



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

2024年度版

ネットワーク型量子コンピュータによる

量子サイバースペース

山本 俊

大阪大学 大学院基礎工学研究科 /
量子情報・量子生命研究センター



1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本研究開発プロジェクトは必ずしも単体では「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」を実現するほどではない小中規模の量子計算機を量子接続し、大規模化するためのネットワーク化技術に貢献する。それと同時にネットワーク化することにより分散型量子コンピューティングを含む任意の量子アルゴリズムを可能にするとともに、「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」により顕在化する情報セキュリティの脅威も同時に解決することを目標に研究を進めている。現在の技術から小中規模量子コンピュータの候補となるハードウェアとして、超伝導、光、原子・イオン、半導体の各物理系が想定される。これらの量子コンピュータをネットワーク接続することでネットワーク型 NISQ 規模量子コンピュータを実現し、光と協調して動作する NISQ 規模量子プロトコルを実装する計画である。また、台頭する量子インターネットに向けた要素技術開発も実施する。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

各ハードウェアと接続するための基盤的な技術に関して、当初定めた方針に従って、研究開発を推進した。当初予見しなかった成果も見られるなど、順調に研究が進展した。研究開発項目ごとの当該年度の実施状況を下記にまとめる。

研究開発項目1：原子ネットワーク型技術

● 研究開発課題1:原子・光多重量子ネットワーク技術

本研究開発課題では、原子と光子の量子もつれを利用した原子量子コンピュータのネットワーク化に関する研究開発を行っている。当該年度はこの研究開発を進展させ、原子アレイ接続のための単一光子のルーティング実証を行い、さらに原子アレイと光子のエンタングルメントの実験系との統合を進めた。光子のルーティングに関しては、16チャンネルのルーティングの実証を行った。

● 研究開発課題2:多重化光子検出器開発

本研究開発課題では、多重化された超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)の研究開発を行っている。当該年度は、光子検出効率の評価システムや超伝導薄膜の動作温度向上に向けた成膜装置を新たに導入することで、前年度よりも優れた特性の SNSPD が内製可能となり、次年度に向けて、30チャンネル規模の SNSPD システムの製作を進めた。また、紫外線近傍から赤外線近傍までの様々な可視光波長に対応した12チャンネル SNSPD システムを開発し、高橋プロジェクトに提供した。

● 研究開発課題3:高性能光子検出技術開発

本研究開発課題では、SNSPD の高性能化および集積化に関する研究開発を行っている。当該年度は、SNSPD の性能評価において、高い信頼性で入射光子数を校正する事の可能な測定系を構築した。同一チップ上に形成された複数の SNSPD 素子と、ファイバアレイを高効率に結合することが可能となる実装技術を開発した。さらに、イオントラップとの集積化にむけて必要となってくる SNSPD 技術の開発を実施した。

研究開発項目2:光子ネットワーク型技術

- 研究開発課題 1:共振器 QED 量子ネットワーク化技術

本研究開発課題では、ナノファイバー共振器 QED 技術に基づく光子量子ビットのネットワーク化に関する研究開発を行っている。当該年度ではナノファイバー共振器 QED 系を用いた原子の量子操作を実現した。また、量子インターネットの基本ノードの実証に向けて、2対の原子間でのエンタングルメント並列生成技術の開発を進めた。

研究開発項目 3: 半導体ネットワーク型技術

- 研究開発課題 1:半導体量子ビットの量子ネットワーク化技術

本研究開発課題では、半導体量子ドット中の電子や正孔の持つスピンを量子ビットとする半導体量子コンピュータのネットワーク化に関する研究開発を行っている。当該年度は、2次元シリコン量子ビットアレイの接続技術として、並列コンベヤシャトルの設計・試作を行った。また、光子とシリコン量子ビットの接続に向けて、1次元量子ドット列と超伝導共振器の強結合の原理実証実験を推進した。並行して、ゲルマニウム量子ドットの開発を進め、光子偏光から正孔スピンへの量子状態変換が可能な光学遷移を理論提案した。さらに次年度の遠隔半導体量子ビット間の光接続実証実験のため、2台の希釈冷凍機へのピエゾステージ導入と低温光学系の構築を完了した。

