



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

2021年度版

2021年4月～2022年3月

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

 **MOONSHOT**
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM



研究開発プロジェクト概要

超伝導量子ビットと通信用光子をつなぐため、量子メモリとオプトメカニカル結晶を融合した量子インターフェースを開発します。それにより、2050年には、大規模な超伝導量子コンピュータの実現を目指します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/62_kosaka.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
小坂英男	横浜国立大学 先端科学高等研究院 量子情報研究センター	センター長
加藤宙光	産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター	主任研究員
寺地徳之	物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点	主席研究員
小野田忍	量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学部門	上席研究員
岩本敏	東京大学 生産技術研究所	教授
馬場俊彦	横浜国立大学 先端科学高等研究院	教授
野村政宏	東京大学 生産技術研究所	准教授

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

- 量子もつれ光源の開発の実施
量子もつれ光源について、ダイヤモンド色中心を用い、発光した光子と残された電子スピンの間の高忠実度での量子もつれ生成を行った。
- 量子メモリの誤り耐性万能量子ゲート操作の実施
誤り耐性万能量子ゲート操作について、ダイヤモンド色中心の電子スピン及び周囲の炭素同位体の核スピンに対し、マイクロ波あるいは光波により幾何学的に量子操作を行った。これにより、誤り耐性のある万能量子ゲート操作を高い忠実度で可能とした。
- 量子メモリ内での完全ベル測定の実施
完全ベル測定について、二つの炭素同位体核スピン間の完全ベル測定を高い忠実度で行った。

研究開発課題2:ダイヤモンド量子構造の研究開発

- ダイヤモンド電荷状態の安定化の実施
ダイヤモンド中の NV 中心の電荷状態が安定化となるようドーピング条件の最適化を行った。研究開発課題1、3、4と連携のもと、研究開発を推進した。
- ダイヤモンドナノ構造の作製の実施
ダイヤモンド上にフォトニック結晶、フォノン結晶などの量子構造を作製する準備として、ダイヤモンド表面にサブミクロンサイズの穴加工など、ナノ構造の試作を行った。構造作製を主に担当し、研究開発項目2との密な連携のもと評価・設計・シミュレーションをフィードバックさせ、研究開発を推進した。
- ダイヤモンドピエゾ構造の作製の実施
ダイヤモンド上にピエゾ効果を有する材料を薄膜形成し、音子(弾性波)を生成するための構造を作製した。構造作製を主に担当し、研究開発項目1の研究開発課題1、研究開発項目3の研究開発課題1との密な連携のもと評価・設計・シミュレーションをフィードバックさせ、研究開発を推進した。

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
単一欠陥の電荷安定性に関する研究の実施：NVあるいは SiVについて、それらの電荷状態を安定化させるための結晶成長および不純物ドーピング制御を行った。

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
ダイヤモンド色中心として主流である NV 中心あるいは SiV 中心、GeV 中心の他に、どのような候補材料があるかを検討した。

(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の構造設計
ダイヤモンドフォトニック結晶共振器の光子に対する Q 値および発光のパーセル増強

因子を最適化する構造設計を行った。

- **ダイヤモンドハイブリッド実装技術の検討**

研究開発項目1の研究開発課題2と連携し、ダイヤモンドオプトメカニカル結晶を光集積回路に実装するダイヤモンド転写プリンティング技術について検討した。

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

- **結合構造設計の実施**

ダイヤモンド光導波路からその他の導波路への結合構造の設計を行った。ダイヤモンド光導波路から SiN などへの導波路へ 10 dB 以下の損失で結合する構造を設計することを目標とした。

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設計の実施**

音子と量子メモリの結合増強を可能にするダイヤモンドフォノン結晶共振器について、有限要素法を用いた構造設計と結合増強性能評価を行った。

(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

- **ピエゾマイクロ波共振器の材料探索、構造設計の実施**

ピエゾマイクロ波共振器について、マイクロ波光子を波長が 5 桁短い通信用光子と同程度の波長 (~1 μm) の音波 (弾性波) に変換するためのピエゾマイクロ波共振器の材料探索、構造設計を行った。(研究開発項目1および2と連携)

