



ムーンショット目標 6

2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

実施状況報告書

2021年度版

2021年4月～2022年3月

誤り耐性型大規模汎用光量子

コンピュータの研究開発

古澤 明

東京大学 大学院工学系研究科



研究開発プロジェクト概要

独自に開発した量子ルックアップテーブル法を発展させ、大規模な誤り耐性のある量子演算を実現します。それにより、2050年には、常温動作を特徴とする大規模な光量子コンピュータの実現を目指します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/64_furusawa.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
古澤明	東京大学 大学院工学系研究科	教授
高橋浩之	東京大学 大学院工学系研究科	教授
橋本俊和	日本電信電話株式会社 NTT 先端集積デバイス研究所	主幹研究員
古澤明	理化学研究所 量子コンピュータ研究センター	チームリーダー

1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

本プロジェクトでは、誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータ実現を目指している。これまで開発してきた時間領域多重汎用光量子コンピューティングの手法に基づき、それをさらに発展させる方針をとっている。具体的には、誤り耐性実現のための論理的量子ビットを生成し、汎用量子計算に必要な全ての量子ゲート(量子演算)を誤り耐性型にする。これらのために令和3年度には、本プロジェクトに導入される実験設備の起動と性能最適化へ向けて、部分ごとに動作確認実験をこなした。それまでの研究装置に倣いながら、光導波路や光ファイバーを用いて赤外光波長領域でセットアップを新規に念入りに組み上げ、アプローチの確認・問題点の抽出を行っている。時間領域多重を行うのに十分な帯域を有し、誤り耐性閾値を超えるのに十分なレベルのスクイーズド光、安定して光量子計算を行うための光量子コンピューターモジュールの開発に成功し、論理的量子ビット等を生成する任意量子状態発生器のための超伝導光子数識別器を研究推進した。また理論研究も並行し、さらに光量子コンピュータを早く社会に実装すべく課題を新たに設定した。

令和3年度においては、1年半の経験を通じて、研究開発プロジェクト内の良い連携の成果として前倒しで3年目のマイルストーンに挙げた目標数値に近づいた。さらに光量子情報から電気系信号への信号処理に5Gや次世代向けの技術を利用することで、光量子コンピュータを早期に実現すると期待できるようになった。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1:(誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発)

研究開発課題1:(時間領域多重汎用光量子コンピューティングに関する研究開発)

当該年度実施内容:

これまで光学定盤上に光学部品を配置して行ってきた実験を光導波路回路に置き換えて量子テレポーテーションを行い、そのフィデリティが誤り耐性閾値を超えるようにする。共振器構造を持たない導波路光パラメトリック増幅器を開発し、広帯域スクイーズド光生成を行う。またスクイーズド光とビームスプリッターにより量子もつれを生成し、量子もつれの一部を超伝導光子数識別器を用い所定の光子数を検出することで、**Gottesman-Kitaev-Preskill (GKP)**量子ビット生成に向けた実験を試行している。

高いスクイージングレベルを得るためのノイズ対策としてノイズの軽減も必要であるが、まず光強度劣化を極力減らす新技術を光ファイバー接続部で生じる偏光の誤差を制御する新技術開発をした。これを研究開発課題3の光ファイバー系に適用するとスクイーズド光生成の安定度を飛躍的に高めプロジェクト目標達成を大幅に前倒しできたと考えられる。

誤り耐性型万能光量子計算機の実現に向けた連続波非ガウス型状態生成、特に**GKP**量子ビットについて研究している。光の連続量の自由度を用いて論理量子ビットをエンコードする**GKP**量子ビットは、誤り訂正可能な量子コンピュータを実現する手法として有力な候補である。**GKP**量子ビットに対するユニバーサルな量子計算のためには非クリフォード操作の実現が課題である。**GKP**量子ビットに対する非クリフォードゲートの具体的な実験系を考案し、スクイージングレベルと論

理的フィデリティの関係を示し、非線形フォワードフォワードの技術が応用可能であることを発見した。

課題推進者:古澤 明(国立大学法人 東京大学)

研究開発課題2:(超伝導光子数識別器に関する研究開発)

当該年度実施内容:

