



## 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

## 2020年度版

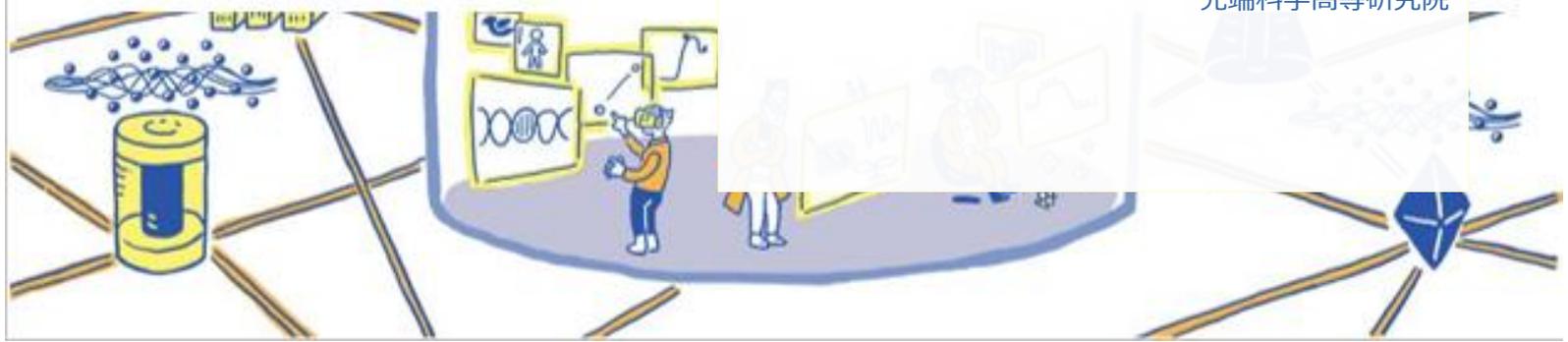
2020年12月～2021年3月

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



## 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](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

令和2年度は下記の研究を実施した。

### (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)

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量子もつれ生成を高い忠実度で可能とする量子もつれ光源の開発手法を検討した。

研究開発課題2:(ダイヤモンド量子構造の研究開発)

ダイヤモンドの電荷状態の安定化やフォトニック結晶、フォノン結晶などのダイヤモンドナノ加工技術を検討し、ダイヤモンド量子メモリのプラットフォームとなる量子構造のアイデアを考案した。

研究開発課題3:(ダイヤモンド量子結晶の研究開発)

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(化学気相成長)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。

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)

光子場の増強のためのフォトニック結晶共振器をダイヤモンドを母材として検討した。

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)

ダイヤモンドオプトメカニカル結晶の光回路との結合を検討した。

研究開発課題3:(フォノン結晶音共振器の研究開発)

音子場の増強のためのフォノン結晶共振器をダイヤモンドを母材として検討した。

### (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)

高効率なマイクロ波と音子の相互変換を可能とするピエゾ材料を検討した。

## 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:(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手法の検討

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量子もつれ生成を高い忠実度で可能とする量子もつれ光源の開発手法を検討した。ダイヤモンド色中心の中でも特に窒素空孔中心(NV 中心)を用い、自然放出により発光した光子と発光後に NV 中心に残された電子スピンの間の量子もつれ生成を高い忠実度で可能とする手法を検討した。現状では発光と同じ波長をもつレッドレーザーを用いて共鳴励起を行っているが、この手法では励起光と発光の切り分けが難しく、忠実度が著しく劣化する。今年度は、これに代わる手法としてグリーンレーザーを用いて非共鳴励起を行う手法、レッドレーザーを用いながらも NV 中心の発光に関与する励起状態とは別の励起状態に共鳴させる手法の両方を検討した。

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
- ダイヤモンドナノ構造の作製
- ダイヤモンドピエゾ構造の作製

ダイヤモンドの電荷状態の安定化やフォトニック結晶、フォノン結晶などのダイヤモンドナノ加工技術を検討し、ダイヤモンド量子メモリのプラットフォームとなる量子構造について議論を進めた。ダイヤモンド中の NV<sup>-</sup>、SiV<sup>-</sup>などの色中心の電荷状態の安定化について、n型ドーピングによるフェルミ制御技術と接合を用いたバンドエンジニアリングから可能性を検討した。また、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の作製に向け、電子ビーム露光装置による微細パターン描画およびフォーカスイオンビームによる直接加工の両面から議論を進めた。ダイヤモンドピエゾ構造の作製については、既存のMOCVD装置を用いてダイヤモンド上に窒化アルミニウム(AIN)のヘテロエピ成長を試み、ピエゾ効果を有する薄膜形成における課題抽出を行うと共に、音子(弾性波)を生成するための構造を検討した。

