



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

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



研究開発プロジェクト概要

光、原子、半導体等の量子コンピュータハードウェアをネットワーク化するための要素技術を開発し、複数の中小規模量子コンピュータを接続した「ネットワーク型量子コンピュータ」を構築します。それにより、2050年には、さらなる大規模化を進め、汎用的な量子コンピュータの実現を目指します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/66_yamamoto.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
山本 俊	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授
下井 英樹	浜松ホトニクス株式会社 電子管事業部	グループ長
三木 茂人	情報通信研究機構 未来 ICT 研究所	主任研究員
青木 隆朗	早稲田大学 理工学術院	教授
大岩 顕	大阪大学 産業科学研究所	教授
久保 結丸	沖縄科学技術大学院大学 サイエンス・テクノロジー・グループ	サイエンス・テクノロジー・アソシエイト

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。本年度は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、研究を推進した。当初予見しなかった研究成果も見られるなど、順調に研究が進展した。

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。令和3年度ではプログラム開始から5年後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用いる原子アレイ系のためのトラップビームの生成と、冷却原子系の立ち上げを行った。当該年度は原子アレイを実現し、原子アレイからの単一光子生成および単一光子検出システムの検証を行った。また、原子アレイ上の量子ビット操作のための装置の立ち上げを行った。光子のルーティングに関しては、古典光でのルーティング動作の実証を行い、論文執筆中である。さらに、ルーティング技術の基礎となっていた光子の周波数多重化が汎用量子コンピュータの新手法へと発展し、Physical Review Letters 誌に論文掲載が決まった。

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: 大規模の量子コンピュータをネットワーク化するためには多重化された超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)の実現が重要となる。本研究開発課題では10年後に小中規模で想定される約100ノードへの対応を目指して、多重化されたSNSPDシステムを開発している。開発成果物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にも提供する。本年度は当研究開発機

関(浜松ホトニクス株式会社)での内製化のため、超伝導薄膜の成膜条件など製造プロセスの条件出しを行った。これと並行して、山本俊 PM の研究開発項目への提供に向けて、世界トップレベルの 30 チャンネル規模の SNSPD 冷凍システムの設計、作製を実施した。開発に際しては、前年度に作製・提供した 10 チャンネル規模の SNSPD 冷凍システムに対する評価のフィードバックを受けることで、SNSPD の動作最適化のための改良に取り組んだ。

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 における暗計数は、室温からの黒体輻射光や物理系操作に起因する励起光などの外的要因が支配的であるため、これらの背景光を排除することのできる技術開発を実施し、暗計数率の低下を図った。また、システムの多チャンネル化に向けて、SNSPD アレイ作製技術の開発および、極低温信号多重化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。当該年度では令和 5 年度のマイルストーンである 1 次元光子量子ビット列生成の原理検証に向けて、ナノファイバー共振器 QED 系における単一光子の生成技術を開発した。また、量子インターネットの基本ノードの実証に向けて、原子と光子のエンタングルメント生成技術を開発した。

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: 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、当該年度は 1 次元量子ドットアレイによるスピン鎖法(断熱量子状態転写)と超伝導共振器による結合に重点を置いて、素子設計・試作と動作確認を推進してきた。特に断熱量子状態転写の高速化につながることを期待される断熱ショートカットをスピン量子ビットで初めて実現した。光子とシリコン量子ビットの接続では、Ge 量子ドットの作製と光子偏光か

ら正孔スピンへの量子状態変換の検討を行った。さらにシリコン量子ビットへ超伝導共振器を介して接続するために、超伝導共振器と単一スピンとの強結合の実現に向け、高速かつ高忠実度のスピン操作の開発を行った。また遠隔半導体量子ビット間の光接続基盤技術開発では、今年度導入した希釈冷凍機用の極低温ピエゾステージシステムともつれ光子対源の構築に着手した。

