



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

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、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不可欠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と、それを支えるデバイスの基本動作の実証を主要な目標として推進してきた。一部の研究開発項目の目標を見直し、柔軟な対応を行ったが、全体としては計画通りに進行し、設定された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 のカルシウムイオンを使った実験では、イオントラップとファイバー微小光共振器を組み合わせた系の構築に向け作業を行った。ガラスの SLE 法と金属蒸着を用いてイオントラップを作製した。また、トラップ周辺の装置を作製し、原子源に関する実験を行った。最終的な実験系を構築するための準備はほぼ完了したが、系構築を完了するには至らなかった。バリウムイオンの実験でも、同様に原子源および系の構築を進めた。MEMS ミラー共振器に関する研究では、シリコン基板上での MEMS 構造の作製および平滑化された凹面構造の作製に成功した。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を用いて光共振器を構成し、フィネス測定を行った結果、フィネス 35,000 を得た。これにより導電性ミラー高フィネス光共振器の原理実証を果たすことができた。研究開発課題1-2では、イオントラップチップ上に集積された半導体ミラーによる高フィネス光共振器の実現を目指した。大阪大学への異動後の実験系再立ち上げを経て、ファイバーミラーによる微小共振器の性能評価を行い、フィネス 100,000 を達成した。研究開発課題2-1では、安定なクライオイオントラップの実現のため、クライオ環境で使用可能なコンタミネーションフリー原子源の開発と、高性能なフリップチップトラップの開発をおこなった。令和 5 年度までのフリップチップ実装では、基板間の配線を導電性の銀ペーストでおこなっており、低温でのその大きな抵抗が性能劣化をまねていた。そこで、ワイヤーボンディングを用いた 3 次元配線手法を新しく開発し、この問題を解決した。研究開発課題3-1では、3 イオン系で複数の振動モードにスクイーズド状態を生成することを目指し、まず環境ノイズの影響が少ない 2 モードに対して運動ラムゼイ干渉測定を行うための準備を行った。イオンごとの個別励起が困難なため、AC シュタルクシフトと 729 nm 光を組み合わせた二段階の励起手法を採用することとし、そのために冷却やラビ周波数測定を実施した。また、熱浴エンジニアリング手法によるスクイーズド状態生成実験について改良を加えて再試行し、スクイーズド状態の特徴である偶数の振動量子数に占有が集中する結果を得た。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、(1)平面型イオントラップの性能評価と供給、(2)立体型イオントラップの性能評価と供給、(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、に関する研究を実施した。研究開発課題4-1-2では、サイドバンド冷却専用の Yb^+ イオントラップ装置を開発し、単一 $^{174}\text{Yb}^+$ で波長 411 nm に対するラム・ディッケ領域閉じ込

めをほぼ達成した。確立した冷却技術の再現性を確認でき、サイドバンド冷却に十分な冷却状態に達した。また、量子計算に利用される $^{171}\text{Yb}^+$ でもラム・ディッケパラメータ 1.5 程度まで冷却を確認し、磁場に鈍感な $\Delta m_F=0$ 間遷移を明確に観測した。また、立体型イオントラップとこれを設置する真空槽の設計を完了し試作にはいった。研究開発課題4-1-3では、 Ba^+ 用平面型イオントラップシステムの構築に係る研究開発を実施した。平面トラップ、原子源、真空系、レーザー光入射および観測光学系、磁場印可コイル等を設計、製作するとともに、一般的な電子部品を用いて容易に製作、使用できる高電圧 RF ドライバの開発に成功した。同位体選択的イオン導入については、波長 533nm の光源を新たに開発、構築した。さらに、小型イオントラップモジュール用真空パッケージの試作品作製を進めた。研究開発課題4-2では、量子ゲート実験に向けて、 $^{171}\text{Yb}^+$ イオンの選択的ローディングおよびトラップ中での安定な保持に取り組んだ。誤り率 5.8×10^{-2} で量子ビット状態の検出を行うことに成功し、それにもとづきマイクロ波によるラビ振動を観測することに成功した。さらに、355 nm 光を用いた Copropagating 配置での誘導ラマン遷移の観測に成功した。平面型イオントラップを用いたカルシウムイオンの直線輸送実験、および高速化のための高出力 Digital to Analog Converter (DAC) の開発とイオンによる評価実験を行った。またイオンの2次元配列では、イオン運動の高空間分解能な観測のための画像計測系を構築した。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を作製し、多波長レーザーの同時照射光学素子を作製した。また、位相変調制御の集積化では、可視光波長域で外部 RF 信号入力による変調振幅動作の位相シフトを作製した。研究開発課題5-2では、光回路チップを利用したイオンの捕獲を目指して開発を進めてきた。大阪大学への異動後の再立ち上げ、プロセスの再開発も行わなければならなかった関係上、これらを完了した。光回路チップの実装を令和 7 年度に行う。研究開発課題6-1では、電場解析ソフト COMSOL を用いて設計した 3 次元 Y 型ジャンクション電極について、企業と製作を検討した。全ての工程を一貫して任せられる業者がなかったため、製作工程を 6 分割し分業させることで、5 工程までの製作を完了した。最終工程の電極の組み立ては課題 4-1-1(NICT)が担当し、その作業を以って電極完成となる状況である。同時に、当該電極を格納する真空容器および電場駆動系を含めた実験系の設計は完了し、製作中である。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、ストロンチウム原子をレーザー励起することでリドベルグ状態へと準備できることが確認できた。また狭線幅遷移を用いたレーザー冷却により原子を 10 マイクロケルビン以下の温度領域に冷却することができた。さらに冷却イオンのリドベルグ励起のために、深紫外レーザーを製作し波長 245nm の励起レーザー光源を得ることができた。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