研究開発項目 4: 超伝導ネットワーク型技術

- 研究開発課題1:超伝導量子ビットの量子ネットワーク化技術

本研究開発課題では、超伝導量子コンピュータのネットワーク化及び大規模化に必要な量子トランスデューサーの実現を目的とし、極低温で動作するダイヤモンド中の不純物スピンを媒介としたマイクロ波-光子変換技術の確立に取り組んでいる。当該年度は、複合共振器の極低温下での動作実証をした後、ダイヤモンド結晶を挿入して、最初の光-マイクロ波変換の実験を開始し、コヒーレント状態のマイクロ波-光変換を実証した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

代表機関である大阪大学 量子情報・量子生命研究センターの下に構成した PM 支援体制チームと共にプロジェクトマネジメントを遂行した。課題推進者会議や各課題推進者との頻繁な情報交換、意見交換を通して、研究開発状況の把握に努め、円滑なプロジェクト運営を実施した。本プロジェクト内でのグループ間の連携、さらには他プロジェクトとの連携を積極的に推進した。また、当該年度の優れた成果に対して2件のプレスリリースを行い(内1件は他プロジェクトとの共同プレス)、さらにプロジェクトホームページの公開を通して、本プロジェクトに関する最新情報を国内外に発信した。国際連携強化に向けた取り組みとしては、不純物スピンをを用いた量子情報技術に関する国際ワークショップ開催し、世界トップレベルの研究者とムーンショット目標6に参加する若手研究者との間で共同研究の可能性を探る場を提供した。アウトリーチ活動にも精力的に取り組む、ショールームでのパネル展示、一般社会人向けの講義、高校生を対象とした半導体微細加工の体験学習などを実施した。

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:原子ネットワーク型技術

研究開発課題1:原子・光多重化量子ネットワーク技術

当該年度実施内容: 本研究開発課題では、原子量子ビットをネットワーク接続するための量子インターフェースを開発し、小中規模の原子アレイ量子コンピュータをネットワーク接続し、大規模化する手法を開発する R5 年度には 5 年目のマイルストーンである原子アレイ間のエンタングルメント生成に向けて、原子アレイと光子のエンタングルメント生成実験を行い、原子アレイ上の2量子ビットゲートのための実験系を構築した。光子のルーティングに関しては、単一光子のルーティング動作の実証、さらに QFC (Quantum Frequency Converter/量子周波数変換) に基づく単一光子のルーティング実証を行った。当該年度はこの研究開発を進展させ、原子アレイ接続のための単一光子のルーティング実証を行い、さらに原子アレイと光子のエンタングルメントの実験系との統合を進めた。光子のルーティングに関しては、16 チャンネルのルーティングの実証を行った。

課題推進者: 山本 俊 (大阪大学大学院基礎工学研究科)

研究開発課題2: 多重化光子検出器開発

当該年度実施内容: 量子コンピュータを接続して大規模なネットワーク型量子コンピュータを実現するためには、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)の多重化が重要となる。NISQ 規模で想定される約 100 ノードに対応することを目指して、本研究開発課題では多重化された SNSPD システムの開発を進めている。開発した SNSPD システムは、山本俊プロジェクト内の各研究開発項目で利用するとともに、イオントラップの高橋プロジェクトとも連携して利用可能にする。当該年度は SNSPD の特性向上に関する取り組みとして、光子検出効率の波長や偏光方向に対する依存性評価システム、さらに超伝導薄膜の動作温度向上に向けて成膜装置を新たに導入した。これにより、開発スピードが向上し、前年度よりも優れた特性の SNSPD が内製可能になった。また、プロジェクト間連携のもと、紫外線近傍から赤外線近傍までの様々な可視光波長に対応した 12 チャンネル SNSPD システムを開発し、高橋プロジェクトに提供した。さらに、次年度に研究開発項目1の山本俊 PI グループへ提供する 30 チャンネル規模 SNSPD システムの製作を進めた。

課題推進者: 下井 英樹 (浜松ホトニクス株式会社)