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

- **量子もつれ光源の開発の実施**

当該年度実施内容:

量子もつれ光源について、ダイヤモンド色中心を用い、発光した光子と残された電子スピンの間の高忠実度での量子もつれ生成を行った。ダイヤモンド NV 中心の A_2 励起状態からのゼロフォノン線発光を用い、発光した光子の偏光と NV 中心に残された電子のスピンの間に量子的なもつれ状態を生成した。本研究では、超伝導量子ビットとの整合性を確保すべく、極めて高い精度で全方位にゼロ磁場に調整された環境下でもつれ生成を行う必要がある。従来手法では、NV 中心の発光波長である波長 637 nm のレッドレーザを用いて A_2 励起状態への共鳴励起を行っていたため、純度の高い量子もつれを生成できなかった。一方で、波長 520 nm のグリーンレーザを用いた非共鳴励起では、高い励起効率を得ることができないという問題点があった。これらの問題点を克服すべく、波長 637 nm のレッドレーザを用いながらも、7 GHz 程度の非共鳴励起を行い、マイクロ波による励起状態内でのスピン遷移を併用することで、完全ゼロ磁場下での高効率かつ高忠実な量子もつれ生成を行った。実験で得られた平均忠実度は 83%と目標とした 80%以上を達成した。

- **量子メモリの誤り耐性万能量子ゲート操作の実施**

当該年度実施内容:

誤り耐性万能量子ゲート操作について、ダイヤモンド色中心の電子スピン及び周囲の炭素同位体の核スピンに対し、マイクロ波あるいは光波により幾何学的に量子操作を行った。これにより、誤り耐性のある万能量子ゲート操作を高い忠実度で可能とした。本研究では、通常とは異なり縮退した 2 準位で量子ビットを構成し幾何学的な量子ゲート操作を用いるため、通常より高い誤り耐性を有する。また、従来は銅線 2 本をダイヤモンド上に交差させて配置したマクロなアンテナ構造を用いていたが、本研究ではダイヤモンド上に金蒸着により形成したマイクロなアンテナ構造を用い、ダイヤモンド NV 中心の単一電子スピンを幾何学的に量子ゲート操作した。本研究では、超伝導量子ビットとの整合性を確保すべく、極めて高い精度で全方位にゼロ磁場に調整された完全ゼロ磁場下での高速かつ高忠実な量子ゲート操作を行った。実験で得られた平均忠実度は 99.5%と目標とした 99.5%以上を達成した。

- 量子メモリ内での完全ベル測定の実施

当該年度実施内容:

完全ベル測定について、二つの炭素同位体核スピン間の完全ベル測定を高い忠実度で行った。従来は弱磁場を印加しなければ完全ベル測定ができなかったが、本研究では、超伝導量子ビットとの整合性を確保すべく、極めて高い精度で全方位にゼロ磁場に調整された環境下で量子ゲート操作を行う必要がある。独自開発の直交マイクロ波アンテナを改良することでこれを実現し、完全ゼロ磁場下での高速かつ高忠実な完全ベル測定を行った。実験で得られた平均忠実度は 74.3%であったが、状態準備の誤りを差し引いた完全ベル測定の忠実度を推定すると目標とした 85%以上を達成した。

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

- ダイヤモンド電荷状態の安定化の実施

当該年度実施内容

リンドーピング n 型ダイヤモンドの成膜には、マイクロ波プラズマ化学気相堆積法により原料ガスとして水素及びメタンの混合ガス、n 型ドーパントとなるホスフィンを追加することで実施した。気相中のホスフィン供給量を調整することでダイヤモンド中に取り込まれるリン濃度を制御し、 $10^{15} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のリン濃度の異なるダイヤモンド膜を成膜した。Hall 効果測定から、負の Hall 係数、電子性バンド伝導を有する n 型半導体特性であることを確認し、また、キャリア濃度の温度依存性からリンドーピングによる 570 meV の活性化エネルギーが得られた。さらに、共焦点蛍光顕微鏡によりリンドーピングダイヤモンド中に含まれる単一 NV 中心の電荷状態を評価したところ、5K 程度の低温下においても NV として安定していた。リンドーピングによりフェルミレベルが NV^0/NV^- 遷移準位より高くなり NV 中心へ電子供給が強く促され、低温においても電荷状態が負に安定化したと考えられる。当該年度の目標を達成した。