プロジェクトマネージャー(PM)を支援する体制のもと、研究開発の進捗把握、知財・データ管理、情報発信などを多面的に推進した。課題推進者との継続的な情報共有を通じて、柔軟かつ効果的な運営を実現している。国際連携では、OIST とマインツ大学の間で技術交流を進め、学生の派遣を通じて高度な量子ビット制御技術などの習得を図った。また、知財戦略の一環として 2 件の特許出願が行われたほか、研究成果や最新動向の共有、国際的な発信を目的として国際シンポジウムを開催し、広報・アウトリーチ活動を展開した。研究データの管理体制については、GakuNin RDM を活用した環境整備を完了

しており、今後は特許との関係性を考慮しながら、公開可能なデータの整理・活用も視野に入れている。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

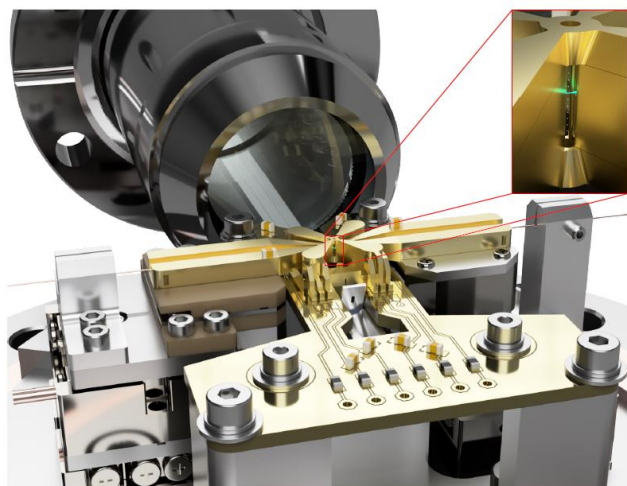
(1) 研究開発項目1:イオントラップの量子光接続に関する研究開発

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

カルシウムイオンを使った実験では、イオントラップおよびファイバー微小光共振器を組み合わせた系の構築に向けて作業を行った。第二世代イオントラップの詳細な設計を完了させ、SLE 法によりイオントラップを作製した(図 1)。トラップ表面に金属の蒸着・メッキを行い、導通試験をして良好な結果を得た。真空内でトラップを設置する PCB、PCB を設置する基部も設計・作製した。イオン導入のための原子源について検討した結果、レーザー加熱を用いた方法を採用することになり、そのための予備実験を行った。金属製、ガラス製、窒化シリコン製の容器にカルシウムの粉末を詰めて、真空内でレーザー加熱し、原子の出射量を比較した結果、ガラス製が最も効果的なことが分かった。既存のイオントラップでは、観測された永年周波数の分裂について解析を行い、妥当な物理モデルを得た。ファイバー共振器に関しては、ファイバーミラーの作製を終え、共振器フィネス最大 150,000 を得た。共振器ロックのためのデジタル回路 (FPGA) を整備し、動作試験を行い、良好な結果を得た。このように、最終的な実験系を構築するための準備はほぼ完了したが、系構築を完了するには至らなかった。現在、系の構築完了に向け、作業を進めている。



第二世代機のトラップモデル



作製したイオントラップ

図1 第二世代イオントラップ

(2)バリウムイオンを用いた共振器 QED 実験

バリウムイオンを用いた実験では、まずトラップにイオンを導入するための原子源の開発を行った。 BaCl_2 の標的にパルスレーザーを照射し、中性バリウム原子が生成されていることを確認した。バリウムイオントラップの系の構築に関しては、カルシウムイオンの系を共同に進め、同様にトラップとその周辺装置の作製を完了した。イオントラップに必要なダブルパス AOM などのレーザー光学系を整備した。イオントラップのための装置の準備はほぼ完了したが、イオン捕獲には至らなかった。現在、イオン捕獲のための作業を進めている。

(3) MEMS ミラーを用いた光共振器の開発

DRIE と HF ウェットエッチングによる犠牲層除去の工程により、シリコン基板上にカンチレバー構造を複数作り、変位測定を行った。サンプル内の出来不出来はまだあるが、変位について数値シミュレーションとほぼ一致する良好な結果を複数のカンチレバーで得た(図 2 左)。また、カンチレバーとは独立にシリコン基板上に平滑化された凹面構造を作製した。もともとはシリカ基板上での作製を予定していたが、これは他課題での CO_2 レーザー加工の進展により見通しが立ったため、目標をシリコン基板上での作製に改めた。その結果、ほぼ所望の構造をシリコン基板上に作製することに成功した(図 2 右)。また、表面粗さを計測した結果、RMS 0.2 nm と高フィネス共振器ミラーに十分な性能を得た。

