



## 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

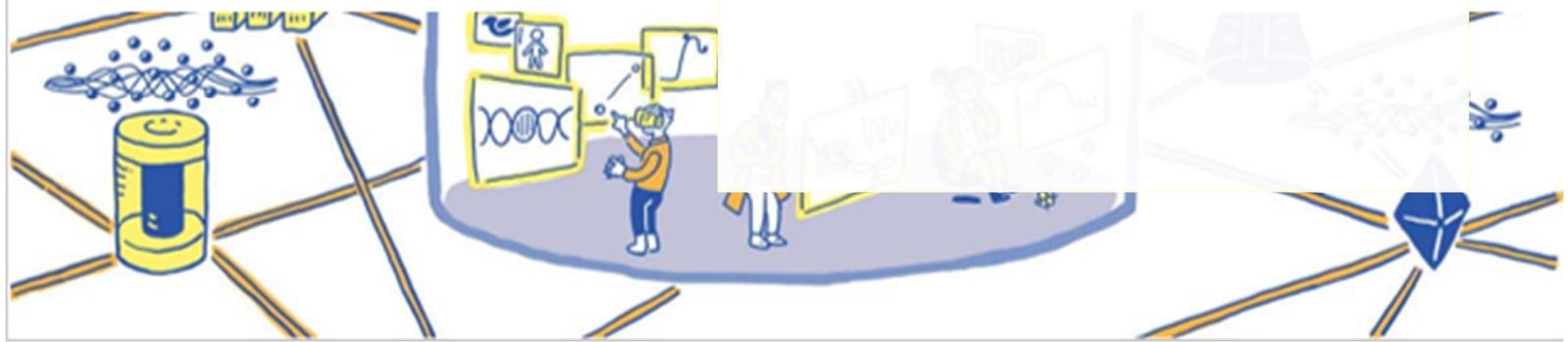
## 2023 年度版

拡張性のあるシリコン量子コンピュータ

技術の開発

**樽茶 清悟**

理化学研究所 創発物性科学研究センター



## 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

シリコン量子コンピュータは産業技術との互換性や集積性の点で優れているが、まだ大規模化への展開が見えていない。本研究では、スパースな集積化と中距離量子結合により拡張性のある単位構造を作製し、その繰り返しにより量子コンピュータを大規模化する。2030年までに大規模化に適した基盤技術を開発し、その後半導体産業と連携して開発を加速し、2050年には汎用量子コンピュータを実装する。

### (2) 研究開発プロジェクトの実施状況

本年度は、大型冷凍機や結晶成長装置などの納入された各装置の点検と整備、計画実施に必要な基盤技術の開発を実施した。主な進捗は、スパースな周期単位構造の開発に向けた、5量子ビットデバイスの作製と評価、誤り訂正に有用な読出しと状態リセット技術の開発、数十ビット規模の量子ビット実験に必要な希釈冷凍機およびエレクトロニクス の設置(項目1)、量子結合のための量子ドット列の試作と伝送方式の検証(項目2)、界面ステップ制御のために必要な水素導入条件の把握と量子ビットの直列配列スケールでの広域的評価手法の構築(項目3)、光パルス-電気パルス変換による短い電子波束の生成技術の開発、電子波束の伝搬速度制御の原理検証(項目4)である。

#### 研究開発項目1: 拡張性を有する誤り耐性 Si 量子ビットデバイス技術

スパースな周期単位構造の開発に向けて、その要素構造となる十字、T字、直列の量子ビット配列を継続し、それらの電気特性評価を開始した。前年度の試作から得られた量子ビット動作に必要な不可欠な電荷検出感度、トンネル結合の制御性、雑音特性等の知見を元に、試料作製スループットを向上させるプロセスの改善を加え、電気特性測定を通じた評価を実施した。特に直列配列に関しては、4ビット以上の量子制御実験に着手した。これらと並行して、数十ビットまでの量子ビット実験に必要な冷凍機およびエレクトロニクス等の実験設備の整備を前年度に引き続き推進した。多量子ビットの制御に必要な実験技術の共有や、バイアス誤り訂正プロトコルの開発に向けた議論を課題間およびプロジェクト間で連携して進めた。

