



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

イオントラップによる光接続型誤り耐性

量子コンピュータ

高橋 優樹

沖縄科学技術大学院大学 量子情報物理実験ユニット



1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

(1) 研究開発プロジェクトの概要

複数のイオントラップを光で連結する新しいアイデアにより、従来技術では達成できない、大規模化が容易なイオントラップデバイスを開発する。それにより、2050年には、大規模な量子コンピュータの実現を目指す。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

本プロジェクトはこれまで、イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータの実現に必要なイオントラップモジュールを構成する基盤技術の確立およびそのモジュールの基盤となるデバイスの基本的な動作を実証することを主要な目標としてきた。一部の研究開発項目の目標を見直し、柔軟に対応することで、本プロジェクトは計画通りに前進し、目標を達成している。次に、研究開発課題ごとの当該年度における進展および実施状況の概要を述べる。

研究開発課題 1-1 では、カルシウムイオンを使った実験では、実際にトラップしたイオンを用いたレーザー冷却、レーザー分光、過剰マイクロ運動補正などを行った。バリウムイオンの実験では、必要となるレーザーシステムの整備を行った。今年度中でのバリウムイオンの捕獲には至らなかったものの、バリウムイオン導入のための予備実験を実施し、信号を得た。導電性ミラーの開発ではITO 薄膜を蒸着した高反射ミラーの光学損失の評価を行った。研究開発課題 1-2 では、半導体ミラー基板上のトラップ電極作製とその動作確認を行った。研究開発課題 2-1 では、研究開発課題 2-1 では、クライオイオントラップを実施し、さらに超伝導ヘリカル共振器技術を開発することで、超低 RF 強度でのイオントラップに成功した。また、イオントラップ電極に集積される超伝導マイクロ波回路の作製と評価を行い、既存のマイクロ波照射回路に比べて高い性能を出せることを示した。その他に、超伝導光検出器集積化に向けた基礎実験として、超伝導光子検出器が、UV光に対しても高い内部効率を示すことを確かめた。また、光コムを用いてレーザーの周波数安定化を行った。研究開発課題 3-1 では、複数イオン配列振動モード間結合の準備として、3イオン配列の軸方向振動モードの分光、個別アドレッシングに関する予備実験を行った。単一イオン軸方向振動モードの運動コヒーレンスを評価し、112 ms というコヒーレンス時間を得た。単一イオンにおける x, y 方向振動モード間誘導ラマン遷移について、コヒーレンス時間内の振動回数を改善した。単一イオンの軸方向振動モードを用いて熱浴エンジニアリングによる振動状態におけるスキューズド状態の生成実験を行った。研究開発課題 4-1-1 では、高性能イオントラップ作製・評価技術の確立を目標として、平面型イオントラップの改善、立体型イオントラップの特性改善とトラップ性能検証実験、立体型イオントラップへの光インターフェース実装に関する研究開発、およびイオントラップ評価システムの性能向上に関する研究開発を実施した。研究開発課題 4-1-2 では、単一 $^{171}\text{Yb}^+$ をラム・ディッケ領域へ閉じ込める技術の確立を目標に研究を進めた。その確認のためにおこなう $^2\text{S}_{1/2}(F=0) \rightarrow ^2\text{D}_{3/2}(F=2)$ 時計遷移分光を進め、ゼーマン成分の同定とサイドバンドスペクトルの検出まで進めた。また、NICT から導入された立体型イオントラップの試作機をもとに、設置する真空槽の概形を決定した。研究開発課題 4-1-3 では、 $^{138}\text{Ba}^+$ によるクーロン結晶の形成を試み、線形 Paul トラップへの Ba^+ の捕獲を確認した。トラップに Ba イオ

ンを同位体選択的に導入するための要素技術であるレーザーアブレーションと光共鳴イオン化について、アブレーション生成粒子から荷電粒子を除去する技術及びアブレーションターゲット作製方法の開発、励起・イオン化用レーザーの整備と Ba 蒸発源の特性把握を行った。高性能汎用イオントラップを搭載する真空パッケージの設計を終えた。研究開発課題 4-2 では、イッテルビウムイオンを用いた 1 量子ビットゲート実験に向けて、イオンのローディング実験を行い、イオン配列の画像取得に成功した。誘導ラマン遷移誘起に用いるピコ秒パルスレーザーの繰り返しレート安定化のために、外部フィードフォワード制御用信号発生器の位相ロッキングを行った。4 イオン配列の個別アドレッシングのための集光光学系を構築した。平面型トラップにおけるイオン直線輸送のための電圧制御システムを開発した。また X 型ジャンクション構造をもつトラップについて、比較的単純なレイアウトでジャンクション中央に生ずるポテンシャルの凹凸を抑えられることを見出した。イオンの2次元的な配列制御では、イオンの2列配列を実現し、補正電圧による整形を実施した。さらに2次元的なイオン配列の多数の振動モードを冷却するための手法として、電磁誘導透過を利用した冷却方法の検討と、1列配列による冷却効果の確認を行った。研究開発課題 5-1 では、イオントラップデバイス用の集積化光導波路回路の作製のため、イオン励起用レーザー光を導入する多チャンネル光導波路と光ファイバーを接合した光オンチップ素子技術の開発を行った。レーザー光導入のパッシブ・コントローラ部に相当する光導波路デバイスでは、Sr イオンのレーザー冷却のため適応レーザー波長に対応する導波路の広帯域化が必要であることから、可視光(422nm)と近赤外波長(1092nm)の光学構造の最適化と光導波路、および回折格子素子の作製を行った。アクティブ・コントローラ部に相当する位相変調器(フェーズシフタ)の開発では、近赤外域を中心とした位相制御デバイスの作製を進め、光オンチップ素子につながる小型化と集積化デバイスの検討を行った。研究開発課題 5-2 では、光回路基板のフリップチップ集積プロセス開発と個別イオンアクセス可能な光導波路グレーティングの設計・試作・光学評価を行った。研究開発課題 6-1 では、令和 4 年度に電場解析ソフトを用いて設計したジャンクション電極について、これまで平面トラップで実績のある企業と製作に向けた検討を行った。それと並行して昨年度準備を進めていた実験系を用いて、課題 4-1-1(NICT)の協力のもと平面型イオントラップ装置を構築し、捕獲イオンの 1 つである Ca イオンのトラップ実験を実施した。研究開発課題 7-1 では、イオンと原子のインターフェース開発に向けてストロンチウムイオンとストロンチウム原子のトラップが確認された。線形イオントラップ中にて単一イオンまたはクーロン結晶のドップラー限界温度付近までの冷却が行え、磁気光学トラップにおいては十分な原子数の原子集団捕獲と冷却に成功した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

代表機関の沖縄科学技術大学院大学(OIST)に設置された PM 支援チームでは、事務全般の統括管理、データマネジメント、ウェブサイトの管理、知財戦略、最新研究動向の調査、プロジェクトに係る報告書などの取りまとめ支援、プロジェクト間連携の窓口などを実施している。当該年度の実施状況としては、研究開発プロジェクトの進捗状況を把握するために、課題推進者および一部の研究参加者を含めた課題推進者会議を大阪大学で開催した。アウトリーチ活動では、令和 6 年度に OIST で開催する国際シンポジウムの

準備を進めている。データマネジメントに関する取組では、GakuNin RDM を利用した研究データを各課題推進者と共有することを可能とした。当該年度のプロジェクトマネジメントの実施状況は、概ね計画書に沿って進められた。

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:イオントラップの量子光接続に関する研究開発

研究開発課題1:微小光共振器一体型線形イオントラップの開発

当該年度実施内容:

(1)微小光共振器一体型イオントラップの開発

令和4年度にイオン捕獲に成功したカルシウムイオンの系を用いて、引き続きイオンを使った実験を行った。カルシウムイオンの $S_{1/2}$ - $P_{1/2}$ 遷移を使ったレーザー冷却、蛍光測定によるレーザー分光を行った。また、それらに付随するソフトウェアの開発を ARTIQ システムの上で行った。RF 信号と蛍光信号の相関を取ることでマイクロ運動の振幅を測定する装置を、FPGA を用いて自作した。これにより、余剰マイクロ運動の補正を自動で行えるようになった。また、ファイバー共振器と組み合わせることを念頭に現行のイオントラップの改良版の設計を行い、イオントラップ、PCB 基板の仕様を固めた。以上の進捗により当該マイルストーンは達成されたとと言える。

(2)バリウムイオンを用いた共振器 QED 実験

バリウムイオンに必要なレーザー光源一式を導入した。レーザー波長としては、455、493、553、614、650nm のレーザーが必要となる。このうち、493、553、614nm はそれぞれ 986、1106、1228nm の光源から第二高調波発生を利用して生成する必要がある。これら、第二高調波発生のための光学系を整備し、全ての波長において十分な出力を得た。次に、イオントラップへのバリウムの導入に必要なバリウム原子の真空槽内における生成過程に関する検討、および予備実験を行った。生成過程としては、電熱式のオープンを使う方式とパルスレーザーによるバリウム化合物のアブレーションがあり得る。電熱オープンによる方式は、市販のオープンを購入し、真空下で試験を行ったものの、正常な動作を確認できなかった。レーザーアブレーションに関しては、塩化バリウムおよびチタン酸バリウムの標的に対してレーザーを照射し、それぞれにおいて質量スペクトロメーターによりバリウムの信号を確認できた。これによりレーザーアブレーションによりバリウムを導入できる見込みが得られた。バリウムのイオントラップ装置はカルシウムのそれとほぼ同一であるため、改良版イオントラップを両者に使う前提で設計を進めた。当該年度マイルストーンである Ba⁺イオンのトラップおよびレーザー冷却には到達できなかったものの、それに向かって進捗しており、令和6年度内に実現する予定である。