① 超伝導光子数識別器の素子構造の研究

本課題においては超伝導光子数識別器を超伝導転移端センサ(TEs)によって実現することを目標としている。光子数識別器の開発にあたっては、超伝導転移端センサ型の検出器は入射光子数に比例する信号出力を与えるため、光子数識別能を有しており、同時に高い量子効率を達しうる。現状では TEs のデバイスサイズは $10\ \mu\text{m}$ 角で、動作帯域は $1\ \text{MHz}$ 程度であるが、応答速度の改善が達成されれば理想的な検出器となることが期待される。当該年度において、熱容量の小さな TEs を実現する新たな概念を考案した。具体的には、信号読み出しの共通化を図り、TEs 自体の熱容量を極めて小さくすることができるような検出器を要素分割する概念を考案した。本概念によれば、分割数を N とした場合、熱容量を $1/N$ とすることができるため、温度上昇としての信号は N 倍になる。一方、個々の要素における雑音が同様であるとすると、全体では雑音が \sqrt{N} 倍になるため、信号対雑音比では $N/\sqrt{N} = \sqrt{N}$ 倍の値が得られる。

② 超伝導光子数識別器の製作と評価の実施

当初計画においては、当該年度は $5\ \mu\text{m}$ 角程度まで小型化することで熱容量を $1/4$ とすることとしていた。新たに考案した(1)の素子構造の概念を適用し、有感面積を維持したまま実現するための方法として、並列ストリップを用いた構造を提案し、 $12\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ の大きさのデバイスを 5 分割し、 $10\ \mu\text{m}$ 角デバイスの約 $1/4$ の大きさの熱容量をもつデバイスの製作を行った。製作プロセスとしては、従来型のフォトリソグラフィによる方法で実施するとともに、FIB (Focused Ion Beam)を用いたデバイス製作の検討についても実施した。これにより従来の $10\ \mu\text{m}$ デバイスに比較して熱容量が $1/4$ となるため、動作速度が 4 倍程度高速化すると考えられる。実際に本検出器について製作を行い、デバイスについて評価実験を行ったところ、従来の素子の立ち上がり時間 $650\ \text{nsec}$ に対して、 $150\ \text{nsec}$ と約 $1/4.3$ の値に短縮することができた。

課題推進者:高橋 浩之(国立大学法人 東京大学)

研究開発課題3:(導波路光パラメトリック増幅器および光量子導波路回路に関する研究開発)

当該年度実施内容:

令和3年度は、令和2年度の基本設計をもとに、導波路光パラメトリック増幅器および光導波路回路の試作および評価を行い課題抽出することを目標に下記2点について検討を進めた。

① 導波路光パラメトリック増幅器による広帯域・高レベルスキューズド光源の検討

昨年度は、PPLN 導波路光パラメトリック増幅器について、スキューズドレベルと帯域両面について評価し、基本設計と予備検討を完了した。本年度は、基本設計を元により低損失化が期待できる NTT の有する PPLN 導波路作製手法をベースに、作製条件の見直し・改良により広帯域・高スキューズドレベル光源実現のための検討を行った。

まず、昨年度実施したドライエッチング加工による導波路作製手法から適用手法を抜本的に見直した。ドライエッチング加工された PPLN 導波路の問題点として加工時に現れる導波路壁面の凹凸が光損失を大きくしてしまうことが判明した。そこで、導波路壁面をより平滑に加工できる機械研磨加工法を用いた導波路作成手法に切り替えた。本加工法の適用により、従来手法では 30 %程度あった導波路損失が 10 %程度となり、従来に比べ損失を 1/3 に低減することに成功した。次に、作製した PPLN 導波路を用いてファイバ入出力が可能なモジュール実装を行った。ファイバで励起光を入力しモジュール内部で励起光と PPLN 導波路により生成されたスキューズド光を分離してファイバ出力する構造になっている。新規 PPLN 導波路に対して光学設計を最適化することで、低損失な PPLN 導波路光パラメトリック増幅モジュールを実現した。

作製した PPLN 導波路光パラメトリック増幅モジュールに対してスキューズドレベルの評価を行った。導波路の改善によりファイバクロード系という実機環境により近い形態であっても 6.3 dB という高いスキューズドレベルを実現することに成功した。この結果は、モジュール化のロスや受光システムのロスを加味すると PPLN 導波路としては 10.3 dB のスキューズドレベルを達成しているの見積もることができる。さらに、全光での検出手法により、作製した PPLN 導波路モジュールのスキューズド帯域を評価した。6 テラヘルツの側帯波成分（波長 1595 nm）においても 6 dB 以上のスキューズドレベルが観測された。さらに広帯域な側帯波成分においてもスキューズドが観測できており、本手法により 10 テラヘルツの帯域を有する超広帯域スキューズド光が生成可能な目途を得た。