#### 研究開発項目2: 中距離量子結合技術

シャトリングを用いた中距離結合技術の開発に向けて、基本要素となる量子ドット列の試作を完成させ、数~5量子ドット列を内包する7重量子ドット試料に関する電気電導特性の測定に着手した。積層ゲート構造開発に関し、伝送路の独立配線数を4種に削減した試料の作製手順を確立した。現在、3重量子ドット列でスピン伝送に使用する電子数の条件を整えた。また、10量子ドット列規模の実験を行う設備を選定した。

#### 研究開発項目3: 誤り耐性を満たす同位体制御 Si/SiGe 基板技術

量産用の同位体制御成膜システム、及び同位体基板の性能評価に必要な実験設備の納入整備を進め、また界面ステップ制御技術に関しては、歪み緩和促進と表面改質抑制を可能とする、局在水素の導入と脱離に対する諸条件を固めた。並行して、同位体基板における結晶傾斜効果の構造評価に関する技術拡張により、量子ビットの直列配列ス

ケールでの広域的評価手法を構築した。大面積の同位体基板評価に展開可能な測定手法の開発については、同位体基板の性能評価に必要なデバイス・プロセスの改善を進めた。

#### 研究開発項目4:新原理電子波束量子ビットの開発

光パルス-電気パルス変換による短い電子波束の生成技術の開発、電子波束量子ビットの高忠実度操作と長コヒーレンスの確認、電子波束の伝搬速度制御に関する原理検証、単一電子波束の読み出しに関する研究に引き続き取り組んだ。短い電子波束の生成に関しては、光電流の基本的な性質に関するテスト実験を行い、同生成実験を行う冷凍機内の構造について検討を進めた。電子波束量子ビットの操作に関しては、冷凍機や制御系の立ち上げ・開発と並行して、パルス生成器の製作、既存装置を用いた波束制御の実験、電子波束を用いた新たな量子演算スキームの設計に取り組んだ。電子波束の伝搬速度制御に関しては、その原理検証を完了させた。電子波束の読み出しに関しては、実験セットアップの整備と高感度な単一電子波束の検出が見込める試料構造の設計を行った。

### (3) プロジェクトマネジメントの実施状況

研究開発プロジェクトのガバナンス： 代表機関の協力を受けて、PM によるプロジェクトマネジメントを継続した。PM、課題推進者による定例の報告会のほか、適宜運営会議を実施し、課題推進者の研究進捗、装置の整備、問題の対策、研究方針や体制などの状況を把握した。

研究成果の展開： 課題推進者に知財戦略の立案を奨励した。現在2件の特許出願が完了した。PMと課題推進者間で内外の研究動向について情報交換を行った。2023年10月31日～11月2日に、多くの課題推進者とプロジェクトメンバーの協力により、最先端のシリコン量子コンピュータの国際会議、Silicon Quantum Electronics Workshop 2023 (SiQEW2023) を主催した。結果的に、これまで最大規模の会議となり、本プロジェクトの成果の発信と情報の収集、交換の絶好の機会となった。

広報、アウトリーチ： ホームページ、YouTube、ラボツアーなど時宜をとらえて活動に努めた。また、国際広報誌や Nature 特集記事による広報活動を行った。

データマネジメントに関する取り組み： マネージメントプランに沿って、適切にデータ管理を行っている。

## 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:拡張性を有する誤り耐性 Si 量子ビットデバイス技術

#### 研究開発課題1:拡張性を有する誤り耐性 Si 量子ビットデバイス技術の開発

当該年度実施内容： スパースな周期単位構造の開発に向けて、その要素構造となる十字、T 字、直列の量子ビット配列の試作を継続し、電気特性の評価に着手した。極低温での電気特性評価によって明らかになった量子ビット測定の感度、トンネル結合の制御性、ゲート電極の歩留まりに関する知見を試料構造および試料作製プロセスにフィードバックすることで、試料品質の向上を図った。Si/SiGe 量子井戸基板に直列5量子ビット

配列を作製し、5つの量子ビット全てに対して、初期化、読み出し、ゲート制御を実装し、それらの性能を定量的に評価した。特にすべての隣接する量子ビット間で2ビットゲート制御を実証したことは、大規模化の実現可能性を示唆する重要な成果である。さらに産業用ラインで製造された Si/SiGe 量子ビット試料の提供を受け、量子ビット制御実験を開始した。