(3)低温環境で動作する微小光共振器一体型イオントラップの開発

当該研究テーマは、他に有望な研究テーマ(MEMS ミラー共振器)が持ち上がったため、これを実施することを取りやめ、計画を見直した。代わりとなる研究テーマ(MEMS ミラー共振器)については、必要となる装置の選定を行い、ミラーの設計、数値シミュレーション

を行い、試料の作製を開始した。

課題推進者:高橋優樹(沖縄科学技術大学院大学)

研究開発課題2:半導体ミラーを用いたイオンー光インターフェースの開発

当該年度実施内容:令和5年度においては転写プリント法により集積された半導体ミラーを用いて高フィネス光共振器を作製することを目標として開発を進めてきた。しかしながら転写プリントによる微小ミラーの集積の歩留まりが悪く、本研究を進めるにあたって適さないと判断した。したがって転写プリントによる微小ミラーの集積によりイオントラップ上にミラーを集積するのではなく、半導体ミラー基板上にイオントラップ電極を作製することで歩留まり良く半導体ミラーの集積されたイオントラップチップを作成することを着想した。実際にこれを作製するためのプロセスフロー(ガラス薄膜の製膜、フォトリソグラフィ、電子線蒸着、リフトオフおよびウェットエッチング)を開発し、サンプルを作製した。これをPCBにワイヤボンディングにより配線し、RF 電圧及び DC 電圧を印可可能にした(図1)。これを真空槽に導入し電圧印可のテストを行った。DC 電圧は問題なく個別に印可することができ、かつ RF

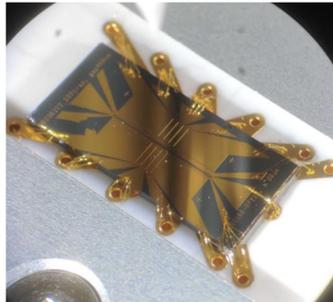


図1. 半導体ミラー基板上のイオントラップ(配線済み)

電圧に関してもイオントラップに十分な電圧をトラップ基板に印可可能であり、超高真空環境にも問題なく導入できたことも考慮するとイオントラップに十分利用可能なチップが作製できたといえる。

このチップとファイバミラーを組み合わせた微小光共振器のテストが本年度のマイルストーンとなるが、上記のようにミラーの集積手法から根本的に修正を試みたこと、本研究室で所持していたファイバミラーが損耗したこと、新たにファイバミラーを調達する際に部材の調達に遅れが出るなどしてファイバミラーの到着が年度末になったことなどから、本年度マイルストーンの光共振器の実現は次年度へと持ち越しとなった。

課題推進者:長田有登(東京大学)

(2) 研究開発項目2:超伝導マイクロ波回路を用いたイオントラップの開発

研究開発課題1:超低振動クライオシステムおよび超伝導回路イオントラップの開発

当該年度実施内容:

- ・ 超低 RF 強度クライオイオントラップ

令和5年度では、これまでに開発をした冷凍機システムを用いて、6 K 環境でのイオントラップを実施し、⁸⁸Sr イオンを捕獲することに成功した。さらに世界中のイオントラップ技術で広く用いられているヘリカルRF共振器を超伝導化し、10,000 程度のQ値を持ち、大振幅のRFが印加可能な共振器を開発することに成功した。この超伝導ヘリカル共振器を用いることで、約 3mW のRFで Sr イオンを捕獲することができた。これは通常イオントラップに用いられる強度に比べて1桁から2桁弱い強度である。低強度のイオントラップが可能になったことにより、クライオ環境でより集積性の高いイオントラップが可能になり、さらに共振器の狭いバンド幅により、より安定で高性能なイオントラップが可能になる。

・低振動4K 冷凍機

超伝導マイクロ波共振器の性能が温度に敏感であるため、これまで用いていた 6K の冷凍機よりさらに低温環境を実現する 4K まで冷える低振動冷凍機の開発をおこなった。超高真空チャンバーからなり、また除振のために高純度銅ブレード線を利用した低振動冷凍機を導入した。また、対物レンズを冷凍機内部に配置し、それを調整する機構を設計し、より低温にまで冷えるクライオイオントラップ実現の準備をおこなった。

・マイクロ波共振回路の集積化

イオントラップにおけるマイクロ波ゲートのさらなる高性能化を目指し、高強度MWが印加可能な超伝導 Nb マイクロ波共振器を開発し、そのトラップチップへの集積をおこなった。トラップは2枚の平面超伝導回路からなり、それらをフリップチップ手法によって組み立て3次元構造を持つイオントラップチップを実装した。

超伝導マイクロ波共振器は、よく用いられる Nb 薄膜に比べて膜厚の厚い Nb 膜をシリコン基板上に製膜し、微細加工技術によって回路パターンを作製する。この方法によって1万を超えるQ値の超伝導マイクロ波共振器を実現した。さらに、超伝導マイクロ波共振器に流れる電流の限界を決める要因を明らかにするため、様々なデザインの共振器の高強度マイクロ波による応答を評価した。この結果、超伝導表面に局在化する磁束密度が臨界磁場程度になるときに超伝導マイクロ波共振器が動作しなくなることがわかり、物性限界付近にまで電流を印加できていることがわかった。この電流に伴うマイクロ波磁場勾配の大きさは、これまで実現されてきたマイクロ波ゲートのものに比べて数倍大きく、またこのときに必要な電力は 500 倍程度少なくて済む。超伝導共振器を使用することで既存のマイクロ波ゲートの性能を大きく凌駕できることがわかった。

フリップチップ実装については、ボッシュ法を用いた深堀加工を用いた3次元構造形成とマイクロビーズを利用することで、チップ間隔精度・位置精度がマイクロメートル程度のフリップチップ実装に成功した。実際のトラップ電極・超伝導マイクロ波共振器を集積化したチップを用いてこれらフリップチップ実装をおこなった。

・超伝導ナノワイヤーを用いた紫外光検出

クライオ環境下でイオントラップをおこなうクライオイオントラップをさらに活かすため、超伝導光子検出器が埋め込まれたイオントラップを目指している。これまで窒化物超伝導を用いた光子検出器は通信波長帯で用いられてきたため、本年度は、この検出器のUV光に対する応答を評価した。UV光を超伝導ナノワイヤー光検出器に照射し、バイアス電流を変化させることで、プラトー領域と呼ばれるバイアス電流の変化により信号量が変化しない領域の観測に成功した。これは、ナノワイヤー内部での内部検出効率がほぼ 100%にな

っていることを示しており、超伝導ナノワイヤー光検出器がUV光に対して利用可能であることを示す。

・光コムを用いたレーザー周波数安定化

イオントラップに使う光源は、ガスセルや原子ビームで周波数を安定化できる中性原子の系とは異なり、周波数標準を用意することが難しい。そこで、系を大きくしていくために光源を追加する際には、レーザーの絶対周波数を安定化するようなシステムが重要になる。この実現のため、差周波コムと呼ばれる絶対周波数が安定化された光コムを準備し、その光コムにイオントラップ用のレーザーを周波数安定化する。令和5年度では、差周波コムを用いてイオントラップに使うレーザー光源の周波数安定化をおこない、23 時間の連続ロックに成功した。

課題推進者:野口篤史(東京大学)

(3) 研究開発項目3:振動自由度を用いた量子誤り訂正符号実装のための研究開発

研究開発課題1:振動状態の多モード量子制御と符号化への応用に関する研究開発

当該年度実施内容: 本年度は、複数イオン任意集団振動モード間ビームスプリッター相互作用を高忠実度で実現することにむけて、必要な準備を行った。

(誘導ラマン遷移による振動モード間結合を複数イオン配列の振動モード間結合に拡張するための準備について)

3 イオン配列の軸方向振動モードに対して操作を加える実験の準備を進めた。まず、軸方向集団振動モード周波数が比較的高い条件下で 3 イオン配列の軸方向振動モードの分光を行った。高い軸方向振動周波数を用いるのは、ドップラー冷却限界でも比較的低い軸方向振動量子数を実現するためである。また、729 nm 光による個別アドレッシングに関する予備実験を行った。3 イオン配列に一本の 729 nm 光ビームを動径方向から集光して照射し、それぞれのイオンに対して(230, 70, 0(同定不可)) kHz というキャリアラビ周波数が観測された。

(誘導ラマン遷移におけるデコヒーレンスの影響の抑制、ビームスプリッター操作の忠実度向上について)

誘導ラマン遷移におけるデコヒーレンスの影響を抑えるための方策の一つとして、「(a) 軸方向振動モードを用いる可能性についての検討・準備」を行った。また、並行して、「(b) 動径方向振動モードを用いてビームスプリッター操作の忠実度を向上させる取り組み」を行った。

まず「(a) 軸方向振動モードを用いる可能性についての検討・準備」の一環として、単一イオンの軸方向振動モードの運動コヒーレンスの評価を行った。そのために、運動ラムゼイ法にもとづく測定実験を行った。結果は図 2 に示したとおりであり、112 ms というコヒーレンス時間を得ることができた。この値は、例えば振動モードにおける GKP 状態の生成に成功したスイス・チューリッヒ工科大学のグループが論文で示している 30 ms 程度の運動コヒーレンス時間を大きく上回っており、軸方向振動モードが符号状態の生成等に必要となる状態操作に適した系であることを示唆している。

