



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

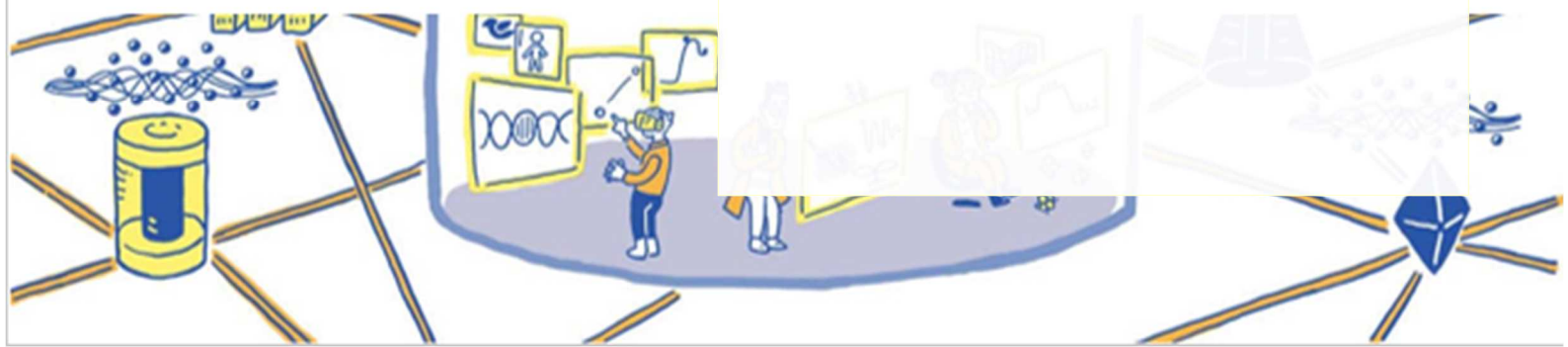
2022年度版

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



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 理化学研究所 量子コンピュータ研究センター | 教授 チームリーダー |
| 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

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本プロジェクトでは、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、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。このために、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念入りに組み上げてきている。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、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する。

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、「高性能導波路光パラメトリック増幅器を開発し、10 テラヘルツの帯域で 8dB 程度のスクイーピングレベルの実現を目指す。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する。これを用いて低近似 Gottesman-Kitaev-Preskill (GKP) 量子ビットおよび、低近似魔法状態を生成する。フィデリティ 0.67 程度の量子テレポーテーションチップを実現する。」と研究開発プロジェクト3年目のマイルストーンとして掲げている。前年度に本研究開発プロジェクトの成果として製品化できた量子光源とみなせるスクイザーモジュールを、各担当課題推進者に導入を促し、基礎研究及び光量子コンピュータ実機製作研究の加速をはかる。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

量子計算を行う量子もつれとしてクラスター状態を用いる。クラスター状態はスクイズド光を用いて生成する。さらに、非ガウス型状態と呼ばれる量子計算は量子誤り訂正やユニバーサル量子計算に必要不可欠である。本研究開発では、非ガウス型状態と呼ばれる非古典性の高い量子状態の生成について、通信波長領域において非ガウス型状態の一種である単一光子状態の高純度生成に挑んでいる。

次に、量子情報分野では、量子光を自在に制御する技術、つまり光の時間波形の制御技術が求められる。「量子任意波形発生器」という概念を提案し、構造を具体的に示しているので、それに基づいた量子任意波形発生器の最も核となる技術を実証しようとしている。

GKP 量子ビットの生成のためには、高次の非線形光学過程の実現が必要となる。本プロジェクトでは、超伝導光子数識別器を用いた測定誘起型でこれを実現する。具体的には、スクイ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、量子もつれの一部で超伝導光子数識別器を用いて所定の光子数を検出することで、**GKP** 量子ビットを生成する。この **GKP** 量子ビットが生成されるのは、所定の光子数が検出された瞬間なので、これを任意のタイミングで使うためには、量子メモリーも必要となる。本研究開発課題は共同で、光子数識別器の開発に着手しており、光量子コンピュータクロック周波数 **1GHz** 相当の動作速度を目指す。

当該年度の実施内容としては、光子数識別器の試作機の開発を行い、初期性能の条件出しを行っている。

導波路光パラメトリック増幅器および光導波路を作製して、光学的な基本特性の評価と量子テレポーテーション動作による特性評価を行い、現時点でのフィデリティを確認するとともに、課題抽出を行うことを目標として取り組んだ。量子テレポーテーション動作による特性評価については、要素回路の特性評価までとして、広帯域・高スクイーミングレベル光源および光量子状態の高速測定の実証に挑んでいる。