以上のとおり、PPLN 導波路の作成手法の見直しにより低損失化を図り、ファイバ実装を行い、導波路光パラメトリック増幅モジュールを試作した。スキューズドレベルと帯域両面について評価し、当該年度の目標である帯域 10 テラヘルツおよび 8 dB のスキューズド光の生成を目指した PPLN の最適化検討を完了した。来期は、本技術を用いてさらなる広帯域化とスキューズドレベルの向上を目指す。

② 石英系平面光波回路による量子テレポーテーションに向けた回路設計と評価の検討

石英系平面光波回路により量子テレポーテーションを実現するため、光回路の設計・作製および評価を実施した。作製した光回路はユニバーサルスキューズド回

路で、ユニバーサルスクイーズ回路を2段組み合わせることで量子テレポーテーションが可能となることから、ユニバーサルスクイーズ回路について詳細に検討して、課題を抽出し、量子テレポーテーション回路設計に反映させることを本年度の目標とした。

ユニバーサルスクイーズ回路は射影測定と位相シフトのフィードフォワード操作を組み合わせた回路で、出力光とエンタングルした信号について射影測定を行い、抑制したい量子状態の広がり方向についての情報を取り出して、出力光の位相をシフトさせることで量子状態の広がりを抑制する光回路である。また、ユニバーサルスクイーズ動作を行うために制御系を構築した。

上記回路構成をもとに実際に作製し、ユニバーサルスクイーズ動作の検証を行った。構築した制御回路については良好に動作し、ユニバーサルスクイーズ動作することを確認した。特性については課題が残った。理論上は可変カプラを変化させるとスクイーズレベルが 0.5dB から 6dB に変化することが期待される。実際は回路の損失が 2.3dB と大きかったため十分なスクイーズ特性が得られなかった。分析によりファイバ接続部で 1dB、光回路の設計パラメータが十分最適化されなかったため 1dB の過剰損失が発生していることを確認した。来期はこれらの課題を解決して、ユニバーサルスクイーズ回路と量子テレポーテーション回路の作製に反映し、光の評価等をすすめることとし、予定どおり、ユニバーサルスクイーズ回路について詳細に検討して、課題の抽出を完了した。

課題推進者:橋本 俊和(日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所)

研究開発課題4:(光量子コンピュータの社会実装に関する研究開発)

当該年度実施内容:

課題推進者 1 のグループで研究されてきた時間領域多重の技術を利用することで、他の方法では現状不可能な大規模クラスター状態を生成する。これまで実装されたクラスター状態よりも効率的に計算リソースとして使用可能な構造のクラスター状態が提案されているので、それを応用した手法で生成する。実装に際しては、後々のクラウド公開を見据えてメンテナンスフリーで動作させるため、ファイバオプティクスや光導波路のような人力による光のアライメントが不要な系を用いて、高精度な制御を行う光学系を構成する。こうして本年度はメンテナンスフリーな実験系を設置することを目指している。

本年度は、ハードウェア構築のための実験室環境を整備し、課題推進者 1 と 3 の共同研究の成果から得られた研究成果・革新的技術の確立を積極的に取り込んで活用するための実験系を準備し、設置してきた。また最終的な計算プラットフォームを見据えると、そのほとんどは高性能・低ロスの光スイッチが必要不可欠であり、この技術はどのように実現すればよいか検討し、量子もつれを利用することで、光スイッチを全く使わないシステムによる光量子コンピュータの構造の一例を提案し、検討し、その性能の有用性を示した。

課題推進者:古澤 明(国立研究開発法人 理化学研究所)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

- 代表機関である東京大学では、PM 支援体制チームとして研究室スタッフの他に、宮園副学長の推進協力の理解を得て、工学系研究科長染谷隆夫教授の内諾もいただけたので、事務部財務課の外部資金チームの支援を受け、契約の窓口になっている。
- 重要事項の連絡・調整の方法(運営会議の設置等)
運営会議を設置したが、期間が短かったので開催できず、その代わり目標 6 のキックオフ会議に先立ち発表内容検討及び調整を諮った。プロジェクトに関連する知的財産権の実施許諾条件等の運用に関し必要な事項について協議するため、知財運用会議も設置したが、これまで該当する案件はない。また東京大学内にある目標 6 内の PM 小芦教授とは SLACK という便利な SNS を用いて連絡することになっている。
- 研究開発機関における研究の進捗状況の把握(サイトビジット、課題推進者会議等)
共同研究を遂行してきているので、準備段階から相互に研究内容・成果を共有している。同じ東京大学の課題推進者 1 と 2 は当然であり、課題推進者 3 も課題推進者 1 の大学院生の共同研究活動から進捗状況を把握することができている。課題推進者 4 は新たに発足した研究機関に実験環境を用意し、課題推進者 1 の研究グループと緊密な共同研究体制を作った。