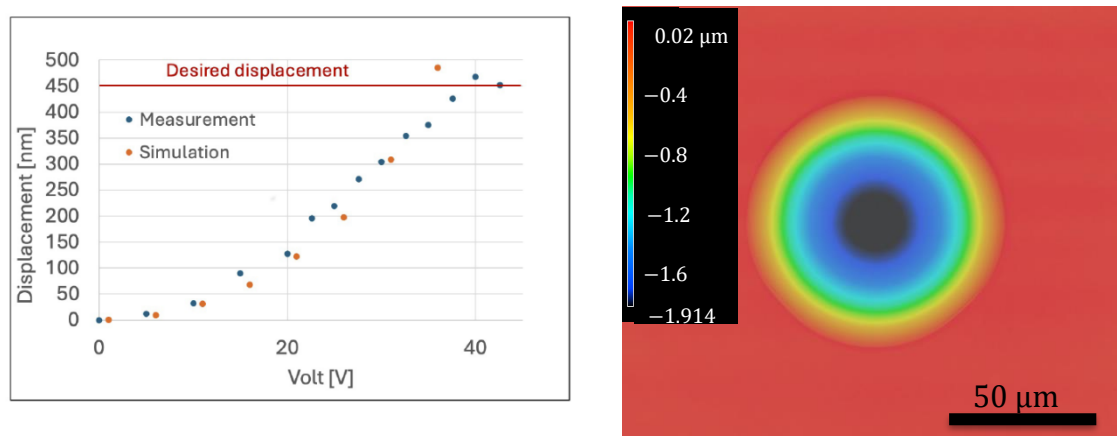


図 2 (左) Si 基板上に作製したカンチレバー構造における変位測定とシミュレーションの比較
(右) Si 基板上に作製した平滑凹面構造と表面粗さ評価

(4) 導電性透明薄膜を用いた低損失高反射ミラーの開発

高反射率ミラー上に ITO 薄膜を蒸着し、共振器フィネスの測定を行った。その結果共振器長 10 mm でフィネス約 35,000 を得た。ITO 膜なしの比較実験では、フィネスはおよそ 40,000 であったので、ITO 薄膜によるフィネスの減少は誤差の範囲内であった。更なる、精密測定のためよりフィネスの高いミラーを使った実験、膜厚を振った系統測定を行う予定である。一方で、ITO 膜を用いてもフィネス 30,000 以上は少なくとも達成可能なが分かり、原理の実証には成功した。

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・光インターフェースの開発

当該年度実施内容:

令和6年度においては半導体ミラーの集積されたイオントラップでのイオンの捕獲とレーザー冷却を目標としてある。しかしながら大阪大学への異動やファイバーミラーの製造に関する遅れもあり、令和5年度マイルストーンである半導体ミラーを用いたファイバー共振器の実現をまずは目標として開発を進めてきた。大阪大学への実験系の移設は4月初旬に完了し、それより実験系の再立ち上げを進めてきた。現在では実験系の再立ち上げが完了し、ファイバー微小共振器の評価の実験が可能になった。また、OIST 高橋グループによる凹面ファイバーも供給され、これにミラーコーティングを施したファイバーミラーが入手できた。これを用いてファイバーミラーからなる微小共振器を作製したところ、波長1092nm に換算したときのフィネスが 100,000 となり、実際の実験条件を考慮してもイオンと光共振モードの強結合状態の実現が可能な性能であることが分かった。令和7年度以降は半導体ミラーを用いた共振器の評価と共振器を組み込んだトラップの評価を進めたい。

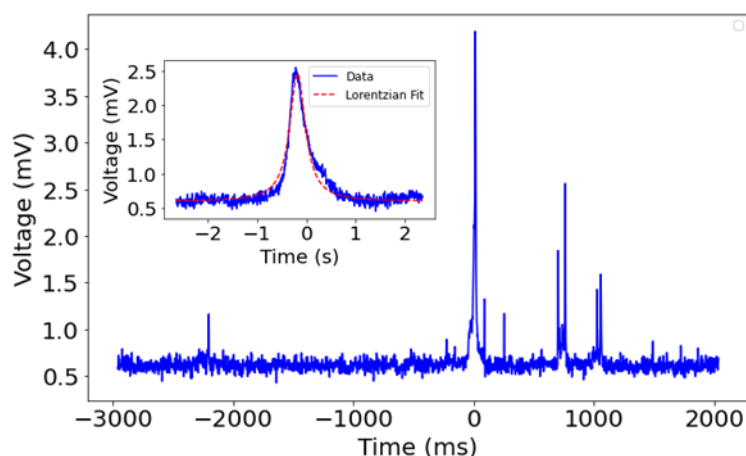


図3 ファイバーミラーを用いた微小共振器スペクトル

課題推進者: 長田有登 (大阪大学)

(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:

(1) クライオイオントラップで使用可能なコンタミネーションフリー原子源

令和5年までに超伝導 RF 共振器を用いたクライオイオントラップには成功していたが、トラップが非常に不安定であり、1度捕まらなくなると、捕獲条件を再度見つけることが困難であることが明らかになった。令和6年度では、トラップの安定性の向上を狙い、荷電粒子のトラップ電極へのコンタミネーションによるポテンシャル変化に着目した実験をおこなった。

現在、レーザーアブレーションという手法で原子を発生させているが、レーザーアブレーションに伴い、トラップチップの上に多くの微粒子が付着することが判明した。レーザーアブレーションは高エネルギーの現象であるため、こうした微粒子の多くは帯電していることが予想され、実際に、トラップ表面に付着した荷電微粒子により、捕獲時の電極電圧はシミュレーションと大きく異なっていることが明らかになった。また、こうしたコンタミネーションは、トラップイオンの加熱レートを上昇させることが考えられるため、不安定なトラップで無理して加熱レートを測定するより、コンタミネーションフリーな原子源の開発が重要であると判断した。なお、従来のメタルターゲットを用いたレーザーアブレーションでも、メタルターゲットにバイアス電圧を印加することで、こうしたコンタミネーションによる帯電を抑制できることが報告されている。

そこで、令和6年度はコンタミネーションフリーの原子源を実現するために

1. バイアス電圧によるレーザーアブレーションのコンタミネーション抑制
2. ストロンチウムに使用可能なメタルターゲット探索
3. クライオ環境下で使用可能なマイクロオープンの開発

という3種類の異なる手法の研究をおこなった。

1について、まず、われわれが使用している SrTiO₃ のレーザーアブレーションによって生成される荷電粒子のエネルギー測定をおこなった。そのために、イオントラップとは独立したテスト真空チャンバーを構築し、マイクロチャネルプレートを使った実験系を構築した。マイクロチャネルプレートの前にバイアス電圧を印加可能な電極を用意し、電圧印加時の信号変化から、エネルギーを推定した。この実験により、SrTiO₃ のレーザーアブレーションによって生成される荷電粒子は 100eV を超える大きなエネルギーをもつことが明らかになり、イオントラップ実験において、バイアス電圧でトラップチップに届く荷電粒子をフィルターすることが難しいことが明らかになった。また、SrTiO₃ の導電性を向上させるため、Nb がドープされた導電性の高い Nb:SrTiO₃ を用いた同種の実験をおこなったが、同じく発生粒子のエネルギーは非常に大きいことがわかった。