- ダイヤモンドナノ構造の作製の実施

当該年度実施内容

ダイヤモンド基板上へナノ構造作製のため、電子線露光装置を用いて、Sub ミクロン

オーダーへ向けた EB リソグラフィーの条件出しを開始した。レジストの密着性を改善するために HMDS 溶液をスピコート(3000 rpm、15 秒)し、表面状態を疎水性へ変える。その後、ZEP520A レジストをスピコート(4000 rpm、60 秒)で塗布し、大気中 180°C、5 分間のベークを行う。最後に電子ビームによる帯電防止を目的に、エスペーサをスピコート(2000 rpm、30 秒)し、室温化で乾燥させる。電子線加速電圧 50 kV、ビーム電流 300 pA、Dose 量を調整することで、電極幅 500 nm/ギャップ 500 nm の IDT (Interdigital Transducer) パターンの形成に成功した。また、既存のプロセス技術(ホトリソグラフィー及び ICP エッチング)とフォーカスイオンビーム(FIB)を用いた直接加工技術を組み合わせることで所望の構造試作を実施した。ダイヤモンドは難加工材料であるため、平面基板から FIB 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、ホトリソグラフィーで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 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た。本工程により、幅 1.2 μm、長さ 30 μm のエアブリッジ構造を試作し、さらに、フォトニック結晶を想定した穴径 250 nm、ピッチ 500 nm の周期的構造を作製した。一連の実験により目標である 700 nm 以下のダイヤモンドナノ加工を達成した。

- **ダイヤモンドピエゾ構造の作製の実施**

当該年度実施内容

ダイヤモンドはヤング率が高く弾性波の伝搬速度を高める特徴がある一方で、ダイヤモンド自身にはピエゾ効果がないため、ピエゾ効果を有する材料を積層する必要がある。ピエゾ効果のある材料候補として、LiNbO₃、AlN、ZnO などあるが、電気機械結合係数、伝播速度、周波数の温度特性の観点から、AlN を有力材料として選定した。ピエゾ効果の発現には、立方晶ではなく六方晶 AlN が必須となる。AlN 成長装置として横型の層流 MOCVD 装置を用いて、原料ガスに水素、窒素、トリメチルアルミの混合ガスを用い、1600°C の環境下で 1 時間の成長実験を実施した。エネルギー分散型 X 線分光法を用いて成長膜の組成を分析したところ、狙い通り Al と N が検出された。また、X 線回折法を用いて結晶構造評価を行ったところ、AlN(0002)の反射ピークとダイヤモンド(111)の反射ピークのみが検出され、c 軸配向の六方晶 AlN がダイヤモンド(111)面にヘテロエピ成長できることが示され、当該年度の目標を達成した。

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

適切な濃度の不純物を有する高純度なダイヤモンドを CVD 成長し、量子メモリとして良好に機能する色中心が形成可能なダイヤモンド量子結晶を作製するためのアプローチを検討した。超高真空型 CVD 成長装置を用いて高純度ダイヤモンド薄膜を成長した。得られたダイヤモンド薄膜の蛍光マッピングを調べた。面内及び深さ方向の分布評価から、NV 中心及び SiV 中心が薄膜中で観測されない程に高純度であり、単一光子源を形成するのに不可欠な極低濃度域においても不純物を適切にドーピング制御することが可能なダイヤモンド薄膜であることが分かった。

