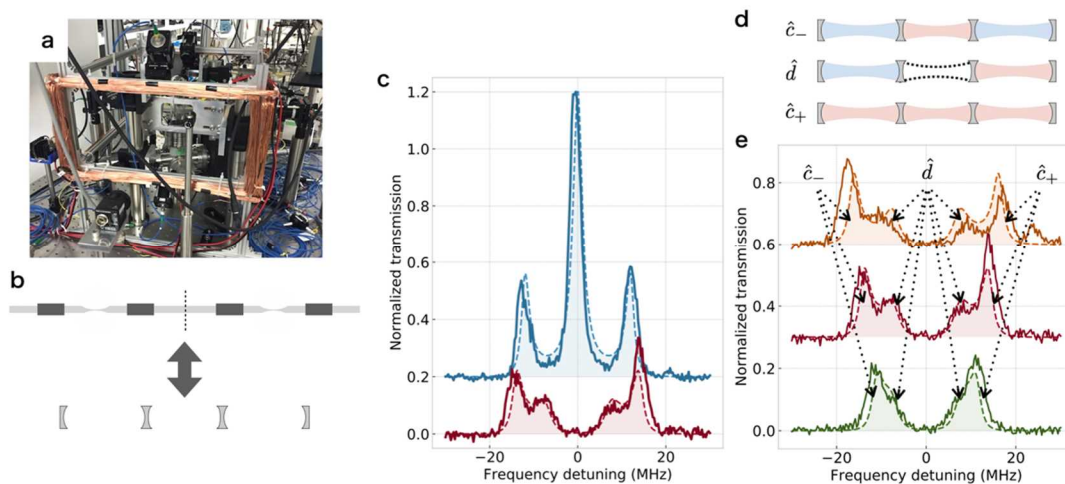


図2 連結 CQED 実験。a 開発した CQED ユニット主要部。同型の装置をもう一台準備して接続実験を行った。b 連結光ファイバー共振器の模式図と対応する凹面鏡を用いた光共振器。c 連結共振器の透過スペクトル。青線が共振器のみ、赤線が両端の共振器に原子を準備したもの。見やすさのために縦軸方向にオフセットを設けている。実線が実験、点線が数値計算結果。以下のグラフでも同様。d 連結共振器のノーマルモードの概念図。 $c_{\pm}$  が全共振器に渡ってモードが存在するのに対して、 $d$  は中央の共振器に振幅がない。e 接続部の長さを変更した場合の原子を含めた透過スペクトル。上から接続部の長さを 0.83 m、1.23 m、2.27 m と変化させた結果。



いはずである。それを実験で実際に確かめた結果が図2e である。ファイバー長さに依存して変化する $c_{\pm}$ に対応するピークに対して $d$ に対応するピークの共鳴周波数は変化しないことが観測できた。

### 研究テーマ B「スプリッタの導入実験と作製装置開発」

複数ユニットの接続を考えた場合に、分岐・合流が可能か否かで実現可能な配置のバリエーションは大きく異なる。実際の光合成分子系でもループ構造を始めとした複雑な結合が内在することが知られており、本研究を進める上でもその実現は重要なポイントになる。その配置の実現に光ファイバーネットワークを利用する本研究では市販の光ファイバースプリッタの活用が可能である。

ただし、多くの市販品は離散的な分岐比と数%程度の挿入損失がある。系統的な実験には任意分岐比の実現は必須であり、挿入損失のような制御できない損失は実験の幅を制限する。そこで、市販品利用で可能な実験と、より高度な実験に向けて損失が低く任意の分岐比を実現可能なスプリッタの作製装置の開発の両方を行った。

市販品を用いた実験は、先の2ユニットの結合実験の発展でユニット間にスプリッタを挿入した装置を作製した(図3a)。この場合、先の実験ではアクセスできなかった中央部分の共振器に光の注入や、そこからの光の測定が可能になる。物理的な意味では、先の2ユニットの実験では観測できなかった、原子と光共振器全体が構成するノーマルモードの一つ(図 3b,  $|cDM\rangle$ )を直接励起し、分光観測することに成功した(図 3c、論文2)。

