



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

量子計算網構築のための

量子インターフェース開発

小坂 英男

横浜国立大学 大学院工学研究院／
先端科学高等研究院



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

分散型の大規模量子コンピュータネットワークの実現に必要な量子通信ネットワークの研究開発を行う。計算用量子ビットとして、既に実用化が始まっている超伝導量子ビットだけでなく、基礎研究の段階にあるシリコン、イオン、光量子などを含めた異種量子ビット間でのハイブリッド量子接続を可能とする量子インターフェースの要素技術を開発する。具体的には、量子誤り耐性を有するダイヤモンド量子メモリと共振器増強効果を有するオプトメカニカル結晶を融合することで、忠実度と効率を両立したハイブリッド量子トランスデューサを開発し、マイクロ波光子と通信用光子間の量子インターフェースを実現することで通信用光子を介した計算用量子ビット間の量子ネットワーク接続を可能とする。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

3つの研究開発項目における計 10 個の研究開発課題について下記の研究開発を実施した。全体として順調に推移しており、一部では目標を大きく上回る成果も出ている。

○研究開発項目1:ダイヤモンド量子メモリ

- 研究開発課題1:ダイヤモンド量子メモリの研究開発(課題推進者:小坂 英男(国立大学法人横浜国立大学))
 - 通信用光子から量子メモリへのヘラルド付き量子メディア変換
 - 量子メモリの多ビット化による量子誤り訂正
 - 通信用光子を介した量子メモリ間の量子もつれ生成
 - マイクロ波による量子メモリの量子操作
 - レーザー照射によるダイヤモンド中の色中心の生成
- 研究開発課題2:ダイヤモンド量子構造の研究開発(課題推進者:加藤 宙光(国立研究開発法人産業技術総合研究所))
 - フォトニック結晶、フォノニック結晶の作製
 - ダイヤモンドハイブリッド実装技術の検討
- 研究開発課題3:ダイヤモンド量子結晶の研究開発(課題推進者:寺地 徳之(国立研究開発法人物質・材料研究機構))
 - ダイヤモンド高純度結晶の作製
- 研究開発課題4:ダイヤモンド色中心の研究開発(課題推進者:小野田 忍(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構))
 - ダイヤモンド色中心の生成
 - ダイヤモンド色中心の生成位置の制御
 - ダイヤモンド色中心の電荷安定性向上

○研究開発項目2:オプトメカニカル共振器

- 研究開発課題1:フォトニック結晶光共振器の研究開発(課題推進者:岩本 敏(国立大学法人東京大学))
 - ダイヤモンドフォトニック結晶共振器による光子と量子メモリの結合増強
 - ダイヤモンドハイブリッド実装技術の検討
- 研究開発課題2:フォトニック結晶光共振器実装技術開発(課題推進者:馬場 俊彦

(国立大学法人横浜国立大学))

- 結合構造設計
 - ダイヤモンドフォトリック結晶共振器による光子と量子メモリの結合増強
 - ダイヤモンドハイブリッド実装技術の検討
 - 研究開発課題3:フォトリック結晶音共振器の研究開発(課題推進者:野村 政宏(国立大学法人東京大学))
 - ダイヤモンドフォトリック結晶共振器の実験的評価
 - ダイヤモンドフォトリック結晶共振器による音子と量子メモリの結合増強評価
- 研究開発項目3:ピエゾマイクロ波共振器
- 研究開発課題1:ピエゾマイクロ波共振器の研究開発(課題推進者:小坂 英男(国立大学法人横浜国立大学))
 - マイクロ波から音波への変換
 - マイクロ波による量子メモリの量子操作
 - 研究開発課題2:量子制御電子集積回路の研究開発(課題推進者:吉川 信行(国立大学法人横浜国立大学))
 - ダイヤモンド量子インターフェース用量子制御電子集積回路の開発
 - 研究開発課題3:量子インターフェースの理論研究(課題推進者:越野 和樹(国立大学法人東京科学大学))
 - 超伝導量子ビット-光子量子ビット間インターフェースの理論

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

代表機関である横浜国立大学の先端科学高等研究院(以下 IAS と略記)に小坂 PM がセンター長を務める量子情報研究センター(以下 QIC と略記)が設置されている。IAS 及び QIC に関わる多くの職員が、課題推進者の研究開発の進捗管理、研究開発機関間の連携、労務管理等の様々な PM 活動を支援している。令和6年度は代表的なものとして下記の活動を支援した。