2について、ストロンチウムをレーザーアブレーションによって生成可能なメタルターゲットを探索した。ストロンチウムは単体では非常に反応性が高く、設置が難しい。そこで、アルミニウムとの合金により反応性が下がることに着目し、ストロンチウム・アルミ合金(Sr/Al)のレーザーアブレーションに取り組んだ。Sr/Al レーザーアブレーションにより、低エネルギーの中性ストロンチウムの発生を確認することができたが、発生原子数が非常に少なく、また数発のレーザーパルスによってほとんど発生原子数が減衰してしまうことが明らかになった。必要原子数の少ないイオントラップには使用可能な原子源であると言える。しかしながら、私たちが用いているトラップは非常にポテンシャルが浅く、トラップ条件を最適化するために多くの原子を必要としている。そこで、現状のトラップでは Sr/Al 原子源によって発生する原子数は十分ではなく、安定なイオントラップには至らなかった。

3について、従来イオントラップでは、オープンを用いた原子源が広く用いられてきた。しかしながら、多くの熱を必要とするオープンはクライオ環境で用いることはできず、レーザーアブレーションベースの原子源を用いてきた。一方で、レーザーアブレーションは、オープンに比べて非常に高エネルギーな現象であり、上記のようなコンタミネーションが多いことが指摘できる。そこで、クライオ環境において使用可能なマイクロオープンの開発を着想

した。MEMS 技術によって作製されたマイクロオーブンは購入可能なデバイスであり、オーブンの上にターゲットとなる材料を製膜することで、簡便にマイクロオーブン原子源の開発が可能になる。実際に、マイクロオーブンを 2 K の冷凍機内に配置することで、20 mW の熱消費で 1000 °C 程度まで加熱可能であることがわかった。また、100 ms 程度の加熱でこの温度に達するため、冷凍機の温度をほとんど上げることなく、オーブンの動作が可能であることがわかった。現在、マイクロオーブンの上にストロンチウムを含む化合物の製膜方法を開発しているところである。

(2) 低抵抗なフリップチップ実装とフリップチップイオントラップ電極開発

(1) で触れたように、既存のトラップで使用可能なコンタミネーションフリーな原子源を開発中である。しかしながら、フリップチップと呼ばれる手法で作製したトラップでは、電極の 3 次元的な構造により、平面電極構造に比べると 10 倍以上深いトラップポテンシャルが生成可能であることがシミュレーションによってわかっている。また、フリップチップトラップでは、チップにトラップイオン観察のための貫通穴が空いているため、トラップチップ背面からの原子ロードが可能である。背面から原子をロードする場合、アブレーションによるコンタミネーションはチップ裏へ付着するため、トラップへのコンタミネーションからの影響は小さくなることが想定される。そのため、フリップチップトラップの場合、既存の SrTiO₃ のレーザーアブレーション原子源をそのまま用いても安定なトラップが実現する可能性がある。

そこで、本課題では、(1) の原子源開発に並行して、超伝導フリップチップトラップトラップによるイオントラップの開発をおこなった。アンチヘルムホルツ型配置の 1 対のアンテナにより、RF 磁場勾配が印加可能なイオントラップを設計し、実際にシリコン上の Nb 箔を用いてサンプルを作製した。サンプルはフリップチップアライメント用の 3 次元構造と、イオン観察・原子ロード用の貫通穴が空いている。

令和 5 年度までのフリップチップ実装では、チップ間の配線のために使用した銀ペーストと接触点の抵抗に伴い、片面チップに比べて性能が大きく低下することが明らかになっていた。そこで、令和 6 年度では、これらの抵抗を低減するため、ワイヤーボンディングを用いた 3 次元配線手法を開発した。上面チップと下面チップの両方をワイヤーボンディングで配線することで、フリップチップ電極において低い接触抵抗を実現することができた。現在、こうして作製したフリップチップトラップが実装されたイオントラップシステムを組み立てているところである。

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:

令和 6 年度は複数イオン配列中の複数振動モードにおいてスクイーズド状態を生成するために、3 イオンを用いた実験に取り組んだ。3 イオンの軸方向振動モードのうち、環境

からのノイズによるデコヒーレンスの影響が大きいとされる重心振動モードを除く他の 2 モードを用いることを計画している。まずこの 2 モードのコヒーレンス時間を同定するための運動ラムゼイ干渉測定にむけた実験に取り組んだ。

運動ラムゼイ干渉測定のためには、各集団振動モードを個別に励起することが必要となる。ここでは、動径方向の 729 nm 光ビームによりイオン位置に依存する AC シュタルクシフトを生じさせ、斜め方向の 729 nm 光ビームにより実際の励起を行うという二段構えにより実験を行うことにした。この方針に基づき、まず軸方向運動のサイドバンド冷却および動径方向光ビームによるラビ周波数の測定を行った。

また、振動モードにスクイーズド状態を生成するための手法である熱浴エンジニアリングの実験に以前より取り組んできたが、今回実験手法を改善し再度実験に取り組んだ。具体的な手法の改善点として、トラップに外部ファクションジェネレーターから振動電圧を入力できるようにし、それをイオンの振動周波数付近に同調した際に強制振動によりイオンの蛍光レベルが変化することを利用し、イオンの振動周波数を正確に同定した。そして、その振動周波数をもとに熱浴エンジニアリングに用いる二色光のキャリブレーションを行った。そのようにして行った熱浴エンジニアリングによるスクイーズド状態生成実験の結果を図 4 に示す。図 4(d)において占有数において偶数の振動量子数 ($n=0,2,4$) に占有数が集中しているのは、振動状態がスクイーズド状態にあることを反映していると考えられる。

