



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

2023年度版

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

 **MOONSHOT**
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本プロジェクトでは、汎用型量子コンピュータの実現のため、光量子技術を用いて、誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの開発を行っている。これまで時間領域多重汎用光量子コンピューティングの手法の開発に取り組んできており、これをさらに発展させ、汎用化に向けた研究開発を進めている。時間領域多重とは、空間的に量子ビットを並べる代わりに量子パルスとして時間的に並べるもので、従来の光量子コンピュータの課題であった誤り耐性の実現を目指す。具体的には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モジュール、論理的量子ビット等を生成する任意量子状態発生器、および超伝導光子数識別器の研究開発を行う。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

本プロジェクトは、誤り耐性実現のための論理的量子ビット Gottesman-Kitaev-Preskill (GKP) 量子ビットを近似的に生成し、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を目指している。これまで、光導波路モジュールと光ファイバーとでコンパクトかつ堅牢なセットアップを新規に組み上げ、低損失化の工夫を施している。これを用いて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いる。

令和5年度は、光量子のもつれ状態からホモダイン測定される信号を電氣的に処理するプロセスを高速化するための測定器を用いて、10 THz の帯域で 8dB 程度のスクイージングレベルの実現を目指し、また 40 光子程度を識別でき、動作帯域 5MHz、量子効率 97%程度の超伝導光子数識別器を開発し、これを用いて低近似 GKP 量子ビットおよび、低近似魔法状態を生成することを目指し、いずれも到達している。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

研究開発課題 1 から 4 すべてについて丁寧に進行具合に配慮し、滞ることなく着実な進展を見た。研究開発の前倒しのため新たに研究開発課題 5「光量子コンピュータのクラウド化と運用に関する研究開発」を設定して、目標の集結点をはっきりさせた。大きなステップとなる成果を引き出し、論文の掲載に合わせてプレスリリースを行った。またマイルストーンを前倒して遂行した研究課題に対して、目標の達成のために研究開発費の補充増額を得た。

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:数 100THz のキャリア周波数を持つ光量子情報処理システムは、情報の読出しを行うホモダイン測定器によって帯域が数 100MHz に律

速されていた。そこに 5G 通信技術を用いて数 10GHz 帯域のホモダイン測定器をこれまでに実現してきた。それでも効率が低く、強度損失に脆弱な量子光への応用は困難であった。量子光に光位相敏感増幅を補助的に用いて、ロス耐性を向上させ、5G ホモダイン測定器を用いた 70 GHz 帯域までの量子もつれ状態の生成と検証を行なった。また 6 THz の光源、6 THz の位相敏感増幅器、66 GHz のホモダイン測定器で、生成レート 0.9 MHz で波束幅が 1ns 以下の状態の生成を行った。この生成レートは、用いた超伝導検出器のタイミングジッタが大きな律速であって、系の 66GHz の帯域が 1GHz に制限されているためである。

超伝導ナノストリップ型光子検出器(SNSPD)は高い検出効率を有し、高速動作可能な光子検出器である。検出器単体では光子数識別性能はないと考えられていたが、昨年度光子検出信号の波形情報から約 20 ps のタイミングジッタで数個程度の光子数識別ができることが明らかになった。本年度はこの超伝導ナノストリップ型光子数識別器を使用し非ガウス型量子状態の生成に成功した。超伝導検出器の性能による制約を取り除ければ、GHz 帯、あるいは THz 帯域の状態生成は OPA によって実現できることを示した。

本手法を初めて量子トモグラフィに応用し、シュレディンガーの猫状態の生成を行った。古典的な状態であるコヒーレント状態の重ね合わせ(シュレディンガーの猫状態)の近似状態が生成される。パルス光のスクイズド真空場の時間-周波数モードの性質を理論的に解析し、低光学損失のパラメトリック増幅器、超伝導転移端センサの 4 光子測定、位相ロックシステムを用いて、世界初の 4 光子引き取りによる非ガウス型状態生成の実験に成功した。生成された量子状態は 1GHz の帯域を有しており、従来の非古典的量子状態生成の約 100 倍の広帯域化に成功した。