また、隣接する二つの量子ビットにおいて、パウリスピン閉塞現象を利用することにより、2量子ビットのパリティ読み出しを  $1\mu\text{s}$  以内の時間に 99%以上の忠実度で実行することに成功した。また、スピン読み出しの結果をリアルタイムに処理し、ゲート制御パルスにフィードバックすることでアクティブリセット操作を実証した。これらの技術を組み合わせることで量子誤り訂正を実現することが可能であると見込まれる。これと並行して数十ビット規模の量子ビット実験に必要な希釈冷凍機およびエレクトロニクス等の実験設備の導入と準備を進めており、これらの技術情報を課題間で共有した。また、プロジェクト間連携により、量子ビット制御実験や、シリコン量子ビット系に適したバイアス誤り訂正プロトコルの開発を進めた。

課題推進者: 中島 峻(理化学研究所)

## (2) 研究開発項目2: 中距離量子結合技術

### 研究開発課題1: 中距離量子結合技術の開発

当該年度実施内容: 量子ドット列を用いた伝送路技術の開発に向け、周期ゲート配列構造を適用した量子ドット列デバイスの作製プロセスを確立し、同時に、5量子ドットを含む7重量子ドットの検証用のデバイスを完成させ、その中で3重量子ドットの電荷状態をスピン伝送条件に調整した。Al ゲート電極の積層配線の開発を継続し、歩留まりを向上させ、一貫したプロセスを確立し、10 量子ドット列相当の距離を持つ伝送路を設計した。伝送路を評価するためスピン量子ビットの制御に着手し、導入した設備を用いて各制御要素を確認中である。伝送の具体的な方式として、スピン鎖方式や、コンベイヤーモード方式に共通する断熱操作の物理に関連して、現実の環境下で速度と精度を向上させることが可能で、99%以上の精度が見込めるショートカット法の原理検証を行った。スピンコヒーレンスの検証のため、冷凍機の設置が完了し、スピン制御のための最低限の高周波測定系を構築した。シリコン量子ビットデバイスに関して、imec からの評価試料の提供を受け単一電荷検出を行い、プロジェクト内でその知見を活かした新規試料作製の議論が開始された。

課題推進者:藤田 高史(大阪大学)

(3) 研究開発項目3:誤り耐性を満たす同位体制御 Si/SiGe 基板技術

研究開発課題1:誤り耐性を満たす同位体制御 Si/SiGe 基板技術の開発

当該年度実施内容:今年度は、構造評価を主体とした効率的な軽元素導入の条件探索と界面ステップ制御の原理検証を開始した。昨年度までに構築した軽元素評価手法を基に、SiGe 基板からの水素脱離条件を決定し、また圧縮歪み層を有する SiGe 薄膜中への局在水素の導入試験を進め、水素導入に伴う再表面層のエッチング効果を抑制しながら、歪み緩和の促進が可能となる水素導入条件を見出した。界面ステップ制御の原理実証の初手として、今年度はその構造的指標となる微小な結晶傾斜角分布の評価手法を発展させ、同位体基板に量子ビットを配列実装する広範囲で可視化する技術へと拡張した。また、大面積基板にも対応可能な同位体基板のプロセス・評価技術については、汎用的なゲート構造のサイズで高い電界制御性を有するスプリット型構造を基本として、電磁界ソルバーによる材料デバイス構造の設計と最適化を進めた。またゲート容量比の違いを利用した層間絶縁膜の材料と最適膜厚の選定を行った。デバイス実装側のプロセス改善としては、当該年度に導入したプロセス設備を利用し、良好なオーミック形成条件の検討を基に、移動度性能評価用のデバイス構造と重なり配線技術による1次元配列のゲート構造の試作と評価を進めた。

課題推進者:宮本 聡(名古屋大学)