市販品を用いた実験でもスプリッタを入れることで初めて可能になる実験の結果を得ることができたが、今後の拡張性を考えた場合には任意の分岐比やより一層の低損失化は不可欠である。光ファイバーを用いたスプリッタの作製手法も様々あるが、低損失化を考え本研究で培ってきたファイバ加工技術を応用する手法をとった。その結果従来のファイバー加工装置を発展させることで、2x2のファイバースプリッタを挿入損失が 1%以下で作製することに成功した(図 3d)。この装置では作る際の設定で分岐比も任意に変更が可能である点も重要な成果といえる。また、2x2のスプリッタを作製する場合には2本のファイバーとなるが、装置構成の工夫で、複数のファイバーの同時加工も可能な装置を実現した。本研究で用いる加工されたファイバーは非常に繊細で微粒子の付着によって容易に性能が劣化する。1

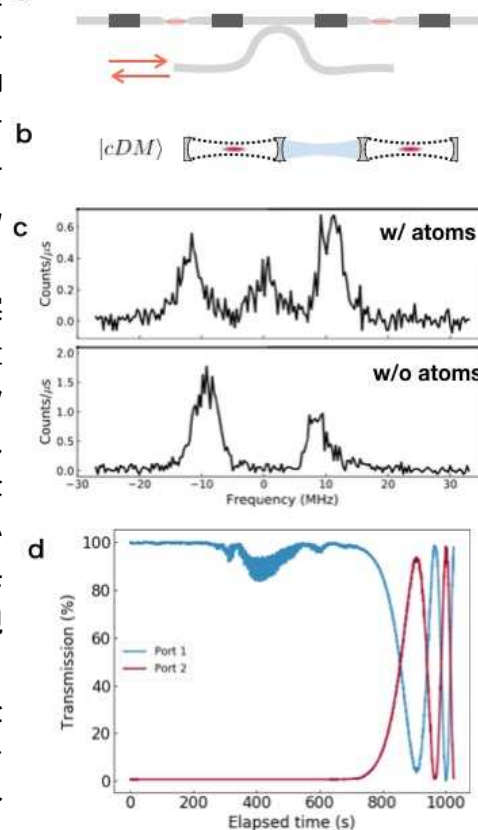


図3 スプリッタに関連した実験。a スプリッタを追加した連結共振器の模式図。b 観測した連結 CQED 系のノーマルモードの模式図。c スプリッタを用いた反射分光結果。上段が共振器に結合する原子あり、下段がない場合の結果。原子と結合した時のみ、中央に $|cDM\rangle$ に対応するピークが観測される。d スプリッタ作製時の透過パワーの推移。加工時間に応じて分岐比が変化し、加工終了のタイミングを制御することで任意分岐比のスプリッタを作製できる。

度に1本しか加工できなかったこれまでの加工後すぐに真空環境に導入するために1台の真空槽に1本のファイバーを入れることしかできなかった。しかし、この新しい装置は複数本同時加工が可能のため、複数本のファイバーを同時に同じ真空槽に導入可能となった。これは多数ユニットを用いた実験を実現させる上で重要な集積化の基盤技術として着実な成果といえる。

### 研究テーマ C「連結共振器系の変調に対する透過率の変化」

本研究では CQED ユニットの接続だけでなく、外部からの変調を加えることによる変化に興味を持っている。そこで連結システムの最小構成単位である2個の光共振器が連結したシステムを用いて、外部変調による系全体での光透過率の変化を測定した。本実験のポイントは2つある。一つはCQED系の原子のエネルギー状態を光で高速に制御することで、従来行われてきたような連結光共振器システムにはない高速な変調が可能になった点である。光合成分子系でも環境系との結合レートが各分子間の結合やエネルギーギャップと同程度であることが効率的な駆動に重要であることが指摘されている。そういった観点でも変調帯域が系の特徴的な時間スケール(連結共振器の間の光子のホッピングレートや各共振器での光子の寿命)に匹敵することは本質的に重要である。さらに、光共振器を構成するミラーの反射率を制御可能な本実験では、連結共振器の結合の具合を変化させることが可能な点も大切である。結合によって系全体に渡る共振器モードが有意な場合と、局所的なモードの確率的な結合とみなすべき領域の両方を統一的に実験できることは他の系にはない利点である(図4a)。

