



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

2020 年度版

2020 年 12 月～2021 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

1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

本プロジェクトにおいて、誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータ実現を目指すために、本提案者らが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とであり、そのために、初年度である令和2年度から令和3年度にかけては、これまでの研究装置に倣いながら、セットアップを新規に念入りに組み上げていく。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チップ、および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開発してきている。

令和2年度の達成目標は、本プロジェクトに導入される実験設備の一部の起動と性能最適化へ向けて、部分ごとの動作確認実験をこなしていくことである。

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: 10THzクロック周波数の全光学式誤り耐性型大規模汎用量子コンピュータ実現を目指している。スクイーズド光を用いて量子もつれとしてクラスター状態を生成し、量子計算を行うための実験をして来ている。これまでに実現されているスクイーピングレベルの向上を目指し、波長を通信波長領域にして光導波路回路に置き換えたセットアップを組み上げている。誤り訂正可能な光量子コンピュータの実現において、Gottesman-Kitaev-Preskill (GKP)量子ビットを使ったエンコーディングが有力な方法である。この GKP 量子ビットに対して量子操作を実現するのに、non-Clifford な量子操作の実現が最重要課題である。その実現方法の鍵として非線形フィードフォワードを用いることによって、最小限の構成要素による実現手法を考案した。光を用いた連続量量子情報処理において、非ガウス型状態は任意の量子計算の誤り耐性実現に必要不可欠である。非ガウス型状態を内包する光の波束形状を規定する時間モード関数を実現する手法を検討し、実際に非ガウス型状態の一種である単一光子状態において大規模量子計算に有用な時間モード関数を生成した。この手法ではゲートテレポーテーションを応用し、量子テレポーテーション回路に基づいた波束を自由自在に整形することができる。非ガウス型状態を生成するには、高性能な光子数識別器の開発が必要である。本研究では超伝導ナノストリップ型光子検出器(SNSPD)の立ち上がり時間による光子数識別

に注目し、出力波形のパターンマッチングによる光子数識別能の改善と検出器トモグラフィーによる光子数識別能の評価を行った。信号波形から光子数識別を行い、さらに量子検出器としての性能指数である POVM を測定した。これにより、本方式では少なくとも 5 光子までの識別が可能であることが明らかになった。我々独自の非線形なフィードフォワードを実現し非ガウス型の補助状態と組み合わせることで、非ガウス型の測定を実現した。時間領域多重方式のクラスター状態と組み合わせることで、大規模な誤り訂正型汎用光量子計算の実現につながる。

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: 超伝導転移端センサ (Transition Edge Sensor, TES) を用いた超伝導光子数識別器の開発を実施した。今年度は特に、①光子数識別器開発を起動し、次年度以降の高速化を視野に入れた研究開発を実施した。また、②TES の信号を高速化・増幅させる技術を新たに考案し、その数値計算を実施した。

①TES 高速化のための小型化においては、フォトリソグラフィプロセスにおいて高精度なアライメント技術を要する。そこで今年度はレーザー直接描画を用いたフォトリソグラフィによる TES 開発技術を確立した。また、検出効率の向上のためには、光ファイバのコアと TES の高精度なアライメントが必要となる。そこで今年度は、深堀エッチングを用いたシリコンウェハ加工による、光ファイバと TES のアライメント技術を確立した。これらの技術によって TES 型光子数識別器を開発し、光子数識別を実施することに成功した。

②また、TES の信号を高速化および増幅させる技術を新たに考案した。有限差分法による熱電気連成計算を実施し、その結果、TES 信号の増幅と高速化が得られる見通しを得た。

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: 本年度は、研究開発課題 1 の研究に連携して、誤り耐性閾値を超えるフィデリティで動作する量子テレポーテーションチップを実現するための導波路光パラメトリック増幅器および光導波路の基本設計の開始に着手し、予備検討を実施した。現在 NTT の有する PPLN 導波路光パラメトリック増幅器について、スキューニングレベルと帯域両面について評価し、優れた特性を有するものの、本プロジェクトの目標については、改良を進める必要があることを確認し、基本設計に反映し、当該年度の目標である、基本設計と予備検討を完了した。また NTT の有する PLC について、800nm 帯用の量子テレポーテーション回路をリファレンス回路