- 課題推進者会議を毎月 1 回程度(計9回)90~120 分オンラインで開催した。
- 海外の研究機関との連携を進め、令和6年1月のデルフト工科大学との協力覚書(Memorandum of Collaboration, MOC)に続いて、7月にシュトゥットガルト大学との MOC、12 月にウルム大学との基本合意書(Memorandum of Understanding, MOU)を締結した。また、国際連携および研究者間の交流を強化すべく、日独の大学・研究機関(QST、横浜国立大学、東京工業大学(現東京科学大学)、京都大学、AIST、NIMS、OIST、筑波大学、ウルム大学、ザールラント大学、ヨハネス・グーテンベルク大学マインツ、シュトゥットガルト大学)が共同で JST 先端国際共同研究推進事業(ASPIRE)提案を行い、令和 7 年 2 月に採択された。
- 海外と並行して国内の研究機関との連携も進めており、情報通信研究機構および東京大学生産技術研究所との契約を締結した。
- 量子科学技術研究開発機構から1件、横浜国立大学から JST に譲渡し JST から出願する形で1件、計2件の特許出願を行った。特に後者については、工業所有権情報・研修館(INPIT)から招聘した知的財産プロデューサーの主導により出願のスキームを構築し

た。

- 小坂 PM が Swiss-Japanese Quantum Symposium 2024 や第7回 QST 国際シンポジウム、International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS) 2024 など国内外の量子技術に関する学会で招待講演を行った。また、NICT Quantum Camp(NQC)においては招待講演だけでなく運営会議組織委員(推進委員・実行委員)としての役割も果たした。
- 朝日新聞、日経デバイス産業新聞など複数の報道機関で小坂 PM の研究が紹介された。また、科学雑誌 Newton の特集で、小坂 PM が監修や分担執筆を行った。
- 米国物理学会 (APS) の Global Physics Summit (2025 年 3 月 16~21 日)にて QIC の紹介動画が放映され (APS TV)、MS プロジェクトの研究が紹介された。本動画は YouTube の WebsEdge Science チャンネルでも公開されており、公開からの 2 か月間で 3 万 2 千回以上視聴されている。

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:(ダイヤモンド量子メモリ)

研究開発課題1:(ダイヤモンド量子メモリの研究開発)

- 通信用光子から量子メモリへのヘラルド付き量子メディア変換の実施

当該年度実施内容:

当該年度は、量子メディア変換の成功事象を低い誤り率でヘラルドするための新手法を開発した。通信用光子から核スピン量子メモリへの量子メディア変換には、窒素空孔 (NV) 中心への光子の吸収を用いるが、従来の手法では、光子吸収をスピン測定によって間接的に検知していたため、スピン測定の比較的高い誤り率がヘラルドの誤り率につながっていた。これに対し、光子吸収をその直後の発光で直接検知すれば、ヘラルドの誤り率を光子検出器の誤り率まで低減できる。これによって蒸留された状態の忠実度を評価し、誤り耐性を示した。さらに、ソリッドイマージョンレンズ (SIL) 構造等の導入によって光子検出効率の向上することで、高効率と高忠実の両立を図った。最終的に、量子メディア変換の忠実度は 98%を達成し、当該年度マイルストーンは達成済みである。

- 量子メモリの多ビット化による量子誤り訂正

当該年度実施内容:

当該年度は、量子誤り訂正を構成する量子操作の忠実度を向上するために、ラジオ波同期幾何学的デカップリング (ゼロ磁場 DDRF) を導入した。ゼロ磁場 DDRF は、ゼロ磁場環境で機能する手法で、量子メモリを選択的に操作しながら、デコヒーレンスを引き起こす無数の核スピンを無効化する。しかし、デカップリングに用いられる操作は誤りを含むため、単純な操作シーケンスでは忠実度が低いことが予想される。そこで、誤り耐性のあるゼロ磁場 DDRF の操作シーケンスを開発し、操作忠実度の向上を図った。これらの技術を用いてダイヤモンド中心近傍の二つの炭素核スピンからなる論理量子メモリを操作し、量子誤り訂正符号を実装した。最終的に、量子誤り訂正の忠実度は 86%を達成し、当該年度マイルストーンは達成済みである。

- 通信用光子を介した量子メモリ間の量子もつれ生成の実施

当該年度実施内容：

当該年度は、ダイヤモンドデバイスの高性能化とシステムの高機能化に取り組み、遠隔量子メモリ間の量子もつれ生成の実現を試みた。デバイスには、NV 中心の発光、吸収効率を向上するソリッドイマージョンレンズ等の光学構造の加工や制御用アンテナ、電極の実装を行うだけでなく、同時に量子もつれ生成に耐えうる NV 中心本来の光学特性を維持することが重要である。これを満たすために、デバイス作製プロセスの改善や事後処理により加工ダメージを減らす技術開発を行った。一方で、システムには、軌道、スピンの操作のためのレーザー、マイクロ波、ラジオ波制御だけでなく、二つの NV 中心の発光吸収波長を一致させるための電場制御や、NV 中心の電荷、スペクトル拡散を測定結果からフィードバックしてリセットする等の機能を加え、これらをリアルタイムに統合管理するシステムの構築を行った。現状で得られた量子もつれ忠実度は 42%に留まるが、11 月末までに当該年度マイルストーンの 60%を達成の見込みである。