ホワイトキャンバスと言えるほどの高純度ダイヤモンド薄膜が作製できたため、次に窒素を極微量の混入させたダイヤモンド薄膜を作製し、薄膜中に形成された NV 中心の特性評価を行った(横国大と共同)。成長膜厚が約 60 μm と厚いにもかかわらず成長面は平滑であり、結晶性が高いことが示唆された。この試料を共焦点 PL 装置で PL 発光像を取得したところ、数密度は少ないが成長直後に NV 中心が形成されていることが分かった。NV 中心の発光評価をしたところ目標としていた発光ブリンキングが起これない NV 中心が形成されていることが明らかになった。

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

ダイヤモンド色中心の生成条件の探索を実施した。ダイヤモンド量子結晶にイオン注入、電子線照射、熱処理などを行った。安定な電荷状態や狭い発光吸収線幅が得られる NV の形成条件として、熱処理(1000 $^{\circ}\text{C}$ ・2 時間)、熱混酸、及び酸素アニールが有効であることが分かった。加えて、SiV⁻、GeV⁻、SnV⁻、PbV⁻などの生成条件を検討した。NV 中心は窒素と隣接する原子空孔であるのに対して、SiV、GeV、SnV、PbV 中心は複空孔の中心に原子が収まる欠陥であるため、NV 中心とは異なるポストプロセス(特に、熱処理)が求められる。原子の質量が大きい程、高い温度での熱処理が必要になると考えられている。1000 $^{\circ}\text{C}$ を超える高温になると、ダイヤモンド量子結晶の表面がエッチングされ易くなることから、ダイヤモンド量子結晶の深部にイオンを注入することで、エッチングされることなく色中心を形成できると考えられる。ダイヤモンド深部へのイオン注入を実現するため、18 MeV の Sn と Pb ビーム開発に成功した。当該年度のマイルストーンで掲げた、NV 中心やそれ以外の色中心の形成条件を検討し、NV 中心以外の色中心形成へ向けた準備を進めた。

また挑戦的目標として、ダイヤモンドナノ加工後に高い位置精度で色中心を生成する方法として、冷却単一イオン制御技術による高位置精度(100 nm 程度)の窒素イオン注入手法の検討を始めた。

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の構造設計

当該年度実施内容

量子インターフェースの高効率化に求められる色中心と光子の強い相互作用を実現するため、光子場の増強を可能にするフォトニック結晶共振器構造について検討した。特に、チーム内の議論から、マイクロ波-フォノン-スピン-光とつなぐ量子インターフェースの実現に向けて有望な構造の一つである AlN とダイヤモンドのハイブリッド構造に着目し、フォトニック結晶共振器の設計を行った。AlN は優れた圧電特性を有しており、マイクロ波から高効率なフォノン生成を可能にすると期待される。

ダイヤモンドとAlNからなるナノビーム構造において、ダイヤモンド部分にフォトニック結晶構造を導入することで、大きなパーセル係数を有する共振器構造の設計に成功した。フォトニック結晶の中央部分の空気孔5つを埋めたL5型共振器構造について、ナノビーム幅や共振器近傍円孔のサイズなどを最適化することにより、Q値 \sim 12,000でパーセル係数 \sim 330(理論値)を得た。また、フォトニックバンド構造解析から、同構造ではフォトニックバンドギャップ自体は存在しないにも関わらず、共振器モードとそれと同じ周波数に存在する導波モードの空間分布が大きく異なる結果、高いパーセル増強係数が得られることも明らかにした。

更に、空気円孔を埋めるのではなく、サイズと位置を調整して実現される格子変調型共振器を検討し、構造パラメータの最適化、光閉じ込めを増強するためのフォトニック結晶周期数の増加などにより、理論パーセル係数 \sim 750を示す共振器構造を見出した。この格子変調型共振器のモード体積は、L5型共振器の約60%であった。実際の試料では、Q値は作製誤差などにより数千程度に制限されることが予想される。したがって、より小さいモード体積を有する格子変調型共振器の活用が有効と考えられる。なお、これら共振器モードの波長をNV中心の発光波長に合わせた場合にも同様に高いパーセル係数が得られることも確認した。