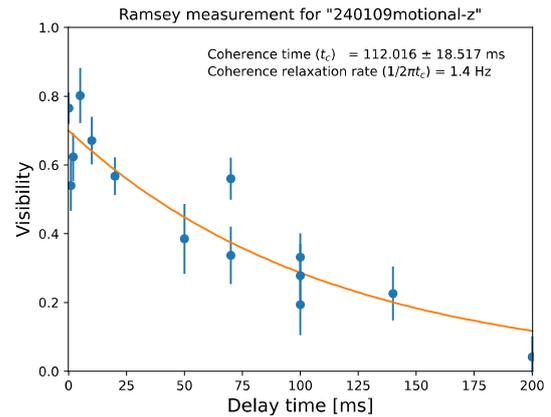


図 2 単一イオン軸方向振動モードに対する運動ラムゼイ干渉法によるコヒーレンス時間の測定結果。

(熱浴エンジニアリングによる振動状態におけるスクイーズド状態の生成)

熱浴エンジニアリングによる振動状態におけるスクイーズド状態の生成に関して、生成されるスクイーズド状態の精度(忠実度、スクイーピングパラメータ等で表される)を高めることを目指して研究を行った。このために、単一イオンの軸方向振動モードを用いて実験を行った。軸方向振動モードを用いた理由として、図 2 に示したように、同モードにて長いコヒーレンス時間が実現されていたことがあげられる。結果として、図 3 に示す結果が得られた。この結果においては、フォノン数分布における偶数性が反映されている可能性があるが、まだ再現性が十分ではないと考えており、さらに再現性よく観測するための改善を行ってきたいと考えている。

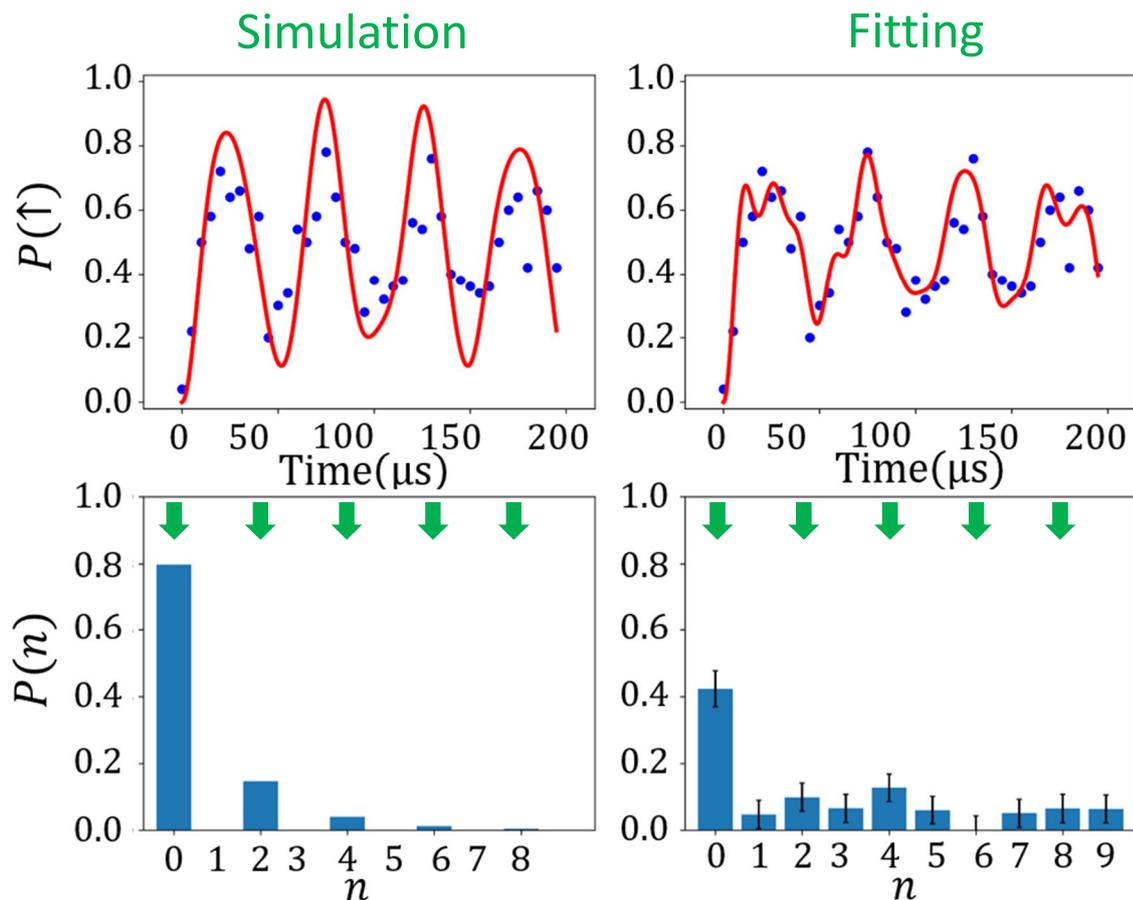


図 3 (a)ブルーサイドバンドラビ振動測定結果(青丸)および期待される曲線(赤実線、スクイージングパラメータ $r=0.70$)。 (b)期待される振動状態占有数分布。 (c)ブルーサイドバンドラビ振動測定結果(青丸)およびフィッティング結果(赤実線)。 (d)フィッティングにより得られた振動状態占有数分布。

課題推進者: 豊田健二(大阪大学)

(4) 研究開発項目4: 高性能イオントラップ作製・評価技術およびクラウド化基盤技術の確立

研究開発課題1-1: 高性能イオントラップ作製・評価技術の確立

当該年度実施内容: 高性能イオントラップ作製・評価技術の確立を目標として、(1)平面型イオントラップの改善、(2)立体型イオントラップの特性改善とトラップ性能検証実験、(3)立体型イオントラップへの光インターフェース実装に関する研究開発、(4)イオントラップ評価システムの性能向上に関する研究開発を実施した。(1)では、トラップを実装した平面型イオントラップ真空パッケージについて、真空度の改善、トラップ駆動小型電気回路の実装と動作検証、熱伝導を改善したトラップ電極の外注による試作、などのアップグレードを実施することに成功し、プロジェクト内チームへの供給を行うことができた。(2)では、ローパスフィルタ、温度センサ、RF用印加用Cuリボンなどを実装して特性を改善した立体型イオントラップを製作し、プロジェクト内チームへの供給を行った。また、X線CTを用いた3次元アセンブリ構造評価技術の開発に成功し、立体電極を形成する二枚の平面基板の二種類の固定方式について、固定精度を定量的に検証して優劣の判断をすることができた。(3)で

はレーザー改質による光導波路のモード解析を実施し、高性能化に硝材の探索が必要であることを明らかにするとともに、選択的エッチングではレーザー照射様式の改善によりオーバハンク構造や複雑なイオントラップ電極構造の試作に成功した。(4)ではイオントラップのヒーティングレートを計測するためのイオンの高分解能イメージングシステム構築と時計遷移サイドバンドを短時間で励起する光源の高出力化に成功した。

課題推進者: 早坂和弘(情報通信研究機構)

研究開発課題1-2: $^{171}\text{Yb}^+$ 時計遷移を用いた立体型イオントラップ評価

当該年度実施内容:

本研究開発課題を遂行するために、 $^{171}\text{Yb}^+$ 冷却・操作技術を向上させつつ、NICT 立体型イオントラップを動作させ評価していく。令和 4 年度までに、超微細構造をもたない単一 $^{174}\text{Yb}^+$ をラム・ディッケ領域へ閉じ込める技術をほぼ確立した。令和 5 年度は、確立した技術を量子計算機や光時計に利用される $^{171}\text{Yb}^+$ へ移転し、単一 $^{171}\text{Yb}^+$ をラム・ディッケ領域へ閉じ込めることを目標に研究を進めた。 $^{171}\text{Yb}^+$ は超微細構造をもつため分光技術がむずかしい一方、磁場に対して鈍感な磁気副準位 $m_F=0$ 間遷移が発現し、量子計算や光時計に有用となる。 $^{171}\text{Yb}^+$ のラム・ディッケ領域閉じ込めの確認は、波長 435 nm $^2\text{S}_{1/2}(F=0) - ^2\text{D}_{3/2}(F=2)$ 時計遷移を観測しておこなう。今回

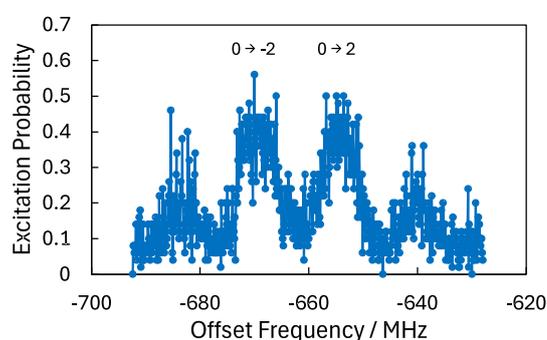


図 4 単一 $^{171}\text{Yb}^+$ $^2\text{S}_{1/2}(F=0) - ^2\text{D}_{3/2}(F=2)$ 遷移のスペクトル。 $\Delta m_F = \pm 2$ 成分。外側の 2 つはマイクロ運動によるサイドバンド。