(4) 研究開発項目4:新原理電子波束量子ビットの開発

研究開発課題1:ピコ秒電子波束の生成と電子波束量子ビットの高忠実度制御

当該年度実施内容:オンデマンド電子波束の生成技術開発に関しては、実験に使用する高速レーザーの導入と並行して、既存の装置を用いた光電流のテスト実験を行った。また、次年度に導入する冷凍機の試料周りの構造やPCB基板の検討を行った。新たな試料の設計も並行して行った。電子波束量子ビットの高忠実度操作技術開発に関しては、東京大学で共通利用(理研所外利用)する希釈冷凍機を導入し、立ち上げを行った。また、既存の冷凍機を用いて、引き続き測定・RF制御系の開発を行った。具体的には、周波数コム的手法を用いたプログラマブルなRFパルス生成器を製作した。また、既存電子波束量子ビットの制御実験にも継続して取り組んだ。更に、time-bin量子ビットのまま任意の量子操作を実現し、長距離伝

搬と組み合わせることができる新しい試料構造を検討し、その設計を行った。

課題推進者: 山本 倫久(理化学研究所、東京大学)

研究開発課題2: マイクロ波電子波束の量子制御と読み出し

当該年度実施内容: Which-path 量子ビットと time-bin 量子ビットの間の相互変換の実証実験に向け、山本 PI のグループと密接に連携を取りながら取り組む予定であったが、山本 PI は 2023 年 7 月に東京大学に着任、高田 PI は 2023 年 10 月に大阪大学に着任するなどの動きがあり、それに伴う実験セットアップの移設や新たな準備が発生したため、which-path 量子ビットと time-in 量子ビットの間の相互変換の実証実験に関しては、試料構造の検討を行うにとどまった。しかし、すでに本実験の鍵となる電子波束の遅延回路や量子干渉計に関しては昨年度の実験から基盤となる知見は有しており、試料作製、及び実験を実施すれば良い状況にある。試料作製については山本 PI のグループにすでに確立した基盤があり、実験についてもセットアップの準備が完了しつつある状況にある。そのため、この研究の遅れに関しては、両 PI が大学にポジションに付いたことによって、今後プロジェクトへの参加メンバーが増える見込みであり、研究の速度が見込める状況にあるため、十分に取り返していくことが可能であると考えている。

また、当該年度は昨年度の実験で得られた知見である局所的な閉じ込め構造を用いた電子波束の速度制御に関し、論文化に向けてより定量的な議論を行うための追加実験を行った。追加実験で得られたデータも合わせて詳細な解析を行った結果、局所的な閉じ込め構造を用いた電子波束の速度制御を行う上で満たすべきナノ構造の長さスケールと電子波束の空間的な長さスケール間の条件について明らかにした。これらの成果については現在論文を執筆中である。

また、単一電子波束の読み出し技術開発において、令和6年度に実施予定の実験に向けた実験セットアップの整備を行うとともに高感度な単一電子波束の検出が見込める試料構造の設計を行った。当該年度の目標であった試料作製までは完了できなかったが、一方で、試料作製にかかる期間は一か月程度であり、当初から予定していた実験セットアップ準備の完了時期(2024年7月頃)には完了する見込みである。そのため、研究計画は大きな遅れはなく推移している。

課題推進者: 高田 真太郎(大阪大学)

### 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

- ・ 代表機関である理化学研究所において、PM 支援チームとして、PM 事務支援のための事務処理アシスタントに加え、研究の管理運営をサポートする PM 補佐として、研究支援専門職を採用した。契約や支払事務に関しては理化学研究所の関連部署のサポートを受けながら、研究計画、予算計画の調整等、関連事項の連絡や問い合わせ窓口としての役割を担うなど、PM 活動の支援体制を構築した。
- ・ 機密情報を含むファイルの共有において、セキュリティの高いクラウドストレージである Box を利用している。プロジェクトメンバーの外部発表やアウトリーチ活動等、成果報告関連様式や発表資料は Box リンクにアップロードされ、PM 承認後に JST へ提出している。Box のリレー機能を活用した受理連絡メールの自動送信を含め、一連の成果をとりまとめる体制を構築した。
- ・ 重要事項の連絡・調整に関しては運営会議を開催し、協議を行っている。令和 5 年 5 月の運営会議では、東京大学が新たに本プロジェクトに参加する旨、PM から課題推進者に報告した。6 月の運営会議では、中間評価会の準備について報告内容を確認した。また知財戦略、広報・アウトリーチ活動について意見交換を行い、今年度のサイトビジットの内容を決定した。令和 6 年 1 月の運営会議では、新たな研究開発機関として、次年度より神戸大学が加わる旨報告した。またステージゲート審査や今後の研究計画について討論を行った。
- ・ 2 ヶ月に一度、定期的に全体会議をオンラインで開催し、研究開発の進捗や予算執行状況などを把握するとともに、適宜対応策を議論し、知財戦略、広報やアウトリーチについて意見交換を行った。大型装置等を導入後の稼働状況等を把握するため、今年度は理化学研究所と大阪大学にてサイトビジットを実施した。