- マイクロ波による量子メモリの量子操作の実施

当該年度実施内容：

当該年度は、マイクロ波の電場の自由度を用いて量子メモリの量子操作を行う。量子メモリとなるダイヤモンド色中心(負電荷 NV 中心、SiV 中心など)の多くは、基底準位に小さい電気感受率を持つが、中性電荷 NV 中心は大きな電場感受率を持つ。そこで、中性電荷 NV 中心の軌道基底準位を量子メモリとして扱うことで、制御性の高いマイクロ波電場で高効率な量子操作が可能にした。また、ダイヤモンド上に微細電極構造やマイクロ波制御装置を改善することで忠実度の向上を図った。最終的に、量子操作の忠実度は 86%を達成し、当該年度マイルストーンは達成済みである。

- レーザー照射によるダイヤモンド中の色中心の生成

当該年度実施内容：

当該年度は、電子線照射により GR1 を生成したバルク・ダイヤモンド中に適切な条件でパルスレーザーを照射することで、照射位置近傍に存在する天然の窒素原子とその周囲に存在する空孔を結合させ(局所アニール)、決定論的に NV 中心を生成した。このとき、発光量モニター用レーザーを局所アニール用パルスレーザーと同時に照射することで、狙った位置(モニター用レーザーおよび局所アニール用レーザー照射位置)から約 100nm 以内における NV 中心の生成をリアルタイムに観測することができる。これらの組み合わせにより、高い位置精度での決定論的に色中心を生成することに成功し、当該年度マイルストーンは達成済みである。

課題推進者:小坂 英男(国立大学法人横浜国立大学)

研究開発課題2:(ダイヤモンド量子構造の研究開発)

- フォトニック結晶、フォノニック結晶の作製の実施

当該年度実施内容：

当該年度は、引き続き、ダイヤモンド基板上へナノ構造作製のための各プロセス工程の技

術開発を進めた。エッチングマスク(SiO₂ 薄膜または金属薄膜)のパターン形成法の検討、レジスト塗布条件、導入した電子線描画(加速電圧、ドーズ量など)の条件出しなどを行い、所望のサイズのダイヤモンドナノ構造を作製した。構造評価には、走査型電子顕微鏡やレーザー顕微鏡などを用いた。また、導入した高温 ICP エッチング装置のプラズマ条件(電力、バイアス、気相圧力、処理時間など)を調整することで加工ダメージ除去法を提案した。さらに、弾性波を用いたスピン操作の高効率化に向け、ピエゾ効果を発現する窒化アルミニウム(AlN)膜の高品質化、IDT 電極のパターンサイズおよび構造の改良を行った。当該年度マイルストーンは達成済みである。

● ダイヤモンドハイブリット実装技術の検討の実施

当該年度実施内容:

平面基板から FIB 法を用いてエアブリッジ構造を直接加工することは困難なため、パターンニングした SiO₂ 膜をマスクに ICP プラズマエッチングを用いてダイヤモンド MESA 構造を作成し、その側壁を FIB 加工で彫り込む手法を用いて、高品質な NV 含有ダイヤモンド上への構造作製を実施した。また、C イオン注入を用いたスマートカット法においては、イオン注入により表層 1~2μm 程度の深さ領域にグラファイト層を形成し、そのグラファイト層を溶液エッチングすることで中空構造体の作成を進めた。注入エリアや初期構造を調整することで、中空構造体の有効エリア拡幅を目指した。ハイブリット実装技術の検討に向け、FIB 装置内でのダイヤモンド自立薄片リフトオフおよびマニピュレーションを行い、異種基板上への操作プロセス開発を進めた。当該年度マイルストーンは達成済みである。

課題推進者:加藤 宙光(国立研究開発法人産業技術総合研究所)

研究開発課題3:(ダイヤモンド量子結晶の研究開発)

● ダイヤモンド高純度結晶の作製の実施

当該年度実施内容:

当該年度は、ガス供給シーケンスと成長温度プロファイルを新たに最適化することで結晶の高純度化と高品質化を進め、更なる PLE 線幅低減に取り組んだ。また成長装置の真空改善に取り組んだ。SiV-中心の形成に関しては、SiV-中心の濃度制御と線幅低減のために、Si ドープダイヤモンド結晶の高品質化に取り組んだ。当該年度マイルストーンは達成済みである。

課題推進者:寺地 徳之(国立研究開発法人物質・材料研究機構)

研究開発課題4:(ダイヤモンド色中心の研究開発)

● ダイヤモンド色中心の生成の実施

当該年度実施内容:

当該年度は、挑戦的目標として掲げる有機化合物イオン注入技術の高度化を継続した。窒素(¹⁵N)と炭素(¹³C)で同位体濃縮した L-アルギニン塩酸塩ビームをダイヤモンドに注入した。パルス ODMR(ラムゼー測定)を行って、イオン注入後に形成された NV 中心が