光ファイバーと光導波路を用いて、人力での光軸調整やメンテナンスをほとんどすることなく 24 時間 365 日安定に動作する光量子情報処理系に仕上げクラウドに上げることを目指している。このシステムは補助状態に関係なく動作し、光量子計算のためのプラットフォームとなる。このまま補助状態を付け加えないとエラーが大きく誤り耐性を持たないので、この構築したプラットフォームに加え、非ガウス型状態を時間分解能の高い光子検出器を用いた光子数識別測定と FPGA を利用した非線形フィードフォワードを組み入れている。

(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。大きなステップとなる成果をも引き出し、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: ファイバーシステムでは自由空間システムとは異なり空間的なアライメントが不要になり安定性の向上が期待されるが、ファイバーシステムにはファイバー特有の様々なゆらぎが存在している。そこで各種制御技術を開発し、自律的にシステム全体を長時間安定に保てるようにした。その結果、低損失化、低雑音化に成功し、光量子情報処理で用いる最も基本的なスクイズド光をオールファイバーシステムで 24 時間連続測定できるようになり、安定化に成功した。

非ガウス型状態は光子数識別器を用いた伝令付き手法で生成され、本研究開発では超伝導転移端センサと導波路型光パラメトリックに加え、パルスホモダイン手法を確立し、世界で初めて 3 光子検出までを用いた非ガウス型量子状態の生成に成功した。これまでには通信波長帯における超短光波束で生成された例はない。本成果が世界初、波長 1545nm、波束幅 8 ps の光波束に光子引去り法によって非ガウス型状態を生成した。非古典的な状態の指標であるウィグナー関数の負値をロス補正することなく観測した。これによって、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 量子ビットを近似的に生成して、誤り訂正可能な量子コンピュータを実現することが期待される。

さらに量子光を実用光量子計算に不可欠な時間波形を持つ非古典状態のパルス波形で出力する光源である「量子任意波形発生器」を提唱し、その核心となる技術である量子光のパルス波形を自在に制御する手法を実現した。これにより、現在開発が進んでいる大規模光量子コンピュータの作動に必要な、特殊なパルス波形を持つ量子光の生成に初めて成功した。今回実現したシステムの拡張により量子任意波形発生器を開発すれば、光量子コンピュータをはじめとする様々な量子技術を実現する「究極の量子光源」になると期待される。

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: 本年度は、超伝導光子数識別器の開発として、高速化を目指して小ピクセル型の Ir-TES の試作を進め、高速の Ir-TES の開発と光子数識別能の向上を進めた。この結果、8 μ m 角の Ir-TES において、信号読み出し系を最適化することで、20ns 程度の立ち上がり時間と 800ns 程度の立下り時間を有する信号応答が得られた。立ち上がり信号から判断すると、動作帯域として 50MHz 程度まで対応可能と考えられる。

また、光子数識別能の向上のために、主成分分析を用いたパルス波形の分析を行い、信号波形情報のみでは分離できなかった光子数情報を拾うことができる見通しを得た。さらに、高速化を進める上では、信号読み出し回路の制約が大きく、現在用いている SQUID による読み出し系の帯域が 50MHz に制限されているために、SQUID 読み出しの代わりに HEMT トランジスタを用いる新たな読み出し回路を適用することの検討を開始した。本研究では有感領域の極小化を進めているために、熱容量が小さく、単一光子入射時の信号が大きくなる。また、Ir-TES では、TES 自体の抵抗値が大きいため、インピーダンス整合の点からもトランジスタ回路による読み出しを適用するのに適していると考えられる。

また、小容量の TES を精度よく製作するために、FIB 装置の立ち上げとそれを用いた加工を実施した。FIB 装置を用いる場合には加工に用いる Ga イオンの影響をどのように防御するかという点が重要になってくるが、あらかじめ表面に保護層を設置しておくことを検討している。

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4年度は、令和3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

改良したデバイスに対して、測定系の最適化を実施し、高レベルスキューズド光の実現のための検討を行った。また、広帯域性の実証実験として、光通信技術を組み合わせた新規測定手法を提案・実証し、世界に先駆けて光通信技術との融合可能性に関して示した。

