

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的  
量子技術基盤の創出」  
研究課題「スケーラブルな光学的量子計算に向けた  
超低損失ナノファイバー共振器 QED 系の開発」

## 研究終了報告書

研究期間 2017年 10月～2023年 3月

研究代表者: 青木 隆朗  
(早稲田大学理工学術院、教授)

## §1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

光学的量子計算において重要な要素技術は、共振器量子電気力学 (QED) 系によって決定論的に動作するものが実現可能である。実際の実装においては、光損失やエラーに対して誤り訂正を施し、かつ、スケーラブルな量子計算 (誤り耐性量子計算) が求められるが、共振器 QED に基づく光学的量子計算の実装に関するスケーラビリティの検討はこれまであまりなされておらず、また、スケーラブルな量子計算を可能にする共振器 QED 系も開発されていない。

本研究では、早稲田大学グループがスケーラブルな光学的量子計算の実装を可能にする超低損失ナノファイバー共振器の開発、およびナノファイバー共振器 QED 系による光学的量子計算の要素技術実証実験を推進し、また明治大学グループがこのアプローチにおける各要素技術、および、それらを組み合わせて構築される誤り耐性量子計算のアーキテクチャ全体の最適化に関して理論的研究を推進した。

特に、早稲田大学グループでは、超低損失ナノファイバー共振器の開発に関して、テーパー加工中の共振器フィネスおよびナノファイバー径を同時にリアルタイム測定する技術を確立するとともに、損失 0.03% 以下の超低損失テーパー部の作製、内部損失 0.026% 以下の超低損失 FBG の作製に成功した。さらに、超低損失ナノファイバー共振器作製技術の副産物として、ファイバー非線形光学現象の高効率化が可能となり、高フィネスファイバー共振器においてサブ mW 閾値での誘導ブリルアン散乱発振を観測した。この短共振器長・低閾値ブリルアンレーザーの実現は、小型で高効率な全ファイバー型の超狭線幅レーザー光源の開発に繋がる。

また、同じく早稲田大学グループでは、光学的量子計算の要素技術実証実験を着実に進め、結合共振器 QED 系の構築に世界で初めて成功した。さらに、ナノファイバー共振器 QED 系の優位性に基づくスケーラブルな分散型量子計算方式を発明し PCT 出願するとともに、光ピンセットによる個別原子トラップ技術を導入することで、本方式の基盤技術を開発した。本方式は、多数の量子ビット程度を収容したナノファイバー共振器 QED 系を量子計算ユニットとして用い、これを複数接続した量子ネットワークによって極めて大規模な分散型量子計算の実現が期待される技術であり、超伝導、イオントラップ、中性原子 (Rydberg 原子) 等、先行する他の物理系に基づく量子計算の実装に対して、大規模化・分散化において大きな優位性を持つ。

さらに、明治大学グループでは、単一光子源および量子ゲートの主要な方式に対して、共振器 QED 系の制御パラメータに関して最適化を行った。各要素技術の性能最大化と同時に高速化を両立させるため、外部結合効率やパルス長をはじめとする共通の制御パラメータに関する最適化を行ったことで、複数の要素技術を組み合わせた実装方式の検討が統一的に可能となった。また、誤り訂正符号を含めたアーキテクチャ設計に向けて、共振器 QED 系による最適な符号の研究を進めた。

### (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. S. Kato, N. Német, K. Senga, S. Mizukami, X. Huang, S. Parkins, and T. Aoki, “Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics”, Nature Communications 10, 1160 (2019).

概要:

結合共振器量子電気力学系を初めて実現した。これは、小規模な量子計算機を光子でつなぐことで大規模な量子計算を可能にする分散型量子計算機の実現に向けた重要な成果である。特に、光子が他の量子系と比較して格段に高いコヒーレンスを持ち、室温においても全く量子性を失わず、光ファイバーによって長距離伝送可能であるという特長に基づいた光学的量子計算の有用性を示すものである。

2. D. White, S. Kato, N. Német, K. Senga, S. Parkins, and T. Aoki, “Cavity Dark Mode of Distant Coupled Atom-Cavity Systems”, *Phys. Rev. Lett.* 122, 253603 (2019).

概要:

結合共振器 QED 系における特異な固有モードである、共振器暗モードの観測に初めて成功した。共振器暗モードは共振器内にトラップされた原子と接続チャンネル光子の重ね合わせ状態であり、共振器光子の寄与がない。このモードにおいては、接続チャンネルに存在する光子と、空間的に離れた原子との間でエネルギーの交換が起こる。

3. H. Goto, S. Mizukami, Y. Tokunaga, and T. Aoki, “Figure of merit for single-photon generation based on cavity quantum electrodynamics”, *Phys. Rev. A* 99, 053843 (2019).