使用するトラップ装置は、我々が以前に単一 $^{171}\text{Yb}^+$ でこの遷移のスペクトルを観測したものと異なる。したがって、単一 $^{171}\text{Yb}^+$ を冷却する技術、つづいて、レーザー冷却をおこないつつも時計遷移の上準位である $^2\text{D}_{3/2}(F=2)$ 準位を冷却サイクルから分離する条件を、以前得た知見をいかしながら確立した。そして、 $^2\text{S}_{1/2}(F=0) - ^2\text{D}_{3/2}(F=2)$ 時計遷移の観測に成功した。図 4 は $D_{m_F = \pm 2}$ 成分のみが励起されるように磁場と偏光の向きを調整したときの時計遷移スペクトルである。図 5 は偏光の向きを変えると同時に時計レーザーの掃引ステップを細かくして分解能を高めた結果で、 $D_{m_F = \pm 2}$ 、 ± 1 成分に対して永年運動によるサイドバンド構造を確認できた。この図では小さい $D_{m_F = 0}$ 成分も、磁場と偏光の向きを合わせることで、遷移確率を高くできることを確認した。今後は分解能をさらに上げて到達温度測定を可能とするとともに、 $D_{m_F = 0}$ 成分を十分な信号対雑音比で検出する。

並行して、平成 4 年度に 3 次元冷却可能なトラップ装置へ改良したトラップ初号機では、単一 $^{174}\text{Yb}^+$ を用いて波長 411 nm $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{5/2}$ 遷移の分光を可能とし、永年運動によるサイドバンドスペクトルの検出まで進めた。2 方向目の冷却レーザー光導入にともない蛍光検出レンズ系をトラップから離れたため蛍光が弱く、 $^{171}\text{Yb}^+$ に用いるには蛍光強度が不足する可能性が高い。しかし、偶数同位体で可能な研究、すなわち、令和 4 年度に確立した冷却技術の再現性確認、サイドバンド冷却の実現、さらに同位体シフトの測定などに利用し、研究を加速させる。

また、NICT から立体型イオントラップの試作機が導入された。このトラップを設置する真空槽の構造について NICT 早坂氏と議論を進めた。トラップ基板が自重でたわみやすいことを考慮して垂直に設置することとし、蛍光検出レンズ系を真空槽の外で、かつトラップに近づけて設置するため、真空槽内部にせり出した窓を導入することとした。

課題推進者：課題推進者：杉山和彦(京都大学)

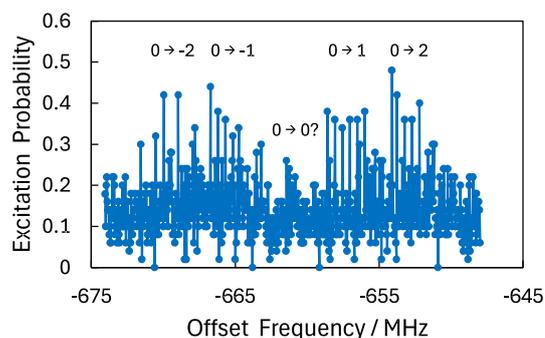


図 5 単一 $^{171}\text{Yb}^+$ $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=0) \rightarrow ^2\text{D}_{3/2}(\text{F}=2)$ 遷移のスペクトル。図 4 よりも高分解能。 $\Delta m_{\text{F}} = \pm 2, \pm 1$ 成分を選択。

研究開発課題1-3: Ba イオンによる平面型イオントラップの評価

当該年度実施内容：

(1) $^{138}\text{Ba}^+$ によるクーロン結晶の形成

Ba 原子源から蒸発する Ba 原子を電子ビーム衝撃でイオン化した後にそれらを線形 Paul トラップにて捕獲する実験を行った。捕獲したイオンを、トラップの端板電圧を制御することで、トラップに隣接して設置したイオン検出器(Channel electron multiplier)に入射させてイオン種の同定および収量測定を行った。イオンの飛行時間のトラップの各種パラメータ(幾何学的形状および寸法、RF 周波数および振幅、DC 電圧)に対する依存性(図 6)を測定し、 Ba^+ がほぼ確実に捕獲されていること、またその収量は Ba 原子密度、電子ビームフラックスおよびトラップ体積などから推定される値とほぼ一致していることがわかった。

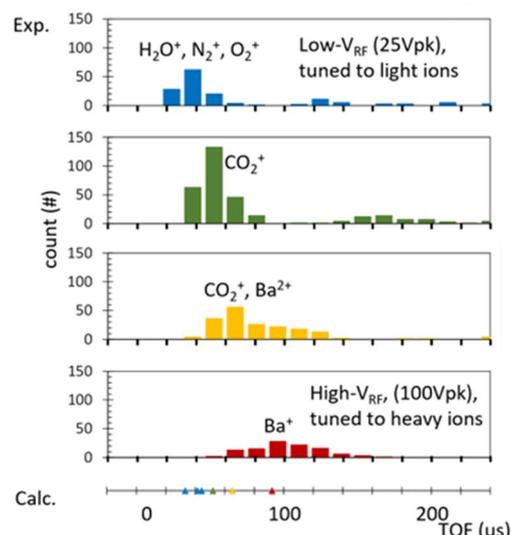


図 6 トラップパラメータに対するイオンの飛行時間の依存性

これらのことから、 Ba^+ のトラップに関してはほぼ想定通りに実現できているものと考えられる。一方で、 $^{138}\text{Ba}^+$ 用に周波数を合わせた冷却用レーザー光およびリポンプ用レーザー光を入射したが、期待した $^{138}\text{Ba}^+$ からのレーザー誘起蛍光はこれまでに観測されていない。この蛍光観測実験においては定常的なイオンのロードを期待して電子ビームを常時照射していたが、それによって Ba イオンの価数が変化してしまったことが蛍光の観測されない原因の一つではないかと考えられる。そこで、測定したイオンのローディングレートおよび捕獲寿命から適切な電子ビームの照射時間および照射間隔を算出し、引き続き蛍光観測実験を進めているところである。

多様な同位体が存在し、放射性同位元素である $^{138}\text{Ba}^+$ をトラップへ導入する方法として、レーザーアブレーションによって Ba 原子を生成し、光共鳴イオン化によって同位体選択的にイオン化する方法を選択し、その要素技術の開発を行った。まず、前年度までに構築したテストベンチに、アブレーション生成ガス・プラズマから荷電粒子を電場で除去して原子

のみを四重極型質量分析装置に導く電極装置を製作・設置し、BaTiO₃ のアブレーション生成物から荷電粒子が除去できることを確認した。さらに、BaCl₂ 塩酸溶液として入手可能な ¹³³Ba をアブレーションターゲットとするための技術開発として、電動マイクロピペットを用いた滴下乾燥装置を構築し、H₂O を使用した模擬滴下乾燥試験を行った。150 μL (BaCl₂ 1 MBq に相当)を約 150°Cの白金プレートに 10 μL ずつ滴下して乾燥させることにより全量の滴下及び乾燥を約 18 分で完了できることを確認した。一方、光共鳴イオン化については

2 光子による共鳴イオン化スキームから選択した 2 つのスキーム($6s^2\ ^1S_0 \rightarrow 6s6p\ ^3P_1 \rightarrow 6s\ ^2S_{1/2}$ 、 $6s^2\ ^1S_0 \rightarrow 5d6p\ ^3P_1 \rightarrow 6s\ ^2S_{1/2}$)について光共鳴イオン化実験の準備を進めた。前者のスキームについては、1 段目選択的励起光(波長 791 nm)に関して、自家製外部共振器型半導体レーザーECDL (External-cavity diode laser)からの出力を搬送・集光し、先行研究との比較から励起に十分な強度(~8 W/cm²)が得られていることを確認した。2 段目光イオン化光(波長 337 nm)も搬送・集光により十分高い強度(~2×10⁻² J/cm²)が得られており、励起・イオン化に必要なレーザー光強度が準備できたことを確認した。後者のスキームについては、^{138,137,136,135,134,133}Ba 各同位体の共鳴波長が存在する波長領域の光を外部制御して発生できるシステムを、別の自家製 ECDL(波長 413 nm)システムに付加した。さらに、光共鳴イオン化試験を行うための真空容器を整備し、これを用いて Ba 原子導入を模擬した原子源通電加熱試験を行った。原子源への電流印加により光イオン化信号検出に十分な蒸気圧や蒸気量の生成可能な原子源温度が実現できた(図 7)。投入電力と発生熱量や温度等のパラメータは数値計算により傾向を把握した。また、原子源の加熱状況を赤外線像で観察し、温度分布など蒸気発生試験に影響を与える情報を把握する手法を検討した。さらに、蒸発源からの Ba 蒸発分布を調べ、Ba 原子の蒸発発散角を考慮したイオン検出系等の配置、原子蒸気遮蔽に必要なデータを得た。これらにより、Ba 原子導入準備を完了した。

核スピン $I = 1/2$ を持ち放射性同位体である ¹³³Ba および核スピン $I = 0, 3/2$ を持ち安定同位体である ^{138, 137}Ba に対して並行してイオンの冷却および量子状態操作実験を進めるための実験環境構築を進めた。光源一式を通常区域(非放射線管理区域)に設置し、^{138,137}Ba⁺の実験はここで行う。¹³³Ba⁺を用いた実験のためのトラップ、真空容器、エレクトロニクスを放射線管理区域内に新たに設け、冷却や量子状態操作のためのレーザー光は PM ファイバーを用いて伝送することにした。通常区域および放射線管理区域内の 2 実験室内の装置は相互にリモートで制御できるよう設計および実装を進めている。これまでに基本設計及び物品の用意はおおよそ完了し、順次実装を進めている。