^{14}N か ^{15}N の何れであるかを判別した。 ^{14}N が検出されれば、ダイヤモンド中に予め含まれていた ^{14}N (天然存在比 99.63%) 若しくは同位体濃縮されていないビームに含まれる ^{14}N が NV 中心になったことを意味する。一方、 ^{15}N 中心が検出されれば、注入したビームに含まれる ^{15}N が NV 中心になったと断定できる。同位体濃縮した L-アルギニン塩酸塩は ^{15}N と ^{13}C で構成されていることから、 ^{13}C 濃縮したイオンビーム注入が成功したことを示すことができた。当該年度のマイルストーンであるイオンビーム開発は達成済みである。

- ダイヤモンド色中心の生成位置の制御の実施

当該年度実施内容：

当該年度は、以下の 4 つの事項について取り組んだ。(1) R4～R5 年度に作製してきたイオン源からのイオンを「注入イオン捕捉領域」(3 段あるイオントラップの 1 段目)まで輸送した。(2)「注入イオン捕捉領域」のイオン及び「Ca 冷却領域」(3 段あるイオントラップの 2 段目)の Ca を「共同冷却領域」(3 段あるイオントラップの 3 段目)に輸送し、「共同冷却領域」において Ca と注入イオンを共同冷却した。(3)「共同冷却領域」からイオンを射出した。(4) 射出したイオンを加速して CEM(チャンネル型 2 次電子増倍管)等で検出した。加速には、極めて高い電位勾配を使用するために、放電の恐れのない数 kV での印加試験から開始し、徐々に昇圧して 100keV に相当する電圧の印加試験を行った。最後に、CEM の代わりにダイヤモンド試料を設置して注入試験を行った。当該年度は、100kV にイオンを加速することに成功し、当該年度マイルストーンを達成した。

- ダイヤモンド色中心の電荷安定性向上の実施

当該年度実施内容：

当該年度は、低温で PLE 計測が可能な系を構築することに横浜国立大学と共同で取り組んだ。その後、色中心の電荷安定性に関する研究として、ダイヤモンド量子結晶に対してイオン注入・電子線照射及び熱処理を行い、励起状態の歪みが小さく、PLE 線幅が狭く、低温でブリンキングを示さない電荷状態の安定な色中心の形成条件を探索した。その結果、当該年度マイルストーンを達成できた。

課題推進者：小野田 忍(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)

(2) 研究開発項目2: (オプトメカニカル共振器)

研究開発課題1: (フォトニック結晶光共振器の研究開発)

- ダイヤモンドフォトニック結晶共振器による光子と量子メモリの結合増強

当該年度実施内容：

当該年度は、ダイヤモンドフォトニック結晶ナノビーム共振器の作製とその共振器モードの観測に成功した。当該年度は、マスク材料およびマスク形成条件の変更、それに伴うダイヤモンドエッチング条件の調整と二段階垂直エッチングの導入により、エッチング側壁およびエアブリッジ化された構造の裏面の平坦性向上を実現した。その結果、 $Q>1,000$ のダイヤモンドフォトニック結晶共振器を実現した(マイルストーン達成)。並行して、共振器中の NV 中心からの発光の観測を目指したプロセス工程や条件の検討を行った。フォトニック結

晶共振器形成後に電子線照射により NV 中心を形成することで、共振器モードと結合した NV 中心からの発光の観測に成功した（小坂グループ、小野田グループとの連携）。

- ダイヤモンドハイブリッド実装技術の検討の実施

当該年度実施内容：

当該年度は、フォトニック結晶共振器を含むダイヤモンド薄膜を、高い歩留まりで基板から剥離、転写プリントするためのパターン構造の設計とその作製を行った。ダイヤモンドフォトニック結晶ナノ共振器を含むナノビーム構造とそれと直交した支持用ナノビームからなる T 字構造を考案した。支持用ナノビームに意図的に脆弱部分を設けることで、ナノ共振器を含む T 字構造を基板から高い歩留まりで剥離することに成功した。さらに、転写プリント法により、同構造を馬場グループが作製した SiN 光回路に装荷することにも成功した（マイルストーン達成）。

課題推進者：岩本 敏（国立大学法人東京大学）

研究開発課題2：（フォトニック結晶光共振器実装技術開発）

- ダイヤモンドフォトニック結晶共振器による光子と量子メモリの結合増強

当該年度実施内容：

当該年度は、プロジェクト全体の方針変更に基づき、AlN が装荷されていないダイヤモンドのみのオプトメカニカル共振器を想定し、製作しやすい円形孔のみで構成される構造で、光に関する高 Q 値設計を導出した。その結果、Q は 9,860、モード体積 V はダイヤモンド内波長体積の 0.481 倍となり、期待されるパーセル係数は 1560 と見積もられた。また、昨年度、ファイバから AlN 付きダイヤモンドまでの最低の結合損失を 0.7 dB と見積もったが、AlN がなくてもほとんど変わらないことを確認した。また、実際のファイバ接続で起こる問題、すなわちチップ端面研磨での導波路の変形、スポットサイズ変換器 SSC に必要な長さ、ファイバを接着固定する際に用いる樹脂の屈折率の変化などに対する損失の増加を計算し、低損失結合の条件を明らかにした。チップ端面の SSC が斜めに欠ける問題は効率にほとんど影響せず、研磨加工による SSC の後退も 5 μ m 程度であれば許容できる。SSC が 200 μ m だと 2.5 dB の結合損が生じ、3 mm 以上まで長くすると 0.5 dB になる。樹脂の屈折率が SiO₂ と比べて ± 0.05 異なると、損失が 4~7 dB 増加するので、低温での屈折率変化も考慮して適切な樹脂を選択することが必要である。以上により、当該年度マイルストーンは達成済みである。