以上のとおり、目標としたダイヤモンドフォトニック結晶構造の設計を開始し、マイルストーンを達成したばかりでなく、高いパーセル係数を持つ共振器構造を見出すなど想定以上の成果を得た。

● 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

集積化のための要素技術の一つとして、ダイヤモンドの異種材料基板への貼り合わせ技術について検討し、実際にシリコン基板へのダイヤモンド基板の貼り合わせを試みた。接合条件を変えて繰り返し実験を行い、最終的に3mm角ダイヤモンドをシリコン基板に接合することに成功した。しかし、光学顕微鏡による観察から3mm角試料のごく一部でのみ接合が実現されており、大部分の領域ではダイヤモンドとシリコンの間に空隙が生じていることが明らかになった。一方、平坦性の高いGaAsやYIG基板などを用いた場合には、基板全体にわたって良好な接合が実現できることを確認した。これらの結果から、ダイヤモンドと異種基板の強固な接合を実現するためには、ダイヤモンド表面の平坦性向上が重要であることがわかった。

また、新たに導入したドライエッチング装置を立ち上げ、転写プリントを用いた集積化で必要となるダイヤモンド薄膜の形成技術開発を進めた。さらに、令和4年4月からの開始を予定したダイヤモンドフォトニック結晶構造の作製について、前倒しで開始し、ダイヤモンド基板へのフォトニック結晶構造形成に成功した。

以上のとおり、目標とした集積化プロセス検討に向けた基礎検討を実施し、マイルストーンを達成したほか、ダイヤモンドフォトニック結晶構造の形成など、想定以上の成果を得た。

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

● 結合構造設計の実施

当該年度実施内容

本プロジェクトでは、ダイヤモンド量子メモリを微小光共振器に搭載し、パーセル効果によって光との相互作用を増強、さらに光導波路を介して光ファイバに接続することで、外部と高効率な通信を可能にすることを目指している。共振器と導波路にダイヤモンドを直接用いることを想定したとき、それらの形状はダイヤモンドの材料品質を劣化させない加工プロセスに大きく制約される。そのような導波路を光ファイバに直接接続しても、高効率は得られない。そこで本研究では中間導波路を用意し、それを介した高効率な接続を検討した。

当該年度は、量子メモリを内蔵させるダイヤモンド層と圧電材料である AlN 層の積層を導波路の基本構造に決定し、シリコンフォトニクス技術によって汎用に製作できる SiN 導波路プラットフォームとの接続構造を、時間領域有限差分法により設計した。両者の先細りテーパ構造を重ねる構造を検討したところ、量子メモリの遷移波長として議論されている 637 nm において、95%以上の透過効率が得られることを計算した。これは損失 0.3 dB 以下に相当し、当初目標を大幅に下回る低損失が予測された。さらにビーム状の同積層構造の導波路に1次元の円孔列を並べた1次元フォトニック結晶共振器の設計も開始した。既に報告例がある円孔配列を参考に、さらに進化計算を用いて自動最適化を行った結果、Q 値 5,400 以上、モード体積が媒質内波長の 3 乗の 0.72 倍となり、偏波の平均化を行ったときのパーセル係数として 190、偏波の向きが最適になったときに 570 を見積もった。今後、この結果をさらに顕彰すると共に、導波路と共振器の結合効率を高めるアポダイズ構造も設計し、トータルでの高効率化を狙う。

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: フォノニック結晶音共振器の研究開発

● ダイヤモンドフォノニック結晶共振器の設計の実施

当該年度実施内容

ダイヤモンドを母材とし、フォノン(音子)と量子メモリの結合増強を可能にするダイヤモンドフォノニック結晶ナノ共振器(音共振器)について設計を行った。

フォノニック結晶は、弾性波(フォノン)に対する機械特性の人工周期構造である。フォノニック結晶中では、その周期と同程度の波長を有するフォノンはブラッグ回折により干渉し、伝搬特性が大きく変化する。本研究開発は、この干渉を利用したフォノン伝搬制御により、フォノンを可能な限り小さな体積を有する共振器に時間的および空間的に強く局在させることで、増強されたひずみによって共振器内に設置された量子メモリとの相互作用を介して、弾性パーセル効果による高効率な量子メディア変換を可能にする系を設計することを目的とする。