この実験についてはまだ安定性が十分でなく、またサイドバンドラビ振動において比較的大きいデコヒーレンスが観測されるなどの課題が残っており、引き続き改善が必要であると考えている。今後の可能性として、外部からの振動励起を利用してトモグラフィーを行い、その結果からスクイーピングの度合いを評価する実験などが考えられる。

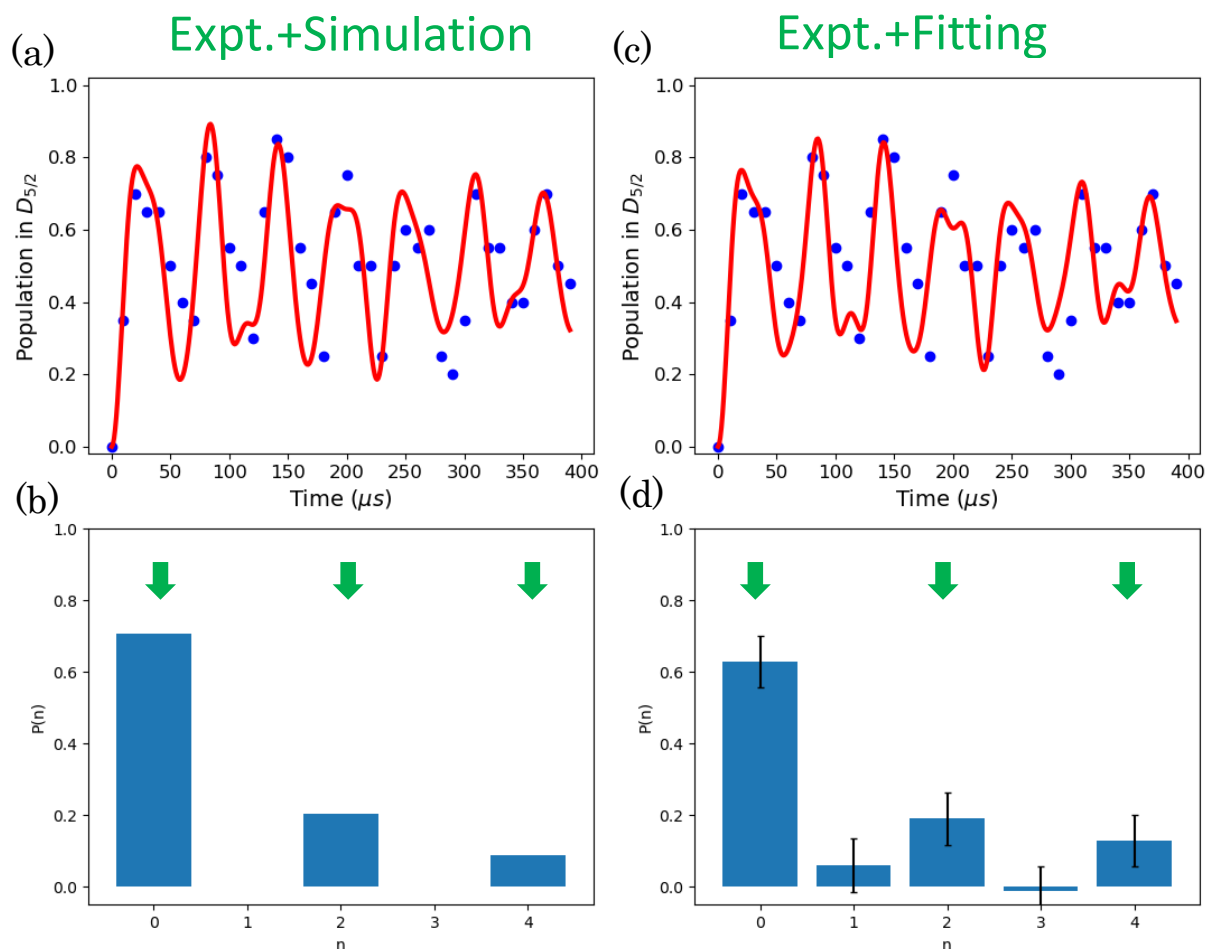


図 4 熱浴エンジニアリングによるスクイズド状態生成実験の結果。(a)ブルーサイドバンドラビ振動測定結果(青丸)および期待される曲線(赤実線、スクイーピングパラメター $r=1.00$)。 (b)期待される振動状態占有数分布。緑の矢印は偶数の振動量子数を示す。(c)ブルーサイドバンドラビ振動測定結果(青丸)およびフィッティング結果(赤実線)。(d)フィッティングにより得られた振動状態占有数分布。緑の矢印は偶数の振動量子数を示す。

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性能評価と供給、(2)立体型イオントラップの性能評価と供給、(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

する研究を実施した。(1)では基板材質と電極形成方法を改善した第二世代平面型イオントラップの供給準備を完了させるとともにイオン運動制御の高度化が可能な第三世代平面型イオントラップの設計を実施した。また供給サイクルを高速化するためのイオントラップモデル作製法の開発を完了した。(2)では立体型イオントラップ基板上に実装するチップ型電気部品の実装方法に関して、真空度劣化の懸念が無い共晶材を用いた実装プロセスを開発し、検証実験で真空度劣化が無いことを確認し、課題1への技術供与を実施した。(3)では合成石英を用いた選択的レーザーエッチング(SLE: Selective Laser Etching)による立体構造形成技術の実証実験として課題6のジャンクショントラップ構造の試作を行って加工精度を検証するとともに、長い加工時間が難点のSLEを高速化する光感光性硝材のエッチング特性評価を行い高速化の見通しを得た。(4)ではイオンのイメージングによりイオン運動を診断する手法の開発及び検証、電気四重極子遷移を用いた量子状態計測・レーザー冷却法を開発及び検証し、イオントラップ評価システムの性能向上を達成した。