課題推進者:大岩 顕(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:本研究開発課題においては、超伝導量子コンピュータのネットワーク化技術に向けて極低温で動作する量子トランスデューサーをダイヤモンド結晶中の不純物スピンを用いて開発する。当該年度においては、その実現に必須な要素技術である光共振器の低温動作を実証し、さらにマイクロ波を組み込む複合共振器デバイスの設計と試作も行った。並行して周波数可変超伝導共振器の考案および設計・試作を開始した。

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(センター長 北川勝浩)の下に構成したPM支援体制チーム(PM補佐、事務補佐および事務補佐員3名)と共に進捗状況の把握に努めた。
- 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1~2か月に1回のペースで計7回開催した。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。

研究開発プロジェクトの展開

- 当該年度も引き続き研究体制を早期に整えることに注力した。特に、PM支援チームの事務補佐員を2名増員し、プロジェクト推進の支援体制の強化を図った。
- プロジェクト内の研究連携を促進させるため、プロジェクトへの参加メンバーを対象とした研究会をオンラインで開催した。プロジェクト内のチームから数名発表し、メンバー間で活発な議論を行うことで、量子技術関連の知識を共有し、さらにはプロジェクト

の目標達成を目指した。当該年度は令和4年5月10日、6月14日、7月12日の計3回開催し、毎回20名ほどの参加者があった。

- 国際連携強化の取り組みとして、久保結丸 PI を令和4年11月14日より、ヘルシンキ(フィンランド)、ワルシャワ(ポーランド)およびロンドン(イギリス)に短期派遣し、訪問先の各研究機関で共同研究の実現可能性について議論した。一方で、山本俊 PI のチームから研究参加者1名を令和4年9月20日より米国ペンシルベニア州立大学に短期派遣し、本研究開発プロジェクトで重要な量子インターフェースについての共同研究を推進させた。

(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。当該年度は令和5年2月14日に知財運用会議を開催した。会議前半では大阪大学 QIQB の町田尚子特任准教授に「量子コンピューティング及びその関連技術の特許出願動向について」と題した講演を依頼し、その後、講演で得た知見をもとに、関係者間で本研究開発プロジェクトにおける知的財産権の運用および知財戦略についての討論を行った。

(3) 広報、アウトリーチ

- プレスリリース(3件)
 - ① **【タイトル】**量子コンピュータに向けたハイエンドな国産超伝導ナノワイヤ単一光子検出器システムのフィールド実証に成功
【発表日】令和4年9月16日
【発表者】山本俊 PM、下井英樹(課題推進者)、小玉剛史(研究参加者)、三木茂人(課題推進者)
【内容】本研究開発プロジェクトのもと、浜松ホトニクス株式会社、NICT および大阪大学が共同で、10チャンネル規模の超伝導光子検出器システムを試作、検証を行い、国産化への道筋をつけた。
 - ② **【タイトル】**量子光のパルス波形を自在に制御する手法を開発 ―光量子コンピュータの基幹となる「究極の量子光源」実現へ―
【発表日】令和4年10月29日
【発表者】東京大学 高瀬 寛助教、古澤 明教授(古澤プロジェクト PM)、NICT 三木 茂人(山本俊プロジェクト 課題推進者)、NTT 橋本俊和(古澤プロジェクト 課題推進者)
【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、あらゆる量子光を所望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。
 - ③ **【タイトル】**半導体量子ビット 2次元配列の高精度制御設計手法を開発 ～半導体量子コンピュータの実現に向けて～

【発表日】令和4年12月13日

【発表者】九州大学、大阪大学 木山治樹(研究参加者)、大阪大学 中村駿吾(研究参加者)、大阪大学 大岩颯(課題推進者)

【内容】本研究開発プロジェクトのもと、量子ドット2次元配列における電子スピン制御の実現に向けて、微小磁石が発生する磁場分布の数値シミュレーションにより、2行2列量子ドット配列用の微小磁石形状設計手法を開発した。

● 量子技術の普及を目指した非専門家向けアウトリーチ(3件)

① 【活動】 国立国会図書館 国会議員向け政策セミナー

【開催日】 令和4年5月24日 (オンライン開催)