研究開発課題 3 高性能光子検出技術開発

当該年度実施内容：SNSPD の性能評価において、高い信頼性で入射光子数を校正する事の可能な測定系を構築した。同一チップ上に形成された複数の SNSPD 素子と、ファイバアレイを高効率に結合することが可能となる実装技術を開発した。さらに、イオントラップとの集積化にむけて必要となってくる SNSPD 技術の開発を実施した。

課題推進者：三木 茂人(情報通信研究開発機構)

(2) 研究開発項目 2: 光子ネットワーク型技術

研究開発課題 1: 共振器 QED 量子ネットワーク化技術

当該年度実施内容：本研究開発課題では、光子量子ビットをネットワーク接続するための量子インターフェースを開発し、NISQ 規模の光子量子コンピュータを実現する。当該年度でナノファイバ共振器 QED 系を用いた原子の量子操作を実現した。また、量子インターネットの基本ノードの実証に向けて、2対の原子間でのエンタングルメント並列生成技術の開発を進めた。

課題推進者：青木 隆朗(早稲田大学理工学術院)

(3) 研究開発項目 3: 半導体ネットワーク型技術

研究開発課題 1: 半導体量子ビットの量子ネットワーク化技術

当該年度実施内容：課題 1 の NISQ 規模の半導体量子コンピュータの接続を目指したシリコン量子ビット間結合の開発について、水野 PJ の 2 次元アレイの大規模集積化で有効な Si 量子ビット間結合について検討を行った。その結果、世界的な動向からも、コンベヤシャトルが有力な結合方法であり、密な 2 次元シリコン量子ビットアレイを拡張する並列コンベヤシャトルの設計・試作を行った。課題 2 の光子とシリコン量子ビット間の量子インターフェースでは、受光部としての 1 次元量子ドット列と超伝導共振器の強結合の原理実証実験を、GaAs 量子ドットを使って推進した。並行して量子ドットとして通信波長光子の受光部となるゲルマニウム量子ドットの開発を推進した。歪ゲルマニウムの Γ 点での電子の g 因子を理論的に解析し、光子偏光から正孔スピンへの量子状態変換が可能な光学遷移を提案した。課題 3 の遠隔半導体量子ビット間の光接続基盤技術開発では、2 台の希釈冷凍機へのピエゾステージ導入と低温光学系の構築を完了した。昨年度構築したもつれ光源と組み合わせ、もつれ配信の実験の準備を進めた。

課題推進者：大岩 颯(大阪大学産業科学研究所)

(4) 研究開発項目 4: 超伝導ネットワーク型技術

研究開発課題1: 超伝導量子ビットの量子ネットワーク化技術

当該年度実施内容: 本研究開発課題では、超伝導量子コンピュータのネットワーク化及び大規模化に必要な量子トランスデューサーの実現を目的とし、極低温で動作するダイヤモンド中の不純物スピンを媒介としたマイクロ波-光子変換技術の確立に取り組んでいる。当該年度は、複合共振器の極低温下での動作実証をした後、ダイヤモンド結晶を挿入して、最初の光-マイクロ波変換の実験を開始し、コヒーレント状態のマイクロ波-光変換を実証した。次年度に向けて、量子メモリ動作や非古典的状态のマイクロ波-光変換を実証する準備も整いつつある。

課題推進者: 久保結丸(沖縄科学技術大学院大学)

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

- 大阪大学 量子情報・量子生命研究センターの下に構成した PM 支援体制チーム(PM 補佐、事務補佐員 2 名)と共にプロジェクトマネジメントを推進した。
- 研究開発プロジェクトの推進に関する重要事項について必要な連絡及び調整を行うため、運営会議を設置している。運営会議の構成は、PM を議長とし、参加機関等(代表機関、研究開発機関および JST)を参加者とする。当該年度は該当案件なし。
- PM 主催で課題推進者会議を半年に1回のペースで開催した。各課題推進者から進捗状況についての詳細な報告を受け、さらにプロジェクト推進に向けての意見交換を行った。また、PM から各重要事項の連絡や報告を行い、円滑なプロジェクト運営に努めた。
- 上記の課題推進者会議とは別に、各課題推進者と頻繁に情報交換を行い、研究開発状況の詳細な把握に努めた。
- 令和 6 年 9 月 27 日に大阪大学産業科学研究所の大岩顕 PI の研究室へサイトビジットを実施し、研究開発状況ならびに、半導体量子ドットの極低温実験装置、超高分解能電子線リソグラフィ装置などの大型研究設備を視察した。同日、NICT 神戸フロンティア研究センターを訪問し、センター内にある三木茂人 PI の研究室とクリーンルームへのサイトビジットを行った。クリーンルーム内では超伝導成膜装置やエッチング装置などの大型設備を見学し、SNSPD の研究開発状況を視察した。
- 令和 7 年 2 月 13 日に早稲田大学の青木隆朗 PI の研究室へサイトビジットを実施し、ナノファイバー共振器と強く結合した単一 Cs 原子を用いた光子の量子クラスター状態発生に関する研究開発の進捗状況を視察した。さらに、下井英樹 PI グループから青木隆朗 PI グループに提供された 12 チャンネル SNSPD システムの稼働状況についても確認した。