(2) 研究成果の展開

- 研究開発プロジェクトにおける知財戦略や知財出願の計画
研究開発の進捗に伴って確立されていく技術は特許申請 4 件あった。成果を論文(速報、解説などをふくむ)にして学術誌への投稿、国内外の学会の講演会への参加発表を奨励している。
- 技術動向調査、市場調査等の計画
学術誌や、講演会などへの参加や企業からのアプローチなどにより技術情報動向を得ている。
- 事業化戦略、グローバル展開戦略等の立案に向けた体制、計画等
将来的には光量子コンピュータのクラウド商品化も期待できそうになっている。基礎研究課題に取り組むだけでなく、研究開発の進捗に伴って確立されていく個々の理論や技術が事業化に値するようであれば、個別に検討していく。
- 技術移転先、将来的な顧客開拓に向けた対応(試作品頒布、実機デモや展示会への出展等)に関する計画
今年度は行っていない。

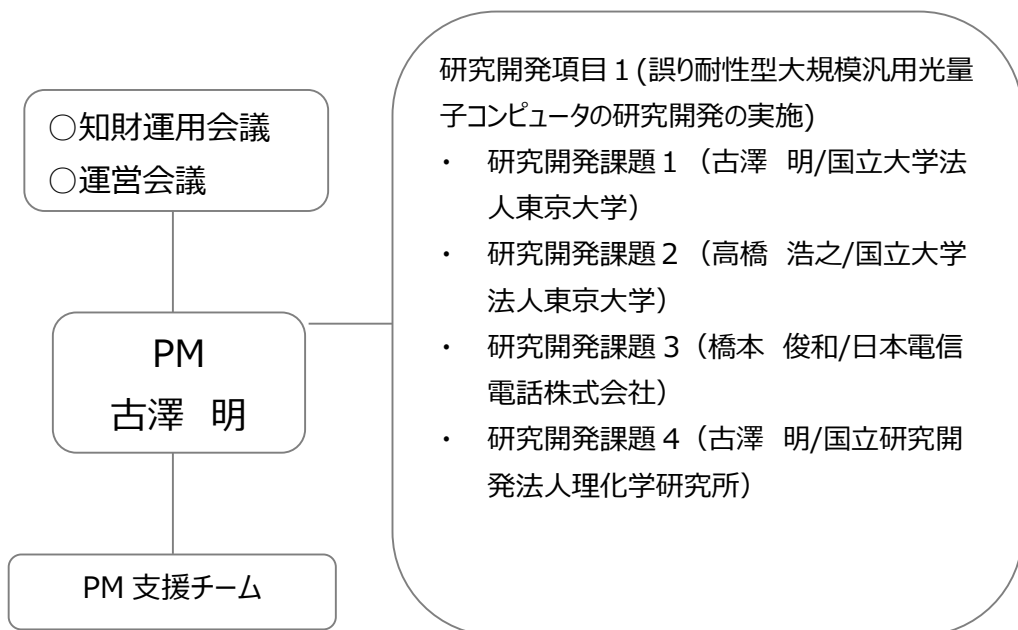
(3) 広報、アウトリーチ

- 年次報告書や公開シンポジウム等の開催を通して、国民との対話を諮るよう努力するが今年度は行わなかった。
- ホームページをムーンショット用に新規に開いた。
<https://optical-quantum-computers.jp>

(4) データマネジメントに関する取り組み

- 研究自体は透明性を持ち、常にオープンであるが、未整理のデータや誤った試行結果が意に反して流出したり悪用されたりしないための、一般的常識的な扱いをする。共有するデータ(文章、画像、動画などをふくむ)はクラウドを用いている。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



知財運用会議 構成機関と実施内容

提出される知的財産権管理に関する書類について、課題推進者と適宜プレーヤーと PM 及び PM 補佐を加えた機関で、オンラインにて季末に報告する。

運営会議 構成機関と実施内容

課題推進者と適宜プレーヤーと PM 補佐を加えた機関で、オンラインにて半年ごとに遂行状況を報告し合う。

5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	4	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	4	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	1	5	6
口頭発表	12	5	17
ポスター発表	0	4	4
合計	13	14	27

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	8	8
(うち、査読有)	0	6	6

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	0	0	0
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	0	0	0

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
1

報道件数
3

ワークショップ等、アウトリーチ件数
0