(2) 小型イオントラップモジュール用真空パッケージの設計

本真空パッケージは、課題 4-1-1 で情報通信研究機構(NICT)が開発する高性能汎用ト

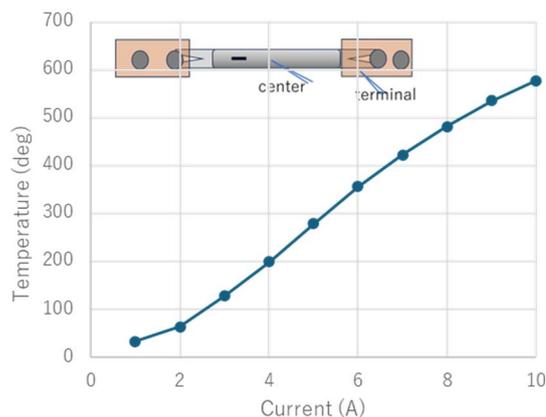


図 7 印加電流と原子源温度の関係

ラップを搭載することを想定し、将来、プロジェクト内に提供することを目的とする。当該年度は、前年度に決定した仕様を基に、引き続き、高性能汎用トラップを開発している NICT、オンチップ・イオントラップ開発の実績がある大阪大学、小型真空パッケージ製作の実績がある企業と連携して設計を行った。

課題推進者：鳴海一雅(量子科学技術研究開発機構)

研究開発課題2:イオントラップ量子コンピュータのクラウド化基盤技術

当該年度実施内容：

(1)イオントラップ量子コンピュータのクラウド化にむけた実験系構築

イッテルビウムイオン(Yb^+)を用いた1量子ビットゲート実験に向けて、 Yb^+ のローディング実験を行った。イオントラップ系の組み立てを完了し(図 8(a))、 Yb 中性原子ビームの蛍光を観測した(図 8(b))。真空系におけるリーク、RF 電極と補正電極が導通していたことなどの問題を解消したうえで実験を繰り返し、 $^{174}\text{Yb}^+$ からの蛍光を確認することに成功した(図 8(c))。検出系を対物レンズ1個、リレーレンズ1個、インテンシファイド CCD 1台のシステム(画像拡大率10倍)から対物レンズ1個、リレーレンズ2個、インテンシファイド CCD 1台、光電子増倍管1台のシステム((画像拡大率54倍)にアップデートし(図 8(d))、各イオンが完全に分離した Yb^+ イオン配列画像の取得に成功した(図 8(e))。1量子ビットゲート実験に必要な量子化軸設定のために、磁場コイルを製作し、設置した(図 8(f))。

誘導ラマン遷移誘起に用いるピコ秒パルスレーザーの繰り返しレート安定化のために、ファンノイズを除去するため外部空冷システムを設置した。そのうえで12 GHz 付近のビートをビートダウンした信号に対して、外部フィードフォワード制御に用いる信号発生器を位相ロックし、10分以上にわたって安定に位相ロックを行うことに成功した。

個別アドレッシングのために、 $f=112.5$ mm の非球面レンズを対物レンズとして用いて 4 本の 355 nm ビームの集光光学系を構築し、5 μm 間隔、各ビーム直径 2 μm で集光することに成功した。

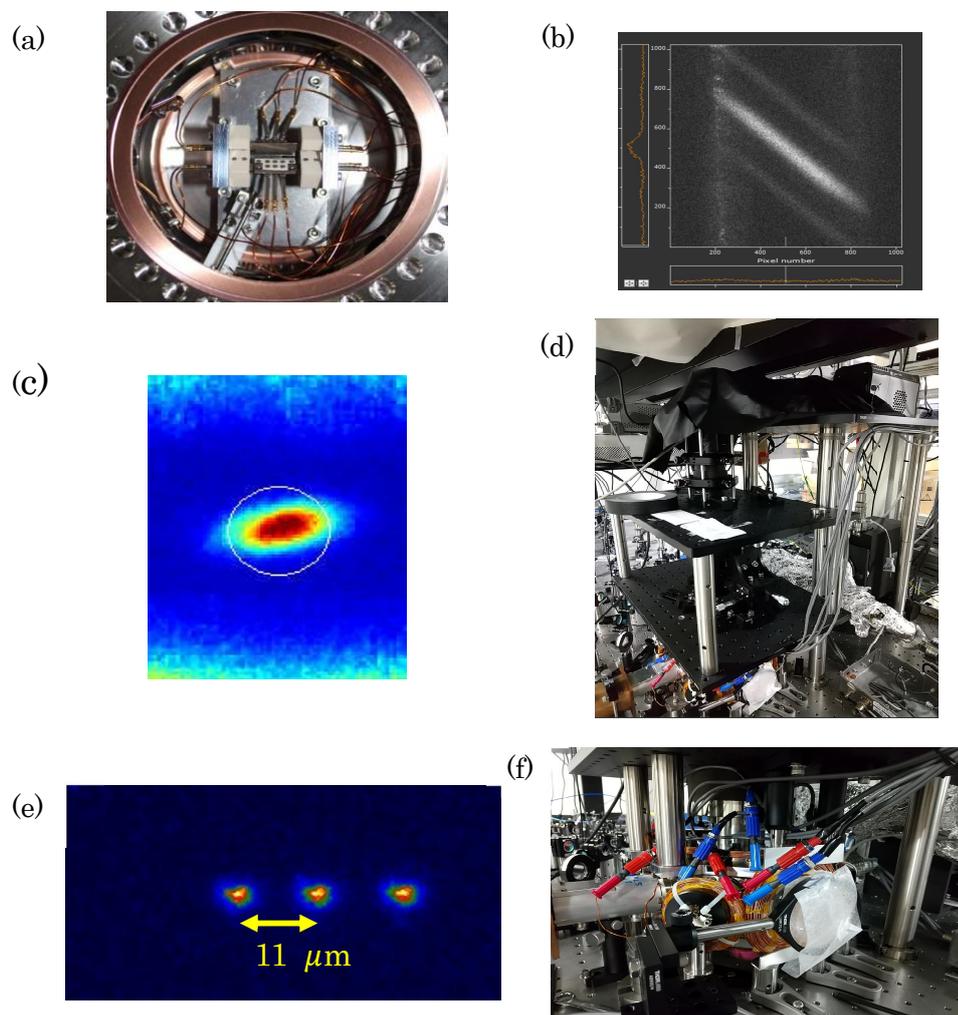


図 8 イッテルビウムイオントラップ・冷却・制御用実験系の開発およびイオンローディング実験の結果。(a)機械加工 3 次元リニアトラップを真空チェンバーにインストールしたところ。(b)中性 Yb 原子ビームからの蛍光。(c)トラップされた Yb^+ イオン(クラウド状態)の蛍光画像。(d)アップデート後の検出系。(e)結晶化した Yb^+ イオンの画像。光っている 3 個のイオンは $^{174}\text{Yb}^+$ であり、また左端に dark ion ($^{174}\text{Yb}^+$ 以外の同位体イオン)がいると推測される。(f) 真空チェンバーの周囲に量子化軸設定のための磁場コイルを設置したところ。

(2) 平面型トラップを用いたイオン輸送技術の開発

令和5年度は、イオンを高速に直線輸送するための電圧制御システムを構築した。令和4年度にはイオンの直線輸送のための印加電圧を導出し、イオン輸送実験に向けて多チャンネルの電圧生成に必要な Digital to Analog Converter (DAC) の性能を検討したが、汎用の DAC の性能では不十分であることがわかった。そこで企業との共同研究によって FPGA ベースの DAC を新たに開発し動作確認を行った。本課題に必要な DAC は多数の電極に電圧を供給するため、高速かつ多チャンネルの出力が必要である。今回開発した DAC は、従来使用していた汎用 DAC と同じチャンネル数(16 チャンネル)でサンプリング

レートは2桁高く、高速イオン輸送に適した性能をもつ。またこの電圧制御システムは python で制御プログラムが構成できるため電圧の設定変更も容易で、新たに導入する場合でも python の知識があればすぐ操作できるのが利点である。

ジャンクション構造については Y 型と X 型を検討し、X 型ポテンシャルで比較的単純な電極レイアウトで、ジャンクション中央に生ずるポテンシャルの凹凸が抑えられることを見出した。この平面型トラップは、大阪大学と NICT とで共同で開発し企業の協力を得て作製した「イオントラップ用 Plug-and-play 型真空パッケージ」を適用できる電極レイアウトになっており、コンパクトな真空装置を構成できる。なおこの真空パッケージは汎用性をもたせてあり、研究開発項目4の研究開発課題1-3、研究開発項目6でも使用できるため、令和5年度には各開発項目の担当者が大阪大学でトラップ電極の実装作業を行った(図9)。

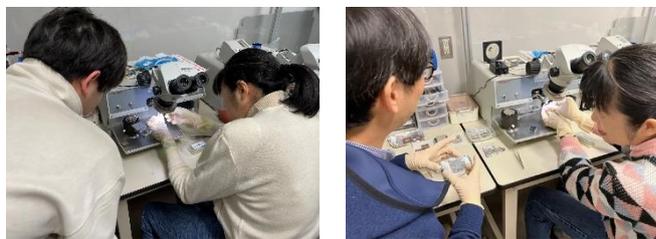


図9 イオントラップ用 Plug-and-play 型真空パッケージへのトラップ電極の実装作業の様子。このパッケージは汎用性があるため他の課題でも利用できることから、各研究開発課題の担当者が大阪大学にて作業を行った。

(3) 平面型トラップによるイオンの2次元的な配列制御

多数個2次元配列では、2列配列の平面型トラップでイオンを2列に配列させた(図10(左))。しかし浮遊電場の影響で各々のイオン列の中心が一致しないという問題が生じたため、補正用の電圧を印加して整形し、図10(右)のような2列配列を実現した。