## 研究開発プロジェクトの展開

- ・ 昨年度に続き、各研究課題推進者の計画の全体計画の中での位置づけ、実現性などについて確認し、必要な手直しについて議論を行った。
- ・ 各研究課題推進者とも、新規に導入された実験装置や技術の立ち上げを行っている。これと並行して、課題推進者間での技術共有、技術討論を積極的に進めた。
- ・ 新たな研究機関として東京大学が加わり、さらに 2024 年度より神戸大学を加えることを決定し、本プロジェクトの研究開発体制を整えた。特に研究開発項目 1「拡張性を有する誤り耐性 Si 量子ビットデバイス技術」では、新たな研究開発課題「集積 Si 量子ビットに向けた制御信号配線実装技術の開発」を設定し、2024 年度に新規課題推進者(三木拓司氏、神戸大学)を追加することとした。低温電子回路の専門家が加わることで、極低温環境における構造評価を含めたアプローチによる当該研究開発項目の強化が見込まれる。
- ・ 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り組みとして、国際会議 SiQEW2023 の事務局として、会場準備や会期中の運営を担当した。2023 年 10 月 31 日～11 月 2 日までの 3 日間で、22カ国、310 名の参加者が一同に集い、シリコン量子コンピュータの最新の研究動向を知ることができた。また国内外の研究者と広く情報交換し、競合グループの状況把握に努めた。

- ・ 本プロジェクトでは、企業連携を重視していることから、当該企業と継続的に技術打ち合わせを行っている。

## (2) 研究成果の展開

- ・ 「電子波束を用いた量子コンピュータの構成方法」に関する特許出願が完了した。また「一次元的に拡張可能なシリコン量子コンピュータの試料構造」に関する特許出願が完了した。引き続き、成果や進捗状況を踏まえて、デバイスレベル、方式レベルでの知財戦略を立てるように各課題推進者に周知した。
- ・ 論文の掲載に合わせて4件のプレスリリースを行った。このほか受賞や報道などを含めた研究成果は、プロジェクトのホームページにおいて公開している。
- ・ 本プロジェクトの成果を発信するため、国内外の関連会議に積極的に出席した。また国内外の研究者と情報交換を行うことにより知見を広げ、産業と連携可能な量子コンピュータの実現に向けて、基本となる量子ビットデバイスの特性評価や問題把握に努めた。