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:

サイドバンド冷却を専用のトラップ装置で進めて進捗を加速するために、 Yb^+ イオントラップ装置を2台体制とした。そのために、2号機で確立した3次元の冷却技術をトラップ初号機に導入した。単一 $^{174}\text{Yb}^+$ で波長 411 nm $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 遷移の分光をおこない、ラム・ディッケ領域閉じ込めがほぼ達成されていることを確認した。サイドバンド冷却に十分な冷却状態まで到達したとともに、確立した冷却技術の再現性が確認できた。トラップが2台体制となり、遷移周波数の比較によるトラップ評価の確立に前進した。

超微細構造をもち冷却や観測が難しいものの、磁場に鈍感な遷移をもつ $^{171}\text{Yb}^+$ について、単一イオンスペクトルの SN 比改善をすすめた。これにより、スペクトルの分解能を高めることができ、ラム・ディッケパラメータ 1.5 程度まで冷却されていることを確認した。また、磁場に鈍感な $\Delta m_F=0$ 成分を明確に検出し、磁場変動に鈍感で長いコヒーレンス時間をもつ、 $\Delta m_F=0$ 遷移の利用を可能とした。

研究開発項目4-1-1で作製される立体型イオントラップの導入に関して、NICTの早坂博士と議論をさらに重ね、トラップとこれを設置する真空槽の設計を確定させた。作製に関して技術的な問題があったが解決でき、試作に入った。

課題推進者: 杉山和彦(京都大学)

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) 平面型イオントラップシステムの構築

$^{138}\text{Ba}^+$ ($I = 0$)および $^{137}\text{Ba}^+$ ($I = 3/2$)に対する平面トラップ、原子源、真空系、レーザー光入射および観測光学系、磁場印可コイル等の設計、製作を完了した。平面トラップは真空容器内に水平にマウントし、蛍光の観測は鉛直上方から行う。イオンは Ba 化合物からのレーザーアブレーションおよび同位体選択的イオン化によりトラップにロードされる。レーザー光学系および静磁場印可コイルはドップラー冷却、サブドップラー冷却および温度計測が行える設計とした。図 5 に装置の概要図を示す。

イオンをトラップするための高電圧 RF ドライバとして従来ヘリカル共振器を用いた昇圧回路が用いられてきたが、この共振器は設計、製作や使用、調整に当たってある程度の習熟を必要とする。このため、我々は通常入手可能なインダクタやキャパシタを用い、容易に製作、使用できる高電圧 RF ドライバの開発を進めた。これまでに比較的低い周波領域において主に開発を行い、電圧ゲイン 25-30 程度でその特性が設計値と高い精度で一致する RF ドライバを製作する手法を確立した。

量子情報担体に用いるイオンとしては、できる限り単純な基底状態超微細構造を持つものが望ましく、この目的で我々は最

小の非零核スピン $I = 1/2$ を持つイオン $^{133}\text{Ba}^+$ に着目してきた。これは放射性同位体ではあるが長寿命(半減期 10 年)であり放射能は微弱であるため比較的扱いやすい。これまでに米国等の研究チームにより ^{133}Ba または他の同位体のレーザーアブレーションによるトラップへのローディングが試みられてきたが、通常入手できる塩化物 BaCl_2 を用いたアブレーションでは他の Ba 化合物に比べ放出粒子のエネルギーが高く、トラップへのロードに適していないことが報告されている。このため、我々は QST で利用できるサイクロトロン加速器を用いてプロトン衝突により核反応を起こし、よりロードに適していると考えられる炭酸化合物 $^{133}\text{BaCO}_3$ の生成を試みた。これまでに行った実験で、ほぼ想定通りの収量の ^{133}Ba を生成できたことが確認できた。並行して、 $^{133}\text{Ba}^+$ イオンのトラップ実験のために、放射線管理区域内での実験系の構築を進めた。特に、一般区域から管理区域へのレーザー光の伝送のための全長 200m の PM ファイバー多芯ケーブルの敷設工事が完了した。

$^{133}\text{Ba}^+$ を他の同位体と区別して効率的にトラップへ導入するため、レーザーアブレーションによって生成した Ba 原子を光共鳴イオン化によって同位体選択的にイオン化する手法についての技術開発を引き続き行った。令和 5 年度までに構築した実験系を用いて、中性 Ba をトラップへロードする際の Ba イオンの混入を避けるための条件探索として、レーザーアブレーションによる Ba イオンの生成試験を行った。BaTiO₃ 試料から生成した Ba イオン強度を四重極型質量分析装置を用いて測定した結果、生成されたイオン量がレーザーエネルギーに対して閾値を持ち、閾値以上では線形に増大することを確認した。また、トラップへのイオンのロードに用いるレーザーアブレーションの物理過程をモニターするための

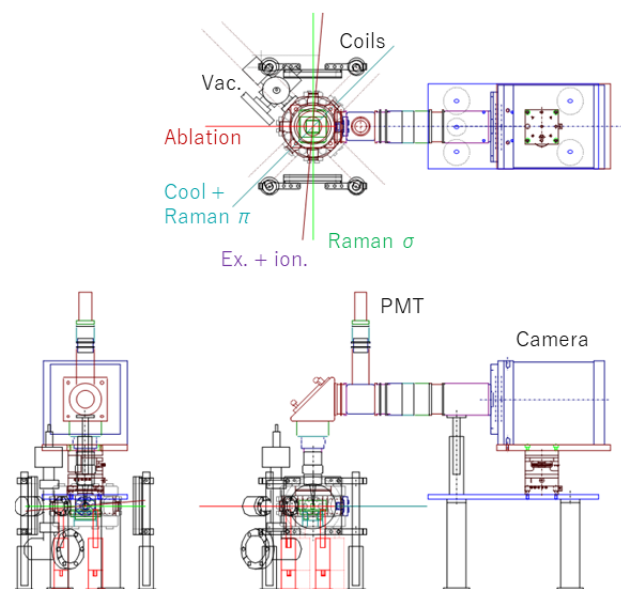


図 5 製作した平面トラップシステム

光学系を製作した。

Ba の同位体選択的共鳴光イオン化に関しては以下の光源開発を行った。光励起に必要とされる、1 段目選択的励起光 (波長 791nm) に関して、External-cavity diode laser (ECDL)からの出力波長の掃引条件を探索し、モードホップの少ない掃引条件を見出した (図 6)。これにより、目的波長において安定な波長掃引を実現した。