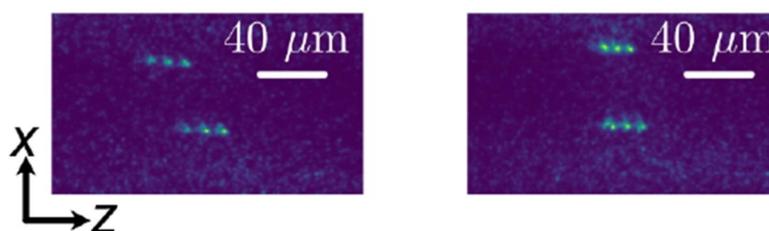


図10 平面型トラップ中の2列配列イオン

また2次元的な配列の多数の振動モードを一度に冷却するための手法として、電磁誘導透過 (Electromagnetically Induced Transparency, 略して EIT) を利用した冷却方法 (EIT 冷却) について検討した。さらに EIT 冷却の効果を確かめるため、まず3個の1列配列イオンの EIT 冷却実験を行い、3つの振動モードを同時に冷却することに成功した(図11)。なおこの実験は大阪大学の学生がドイツの Physikalisch-Technische Bundesanstalt (略称 PTB、ドイツ物理工学研究所) の Mehlstäubler 教授の研究室に3ヵ月滞在して実施した。この結果により今後大阪大学で2次元配列イオンへ EIT 冷却を適用する際の重要な指針を得ることができた。

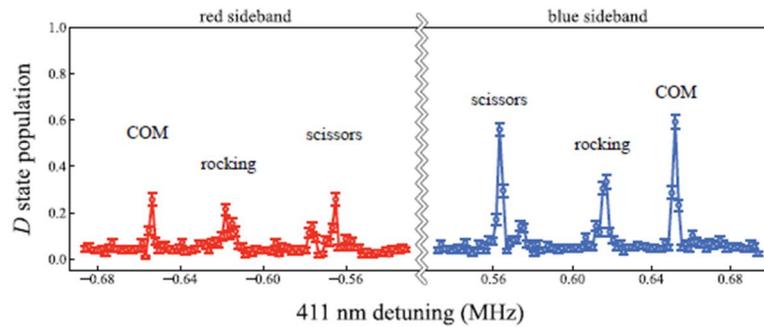


図 11 1 列配列の複数個イオンの EIT 冷却による冷却の結果。COM, rocking, scissors は3つの振動モードの名称。このスペクトルの各振動モードの red sideband が blue sideband よりも小さいことは、冷却が成功していることを示している。

課題推進者: 豊田健二(大阪大学)

(5) 研究開発項目5:イオントラップのための集積化光回路に関する研究開発

研究開発課題1:イオントラップのための集積化光導波路回路の作製技術

当該年度実施内容:

イオントラップデバイス用の集積化光導波路回路の作製のため、イオン励起用レーザー光を導入する多チャンネル光導波路と光ファイバーを接合した光オンチップ素子技術の開発を行った。

(1) 多チャンネル光導波路のオンチップ集積化

光導波路素子の母材となる窒化ケイ素(SiN)膜は、紫外から近赤外波長領域で光透過性が高く、屈折率も高いことから光集積導波路回路として有用であることに着眼している。SiN 膜は、その成膜方法によって、Si/N 組成や結合欠陥が生じ特に紫外域における光損失に影響を与える。Sr イオン励起に必要なレーザー光を透過する導波路は、最短波長で405nm の透過性が必要となることから導波路の光学母材と透明性の確保は重要となる。本研究では、CVD 法によって SiN 成膜を行い光透過性の確認を行った。この波長周辺は SiN のバンドギャップ近傍であり、成膜時に生ずる Si/N 組成の微小な違いや Si-N 結合欠損の影響等が考えられる。一方、酸窒化ケイ素(SiON)膜の検討も進めてきた。成膜時の Si/O/N 組成調整の検討を行い、屈折率の高屈折率性を保ちながら、CVD 成膜時に酸素源の混入を調整することで SiON 膜を作製した。光導波路は、目的とする紫外波長域で透明性が確保できることえを確認した。バンド端が影響する吸収損失は、酸素導入率を高めれば低下する傾向があるが、屈折率の低下も伴い回折素子の回折効率にも影響を及ぼすため、本研究では屈折率の下限を 1.85 とした。以降、SiON 基板を使って多チャンネル光導波路デバイスの作製を進めた。光導波路と回折素子の設計は、光伝搬計算法によって構造決定した。電子線描画とドライエッチングの作製条件の最適化後、

目的とする導波路デバイスを作製した。本年度は、波長 422nm(Sr イオンの励起遷移(5s 2S1/2 から 5p 2P1/2)に相当)と 1092nm(準安定遷移(5p ²P_{1/2}から 4d ²D_{3/2})に相当)の代表的な 2 系統で評価を行った。最終的には波長 405nm まで拡張することで、Sr イオンのレーザー冷却用の全波長を網羅する予定である。作製実験の結果、各波長で適切なレーザー光の照射・集光を確認し、得られた回折角 76.1° (422nm)と 63.4° (1092nm)、および集光点 400μm は、設計で示された指標の範囲内であった。

(2) イオントラップデバイスの光入力制御技術の実施

LN 膜は SiO₂/Si 基板上に薄膜形成し(LNOI:LN-ON-Insulator)、光伝搬計算の結果に基づく導波路の作製を行った。作製した位相変調部の長さを 10mm 以下とすることで、バルク結晶の LN 変調器と比べると 1/10 以下の小型化と Si 基板上の光集積技術への可能性を示した。しかし、東京大学で設計されたイオントラップデバイスに近接して集積するにはその小型化は不十分である(イオントラップデバイスに外挿して制御することは可能)。そこで、LNOI と SiN 膜(または Si 膜)を組み合わせた導波路の検討を進めた。Si 系導波路のような高屈折率領域をつくることで光モードを活性層に強く閉じ込め、位相変調効率を高める狙いである。得られた位相シフタの変調電圧利得は 19.0V・mm であり 40GHz の周波数応答性も確認でき、予測通りの効果を得ることができた。このような結果を考察して、LNOI を使ったフェーズシフタは波長 700nm 以上で動作させる位相変調素子として引き続き検討することとした。一方、イオントラップデバイス内に実装が可能で透明性が高い小型位相シフタを実現するため、小型で位相変調効率が高い強誘電体薄膜を使った導波路作製に着手した。ここで着眼した強誘電体薄膜は LN に置き換わる電気光学材料であり、その電気光学定数は LN の 5 倍以上の大きさを持つ。従って、位相長の長さを短くし光学損失を低減させつつ、小型のフェーズシフタを作製することが期待できる。LNOI より大幅に位相変調効率が高いことが確認できた。変調電圧利得が高いことから、長さを 1mm 程度まで短くすることも可能と予測でき、イオントラップデバイスに近接した光集積回路としても有望と考えられる。

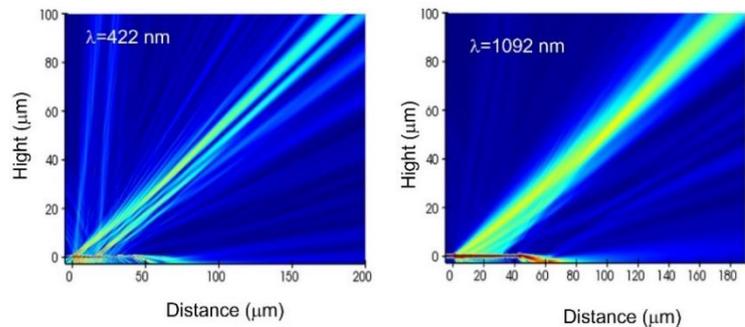


図 12 波長 422nm 及び 1092nm の多チャンネル回折格子素子のビームプロファイル。

課題推進者:横山士吉(九州大学)

研究開発課題2:光導波路回路一体型イオントラップの開発

当該年度実施内容: 令和5年度においては光回路一体型イオントラップによるイオンの捕獲に向けて光回路チップの開発を行った。具体的には昨年度に波長 422nm と 1092nm におけるシングルモード光導波路、グレーティング光出射素子の設計を横山研究室とノウハウを共有しつつ進めたため、これにより配送されたレーザー光をイオンに照射できるようなハイトをチップ上に実装するための設計を行い、その作製のためのプロセス開発と試作を行った。横山研究室製の光素子を搭載した光回路チップに deep RIE プロセスにより基板貫通穴を作製することでチップ外形、位置合わせ用の穴、および蛍光観察用のスリットを設けるという手順を進めることが現状では有望そうである。フリップチップ集積によりイオントラップに実装する手法(図 13)は特許申請中である。

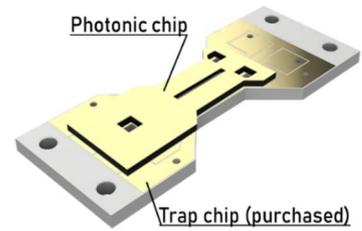


図 13 フリップチップ集積による光回路一体型イオントラップ

令和 5 年度は上記のプロセス開発に終始し、マイルストーンである光回路一体型イオントラップの試作とそれによるイオンの捕獲は令和6年度以降の課題として持ち越す。一方、令和 6 年度マイルストーンである個別イオンにアクセス可能な、イオンの位置で小さなビーム径を実現するグレーティング光出射素子の設計はでき、実際に試作し光学評価を行ったところスポット径 3.5 マイクロメートルという十分に実用的な集光を行うことができた。