誤り耐性型量子計算を実現する有望な手段は、光進行波中に Gottesman-Kitaev-Preskill (GKP)量子ビットを生成することである。光子数測定を利用して光 GKP 量子ビットの生成を世界で初めて実証した。同じ方法を反復することでピークの数が増えて、質の高い GKP 状態を実現できると期待される。まだ平均光子数が少ないため荒い近似の GKP 量子ビットの生成レートは数 Hz であり、まだ非常に低いので実用化への課題となる。光子数測定器の量子性を効率よく利用し、GKP 量子ビットの生成レートを 100 万倍以上改善することに取り組んでいる。

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:超伝導光子数識別器を超伝導転移端センサによって実現する。光子数識別器の開発にあたっては、現状、超伝導転移端センサ型の検出器が本来的な光子数識別能を有し高い量子効率を達しうるものとして最も有望であるため、この開発を実施する。

令和5年度は、センサの読み出し回路を低温で動作させたHEMT(High Electron Mobility Transistor)回路で直接読み出しを行うことで、これまで読み出しに利用してきたSQUIDによる帯域制限の問題を解決し、高速化が達成できることを示した。冷凍機の3Kステージ上に低温での特性を踏まえて製作した増幅回路を設置し、TESから得られる光信号の読み出しを行った。

この結果、波長1550nmのレーザー光を照射して実測したデータから立ち上がり時間は10%-90%において12.2nsとなった。したがって、これから計算される動作帯域としては、 $0.35/12.2 \text{ ns} = 28.6 \text{ MHz}$ となった。当初の目標としては、動作帯域10MHzを目標としていたので、それ以上の値を達成することができた。

また、光共振器構造の作成を行い、量子効率の測定結果として、1550nmにおいて98.7%の値と評価された。また、光子数の測定においては、1550nm光子に対して、飽和する信号強度が43光子となった。よって、当該年度のマイルストーンをすべて達成することができた。

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5年度は、令和4年度の成果をもとに、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(1)(2)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

本年度は、量子コンピュータ実現に向けて研究課題1および研究課題4の研究開発加速のために、昨年度までに改良してきた導波路光パラメトリック増幅器に関して安定的に作製できるような製造体制の立ち上げを実施した。これにより実際に年間20台以上の導波路光パラメトリック増幅器を製造することに成功し、約90%の歩留まりでクライテリアである透過損失1.5dBを下回る低損失なモジュールの作製に成功した。

さらに、作製したモジュールを研究課題1および研究課題4における量子もつれ生成実験、非ガウス状態の生成実験に組み込み、実機への適用可能性を確認した。実験結果から適切にフィードバックを受けることで、令和6年度へのデバイス作製指針を獲得し、昨年度実証

した高速な量子受信技術に関して、従来では利得 30dB 以上となる特別仕様の光パラメトリック増幅器で実験を実施していたが、利得に対する損失耐性の精査を実施することで、特別仕様でない安定製造可能なデバイスであっても適用可能であることを確認した。

また、導波路光パラメトリック増幅器の高性能化に向けた課題抽出として、研究課題4との連携により、導波路構造のばらつきによる出射ビームの形状が干渉ビジビリティの劣化を引き起こすことを確認し、高レベルスキューミング実現に向けた課題抽出を実施した。広帯域化に向けては光導波路を短くすることで達成できることが知られていたため、今期は短尺化にも取り組み、従来よりも短尺なモジュールを作製した。特性の評価に関しては令和 6 年度に実施予定である。

以上のとおり、改良された導波路光パラメトリック増幅器の安定製造体制を構築するとともに、低損失化、広帯域化に向けた検討を着実に遂行中である。来期は、今年度抽出された課題をもとにさらなる広帯域化とスキューミングレベルの向上をめざす。

(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

昨年度は $VH\Delta$ -PLC (ファイバーと整合させてコアとクラッドの屈折率のコントラストを高くした比屈折率差 1% 程度の光導波路) での回路検討を行い、要素回路としては $M\Delta$ -PLC (屈折率のコントラストの低い比屈折率差 0.4% 程度の光導波路) の場合と同等の特性を得られることを確かめた。本年度も、引き続き $VH\Delta$ -PLC を用いて低損失化の検討を継続した。

計画の見直しにともない、量子テレポーテーション系を構築して検討するのではなく、量子テレポーテーションで用いられる光量子動作を基本的な光学系を持つ PLC から検証していくこととした。そのため EPR 生成向け PLC を作製して、PLC の低損失化の検証を進めた。