まず、変調のない場合で共振器間の結合の強さの影響を先の実験のような分光実験を通じて確認した(図4b,c)。結合が十分弱い(中央のミラーの反射率が高い)場合にはそれぞれの共振器が確率的に光子を受け渡していると見ることができて、観測されるスペクトルは単一のピークを持つ(図4b、青線)。それに対し、結合が強く(中央のミラーの反射率が低い)、系全体にまたがるノーマルモードが有意な場合、スペクトルは2つのノーマルモードを反映して分裂して観測される(図4c、青線)。それらの条件に加え原子を結合させた場合は相互作用によってスペクトル形状が変化する(図4b, c、赤線)。

連結共振器としては、原子が結合することによって特定の波長に対してその透過率は著しく下がる。図4b, cの周波数原点付近での透過率が青線から赤線へと変化していることがそれに対応する。そういった条件で、原子のエネルギー状態を高速に変化させてその影響による透過率の変化を測定した(図 d, e)。共振器同士の結合が十分弱い場合には、原子のいない共振器と原子と結合して変調をうける共振器が確率的に結合しているとみなせる(図4a 上段)。従って変調による変化は単一の共振器のみがそれを受けている場合と同じ応答を示す。それは実験でも数値計算の結果でも読み取れ、独立に行った単一の共振器の場合と同じ変調周波数(図4d、緑破線)で透過率増強のピークが観測される。それに対して、共振器間の結合が強く、全体に渡るノーマルモードが有意な場合は応答に変化が生じる(図4e)。実験、数値計算ともにみられるようにピークの位置が高周波側にシフトする。これは、局所的な変調に対する変化が系全体に広がる共振器モードを通じて全体の透過率の変化に影響を及ぼしていると解釈できる。今回の実験は個別ユニットの特性だけではなく、連結の詳細に依存して全体の振る舞いに変化する様子を捉えたという点で重要だろう。この結果はより複雑な構造を持つ実際の光合成光捕集系の物理を、連結光共振器で考える研究の基礎をなす成果と言える。以上の内容については現在論文を準備中である。