【実施者】 山本俊 PM

【内容】 令和4年3月30日に国立国会図書館より発行された量子情報技術に関する調査報告書の代表執筆者として、国会議員向けに量子情報技術に関するレビュー講演を行った。報告書にまとめられている量子情報技術の概要、研究開発動向、社会実装の課題といった様々なトピックについて、分かりやすく説明した。

② 【活動】 大阪大学基礎工学部 第43回公開講座「未来を拓く先端科学技術」での講演

【配信日】 令和4年8月3日 (オンライン開催)

【実施者】 山本俊 PM

【内容】 大阪大学基礎工学部の公開講座にて、非専門家を対象として、「量子ネットワークや量子コンピュータなどの量子情報技術」というタイトルのセミナー講演を行った。量子ネットワークや量子コンピュータについて解説しながら、量子2.0技術を取り巻く環境を紹介し、さらに本プロジェクトで取り組んでいる研究開発課題についても説明を行った。

③ 【活動】 OIST サイエンスフェスタ2022での研究と実験室紹介

【開催日】 令和4年11月12日開催(ハイブリッド開催:OIST、オンライン)

【実施者】 久保結丸(課題推進者)

【内容】 非専門家の聴衆を対象としたOISTサイエンスフェスタの企画「オンラインツアー OIST ラボを探検しよう」において、本プロジェクトで取り組んでいる量子コンピュータの研究開発について、実験室からの配信(バーチャルラボツアー)で分かりやすく紹介した。

● ムーンショット目標6達成を担う人材育成に向けたアウトリーチ(2件)

① 【活動】 JST スーパーサイエンスハイスクール事業

武庫川女子大学附属高等学校での授業

【開催日】 令和4年5月28日 (オンライン開催)

【実施者】 三木茂人(課題推進者)

【内容】 昨年に引き続き、当該年度も高校生を対象としてオンラインで出張授業を行った。授業では超伝導の不思議な現象を分かりやすく解説し、さらに、超伝

導を応用して「絶対に破ることのできない暗号通信」や「スーパーコンピュータを上回る新しい量子コンピュータ」などの未来技術を実現しようとする最先端の研究開発を紹介した。

② 【活動】 大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センター「ナノ高度学際教育研究訓練プログラム」社会人教育プログラム

【開催日】 令和5年1月17日（オンライン開催）

【実施者】 大岩 颯（課題推進者）

【内容】 実社会で活躍中の研究者・技術者を対象として、講義と短期実習を通じてナノサイエンス・ナノテクノロジーの現状を理解し、次世代産業に役立つ学際的知識と幅広い実践能力を身につけるための高度教育プログラムのもと、「量子ビット・量子コンピュータ」と題した講義を行った。

● その他のアウトリーチとして(1件)

【活動】 SANKEN Online Advanced Lectures from Science to Industry

2022年度秋冬学期バーチャル留学プログラム科目国際交流特別講義

【開催日】 令和4年10月14日（オンライン開催）

【実施者】 大岩 颯（課題推進者）

【内容】 海外大学の講義をオンラインで受講する大阪大学のバーチャル留学プログラムにおいて、物理を非専門とする学生に対して、英語による特別講義を行った。半導体の基礎科学から最新のナノテクノロジーまで分かりやすく解説した。