プロジェクト間連携の進捗状況把握ならびに体制強化

- 令和6年7月19日に水野プロジェクトと山本俊プロジェクト間での研究協力を加速させる目的で大岩頭 PI グループと共に日立製作所 中央研究所を訪問し、技術交流会に参加した。水野弘之 PM のグループの実験室で希釈冷凍機などの大型設備を見学したのち、討論会が実施された。水野 PM のグループからはシリコン量子コンピュータのシステム・アーキテクチャ(ハードウェアとソフトウェア)に関する発表があり、山本俊プロジェクトからは大岩頭 PI がシリコン量子ビット間接続に関する発表を行った。活発な議論や意見交換を通して、研究協力を行うに際してのそれぞれのプロジェクトでの検討課題が明確になった。
- 令和6年11月29日に大岩頭 PI が所属する大阪大学産業科学研究所に水野弘之 PM をはじめ、水野プロジェクトのメンバーを招き、技術交流会を開催した。前半の討論会では、それぞれのプロジェクトでの進捗状況が報告され、今後のプロジェクト間連携について、活発な意見交換を行った。後半は、水野プロジェクトのメンバーに大岩頭PI の実験室を見学してもらい、シリコン量子ビット開発における技術情報の共有を進めた。
- 令和6年8月7日から8月9日までの3日間、大阪大学豊中キャンパスにおいて、ムーンショット目標6プログラムで原子(イオンを含む)を量子ビットとして誤り耐性量子コンピュータの研究開発を進めているプロジェクトから若手研究者を中心にメンバーが集い、プロジェクト間連携強化に向けた内部ワークショップを開催した。参加した各プロジェクト(山本俊プロジェクト、青木プロジェクト、大森プロジェクト、高橋プロジェクト)からは最新の研究成果や技術情報に関する発表があり、連日、活発な議論や意見交換が繰り返された。参加者の数は66人に達し、プロジェクト間連携が促進され、非常に有意義なワークショップであった。

研究開発プロジェクトの展開

- 光子検出器の研究開発において、浜松ホトニクス株式会社 下井英樹 PI のグループによる SNSPD システムの内製化が進展している。SNSPD の特性向上に関する取り組みの結果、開発スピードが向上し、前年度よりも優れた特性の SNSPD が内製可能になった。この背景にはプロジェクト内連携として、三木茂人 PI のグループによるデバイス作製に関する技術協力、ならびに山本俊 PI のグループによる SNSPD 性能評価結果のフィードバックがうまく機能しており、今後もこの連携体制を維持しながら、光子検出器の研究開発を進めていく。
- プロジェクト間連携の一環として、理論の小芦プロジェクトとは目標6プログラムの開始当初より緊密な協力関係を維持している。また、各種量子ビットのネットワーク化に向けて、イオントラップの高橋プロジェクト、シリコン量子コンピュータの水野プロジェクト、樽茶プロジェクト、超伝導量子コンピュータの山本剛プロジェクト、光量子コンピュータの古澤プロジェクトとの研究連携を進めている。当該年度の顕著な成果として、紫外線近傍から赤外線近傍までの様々な可視光波長に対応した12チャンネル SNSPD システムを下井英樹 PI グループがイオントラップ用に開発し、高橋プロジェクトに提供した。一方で、その他のプロジェクトとの連携可能性も模索している。