有限要素法を用いた線形弾性モデルにより、ダイヤモンド構造中のフォノン伝搬に伴う変位およびひずみ解析を行い、フォノニック結晶ナノ共振器の固有機械振動モード解析と機械 Q 値解析を行うシミュレーターを構築した。シミュレーションは 3 次元で行い、実験を行う極低温における物性値を調査して使用し、第一段階として先行研究の

結果を再現することを確認し、信頼性を確認した。フォノン結晶ナノ共振器を設計するには、最終的にマイクロ波や通信波長帯フォトンも含めたシステム全体として機能する必要がある。そのため、フォノン系単体の検討にとどまらず、フォトニック結晶系や現在検討されている AlN フォトニック・フォノンサーキットとの連続性を持った系となるような設計が必須となる。しかし、AlN とダイヤモンドが複合した系では、所望の性能を実現する共振器が設計・作製可能か不明なため、小坂グループが本系、当グループがダイヤモンド系を担当して並行して研究を進めることとなった。また、当初はフォノン結晶ナノ共振器系の設計であったが、補正予算による計画変更によって、ダイヤモンドオプトメカニカル共振器の設計を行うことになった。シミュレーターを新たに構築し、高 Q 値化に向けた検討を進めた。まず、MIT のグループが検討中のオプトメカニカル共振器の設計指針を踏襲し、加工精度により低下する光共振器 Q 値を設計段階で上げすぎず、モード体積を小さくする方針とした。そして、1 次元オプトメカニカル共振器で音共振器のモード体積が、波長の 10 万分の 1 程度と極めて小さく、光共振器 Q 値は 30,000 程度の共振器設計を得た。音共振器の Q 値は設計値で 100 万以上であり、目標を達成した。

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

● ピエゾマイクロ波共振器の材料探索、構造設計の実施

当該年度実施内容

ピエゾマイクロ波共振器について、マイクロ波光子を波長が 5 桁短い通信用光子と同程度の波長 ($\sim 1 \mu\text{m}$) の音波 (弾性波) に変換するためのピエゾマイクロ波共振器の材料探索、構造設計を行った。量子メモリとなる NV、SiV などのダイヤモンド色中心は、軌道とスピンが強く結合するため、軌道を介したスピン制御が可能なることから、本課題では音子による軌道励起を誘起することで、音子から量子メモリへの変換を目標とする。具体的には、マイクロ波から音波 (弾性波) への変換を目指し、窒化アルミニウム (AlN) 等のピエゾ材料をダイヤモンドあるいはサファイヤ上に形成し、1~10 GHz 帯の周波数のマイクロ波により音子 (弾性波) を生成するための準備を行った。目標とする性能は、研究開発項目2の研究開発課題3で開発するフォノン結晶の評価に用いる音源として十分な性能を示すことである。あるいは、マイクロ波による量子メモリの量子操作を行うべく、1~10 GHz 帯のマイクロ波から変換された音波により量子メモリの量子操作を行うことである。当該年度は、候補として考えられるデバイスの設計と設計したデバイスの特性についてのシミュレーションを行った。加えて、マスター方程式によりモデル系の時間発展を計算し、量子変換効率や高効率の変換に要求される共振器性能を見積もった。その結果、1~10 GHz 帯のマイクロ波から変換された音波により量子メモリの量子操作を行う可能性を示すことに成功した。ピエゾ材料の候補となる窒化アルミニウム (AlN) のダイヤモンド上へのエピタキシャル成長については、産総研との連携で順調に準備を進めた。以上のように、目標としたピエゾマイクロ波共振器の材料探索を達成した。