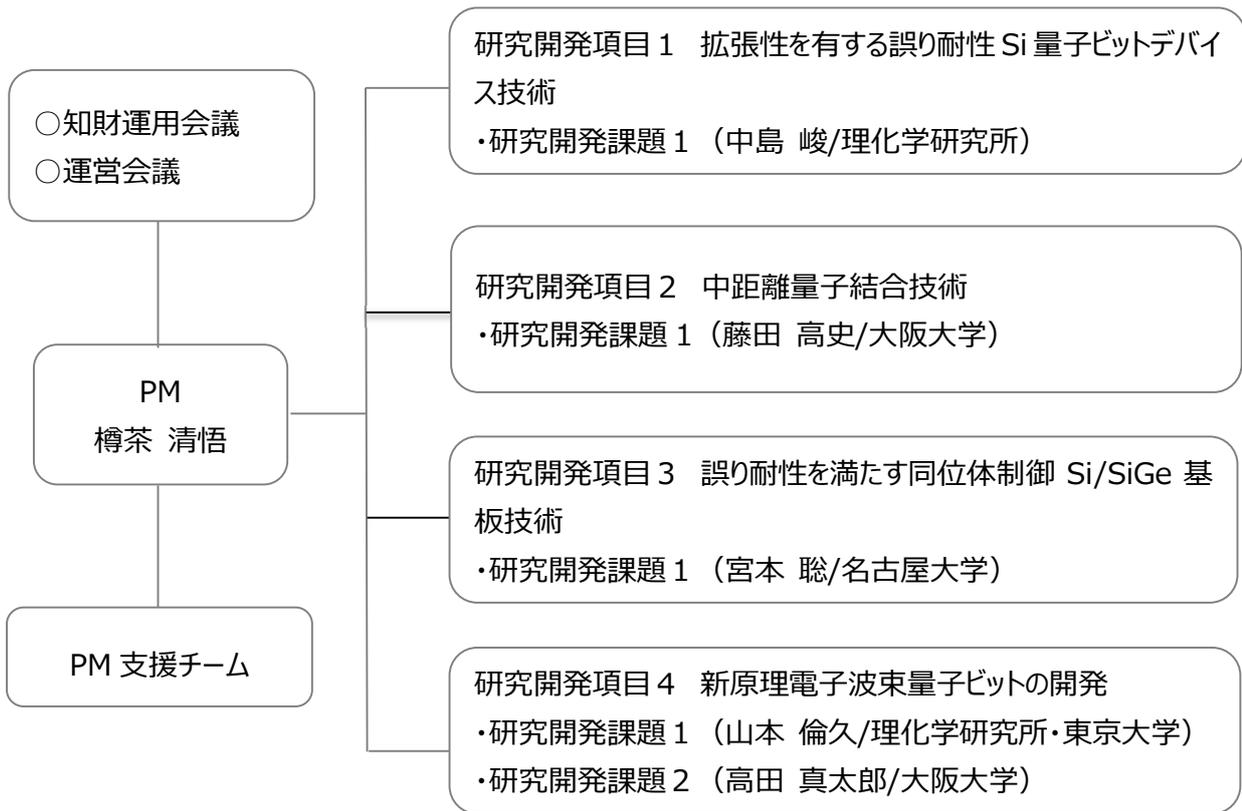
## (3) 広報、アウトリーチ

- ・ プロジェクトのホームページを立ち上げ、2023年8月より運用を開始した。各研究機関において、ラボツアーや科学技術イベントを実施し、広報活動を行った。
- ・ 代表機関においては、プロジェクトの紹介動画コンテンツ「半導体で量子コンピュータをつくろう」を制作し、一般公開やYouTubeにおいて配信した。
- ・ 国際広報誌 RIKEN Research へ研究成果論文「Feedback system could fix quantum-computing errors」の紹介記事を掲載、本記事は全世界に無料配信されている。
- ・ Nature 誌の特集記事“Focal Point on Quantum computing in Japan”の中で、水野プロジェクト(日立製作所)とともに、半導体量子コンピュータ分野の研究開発の進捗や今後のビジョンについて紹介した。

## (4) データマネジメントに関する取り組み

- ・ 各種実験データ、解析データ、及び量子アルゴリズム実行データなどに関して、マネジメントプランに沿って、適切なデータ管理を行った。また、公開非公開の内容に関して、適切に管理した。

#### 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 構成機関と実施内容

構成機関：理化学研究所、大阪大学、名古屋大学、東京大学

実施内容：まず、各研究機関に対して、知財に関する共同研究契約を締結する。下記運営会議において知財戦略を協議し、方針を定める。本研究開発では、外国研究機関との共同研究を予定しており、JST とも相談しながら知財に関する共同研究契約を締結する。

##### 運営会議 実施内容

課題推進者、研究参加者を対象に定期的に全体会議を開催し、各課題推進者の研究状況を把握するとともに、内外の研究状況について情報を共有する。同時に課題推進者のみを対象とする運営会議を開催し、予算や研究の方向性、また、各種会議の企画、広報活動などについて相談する。

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

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	2	16	18
口頭発表	3	3	6
ポスター発表	5	12	17
合計	10	31	41

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	7	7
(うち、査読有)	0	7	7

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	1	0	1
その他	0	0	0
合計	1	0	1

受賞件数		
国内	国際	総数
5	1	6

プレスリリース件数
4

報道件数
7

ワークショップ等、アウトリーチ件数
12