- ダイヤモンドハイブリッド実装技術の検討

当該年度実施内容：

当該年度は、昨年度の SiN 導波路光集積プラットフォーム 1 次試作基板にファイバを接続した実装モジュールを使って、波長 630 nm 帯に対する導波路伝搬損とファイバ接続損を評価した。その結果、伝搬損 1.9 dB/cm、接続損は 6.3dB となった。前者はおおよそ妥当な値であり、最終的なチップの導波路長でも 1 dB 以下になる見通しを得た。一方、後者は計算値の 0.5 dB 以下よりも大きい、(1)の計算より、これは主にスポットサイズ変換器 SSC の

長さ不足と樹脂の屈折率のずれが原因と判明した。これらは今後の研究で改善可能である。また、岩本グループにより製作と転写プリントが行われたダイヤモンド微小構造を貼りつけた同プラットフォーム基板を完成させ、ダイヤモンドまでの光結合を確認した。また、これらの結果を踏まえ、プラットフォーム基板の2次試作を行った。ここではマイクロ波光子を受信するための超伝導電極/共振器までを集積した様々なパターンの計 760 個以上のチップを完成させた。今後、ファイバ実装と光学特性評価に進む。以上により、当該年度マイルストーンは達成済みである。

課題推進者:馬場 俊彦(国立大学法人横浜国立大学)

研究開発課題3: (フォノン結晶音共振器の研究開発)

● ダイヤモンドフォノン結晶共振器の実験的評価の実施

当該年度実施内容:

当該年度は、ダイヤモンド試料作製グループの進捗をみつつ、シリコンフォノン系にピエゾ材料であるニオブ酸リチウムのフォノン発生器を形成、加工してフォノン結晶系の特性評価用試料を作製した。昨年度に構築が完了した測定系でフォノン結晶ナノ共振器の Q 値を測定し、実測値とシミュレーション値の比較検討から作製 Q 値の制限要素の洗い出しを行い、ダイヤモンド共振器作製への知見を得た。

ダイヤモンド系が作製され次第測定が可能になるよう、ニオブ酸リチウム薄膜を用いたシリコンフォノン結晶系での課題抽出を進める。ダイヤモンド試料作製グループの加工精度を考慮した設計により、作製 Q 値を最大化するシミュレーションを行い、プロセスへのフィードバックを行った。フォノン生成を行う AlN/ダイヤモンド上に作製し、GHz フォノン共振器 Q 値 20,000 を得てマイルストーンを達成した。

● ダイヤモンドフォノン結晶共振器による音子と量子メモリの結合増強評価の実施

当該年度実施内容:

当該年度は、試料作製グループが作製する試料について、項目1課題2と項目2課題1と連携しながらフォノンと量子メモリの結合増強を評価するために必要な、ナノ共振器中の量子メモリの空間的位置、フォノン結晶共振器の機械振動 Q 値などのパラメータを検討した。そして、シミュレーションから得られる電磁界分布とフォノンモード体積などの情報を用いてスピン-機械結合レートを評価した。また、昨年度導出したマイクロ波-光通信波長帯光子間の量子インターフェースにおけるハミルトニアンを用いて、マイクロ波領域の光子、GHz 帯フォノン、通信波長帯光子への変換の時間発展を計算し、量子コヒーレンスを考慮して量子メディア変換効率の評価も進め、10%以上のコヒーレント変換効率が可能な系を設計した。加工限界と精度を考慮したダイヤモンドオプトメカニカル共振器系を設計し、それに基づいて岩本グループが実際に作製した構造を SEM で測定し、その性能をシミュレーションで評価した。理論光および音子共振器 Q 値 5,000 と 30,000、光と音子のパーセル係数 40 と 106 を得て、達成目標を大幅に超えてマイルストーンを達成した。

課題推進者:野村 政宏(国立大学法人東京大学)

(3) 研究開発項目3: (ピエゾマイクロ波共振器)

研究開発課題1: (ピエゾマイクロ波共振器の研究開発)

- マイクロ波から音波への変換の実施

当該年度実施内容:

当該年度は、フォトニック結晶を模したモード体積が数波長程度の表面弾性波デバイスにおいて音波の生成効率 1%以上を目標とした。またマイクロ波共振器との統合を視野に、表面弾性波デバイスと結合できるようなマイクロ波共振器の設計と、表面弾性波デバイスの設計の最適化を COMSOL、SONNET といったシミュレータで行った。モード体積の小さな収束型表面弾性波デバイスにおいて、0.06dB の深さの反射ディップを観測した。0.06dB を全て弾性波に変換されたエネルギーとみなすとマイクロ波—フォノン変換効率 1.4%に対応する。よって当該年度マイルストーンは達成済みである。