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

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(化学気相成長)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。(課題1、2と連携)

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条件の探索

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、日本独自のSnV中心、PbV中心などの候補を探索した。(課題3と連携)

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

ダイヤモンド色中心を用いた量子メモリの高性能化に求められる色中心と光子の相互作用の増強を実現するため、光子場の増強を可能にするフォトニック結晶共振器についてダイヤモンドを母材として検討した。特にナノビーム型と呼ばれるフォトニック結晶構

造に注目し複数のダイヤモンドフォトニック結晶共振器構造を検討し、数値計算を用いて共振器モード波長や光子に対する Q 値およびパーセル増強因子を求めた。その結果、窒素空孔中心 (NV 中心) の発光波長に共振周波数を持ち、高い Q 値とパーセル増強因子を実現しえる共振器を設計できることを示した。

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

ダイヤモンド光共振器／光導波路から光ファイバまでを接続する SiN 導波路を検討した。SiN 導波路は、光集積プラットフォームとして拡大する Si フォトニクス CMOS プロセスに含まれ、スポットサイズ変換器を介したファイバとの接続損は 0.5 dB 以下と低い。今年度は、この導波路上にダイヤモンド薄膜を転写プリントして導波路加工する状況を想定し、これと SiN 導波路の結合を FDTD シミュレーションした。その結果、両導波路をテーパ状にして重ねた構造では、ほぼ完全な結合 (損失が評価限界以下) が計算された。より製作しやすい構造として、SiN 導波路をテーパ状にしない場合も同様の結合が得られたが、光閉じ込めが弱まった。これがダイヤモンド共振器のパーセル効果に与える影響を考察する必要がある。

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)

- 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の設計  
フォノン結晶音共振器の研究開発については、ダイヤモンドを母材とし、量子メモリとフォノンの結合を増強するための高 Q 値と小さなモード体積を両立するナノ共振器について先行研究を調査し、シミュレーションを構築した。ハーバード大学の Loncar グループが報告した (Optica 3, 1404 (2016)) 断面が三角形のナノビーム型オプトメカニカル結晶構造を参考とし、有限要素法を用いて線形弾性論に基づくシミュレーションを行い、結果をほぼ再現した。機械振動 Q 値は、シミュレーションモデルに実際のエネルギー損失を取り込めないため実測するしかないが、当該グループは実験的 Q 値 4,100 (5.52 GHz) を報告しており、本研究の目的に使用できると考えられる。また、AlN サーキットとダイヤモンド薄膜のフォノン伝搬シミュレーションを構築・実施し、テーパ構造を用いてエネルギー透過率を調査した。

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)

- ピエゾ材料探索

マイクロ波光子を音波 (弾性波) に変換するためのピエゾ材料の検討と、弾性波の励振・伝播法についての議論、ならびに弾性波のシミュレーションを行った。マイクロ波の波長は通信用光子 (可視光を含む) より 5 桁長く、ダイヤモンド中の色中心と各種場の

相互作用の増強に不可欠なマイクロな共振器を作ることができない。マイクロ波を通信用光子と同程度の波長(～1 μm)の音子(弾性波)に変換することで、弾性波の波長程度のマイクロな共振器を作成できる。窒化アルミニウム(AIN)あるいはLiNbO3、ZnO等の大きなピエゾ効果をもつ材料を候補とし、マイクロ波光子を音波(弾性波)に変換するための材料的検討を行った。並行して、マルチフィジックスシミュレーションソフトによる表面弾性波とバルク弾性波のシミュレーションに着手した。