概要:

共振器 QED に基づいた単一光子の発生においては、光子の内部生成効率と外部取出し効率がトレードオフ関係となる。本研究では、共振器の内部損失を明示的に考慮し外部結合レートを設定することで、このトレードオフ関係の最適解を導けることを明らかにした。またその結果、内部共同パラメータという、共振器の全損失ではなく内部損失を用いた共同パラメータが共振器 QED を用いた光子生成方式の性能指数となることが明らかになった。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 青木隆朗、早稲田大学、「量子計算ユニット、単一光子源、および量子計算装置」、PCT/JP2021/25783 (2021)

概要:

近年、さまざまな物理系を対象に大規模な量子計算の実現を目指した研究開発が進められているが、いずれの方式も量子ビット数の大幅な拡大に向けて技術的な課題を抱えている。本発明は、ナノファイバー共振器 QED 系による新規な量子計算の実装方法である。すなわち、単一のユニットで多数の量子ビットが実装可能であり、さらにユニットを分散接続することで、既存方式と比較して圧倒的に大規模な量子計算を可能にする画期的な手法である。

2. 青木隆朗、早稲田大学、「量子演算ユニット、量子演算器」、特願 2022-079702 (2022)

概要:

長距離量子通信の実現には量子中継技術が必須である。ここで、量子中継における量子ノードに求められる機能は、(1)量子ノードにおける局所的な量子メモリ機能・量子ゲート機能、(2)長距離伝送のための通信波長帯における量子インターフェース機能の 2 つである。現在、さまざまな量子中継技術が提案・開発されているが、上記 2 つの機能を両立する技術はまだない。本発明は、ナノファイバー共振器 QED 系により上記 2 つの機能を全ファイバーで両立する技術であり、高効率な長距離量子通信を単一のプラットフォームで実現する画期的な技術である。

3. S. Kato and T. Aoki, “Single-frequency fiber Fabry–Perot Brillouin laser”, *Opt. Lett.* 47, 5000 (2022).

概要:

本プロジェクトでは、スケラブルな光学的量子計算のために超低損失ナノファイバー共振器を作製し、共振器 QED に応用したが、超低損失ナノファイバー共振器技術の

副産物として、ファイバー非線形光学現象の高効率化が可能になる。その実証として、作製した高フィネスファイバー共振器においてサブ mW 閾値での誘導ブリルアン散乱発振を観測した。この短共振器長・低閾値ブリルアンレーザーの実現は、小型で高効率な全ファイバー型の超狭線幅レーザー光源の開発に繋がる。

<代表的な論文>

1. S. Kato, N. Német, K. Senga, S. Mizukami, X. Huang, S. Parkins, and T. Aoki, “Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics”, *Nature Communications* 10, 1160 (2019).

概要:

結合共振器量子電気力学系を初めて実現した。これは、小規模な量子計算機を光子でつなぐことで大規模な量子計算を可能にする分散型量子計算機の実現に向けた重要な成果である。特に、光子が他の量子系と比較して格段に高いコヒーレンスを持ち、室温においても全く量子性を失わず、光ファイバーによって長距離伝送可能であるという特長に基づいた光学的量子計算の有用性を示すものである。

2. H. Goto, S. Mizukami, Y. Tokunaga, and T. Aoki, “Figure of merit for single-photon generation based on cavity quantum electrodynamics”, *Phys. Rev. A* 99, 053843 (2019).

概要:

共振器 QED に基づいた単一光子の発生においては、光子の内部生成効率と外部取出し効率がトレードオフ関係となる。本研究では、共振器の内部損失を明示的に考慮し外部結合レートを設定することで、このトレードオフ関係の最適解を導けることを明らかにした。またその結果、内部共同パラメータという、共振器の全損失ではなく内部損失を用いた共同パラメータが共振器 QED を用いた光子生成方式の性能指数となることが明らかになった。

3. R. Asaoka, Y. Tokunaga, R. Kanamoto, H. Goto, and T. Aoki, “Requirements for fault-tolerant quantum computation with cavity-QED-based atom-atom gates mediated by a photon with a finite pulse length”, *Phys. Rev. A* 104, 043702 (2021).

概要:

共振器 QED に基づく原子量子ビット間 2 量子ビットゲートに関して、有限パルス長の光子に対する誤り耐性条件を明らかにした。特に、光子損失および光子パルス歪みによるインフィデリティを同時に考慮することで、従来手法と比較して誤り耐性条件を緩和させた。

## §2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 早稲田大学グループ

研究代表者: 青木 隆朗(早稲田大学理工学術院 教授)

研究項目

[1] 超低損失ナノファイバー共振器の開発

[2] 光学的量子計算の要素技術実証

#### ② 明治大学グループ

主たる共同研究者: 金本 理奈(明治大学理工学部 教授)

研究項目

[3] 最適化に関する理論

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

ナノファイバー共振器 QED 系と量子波長変換器を用いた量子中継の実現に向け、井元チームとの共同研究を進めた。光領域の共振器 QED 系と相補的な物理系である超伝導回路 QED 系に関する研究を推進している仙場チームとの連携を進めた。結合共振器 QED 系の研究に関して、JST さきがけ研究者(「量子の状態制御と機能化」領域)の加藤真也氏との密接な共同研究を実施した。共振器 QED の理論に関して、ニュージーランド・オークランド大学の Scott Parkins グループとの密接な共同研究を実施した。本研究で得られた超低損失 FBG を用いて、光ファイバー地震計の開発に関するニュージーランド・IESE 社との共同研究を進めた。本研究で得られた超低損失ナノファイバー共振器を用いて、衛星-地上間量子通信のための量子もつれ光源の開発に関する JAXA との共同研究を進めた。本研究で創出されたナノファイバー共振器 QED 技術の社会実装を目的として NanoQT 社を設立し、同社との密接な共同研究を進めた。