課題推進者:小坂 英男(国立大学法人横浜国立大学)

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大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が設置されている。主たるメンバーとして、PM 補佐 1 名、知的財産プロデューサー1 名、事務職員 3 名、URA1 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 3 年 4 月には将来の課題推進者候補を含む客員教授、客員准教授、客員研究員各 1 名が IAS に着任した。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。

工業所有権情報・研修館(INPIT)の知的財産プロデューサー派遣事業の準備派遣 B への応募が採択され、知的財産プロデューサーが令和 3 年 10 月より IAS に客員研究員として着任し、PM 及び PM 補佐とも連携し知財権利化や知財戦略策定を行っている。

課題推進者会議を令和 3 年 7 月以降、毎月 1 回 90 分程度オンラインで開催している。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良い機会となっている。令和 3 年 11 月 25 日、令和 4 年 1 月 27 日開催の課題推進者会議では運営会議を同時に開催し、それぞれ MS 実施規約改訂案、新課題推進者の承認手続きを行った。

令和 3 年 9 月 27 日には第 3 回 PD-PM 個別会議において産総研及び物材機構へのオンラインによるサイトビジットが行われ、北川 PD、小坂 PM、課題推進者である加藤宙光氏、寺地徳之氏との間で意見交換が行われた。

令和 4 年 3 月 28 日には小坂 PJ が目指す量子インターフェースについての勉強会を開催し、横浜国大の関口助教、黒川助教がプロジェクトメンバーに対してレクチャーを行った。

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。設計を東大が担当、素子の作製を産総研及び物材機構が担当、その評価を横国大が担当、フィードバックするなど、各研究開発機関の協働も進めている。

(2) 研究成果の展開

INPIT より招聘した知的財産プロデューサーを中心にグローバルな技術動向調査や知財戦略の構築を進めている。これまでに各課題推進者のうち、寺地徳之氏(物材機構)、加藤宙光氏(産総研)、小野田忍氏(量研機構)が持つバックグラウンド特許の調査と関連性を整理し、競合する企業である Element Six 社が持つ特許群についても調査を進めた。

古河電気工業と共同研究契約を締結し共同研究資金を獲得しているほか、量子インターネットタスクフォース(QITF)の活動との関連で慶応義塾大学 SFC 研究所と共同研究契約を締結した。

ミュンヘン工科大の Jonathan Finley 教授らのグループと共同研究を進めるべく、令和3年10月20日にお互いのプロジェクトメンバーが集まって会合を開催し、それぞれのプロジェクトの紹介等を行った。その後も MoC 等の締結に向けた調整を行っている。