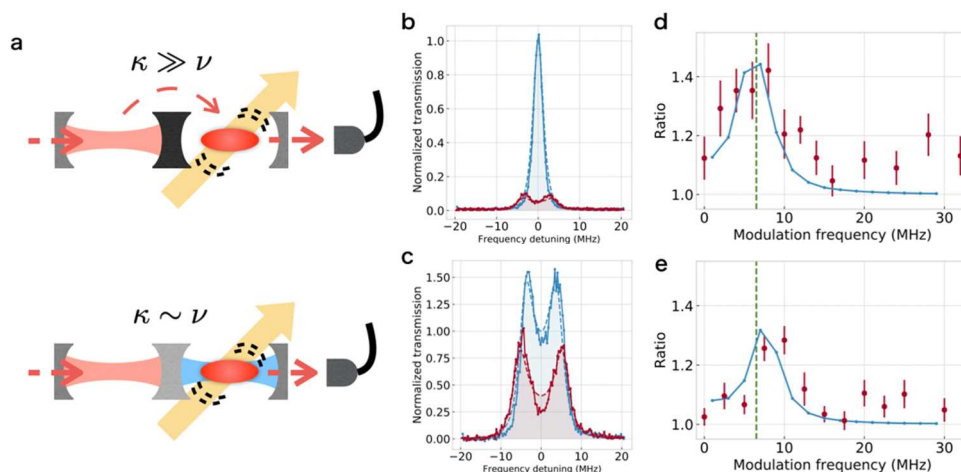


図4 連結共振器系の外部変調に対する変化。**a** 実験の模式図。共振器同士の結合レート( $\nu$ )が共振器中の光子の寿命( $\kappa$ )に対して小さい場合(上段)と同程度の場合(下段)。本実験では片方の共振器にのみ原子が存在し、外部からの光でそのエネルギー状態が変調される。**b,c** 原子が結合していない場合(青線)と、している場合(赤線)の透過スペクトル。**d,e** 原子への変調の周波数に対する透過率の変化。変化の基準はエネルギー変調が時間的に変化しない場合を基準としている。共振器の条件は **b,d** が  $\kappa \gg \nu$  に対応し、**c,e** が  $\kappa \sim \nu$  に対応する。

### 3. 今後の展開

2ユニットの直接接続やスプリッタの導入といった複雑な構造を実現する上で必須の技術はこの研究期間に確立することができた。今後の展開としては、これらの技術を統合し、例えばループ構造のような特徴的な配置をもつ結合システムの実験に進む方向を考えている。また、それらと並行して、それぞれのユニットで単一の原子を選択的に結合させる実験も今後の飛躍には重要であると考えている。これまでの実験は基本的に集団原子が光共振器と結合する形をとってきた。装置の性能としては単一の原子でもいわゆる強結合領域で実験できることがわかっている。実際に初期の実験においては単一の原子が結合した状態を観測しているが、確率的にそれを実現していたためごくまれに単一の原子が結合する結果を事後選択する形で利用していた。この手法だとユニット数が増えれば成功確率が指数関数的に減衰するために、多数のユニットで行うのは実験時間的に現実的でなくなる。そこで、光ピンセットといった技術を併用し、選択的な単一原子の準備を行う実験にもとりかかっている。単一の原子が準備できれば、系内に単一の光子を生成することが可能で、これまでの実験のような微弱コヒーレント光ではなく、その非古典性を議論できる単一光子の伝搬について研究することができるようになる。

これまでの変調は強いコヒーレント光による古典ノイズと呼べるものを用いてきた。ところが、実際の光合成分子を用いた最近の結果で、光エネルギー伝搬の量子性については量子化された分子振動と光励起された電子の結合がその本質であるという指摘がなされてきた。つまり、古典的な環境と考えていた分子振動もまた量子的な取り扱いをすることが現象の理解に重要ということである。そういったより複雑な実験環境に関しても、光ファイバー共振器の性質を応用して再現で



きるのではないかと考えている。具体的には変調用として導入している光についても光共振器を構成し、変調用の光の量子ゆらぎが系の振る舞いに影響を及ぼすような構成を考えている。こういった多色の光共振器も本研究で使っている光ファイバー共振器のシステムでは作製が十分現実的で、装置構成について検討を始めている。

それらに加え、2～3ユニットを超える数のユニットを現実的に作製するためには集積化を含めた工夫も必要になる。スプリッタ作製装置の項でも触れたが、一番重要な光ファイバ加工の部分ではその方向性のめどがたつた。今後は複数本の光ファイバーを収納する真空槽の設計と、多数の光共振器を安定的に結合させる工夫が必要である。それらの開発を着実に進め、当初目標としていた7ユニットの結合に向けて装置全体のさらなる成熟を図る予定である。

#### 4. 自己評価

本研究期間中には、独自技術を応用することで世界で初めて CQED 系を低損失に接続することに成功した。また、今後の展開を踏まえ低損失・任意分岐比スプリッタ作製技術、それと同時に集積化を可能にする複数ファイバ加工技術を確立した。さらに、本研究の目的である連結した量子システムと外部変調の関係を研究するコンセプトの元、2ユニット系での実験も行い、数値計算と比較することで本実験システムの特徴を活かした測定にも成功した。当初計画ではこれらの成果の上にユニット数を増加させ、実際によく調べられている光合成系の研究と比較できるような実験を行う予定であったが、期間中では少なくともそれに向けた着実な技術基盤の整備ができたと評価している。また、研究箇所の移動に伴い、期間途中で何も無い実験室からの再スタートとなったが、さきがけのサポートのおかげで円滑な移行ができた点は非常に良かったと感じている。