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

計画確認会の開催

運営会議(キックオフミーティング)の開催

知財運用準備会の開催

研究チーム毎の研究会を開催

研究開発プロジェクトの展開

量研機構との共同研究契約を締結

民間企業との共同研究契約を締結

#### (2) 研究成果の展開

特になし

#### (3) 広報、アウトリーチ

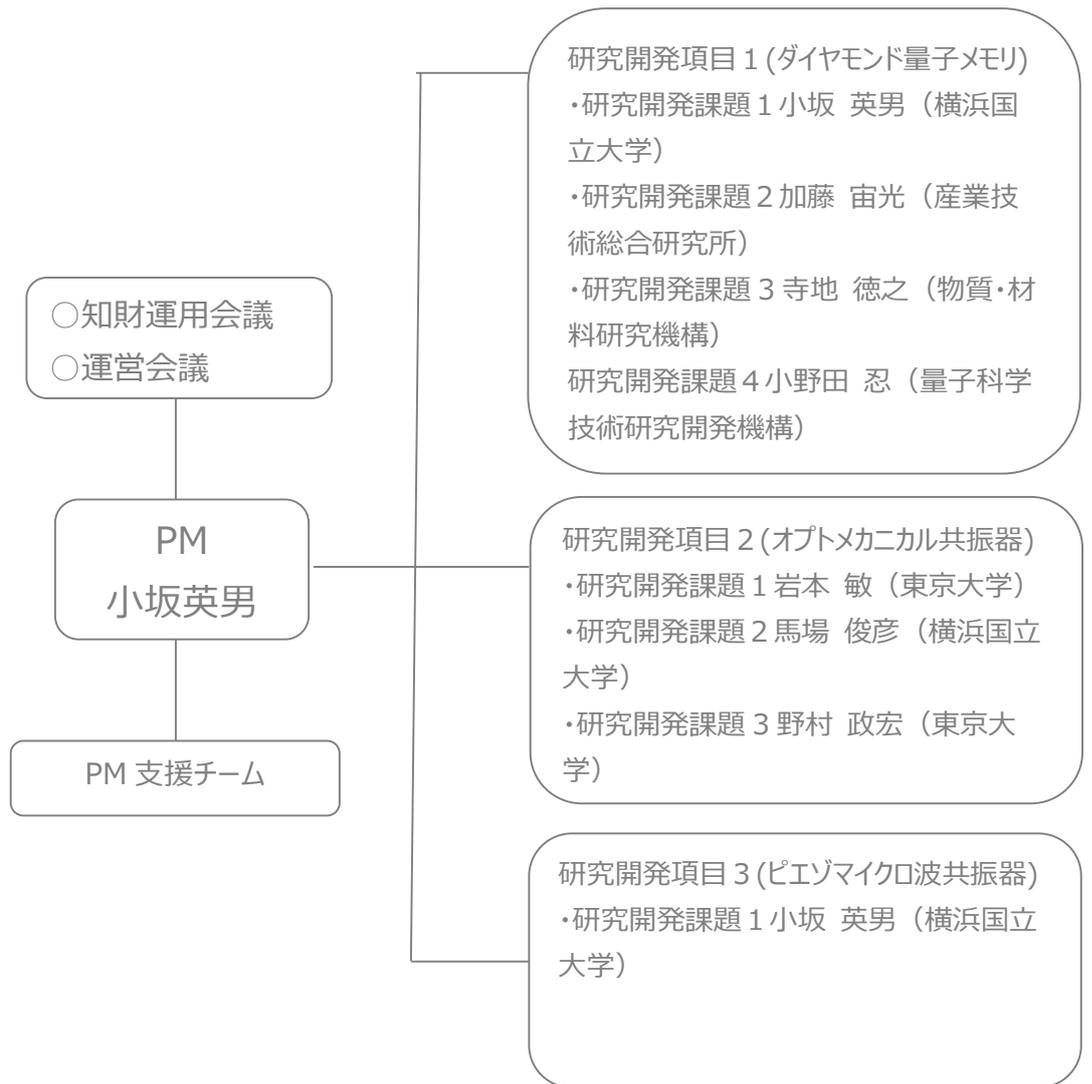
ムーンショット事業小坂プロジェクトのホームページを作成

講演会の開催

#### (4) データマネジメントに関する取り組み

計画したデータマネジメントプランに従い各種データを保管

#### 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

知財運用会議の前段階にあたる知財運用準備会を開催し、PM、研究戦略企画マネージャーと連携して知財戦略のベースをつくる知的財産プロデューサーを工業所有権情報・研修館 (INPIT) から受け入れる手続きを進めた。

##### 運営会議 実施内容

運営会議の前段階にあたる計画確認会を開催し、課題推進者候補と今後の計画について検討を行った。その後、実質的に第 1 回目の運営会議にあたるキックオフミーティングを開催し、全課題推進者らと現状をより深く理解すると共に、課題推進に向けたアイデアの検討を行った。

## 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	5	1	6
口頭発表	4	1	5
(うち、査読有)	0	0	0
ポスター発表	3	0	3
合計	12	2	14

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

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	0	0	0
その他	0	0	0
合計	0	0	0

受賞件数		
国内	国際	総数
0	0	0

プレスリリース件数
1

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
1