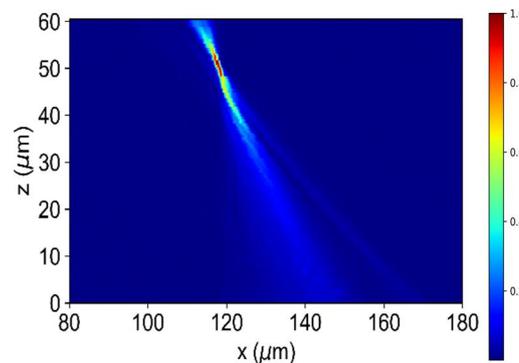


図 14 作製した光出射素子の波長 674nm における出射プロファイル

課題推進者:長田有登(東京大学)

(6) 研究開発項目6:イオントラップ多重化のためのイオン輸送・配列技術

研究開発課題1:ジャンクショントラップを用いた捕獲イオンの配列技術

当該年度実施内容:

(1) 研究体制の拡充

令和 5 年 4 月よりレーザー開発および大型加速器を用いた原子核分光実験の経験を有する特任研究員 1 名を採用し、研究体制を拡充することができた。当該研究員はイ

オントラップ実験に必要な装置の立ち上げおよび要素技術開発に取り組んでいる。
これにより、本研究体制は本学大学院生に加えて、ムーンショット専任研究員 1 名＋ムーンショット専任学術専門職員(週 3 時間) 1 名の体制となった。

(2) 微細電極の製作

令和 4 年度に電場解析ソフトを用いて設計した 3D-YJunction 電極の製作に向けて検討を開始した。三次元電極でイオンのシャトリングを行うためには、微細に分割された DC 電極にそれぞれ異なる電圧を印加する必要がある。また、絶縁体のチャージアップがイオンの捕獲電場を乱さないよう、セラミックが剥き出しになっている部分をイオンの捕獲位置から遠ざける必要がある。以上を踏まえ、図 15 のように根本部分の内壁が絶縁されている串歯状の微細加工電極を設計した。これまで平面イオントラップの製作実績のある企業を中心に、基板加工とメッキを受託している A、B、C、D 社との加工交渉を行った。その交渉結果を表 1 にまとめる。全ての企業において上面及び下面のメッキは比較的容易に行うことができるが、側面のメッキは電子ビームの側面への回り込みが不十分になる可能性があるため C 社、D 社から難しいとの回答を得た。また、串歯の根本にマスキングを行うことができないため、串歯根本内壁の絶縁は 4 社とも受託できないとの回答を得た。当初の計画では全ての製作工程を一つの業者による管理体制のもとで進める予定であったが、今回交渉した 4 社の中に全ての工程を一貫して任せられる業者がなかったため委託を断念した。このような結果もあり、課題 4-1-1(NICT)において、電極製作に対して共同で進めることとなり、令和 6 年度に試作することとなった。これと並行して、製作工程を以下の 6 工程に細かく分割して各工程を分業委託する可能性を検討している。

- I. 高純度アルミナ基板の調達
- II. フェムト秒レーザーを用いたアルミナ基板貫通加工
- III. 電子ビーム蒸着による Ti/Au メッキ
- IV. フェムト秒レーザーを用いたパターニング
- V. Au 電解メッキ
- VI. 電極の組み立て

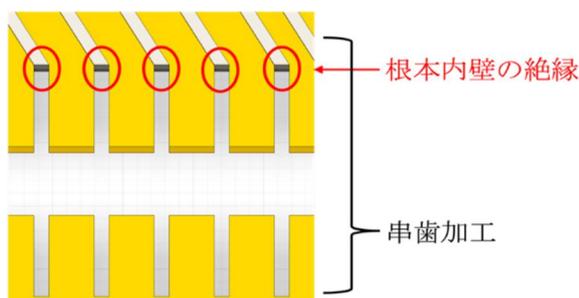


図 15 三次元電極の串歯構造

表 1 基板加工業者との交渉結果

	A社	B社	C社	D社
基板	アルミナ	アルミナ	アルミナ	ガラス
上下面メッキ	○	○	○	○
側面メッキ	○	○	△ 3.6mm×5.0mm以下の 基板であれば可能	×
根本内壁の 絶縁	×	×	×	×

(3) 微細電極での実験に向けた装置の完成

令和 4 年度に調達した物品に加え、納期が大幅に延びたレーザー光源系(外部共振器型半導体レーザー+波長計)の調達が完了し、実験系の立ち上げを行った。イオントラップ実験の実施に当たって必要な要素技術ごとに準備状況および成果を記載する。

平面型イオントラップ

3次元イオントラップ電極の製作の進展が思わしくないことから、課題 4-1-1(NICT)から平面型イオントラップの供与を受けて、システム構築を行った。

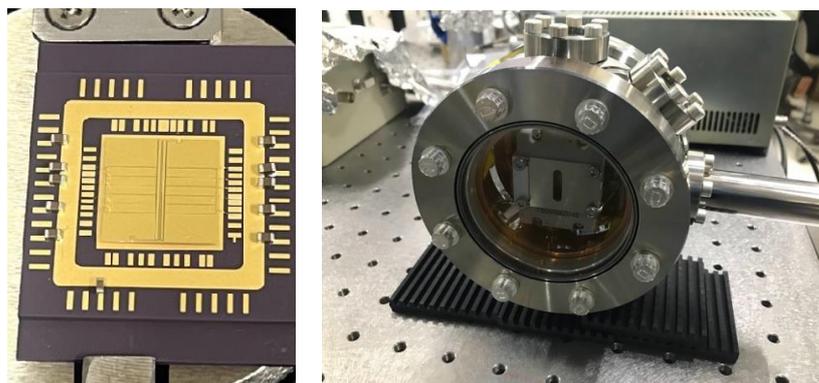


図 16 (左) 課題 4-1-1(NICT)から供与を受けた平面型イオントラップ
(右) 平面型イオントラップをインストールしたソケット型トラップチャンバー

真空系

ドライスクロール・ターボ分子・イオンの 3 種類の真空ポンプを組み合わせることで、 5.6×10^{-9} Torr の真空度を観測し、イオントラップが可能な真空特性が確認できた。

電場駆動系

微細電極トラップのために必要な RF 周波数が、過去に研究室で開発した増幅器と比較して高周波であり、製作ノウハウを有していなかった。そこで、課題 4-1-1(NICT)の協力のもと、ソケット型ヘリカル共振器を開発した。ヘリカル共振器を用いた RF 電圧の増幅試験において、周波数 19 MHz において約 4 倍の増幅を確認し、プリアンプと組み合わせることでイオントラップが可能な RF 電圧を達成した。

観測・光学系

研究室で過去に構築した光学系(倍率 10 倍)を、鏡筒長を伸ばすことで倍率 20 倍まで増倍することに成功した。この光学系と昨年度調達した浜松ホトニクス製 qCMOS カメラを組み合わせることで捕獲したイオン間の距離も正確に観測できる見込みであることが明らかになった。

レーザー光源系

本研究の Ca イオントラップにおいては、光イオン化のために 423 nm と 375 nm、トラップイオンの冷却および再励起のために 397 nm と 866 nm の 4 波長のレーザーを使用する。光源としては外部共振器型半導体レーザーを採用し、このうち Ca を連続状態まで電離させるのに必要な 375 nm のレーザーを自作した。

(4) 試作した電極による Ca イオンの捕獲

完成した実験系(図 17)および平面型イオントラップを用いて、捕獲イオンの 1 つである Ca イオンのトラップ実験を実施した。



図 17 構築したイオントラップ装置

課題推進者:長谷川秀一(東京大学)

(7) 研究開発項目7:単一イオンと単一原子の量子インターフェース開発

研究開発課題1:リドベルグ励起によるイオン・原子間の量子インターフェース開発

当該年度実施内容: 当該年度の研究では、イオンと原子の量子インターフェース開発に向けて「単一イオンと冷却原子集団のトラッピング」を行った。そのためにまず、線形イオントラップを製作しイオン捕獲に必要な RF 電場や DC 電場が適切に印加できることを確認した。続いてレーザー冷却用光源システムの開発を行い、イオントラップ装置と組み合わせることでストロンチウムイオンの捕獲が確認された。また、イオントラップ中で単一イオンがドップラー限界温度付近にまで冷却できることも確かめられた。図 18(a)は高感度 CCD カメ

ラにて撮像された単一/クーロン結晶からの蛍光を表す。冷却中性原子トラップの準備においては、原子オーブン、ゼーマン減速機、メイントラップチャンバー、真空排気チャンバーといった個々の真空装置の製作に取り掛かり、それらを統合することで原子トラップ装置を構築した。続いて、原子のレーザー冷却用光源の開発や周波数安定化などを行うことで、磁気光学トラップ中でストロンチウム原子集団が捕獲・冷却されることが確かめられた。図18(b)はその際に得られた冷却原子集団を表す。今後はこのようにして得られたイオンや原子の量子制御技術の開発に取り組む。