世界に目を向けてみると、超電導量子回路やイオントラップという異なる量子の実験系で、結合する量子系と外部変調による物理を光合成光捕集系の物理とからめた議論をする論文が海外の有力グループから昨年、今年と立て続けに出版された。そういった状況を考えると研究開始時にたてた本研究のコンセプトは世界的に見てもさきがけていたと呼べるが、他の物理系での実験に先行されている側面も事実である。単一原子の制御技術を開発し、より高度な実験を行って世界にアピールしていく必要があるだろう。また、光ファイバーを用いた本研究は組み換え可能である点や結合の制御といった他の実験系にはない利点も存在する。さらに同じ原子に複数の光が強く結合する新しい CQED 系は先行する実験の古典的な環境ノイズの再現とは質的に異なる実験を可能にする。本さきがけで培った基盤技術を応用することで、そういった独自デバイスの利点を生かした研究でさらなる展開が期待できると考えている。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. Donald H. White, Shinya Kato, Nikolett Nemet, Scott Parkins, and Takao Aoki, "Cavity Dark Mode of Distant Coupled Atom-Cavity Systems," *Physical Review Letters* **122**, 253603 (2019).
2. Shinya Kato, Nikolett Nemet, Kohei Senga, Shota Mizukami, Xinhe Huang, Scott Parkins,

and Takao Aoki, “Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics,” Nature Communications **10**, 1160 (2019).

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件 (公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

[国際学会発表]

1. Shinya Kato and Takao Aoki, “Transmission enhancement in a coupled-cavities with fast modulation through atom-cavity interaction,” Gordon Research Conference: Quantum Control of Light and Matter, Newport, US (2019.8).
2. Donald H. White, Shinya Kato, Nikolett Nemet, Scott Parkins and Takao Aoki, “Observation of nonlocal atomic saturation in a coupled-cavities quantum electrodynamics system,” International Conference on Laser Spectroscopy, Queenstown New Zealand (2019.7).
3. Shinya Kato, Nikolett Nemet, Kohei Senga, Shota Mizukami, Xinhe Huang, Scott Parkins and Takao Aoki, “Observation of dressed states in coupled-cavities quantum electrodynamics,” Optical Nanofiber Applications: From Quantum to Bio Technologies, Okinawa, Japan (2019.6).
4. Shinya Kato, Nikolett Nemet, Kohei Senga, Shota Mizukami, Xinhe Huang, Scott Parkins, and Takao Aoki, “Coupled-cavities quantum electrodynamics with a cavity array in a single optical fiber,” The 26<sup>th</sup> International Conference on Atomic Physics, Barcelona, Spain (2018.7).

[国内会議]

1. (招待講演) 加藤真也、「結合共振器量子電気力学系とその展開」、応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会、長野県、2018年12月。
2. 加藤真也、千賀功平、水上翔太、黄心和、青木隆朗、Nikolett Nemet、Scott Parkins、「ナノ光ファイバー共振器を用いた結合共振器量子電気力学」、日本物理学会第73回年次大会、千葉県、2018年3月。

[プレスリリース]

- 「二つの共振器量子電気力学系を光ファイバーで低損失・高効率に結合成功」2019年3月11日。
  - 日経新聞電子版「早大と JST など、二つの共振器量子電気力学系を光ファイバーで低損失・高効率に結合成功」(2019年3月11日)
  - EE Times Japan「複数の系を高効率に結合可能: 2 つの共振器量子電気力学系を光ファイバーで結合」(2019年3月14日)