- マイクロ波による量子メモリの量子操作の実施

当該年度実施内容:

当該年度は、 NV^- のフォノンによる操作ではなく、代替案である希釈冷凍機中での NV^0 における電場を介した軌道励起状態の操作を目的とした。希釈冷凍機に設置した光学系とマイクロ波系を用いて、1 K 以下の低温で NV^0 の量子操作が可能であること、またメモリ時間 $T_1 \sim 5 \mu s$, $T_2^{\text{echo}} \sim 2 \mu s$ を実証した。また、Rabi 振動実験の明瞭度から、 π パルスの忠実度は 83%と見積もられた。よって当該年度マイルストーンは達成済みである。(本成果は Phys. Rev. Lett. に掲載予定である)

課題推進者: 小坂 英男 (国立大学法人横浜国立大学)

研究開発課題2: (量子制御電子集積回路の研究開発)

- ダイヤモンド量子インターフェース用量子制御電子集積回路の開発

当該年度実施内容:

これまでに開発した 4.2K 動作 SFQ マイクロ波発生回路を極低温動作させるためには、消費電力とバイアス電流の低減が必要である。そのため、臨界電流密度を従来の 10 分の 1 とする Josephson 集積回路プロセスを用いて高度な回路設計のためのセルライブラリを開発した。これにより、回路の消費電力を 30 分の 1 に、バイアス電流量を 10 分の 1 に低減した。また、バイアス抵抗を除去した低消費電力型の SFQ 回路の導入により、消費電力を更に 10 分の 1 に低減した。以上により従来に対して消費電力を 300 分の 1 に縮小した SFQ マイクロ波発生回路を開発し、回路の極低温動作を実証した。当該年度マイルストーンは達成済みである。

課題推進者: 吉川 信行 (国立大学法人横浜国立大学)

研究開発課題3: (量子インターフェースの理論研究)

- 超伝導量子ビット—光子量子ビット間インターフェースの理論

当該年度実施内容：

当該年度は、超伝導量子ビットを、音子やダイヤモンドNV中心といった量子系を媒介として、最終的に光子量子ビットへとメディア変換する過程の効率評価を行った。具体的には、当プロジェクトで想定されるスキームを用いて、超伝導量子ビットから放出されるマイクロ波光子を通信波長帯光子へとコヒーレントに変換する効率を評価した。すべての構成要素間の離調をゼロにすることができれば、効率は数10%程度に達することが予想される。当該年度マイルストーンは達成済みである。

課題推進者：越野 和樹(国立大学東京科学大学)

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

代表機関である横浜国立大学内の先端科学高等研究院(IAS)に、小坂 PM がセンター長を務める量子情報研究センター(QIC)を中心とした PM 支援体制が構築されている。主たるメンバーとして、PM 補佐(研究戦略企画マネージャー)1名、知的財産プロデューサー1名、産学官連携コーディネーター1名(令和7年3月退職)、非常勤教員1名、事務職員3名、URA 1名、事務補佐員5名が、代表機関内外に所属する課題推進者の研究開発の進捗管理、研究開発機関間の連携、労務管理等の様々な PM 活動を支援している。

令和6年度も各課題推進者を IAS 客員教授および客員准教授として招聘し、より効果的なプロジェクトマネジメントを実施できる体制とした。PM 補佐は、事業化戦略・研究環境整備・産学官連携・報告書のとりまとめ等を実務的に支援しているほか、JST 担当者とも随時連絡を取りながら活動を推進している。

昨年度に引き続き、課題推進者会議を毎月1回90分程度オンラインで開催した。PM、課題推進者、PM 補佐、知的財産プロデューサー等の主たるプロジェクトメンバーが集まり、進捗状況把握や課題推進のための重要な機会となっている。

研究開発プロジェクトの展開

研究開発項目1がプロジェクト全体の目的遂行に責任を持ちつつ、各研究開発項目と連携しながら目標達成を目指す体制を整えている。毎月の課題推進者会議に加え、小坂 PM と各課題推進者との個別の会合も必要に応じて不定期に行っている。素子の設計・作製を産業技術総合研究所(AIST)、物質・材料研究機構(NIMS)、量子科学技術研究開発機構(QST)、東京大学が担当、その評価を横浜国立大学が担当しフィードバックするなど、各研究開発機関が密接に協働することにより研究開発を進めている。

国内外の各研究機関との連携や共同研究についても順調に契約の締結を進めている。国内については、令和6年5月に横浜国立大学先端科学高等研究院と情報通信研究機構との共同研究契約を締結したほか、令和6年5月に東京大学生産技術研究所との連携協定を締結した。また、後半のムーンショットにおける超伝導量子コンピュータに関するより強固な連携に向け、富士通との秘密保持契約を締結した。さらに、産業技術総合研究所