として、光回路の損失の現状把握を行った。0.5dB以下という損失目標に対しては非常に大きな値となっており、次年度の試作を通して、特性改善等を進めていく予定である。検討すべき主なパラメータを抽出し基本設計に反映し、当該年度の目標である、基本設計と予備検討を完了した。

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)

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、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他ムーンショット 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。

研究開発プロジェクトの展開

- 本プロジェクト内では研究開発機関間で重複する実験テーマがなく、互いに協力してきている。研究開発の進展がスムーズであり、光量子コンピュータの実現研究を始める他研究組織があるので、体制の再構築を行なう予定である。
- 研究開発の進捗、成果を踏まえた時機を逸しない研究開発プロジェクトの大幅な方向転換は見込んでいないが、新たに光量子コンピュータの社会実装を具体的に企画し得る研究を課題に追加したい。
- 研究開発プログラム計画の実現のため、研究開発プロジェクト全体の再構築の戦略
各課題で成果や進捗状況が均一に進行することは必ずしもないので、既述のマイルストーンに早めに到達していけそうなので、基礎技術研究だけではなく、光量子コンピュータの実証研究を平行に推し進めていける柔軟性を用意している。

(2) 研究成果の展開方法

- 研究開発プロジェクトにおける成果発信や知財出願
今年度特許出願はなかった。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た。

○ 技術動向調査、市場調査等

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た。

○ 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

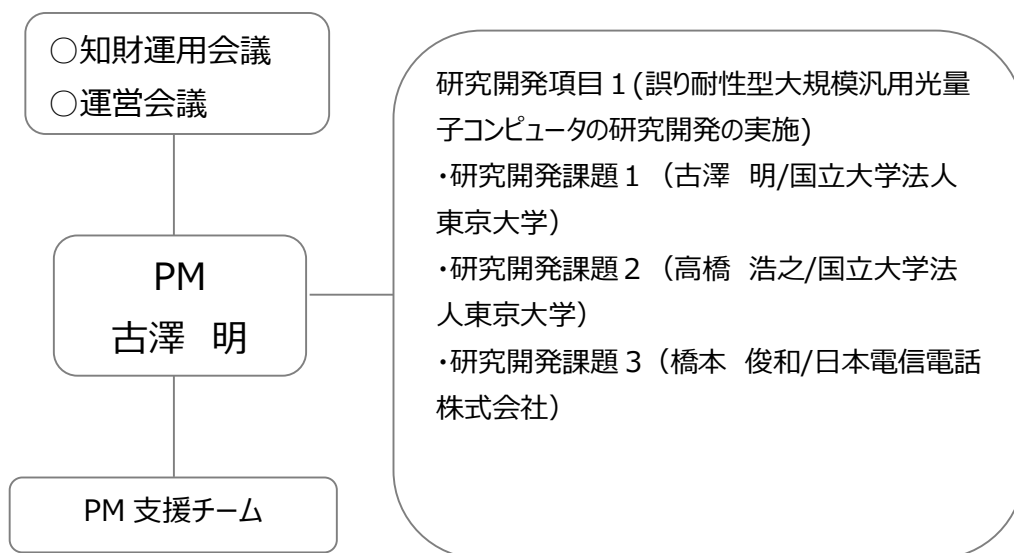
○ 年次報告書や公開シンポジウム等の開催を通して、国民との対話を語るよう努力するが今年度は行わなかった。

○ ホームページをムーンショット用にひとまず試験的に新規に開いた。一旦運用を停止して包括的内容の準備をしている。

(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

課題推進者と適宜プレーヤーと PM 補佐を加えた機関で、オンラインにて隔月末に研究状況を報告し合う。

運営会議 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、オンラインにて隔月末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	0	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	3	3	6
口頭発表	4	0	4
(うち、査読有)	(0)	(0)	(0)
ポスター発表	0	0	0
合計	7	3	10

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	5	5
(うち、査読有)	(0)	(1)	(1)

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
0

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
0