- 国際連携強化の取り組みとして、令和6年12月3日～5日の3日間、沖縄科学技術大学院大学にて不純物スピンを用いた量子情報技術に関する国際ワークショップを開催した。組織委員長は久保結丸 PI が担当し、海外から招待した世界トップレベルの研究者とムーンショット目標6に参加する研究者が議論し、共同研究を探る機会を提供した。

(2) 研究成果の展開

- 研究開発プロジェクトにおける知的財産権の運用について協議する場として、知財運用会議を設置し、知財戦略の体制を整えた。構成員は議長：山本俊 PM、参加者：JST および知的財産権の利害関係者とする。ただし、当該年度は知財運用会議で協議すべき案件は生じなかった。
- 量子コンピュータのプラットフォームとなる物理系（超伝導、光、原子・イオン、半導体）での最新の技術動向の把握に努め、有益な情報は各課題推進者と共有した。

(3) 広報、アウトリーチ

広報活動の一環として、当該年度は下記のプレスリリースを実施した。

● プレスリリース（2件）

- ① 【タイトル】 半導体量子ビットの高精度読み出し法を開発 ～大規模半導体量子コンピュータの読み出し法の確立へ向けて～
【発表日】 令和6年10月3日
【発表者】 大岩颯 PI
【内容】 量子ビット性能によらず読み出しエラーを大幅に低減可能な新たなスピン量子ビット読み出し法を考案し、これまでの世界最高精度に匹敵する高精度読み出しを実現した。今回開発した手法はスピン量子ビットの大規模配列においても高精度を維持することが予想され、大規模半導体量子コンピュータの実現に向けた進展が期待される。
- ② 【タイトル】 光量子状態の高速生成 ——光通信技術による光量子コンピュータの加速——
【発表日】 令和6年11月1日
【発表者】 古澤 明 PM (古澤プロジェクト)、 三木 茂人 PI
【内容】 古澤プロジェクトと山本俊プロジェクトとの連携により、従来の量子光源・測定器による速度の制限を打破し、光量子状態の生成レートを1000倍程度向上させた。これにより準決定論的な定論的な状態生成が可能になり、超高速光量子コンピュータの実現が期待される。

その他の広報活動として、

- プロジェクトホームページの公開
(日本版 URL: <https://qcnqc.jp> 英語版 URL: <https://qcnqc.jp/en/>)

ホームページでは、プロジェクト概要、さらには各研究開発課題をコンパクトに分かりやすく紹介している。プロジェクトに関するプレスリリースやニュースなどを、このホームページを

通じて、タイムリーに情報発信した。また、論文や学会発表などの研究成果は定期的に更新し、このホームページから最新の成果情報を入手できるようにした。

主なアウトリーチ活動として、当該年度は誤り耐性型汎用量子コンピュータに関連した国際ワークショップ開催した。

- 国際ワークショップの開催

会議名： Impurity Spins for Quantum Information Science and Technologies (iSQIT24)

開催期間： 令和 6 年 12 月 3 日 (火)～5 日 (木)

開催場所： 沖縄科学技術大学院大学(OIST)