量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センターとの連携協定を締結した(2025 年 6 月 1 日)。国外については、令和 6 年 7 月にシュトゥットガルト大学との協力覚書を締結、令和 6 年 12 月にはウルム大学と基本合意書(Memorandum of Understanding, MOU)を締結した。さらに、日独の大学・研究機関(QST、横浜国立大学、東京工業大学(現東京科学大学)、京都大学、AIST、NIMS、沖縄科学技術大学院大学(OIST)、筑波大学、ウルム大学、ザールラント大学、ヨハネス・グーテンベルク大学マインツ、シュトゥットガルト大学)が共同で先端国際共同研究推進事業(ASPIRE)提案を行い、令和 7 年 2 月に採択された。産業界との連携では、古河電工との共同研究について昨年度に引き続き受け入れが決定した。

(2) 研究成果の展開

前年度に引き続き、INPIT より招聘した知的財産プロデューサー(知財 PD)を中心に、技術動向調査、知財戦略の構築及びそれを踏まえた具体的な出願支援を進めている。令和6年度は、QST からの出願1件、横浜国立大学から JST に譲渡し JST から出願する形で1件、計2件の特許出願を行った。特に後者については、上記知財 PD の主導により出願のスキームを構築した。令和7年1月に開催した課題推進者会議において、特許出願スキームに関して知財 PD からの説明による情報共有を行った。

また、令和6年度は、昨年度までの 12 機関に加えて MIT 所属研究者や国内主要研究者の特許出願戦略の深掘り調査を行い、本 PJ 研究領域と関連する主要論文と特許との紐付けを図った。これらの結果は適宜、課題推進者に展開を図り、競合機関の技術動向、権利化や各機関との連携状況把握を踏まえた知財戦略構築の一助としている。

(3) 広報、アウトリーチ

【講演・シンポジウム・ワークショップ】令和6年6月に東京大学で開催された Swiss-Japanese Quantum Symposium 2024、および同年7月に G メッセ群馬で開催された第7回 QST 国際シンポジウムにおいて、小坂 PM が招待講演を行った。また、同月カナダで開催された International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS) 2024 において、小坂 PM が招待講演を行った。同年9月に開催された NICT Quantum Camp(NQC)において、小坂 PM は招待講演だけでなく運営会議組織委員(推進委員・実行委員)としての役割も果たしている。令和7年3月、応用物理学会春季学術講演会のシンポジウム「誤り耐性量子コンピュータへの新技術」において横浜国立大学の黒川 IAS 助教が招待講演を行った。

【視察】令和6年6月に文部科学省による横浜国立大学の視察があり、プロジェクト概要の説明の後、小坂 PM の研究室で実験設備を見学した。

【新聞・ニュース】令和6年4月4日付の電子デバイス産業新聞(「超伝導光デバイス開発に挑戦」)に、小坂 PM へのインタビュー記事が掲載された。また、同年 10 月 8 日付の朝日新聞デジタル(「ノーベル賞でも注目の量子コンピューター 日本の研究者も貢献」)および 12 月 3 日付の朝日新聞(「量子コンピューター、どう使う? 超伝導・光・シリコン…5方式の開発進む」朝日新聞紙面および朝日新聞デジタル両方に掲載)に、量子コンピュータに関する小坂 PM へのインタビュー記事が掲載された。

【書籍・雑誌】令和6年8月に Newton 2024 年 10 月号 特集記事「“量子時代”のかぎをにぎ

る もつれる量子」の監修を行った。本特集記事については、2024 年 8 月 25 日付の朝日新聞デジタルにも取り上げられた。また、令和7年3月の Newton 別冊「量子力学 100 年」でも小坂 PM が分担執筆を行った。