● プロジェクトホームページの作成

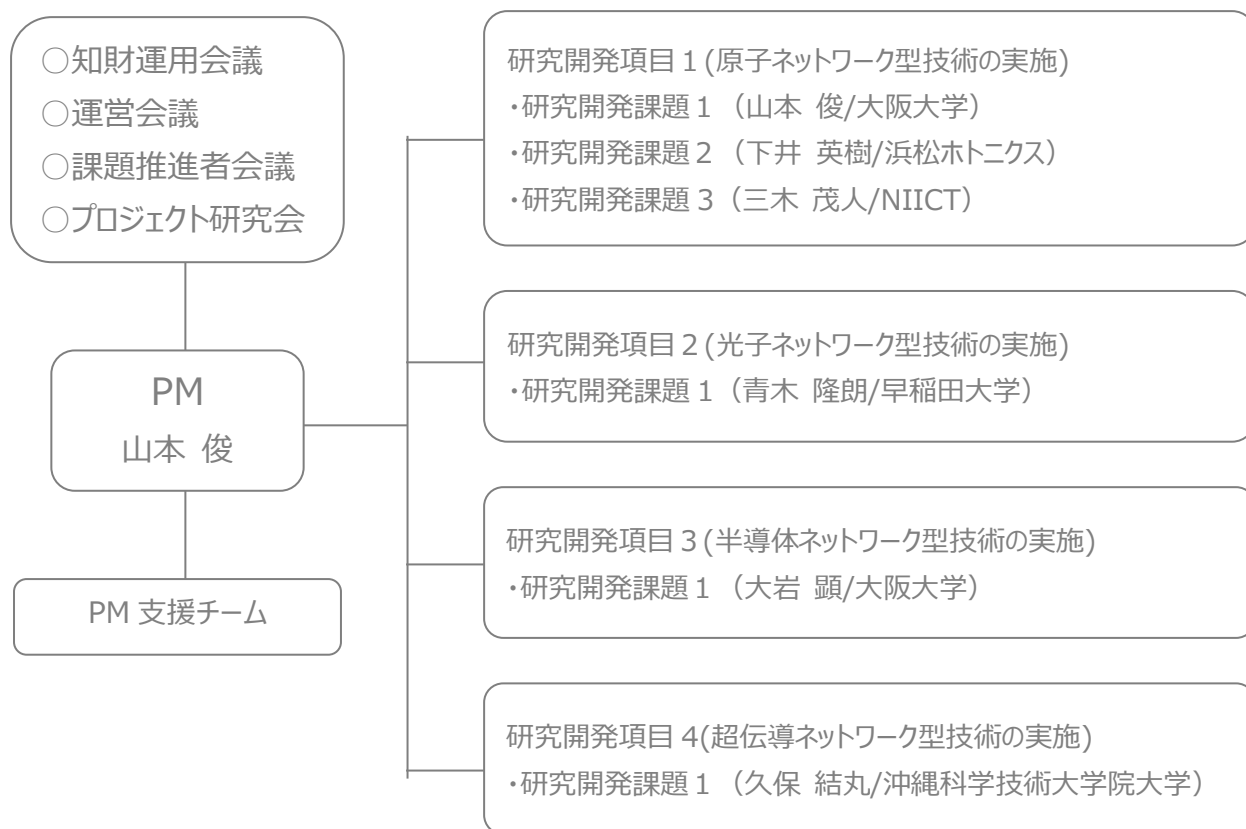
広報活動の一環として、本プロジェクトのホームページを令和5年3月14日に公開した。(URL:<https://qcnqc.jp>)

今後はこのホームページを利用して、プロジェクトに関するタイムリーな情報提供を行っていく。

(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、適切なデータ管理に務めた。

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、利害関係者

実施内容：令和 5 年 2 月 14 日に開催し、会議前半では大阪大学 QIQB の町田尚子特任准教授に「量子コンピューティング及びその関連技術の特許出願動向について」と題した講演を依頼した。その後、講演で得た知見をもとに、関係者間で研究開発プロジェクトにおける知的財産権の運用および知財戦略について討論した。

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：1～2 か月に 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。

プロジェクト研究会

参加者：山本俊 PM、課題推進者、プロジェクト参加者、関係者

実施内容：プロジェクトの参加メンバーを対象とした研究会であり、3～4 か月に一回のペースで開催した。プロジェクト内のチームから数名発表し、メンバー間で活発な議論を行うことで、量子技術関連の知識を共有し、プロジェクトの目標達成を目指す。

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	2	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	1	2	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	13	9	22
口頭発表	7	10	17
ポスター発表	2	1	3
合計	22	20	42

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	1	0	1
その他	0	0	0
合計	3	0	3

受賞件数		
国内	国際	総数
1	0	1

プレスリリース件数
3

報道件数
3

ワークショップ等、アウトリーチ件数
6