$VH\Delta$ -PLC を用いて、EPR 生成向け PLC を作製し、その透過特性を確認した。スキューズド光が通過するパスで受ける損失は、光回路内部で 0.7dB、光回路とファイバーの接続部両側で 0.2dB、合計 0.9dB となった。この損失には、伝搬損失 0.006dB (単位伝搬損失 0.02dB/cm、回路長さ 0.3cm としたときの値) と要素回路の計算上の損失が含まれる。残りの損失を低減するには要素回路自体の損失を抑制するような取り組みが必要となる。この PLC へスキューズド光を伝搬させると、出力されるスキューズド光のスキューミングレベルは約 5.7dB (入力スキューミングレベルを 10dB としたときの値) と推定され、この値は、識別できるスキューミングレベルとなっている。以上により $VH\Delta$ -PLC によって EPR 生成の動作検証が可能であることを確認した。

以上(1)及び(2)を踏まえて量子テレポーテーション動作の検証につ

いては、研究開発課題 1 の研究と連携実験を優先して進め、量子光源の広帯域・高スケーリングレベル光源および光量子状態の高速測定の実証を優先させ、次年度以降の検討とした。次年度以降、本プロジェクトの研究開発課題 1、研究開発課題4において、さまざまな実証系の構築や実証実験が検討されており、本研究開発の導波路光パラメトリック増幅器等の適用が想定される。それらの状況にダイナミックに対応するため適宜計画を見直して研究開発計画に反映するとともに、研究開発計画に基づき、プロジェクト全体の成果創出に貢献しつつ、本研究開発では、その基盤となる導波路光パラメトリック増幅器および光導波路回路技術の高度化に取り組んでいく予定である。

課題推進者:橋本 俊和 (日本電信電話株式会社)

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した。特に、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を生成した。

これまでの研究により、実験室環境を大幅に改善・安定化することに成功したため、フリースペース系で系を構築した。これは実験室環境の温度安定性が高まったためフリースペース系でも長期的安定性が見込めるようになったこと、さらにフリースペース系の方が低ロスであり、より質の高いクラスター状態の生成が見込めるためである。

今年度は実際の実験系を構築し、クラスター状態の相関を測定することができた。さらに高速かつプログラマブルな量子操作のためのFPGAの開発とクラウド公開のため環境準備を行った。

課題推進者:古澤 明(国立研究開発法人 理化学研究所)

研究開発課題5:光量子コンピュータのクラウド化と運用に関する研究開発

当該年度実施内容: 課題推進者 4 のグループと連携してシステム構成の検討を行なった。全体のシステム構成として、多段階のソフトウェア層を具体的に検討した。

光量子コンピュータ実機は当然に、実験室に設置されるが、当研究テーマがクラウド公開であることから、ソフトウェアの大部分はAWS等のパブリッククラウドで動作させることを念頭に設計を進めた。

レイヤー構成の検討は全般に並行して進めるが、特にハードウェアに近い層の実現を優先して目指し、当該年度のマイルストーンは「クラウドからハードウェアをリモート制御するソフトウェアの構築」としていた。

結果として、実機の予定仕様と照らし合わせ、以下のソフトウェア仕様を定義した。

- ・Quad-rail Lattice 方式の光量子コンピュータであって、そのクラスター状態は 4 つのノードで一つのマクロノードを構成し、そのマクロノードが約 100 ノードずつ層状になった構造を持つ
- ・100 ノードの層が最大 100 層連なることができる
- ・上記の実機に対する入力、各マクロノードに対する測定規定とフィードフォワード情報であり、出力はホモダイン測定の結果であって、それぞれ 16bit の数値に指定されるものとする

その他、量子回路層ソフトウェア、ソフトウェア開発キット(SDK)の仕様も含め定義し、課題推進者 4 のグループから外部へソフトウェア開発を発注したところである。

課題推進者:平岡 卓爾(株式会社 Fixstars Amplify)

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、工学系研究科長の内諾もあり、事務部財務課の外部資金チームの支援を受ける。
- 重要事項の連絡・調整の方法(運営会議の設置等):運営会議を必要な場合を開く。新規課題と課題推進者の決定の際に今年度は開催した。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、知財運用会議を設置する。そのために専用のメーリングリストを運用している。また東京大学内にある他メンバーショット 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)準備段階からも共同研究を遂行し、研究者の往来も行っているため、今後も相互に研究内容・成果を共有している。課題推進者間でも情報を共有しており、定期的に研究例会を開いて、進捗状況を把握しており、課題推進者会議を別に開催する予定はしない。