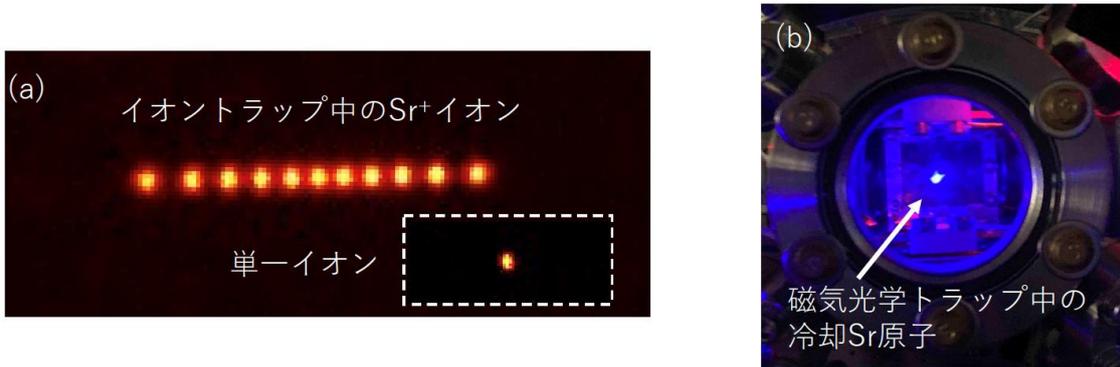


図 18 (a) 捕獲されたストロンチウムイオン (b) 磁気光学トラップ中の冷却ストロンチウム原子

課題推進者: 土師慎祐 (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

代表機関である沖縄科学技術大学院大学(OIST)に設置された PM 支援チームの体制は、アシスタント PM (Administration)、外部研究資金セクションマネージャー、事務職員、アシスタント PM (Research) で構成され、担当内容は次の通りになっている。

- アシスタント PM (Administration)：事務的全般を統括管理
- 外部研究資金セクションマネージャー：データマネジメント、知財戦略などを統括する。
- 事務職員：JST との調整、課題推進者との会議日程調整など事務的補佐(雇用・労務・経理、計画書、報告書、成果公表申請、広報・アウトリーチ、ウェブサイト管理)に携わる。
- アシスタント PM (Research)：プロジェクト計画・進捗管理に必要な最新研究動向の調査、プロジェクトに係る報告書などの取りまとめ支援、知財調査の補佐、プロジェクト間連携の窓口などを担当する。

代表機関(OIST)において、PM および PM 支援チームでの予算運営会議、知財戦略のための打合せ、データマネジメントに関する情報共有・今後の展開の会議などを実施した。各課題の進捗状況の把握や情報交換などは Slack 等を活用し実施している。課題推進者および研究参加者を含めた課題推進者会議(ハイブリッド会議)を大阪大学 豊中キャンパスで開催した。各課題の研究内容、目標/マイルストーン、プロジェクト全体における位置づけ、進捗/準備状況、年次計画および人員体制などを発表し、プロジェクト全体の進捗状況を把握した。課題推進者会議の現地参加者については、大阪大学所属の課題推進者の研究室を見学し、サイトビジットとして研究環境及び進捗を確認した。

研究開発プロジェクトの展開

令和 5 年度においても策定した研究計画に沿って研究活動を行い、必要な機器を購入し、実験系を立ち上げるなど研究体制の構築を実施している。研究機関間では連携を密にとり、情報共有を徹底することで研究開発計画の柔軟な変更を可能とするよう努めている。

国際連携としては、OIST の課題推進者である高橋優樹 准教授が Mainz 大学 Schmidt-Kaler グループを訪問し、NDA 締結に向けて作業を進めている。大阪大学(課題推進者 豊田健二 教授)の研究参加者を Oxford 大学 Lucas グループに派遣した(令和 5 年 7 月～令和 6 年 3 月)。

量子コンピュータの研究開発や社会実装に向けた ELSI/数理科学等に関する取り組みについては、令和 5 年 9 月に開催された、大阪大学 量子情報・量子生命研究センター(QIQB)、社会技術共創研究センター(ELSI センター)主催の「量子コンピュータの ELSI」検討会に参加し(オンライン)、ハイプや疑似科学に関するリスクにも触れた研究開発倫理指針について検討した。

(2) 研究成果の展開

当該年度の研究開発プロジェクトにおける知的財産に関して、1 件の特許が出願中であり、さらに 2 件の特許が各機関の知的財産部門により出願準備が進められている。ホームページにおいては本研究開発プロジェクトの各課題推進者へのホームページへリンクしている。

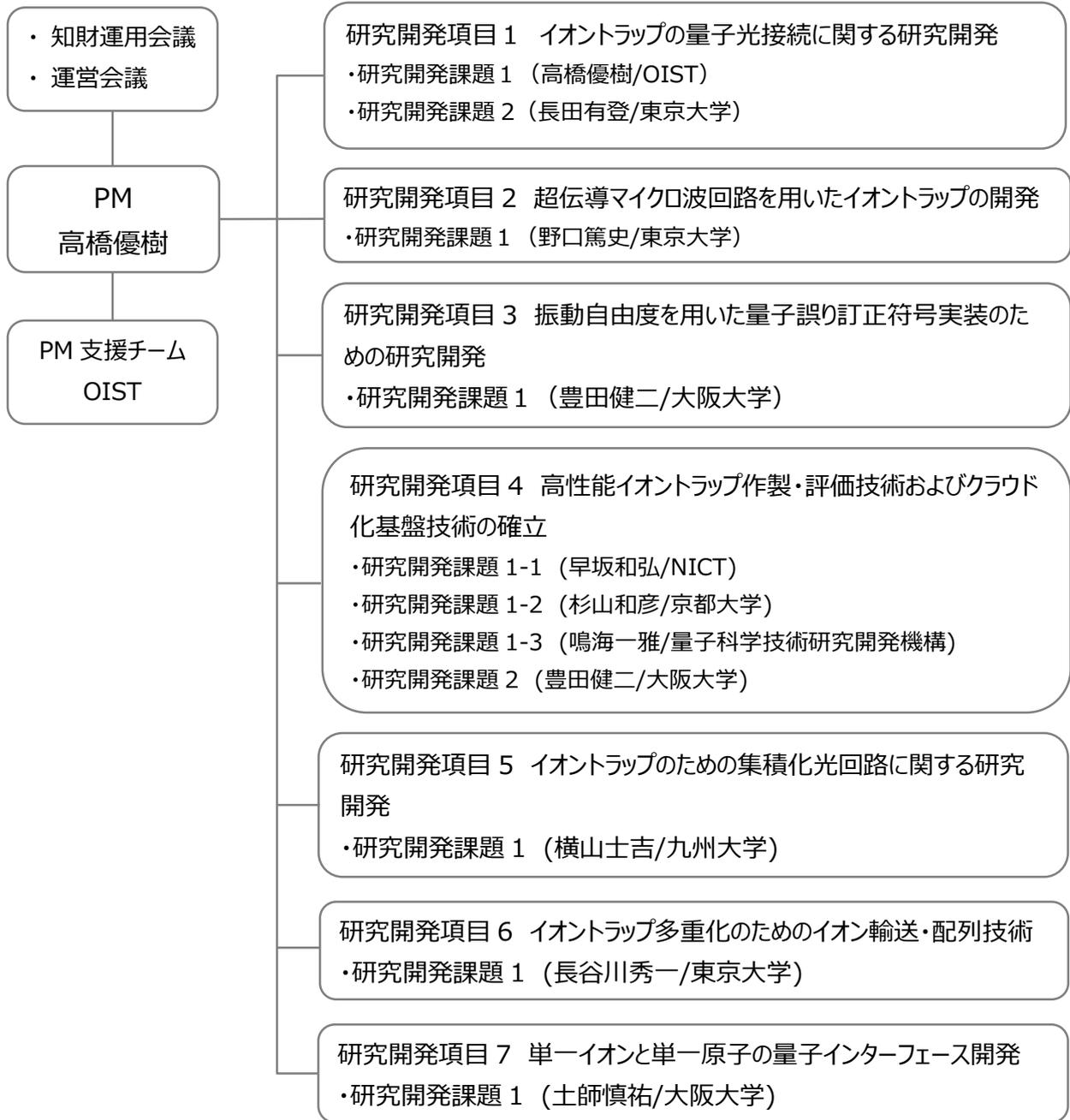
(3) 広報、アウトリーチ

広報活動としては、一般公開しているホームページ(<https://www.oistmoonshot.jp/>)によって、最新の情報やイベントについての詳細な内容を提供している。このホームページでは、プロジェクトの概要、研究開発プロジェクトが貢献する未来像、参加研究機関、課題推進者、PMへのインタビュー形式の動画を配置し、本プロジェクトを紹介している。また、ホームページから各課題推進者のホームページにリンクしており、公表できる研究成果、最新活動状況などの情報を得ることができる。アウトリーチ活動においては、令和6年9月にOISTで開催する国際シンポジウム(<https://groups.oist.jp/AQTTI>)の準備を進めている。

(4) データマネジメントに関する取り組み

研究データ基盤システム(NII Research Data Cloud: NII-RDC)の研究データ管理基盤(NIIストレージ)を活用するために、GakuNin RDMを利用し、研究データを課題推進者毎に保管し共有できるように用意されている。今後は、管理対象データにメタデータを付与し、メタデータを集約、PDに提出・承認後、NII-RDCを用いて研究データなどを公開することを目標としている。

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

参画する研究開発機関のうち、知財運用会議にて協議すべき案件に関わる機関、ならびに PM、JST が参加することを基本とする。本プロジェクトにおける研究の一部の知財権利化について、代表機関の知財担当部門と会議を実施した。

運営会議 実施内容

令和 5 年 8 月 7-8 日：課題推進者および関連する研究者/学生を含めた高橋プロジェクト全体会議(ハイブリッド会議)を大阪大学で実施した。各課題推進者による研究発表を行い、各自担当課題のプロジェクト全体における立ち位置、目標、マイルストーン、進捗状況、年次計画、人員体制共有し、研究発表を通じて、プロジェクト全体および研究開発の進捗状況や課題について有効な情報交換を行い、今後の展開方針を検討した。

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

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	10	10	20
口頭発表	17	5	22
ポスター発表	1	6	7
合計	28	21	49

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	5	5
(うち、査読有)	0	4	4

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
0	1	0

プレスリリース件数
0

報道件数
0

ワークショップ等、アウトリーチ件数
0