組織委員会 委員長： 久保 結丸 PI

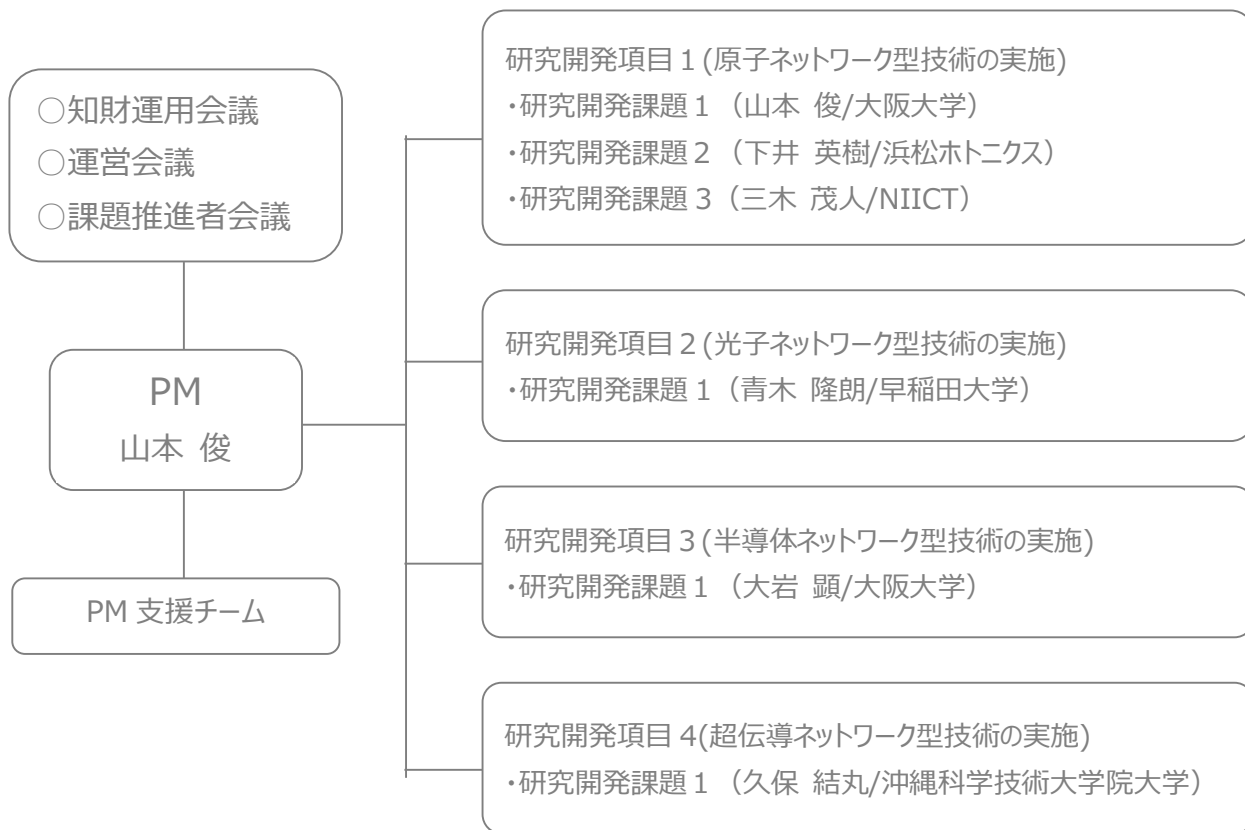
会議概要： ムーンショット目標 6 が目指している誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けて、不純物スピンを用いた量子情報技術に関する国際ワークショップである。山本俊プロジェクトが研究開発している分散型量子コンピューティングにおいて重要になる「量子通信」、「量子メモリ」、「ハイブリッド量子系」および「量子コンピューティングのための素材」のトピックに対して、世界トップレベルの海外研究者 10 名を招聘した。国内からの招待講演者 8 名のうち 5 名が目標 6 に参画している若手研究者であり、ワークショップでは最新の研究成果が発表され、活発な議論が繰り広げられた。

これ以外にも、MS6 での SNSPD 開発を紹介したショールームでのパネル展示や、高校生を対象とした半導体微細加工の体験学習、さらには一般社会人向けの講義などの様々なアウトリーチ活動を積極的に実施し、量子情報技術分野の普及に努めた。

(4) データマネジメントに関する取り組み

- データマネジメントプランを作成し、適切なデータ管理を実施した。

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

議長：山本俊 PM、 参加者：JST および協議の対象となる知的財産権に直接的または間接的に利害関係を有する研究開発機関等の一部または全部。当該年度は該当案件なし。

課題推進者会議および運営会議

議長：山本俊 PM、 参加者：参画機関（課題推進者、JST 等）

実施内容：半年に1回のペースで課題推進者会議を開催し、進捗状況の報告や各種連絡、さらにプロジェクト推進に関して意見交換を行った。重要案件については、別途運営会議を開催し、決議を行う。

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	3	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	3	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	11	4	15
口頭発表	10	12	22
ポスター発表	3	18	21
合計	24	34	58

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	9	9
(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	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
1	0	1

プレスリリース件数
2

報道件数
4

ワークショップ等、アウトリーチ件数
5