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いので、互いに競うことはない。研究開発の進展にともなって、体制の再構築を行い、発展的延長が見込まれるテーマになるよう、研究開発体制の活性保持に努めている。
- 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、技術革新により急激に進歩完成に至るテーマがあれば、その開発課題を廃止したり、新たな近道があればそういう研究を課題に追加したりする。

- 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くことを望ましいとみなしながらも、難題化している研究に挺入れするなどの柔軟性を用意しておきたい。

(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などの申請を行うことがある。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く。
- 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る。研究開発の進捗に伴って確立されていく個々の技術が他研究分野に波及することがあるので、ニーズがあれば個別に検討していく。
- 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
将来的には量子コンピュータの商品化も期待でき、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るので、ベンチャー企業を設立し、さらに検討していく。世界的な展開につなげるためには、着実な研究遂行と、様々な地道なPR活動を心掛ける。
- 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
今年度はまだ予定していないものの、将来的には公開シンポジウム等の開催に際して途中段階の公開実験やヴァーチャル公開などというものが可能であると考えている。

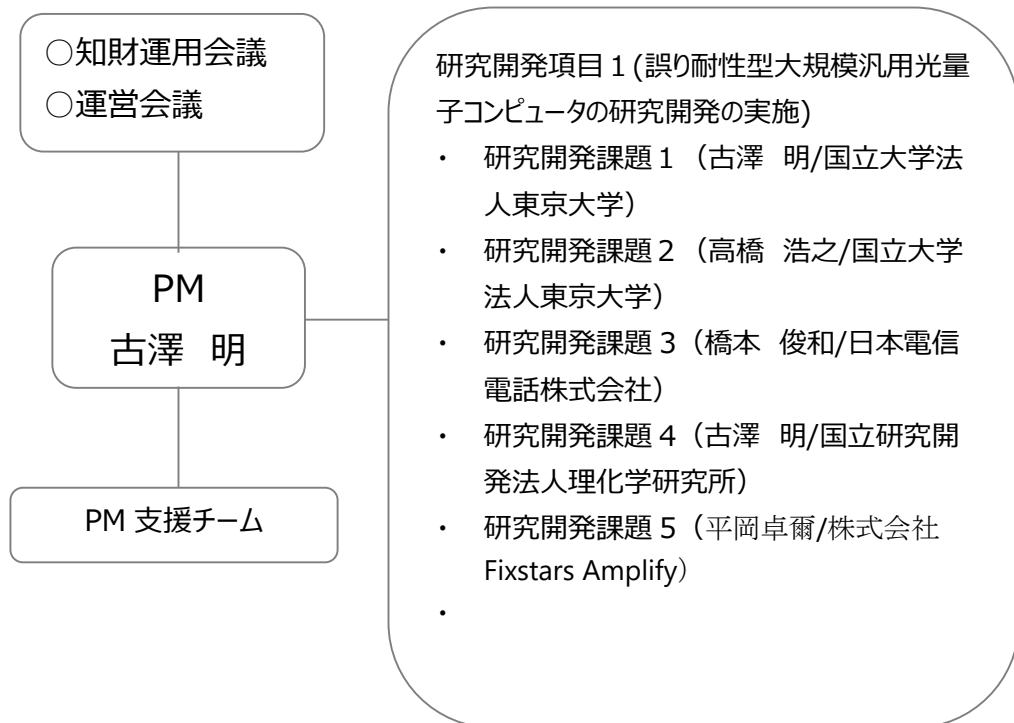
(3) 広報、アウトリーチ

- 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。
- Nature(2024年2月29日号)でムーンショット目標6の活動が特集記事で紹介され、本研究開発課題について「Quantum computers move into the light」という題名で紹介された。
- ホームページをムーンショット用に開いており、国内外に存在を知らせる。リーフレット等によっても積極的に広報活動をする。

(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

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、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	1	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	1	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	1	6	7
口頭発表	20	8	28
ポスター発表	3	12	15
合計	24	26	50

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	12	12
(うち、査読有)	0	12	12

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	2	0	2
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	2	0	2

受賞件数		
国内	国際	総数
2	0	2

プレスリリース件数
2

報道件数
2

ワークショップ等、アウトリーチ件数
0