また、励起確率がより高く、高効率励起が期待できるスキームの1 段目励起光源 (波長 553nm) に関して、Distributed Feedback (DFB)レーザー (波長 1107nm) と Periodically Poled Lithium Niobate (PPLN)(波長 553nm)を用いた光源を新たに開発した。その結果、553nm で10mWを超える十分なレーザー出力を得た (図 7)。また、設定温度の掃引により安定でモードホップのない単一波長掃引が実現できることを確認した。これにより、高効率、コンパクトで安定動作可能な新しい Ba 同位体選択的励起用光源を実現した。

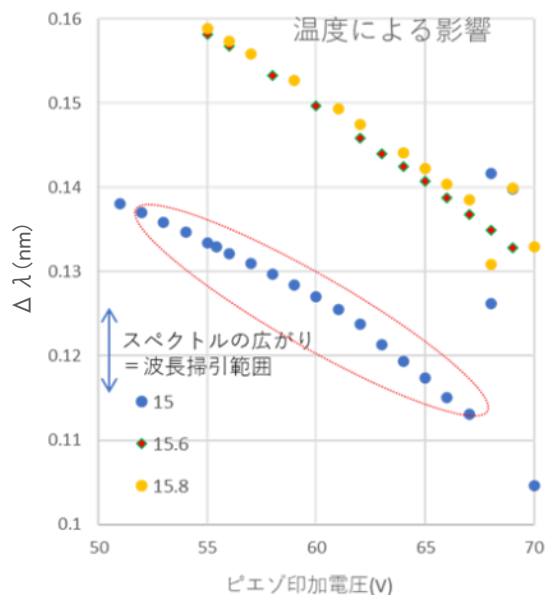


図 6 791nm 光源のピエゾ伸長による波長掃引

(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、令和 5 年度に完成した設計図を基に、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、および、小型真空パッケージ製作の実績がある企業と連携して試作品の作製を進めた。フラットパッケージの中央部に高性能汎用トラップを設置・固定し、配線の後、キャップ部をかぶせ、溶接・封止する。現在、トラップの設置、配線および封止に係る作業を進めており、間もなく当該真空パッケージの試作品が完成する予定である。

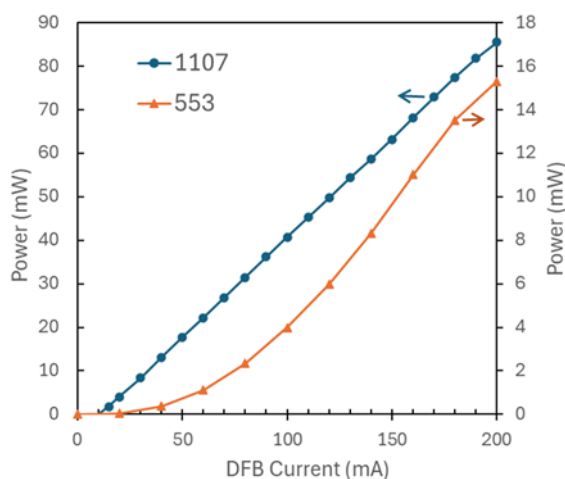


図 7 DFB レーザー出力(1107nm)と PPLN 出力(553nm)の DFB 印加電流依存性

課題推進者: 百合庸介 (量子科学技術研究開発機構)

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を用いた量子ゲート実験にむけて、まず $^{171}\text{Yb}^+$ の選択的捕獲およびトラップの安定化に取り組んだ。光イオン化レーザー (399 nm) および冷却レーザー (369.5 nm, 935 nm) の波長を適切に調整し、またオープン電流を十分下げることで、比較的高い確率 (90 %ほど) で $^{171}\text{Yb}^+$ を選択的にロードすることに成功した。イオン内部状態の占有数が $^2\text{D}_{5/2}$ 状態を介して $^2\text{F}_{7/2}$ (寿命約 5 年) に落ち、ダークイオンとなる振る舞いが問題となっていたが、 $^2\text{F}_{7/2} - ^1[3/2]_{3/2}$ 遷移に共鳴する 760 nm 光の周波数を正確に同調することでこれを防ぐことを試みた。そのために、別に $^2\text{D}_{3/2} - ^1[3/2]_{3/2}$ 遷移に共鳴する 861 nm 光を用意し、その光による恣意的な $^2\text{F}_{7/2}$ 状態への棚上げと 760 nm 光による基底状態への戻しを競合させることにより、760 nm 遷移の波長を調整した。そのようにして同調した 760 nm 光を常時照射することで、イオン配列を準備したうえでダークイオンに移行させずに長時間 (数十分以上) 保持することが可能になった。

次に、量子ビットとして用いる基底 $^2\text{S}_{1/2}$ の $|F=1, m_F=0\rangle \equiv |1\rangle$ と $|F=0, m_F=0\rangle \equiv |0\rangle$ の 2 状態の状態検出に取り組んだ。ここでは $|1\rangle$ と $^2\text{P}_{1/2} |F=0, m_F=0\rangle$ 状態の間の吸収放出サイクルによる蛍光を用いて状態検出を行う。上準位 $^2\text{P}_{1/2}$ の $F=1$ 状態を介した非共鳴遷移により状態検出誤りが生じてしまうこと、光子カウントレートが基底状態における暗状態生成の影響を受けることに注意しつつ、観測時間、観測用光ビーム (369.5 nm) の強度、磁場の大きさ、状態検出の閾値等を適切に設定することにより、最終的に 5.8×10^{-2} の誤り割合で状態検出を行うことに成功した。