まず、昨年度低損失化に成功した周期分極反転ニオブ酸リチウム (Periodically Poled Lithium Niobate: PPLN) 導波路から出射されるスキューズド光を劣化なく評価するために、光学系の低損失化、位相同期系の最適化を実施した。本測定系により、昨年度は 20 %程度あった受光損失が 10 %程度となり、従来に比べ損失を低減することに成功した。さらに、測定時に必須となる位相同期に関して、高精度化を実現するために、システム全体の周波数応答を評価し、制御周波数の最適化を実施した。システム応答の分析結果、位相反転しない周波数を見極め、制御周波数を約1MHzと選定した。これらの取り組みにより、位相同期されたスキューズド光レベルとして中間目標であった 8.3dB を達成し、導波路スキューズド光としての記録を更新した。また、スキューズド光の劣化要因を切り分けることに成功し、10dB スキューズド光の実現に向けた課題抽出を行った。

また、直交位相振幅測定 of 広帯域化に向け、広帯域光パラメトリック増幅器 (OPA) を、光検出前の前置増幅として用いる手法を提案・実証した。本手法では、検出効率と検出帯域のトレードオフを解消することが可能である。前置増幅用の OPA にもスキューズド光と等しく周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) 導波路を用いた。本研究では、光検出器として市販される光通信用の 43 GHz 帯域の光検出器を使用した。光検出器からの電気信号は 63 GHz 帯域のリアルタイムオシロスコープで検出される。なお、本実験系では、前置増幅 OPA の高い利得により、実効的な光損失が 92.4%から 0.4%まで低減されている。得られた電圧振幅の分散値から、量子ノイズ圧縮率であるスキューズド光レベルを計算すると、5.1 dB であることが分かった。この値は、測定誘起型光量子コンピュータの重要なリソース状態である二次元クラスタ状態の生成に必要な、スキューズド光レベル(4.5 dB)を超える値である。また、DC から 43 GHz 帯域にわたって、リアルタイム直交位相振幅測定したことを示している。これは、従来の検出手法と比べ、1000 倍以上の帯域拡張に成功したことを意味しており、将来的に数十 GHz のクロック周波数での量子演算が可能になることを示唆している。

(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

量子テレポーテーション向けの Planar Lightwave Circuit: 石英系平面光波回路 (PLC) を作製して、低損失化の検討を継続した。作製した PLC を用いた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、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行い、次年度以降の検討とした。

量子テレポーテーション向けの PLC を実現するにあたり、2つの選択肢を検討した。一つは、通常のシングルモード (SM) 光ファイバとの結合損失を抑えるために、SM 光ファイバとモードフィールド系が整合するようにコアとクラッドの屈折率のコントラストの低い比屈折率差 0.4% 程度の光導波路を使用して PLC を実現する ($M\Delta$ -PLC)、というものである。もう一つは、光ファイバのコアとクラッドの屈折率のコントラストを高めた高数値開口 (HNA) 光ファイバ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% 程度の光導波路を使用して PLC を実現するものである ($VH\Delta$ -PLC)。 $M\Delta$ -PLC は要素回路の損失も低く抑えられるので損失の面で有利であるが、光導波路の曲げ損失が無視できる曲率半径 (以下曲げ半径) が大きくなるため要素数の多い量子テレポーテーション向けの PLC を実現するには 1ウエハに収めるのが難しく、回路の引き回し距離も長くなり伝搬損失が増大するという点で不利になる。 $VH\Delta$ -PLC はその逆で、曲げ半径が小さく回路全体のサイズを小さくできるが、単位距離当たりの伝搬損失や要素回路の損失が大きくなりやすい。以上のように、 $M\Delta$ -PLC と $VH\Delta$ -PLC でトレードオフがあるため、両方について設計と評価を実施し、量子テレポーテーション向けの PLC の実現性を検討した。 $VH\Delta$ -PLC では要素回路としては $M\Delta$ -PLC の場合と同等の特性が得られており、さらに特性を改善することで $VH\Delta$ -PLC での量子テレポーテーション用回路を作製し実証に用いることも視野に入れられることを確認した。

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。

量子状態の適切なリソースと、測定結果に基づいて変化させることができる電気光学フィードフォワードとを用いて、誤り耐性や汎用性も実現できる。線形フィードフォワードは既に実現され、一般的な実験手法と