(3) 広報、アウトリーチ

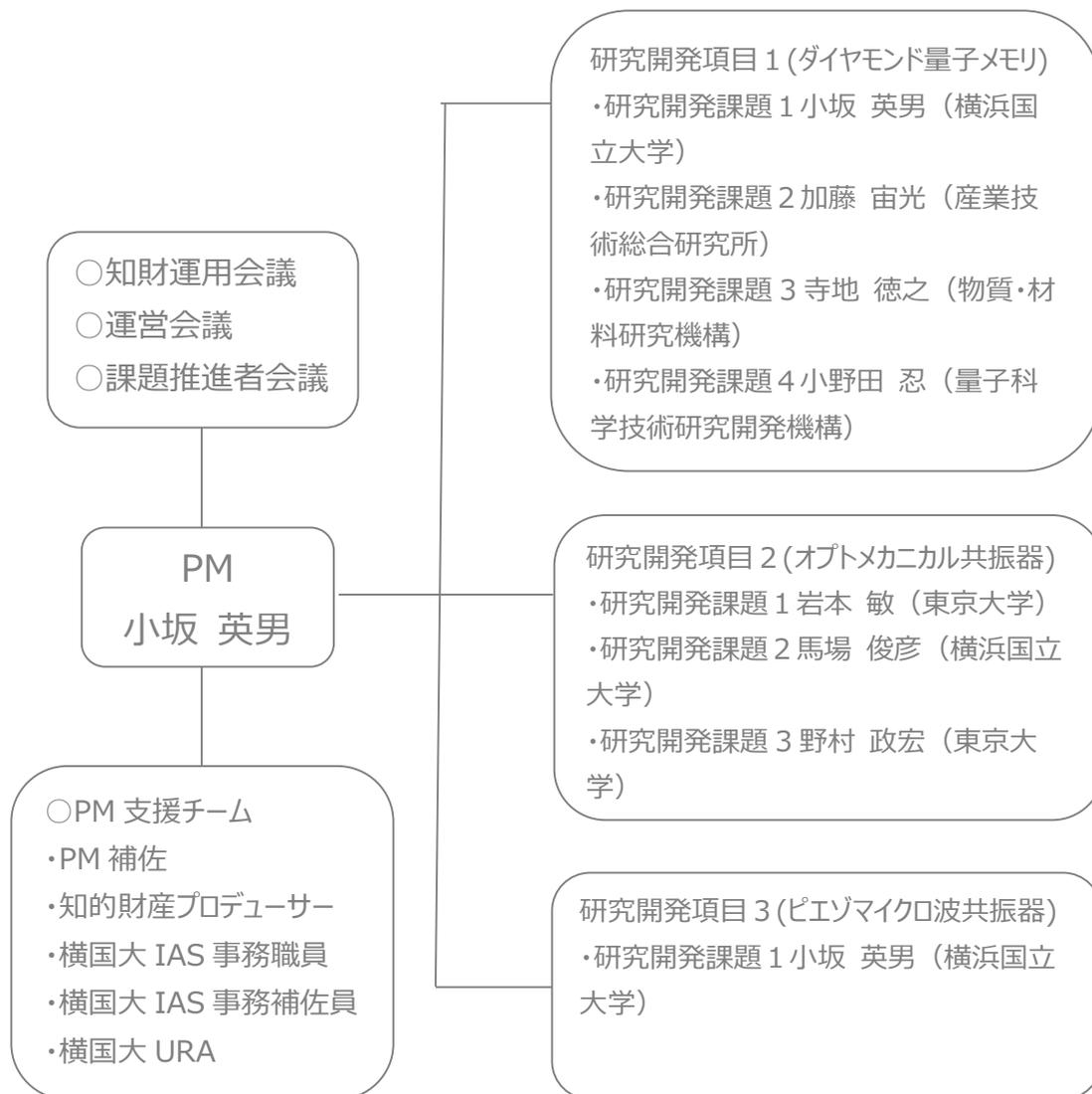
令和3年12月15日に横浜国大の小坂 PM、関口助教らによる Communications Physics に掲載された論文について「世界初、ダイヤ中の電子と光子の幾何学的な量子もつれの生成に成功」と題したプレスリリースを行い、横浜国大、JST、EurekAlert!のウェブサイトで紹介したほか、日本経済新聞や各種ネット記事でも内容が掲載された。

令和3年12月18日に横浜国大の院生2人が高校生に対してオンラインで量子情報勉強会のアウトリーチを行った。

(4) データマネジメントに関する取り組み

令和3年度データマネジメントプラン(様式405-1)に基づき、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 を令和3年8月に立ち上げ、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

当該年度の知的財産プロデューサーの活動計画を策定した。これに基づき各課題推進者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った。また国内の産学の研究機関と共同研究契約を締結した。

課題推進者会議及び運営会議 実施内容

令和3年7月から毎月1回、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し、各種報告、進捗状況の確認、課題推進に向けた討論を行った。重要事項については運営会議を開催し、決議を行った。

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	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	0	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	6	3	9
口頭発表	16	3	19
ポスター発表	4	0	4
合計	26	6	32

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	3	3
(うち、査読有)	0	3	3

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	2	0	0
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	2	0	0

受賞件数		
国内	国際	総数
8	0	8

プレスリリース件数
1

報道件数
18

ワークショップ等、アウトリーチ件数
1