【プレスリリース】理化学研究所との連携協定締結に際して、横浜国立大学と理化学研究所でプレスリリースを行った。

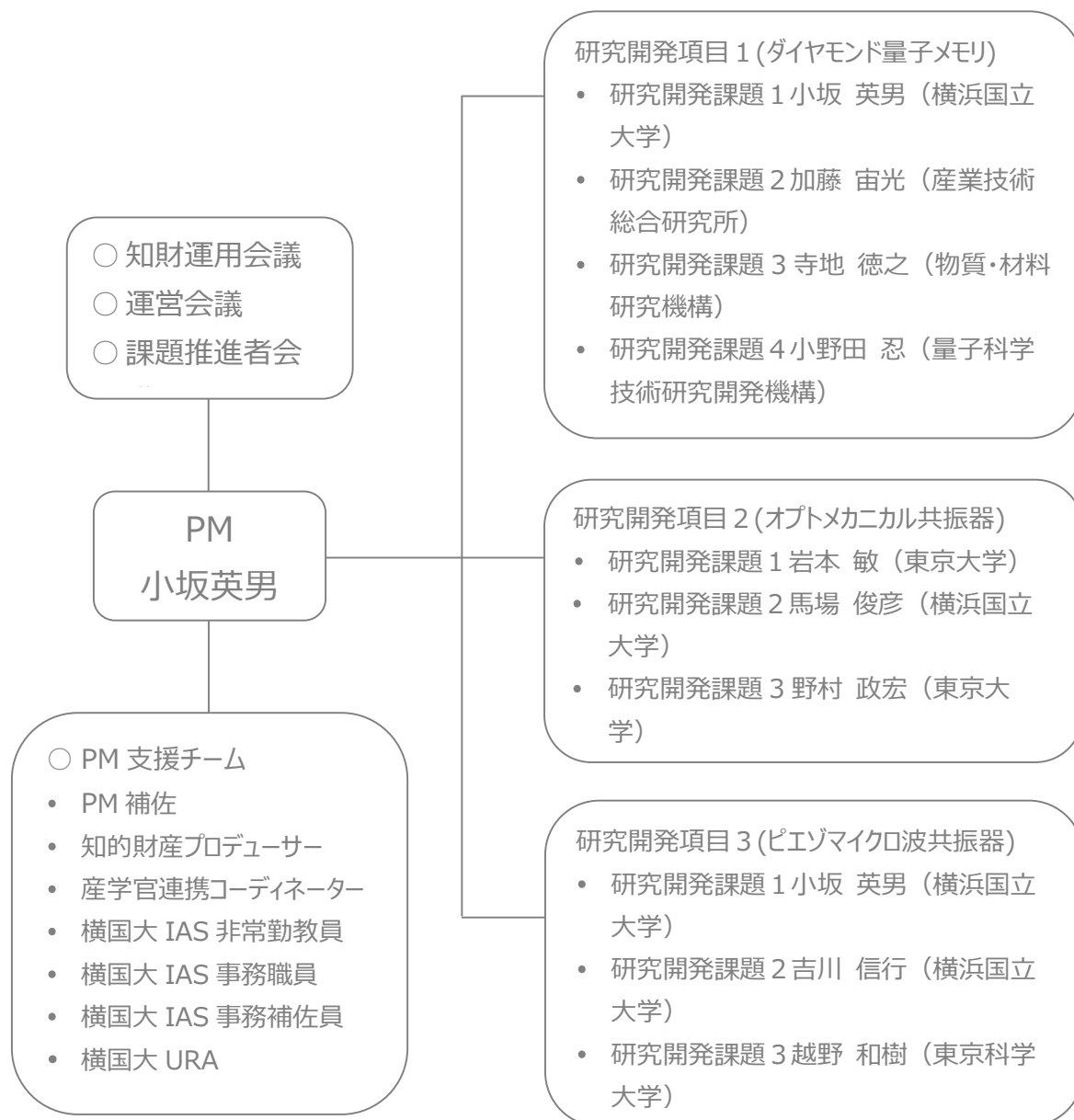
【その他】米国物理学会 (APS) の Global Physics Summit (令和7年 3 月 16～21 日)において、QIC の紹介動画が放映され (APS TV)、本プロジェクトの研究が紹介された。本動画は現在 YouTube の WebsEdge Science チャンネルで公開されており、公開からの 2 か月間で 3 万 2 千回以上視聴されている。

(4) データマネジメントに関する取り組み

昨年度に引き続き、横浜国立大学のセキュリティポリシーに則って各課題推進者が取得するデータを把握し、共有すべきもの、セキュリティを担保すべきもので整理している。課題推進者にはこのポリシーに準拠してもらい、PM がデータ全体を把握できる仕組みを構築する。

各種データを各機関の施錠された実験室内の設計用、測定用、制御用、データ処理用の各 PC に保存しているほか、OneNote や Slack に実験情報などを加え保存している。また、本プロジェクトメンバー用の共用 Slack もメンバー間の情報共有に利用している。特に秘匿が必要な情報についてはプライベートチャンネルを設け、招待されたメンバーしかやり取りできないようにしている。

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

PM、PM 補佐、及び知的財産プロデューサーが連携して、本プロジェクトメンバーのバックグラウンド特許、競合グループの特許、マクロな技術動向等の調査を行い、知財戦略のベースをつくる。また、本プロジェクト研究内容で特許につながりうるコア技術の発掘を行う。

課題推進者会議及び運営会議 実施内容

毎月 1 回程度、PM、課題推進者、PM 補佐、知的財産プロデューサー等のメンバーが集まる課題推進者会議を開催する。各種報告、進捗状況の確認等を行い、課題推進に向けた新たなアイデアの創出を目指す。また重要事項については運営会議を開催し、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	2	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	2	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	11	11	22
口頭発表	25	9	34
ポスター発表	12	8	20
合計	48	28	76

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	14	14
(うち、査読有)	0	13	13

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	2	1	3
その他	0	0	0
合計	2	1	3

受賞件数		
国内	国際	総数
10	0	10

プレスリリース件数
5

報道件数
6

ワークショップ等、アウトリーチ件数
2