なっているが、非線形フィードフォワードはこれまで実現されていなかった。

今年度は、高速かつ柔軟な非線形フィードフォワードが、誤り耐性を持ちつつユニバーサルな量子計算に必要な重要な測定を実現するというを示した。特に非線形フィードフォワードに用いているルックアップテーブルに FPGA を活用することに成功し、技術的に実証できた。また非ガウス補助状態を使用すると、古典的な真空補助状態と比較して測定過剰ノイズが 10% 減少することを観察できた。

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、大学本部の推進協力の理解を得て、工学系研究科長の内諾もあって、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、本年度は開催しなかった。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、該当する案件はなかった。
- 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)
これまでも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や PM を含めた定期的セミナー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に共同研究体制を作って運営している。

研究開発プロジェクトの展開

- 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 1 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。

- 世界中から研究者の英知を結集するための国際連携に関する取組みについて
本年度は国際会議への参加のみならず、のべ 40 件ほど、米国、ドイツ、カナダ、オーストラリア、フランス等の研究拠点への大学院生を含むスタッフの派遣を行い、あるいは派遣を受けている。国際連携強化支援も受けている。
- 研究開発の加速や社会実装に向けた ELSI/数理科学等に関する取組みについて
光量子コンピュータをクラウド化することを目指しているので、既存の IBM 等における試みにおいての ELSI 取り組みを踏まえていく。

(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
特許申請は 1 件着手した。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。国外の研究拠点とは、のべ 40 件ほどの往来があり、期間が 1 ヶ月から半年に渡るものであったので、競合する研究者間で、情勢の分析ができています。
- 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

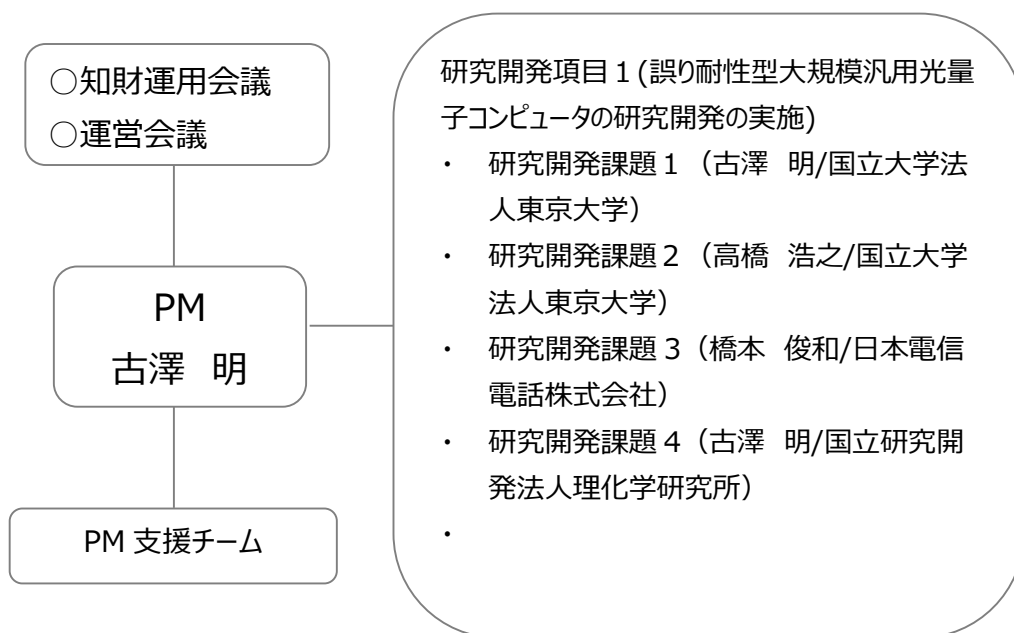
- 年次報告書や公開シンポジウム等の開催を通して、国民との対話を語るよう努力するが今年度は行わなかった。
- ホームページをムーンショット用を開いている。
<https://optical-quantum-computers.jp>

(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

運営会議、知財会議を適切に運用する。その推進体制を下の図に示す。



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、オンラインにて必要に応じて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 | 5 | 13 | 18 |
| 口頭発表 | 16 | 14 | 30 |
| ポスター発表 | 0 | 10 | 10 |
| 合計 | 21 | 37 | 58 |

| 原著論文数(※proceedingsを含む) | | | |
|------------------------|----|----|----|
| | 国内 | 国際 | 総数 |
| 件数 | 0 | 13 | 13 |
| (うち、査読有) | 0 | 9 | 9 |

| 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 |
| 3 | 0 | 3 |

| |
|-----------|
| 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 |