以上の状態検出とマイクロ波照射を組み合わせることにより、マイクロ波によるラビ振動を観測することに成功した (図 8)。この時のラビ振動数は 25 kHz、振動のコントラストは約 90 %であった。

さらに、355 nm パルスレーザーの照射による誘導ラマン遷移の観測を試みた。

今回試みたのは、同一方向からの光照射による Copropagating carrier 遷移の観測である。パルス繰り返しレートの変動を補償する外部フィードフォワード制御を有効にした状態で 355 nm 光を 1 方向から照射し、適切に経路を調整することで、誘導ラマン遷移 (Copropagating carrier 遷移) を観測することに成功した。また、パルス照射時間を制御して状態検出と組み合わせることにより、誘導ラマン遷移によるラビ振動の観測に成功した。その際のラビ周波数は 3 kHz 程度であった。今後、引き続き Counterpropagating 配置で誘導ラマン遷移の観測を行い、さらにその後 2 量子ビットゲート、クラウドへの接続へと進めていく予定である。

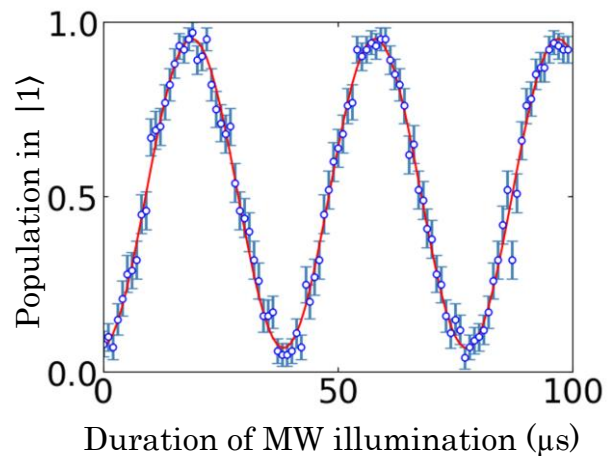


図 8 マイクロ波遷移によるラビ振動の観測結果。

(2) 平面型トラップを用いたイオン輸送技術の開発

令和6年度は、平面型イオントラップを用いたカルシウムイオンの直線輸送実験を行った。5対の DC 電極の印加電圧を制御することにより、図 9 に示すように単一カルシウムイオンを直線状に輸送した。この時の印加電圧は、調和型のトラップポテンシャルの固有周波数 ω_z が一定になるという条件で2次計画法によって求めた。またイオンの加熱を抑えるために始点、終点付近ではそれぞれ徐々に加速、減速を行っている。このような直線輸送でイオンを 10,000 回往復させることに成功した。

さらに高速化のため、DC 電圧制御に必要な高速多チャンネルの Digital to Analog Converter (DAC) の開発も行った。断熱的にイオンを輸送する場合には、 ω_z がイオン輸送速度の上限を決めるため、イオン輸送の高速化には DAC を高出力化して ω_z を高くすることが重要である。令和5年度からキューエル株式会社、株式会社イーツリーズ・ジャパンとの共同研究によって、FPGA ベースの DAC を開発してきたが、令和6年度はこれをさらに改良して高出力化を行い、イオンを用いてその評価を行った。市販の DAC の出力は $\pm 10V$ が一般的であるが、今回開発したものは、高速多チャンネルで、かつ、出力 $\pm 50V$ である。この DAC を用いて、高出力化によって高い ω_z が実現していることを、カルシウムイオンを用いて確認した。

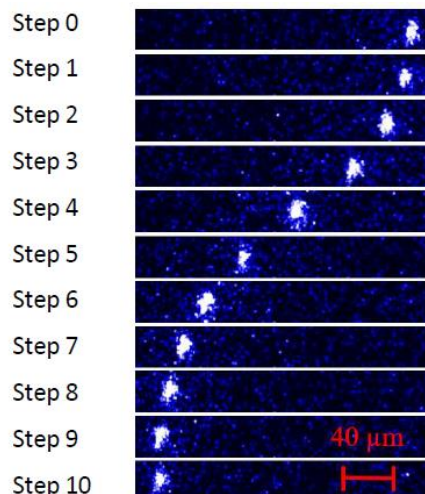


図 9 単一カルシウムイオンの直線輸送の画像。

(1) 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、イオン運動を高感度に検出するための画像計測系を構築した。多数個2次元配列では、単一イオンのように1点からの光を集光し光電子増倍管で検出する手法は適用できないため、画像計測で処理できるのがのぞましい。トラップ平面と平行な方向の運動は画像計測による振幅の広がりによって、また垂直な方向はパラメトリック共鳴を用いた蛍光カウントの増減によって、余剰マイクロ運動を全方向に観測しながら補正電圧をかけて最小化する。そこでカルシウムイオンの蛍光波長用に設計した集光用レンズを導入し、高解像度のカメラと組み合わせることでイオン画像の空間分解能を向上させた。これによって多数のイオン運動の様子が高空間分解能で観測できるようになった。

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を作製し、イオントラップデバイス内に

イオン励起用レーザー光を導入するモジュールへの実装化に取り組んだ。パッシブ・コントローラ部となる光導波路回路は、Sr イオンの励起に適応した複数レーザー光源の光導入部と照射部で構成し、外部レーザー光源からは光ファイバーを実装した光インターコネクトも作製した。アクティブ・コントローラ部に相当する位相変調導波路(位相シフタ)の開発では、光導波路回路と同様に可視化が必要となる。位相長が 20 μm の小型位相シフタを作製し、外部 RF 信号入力による変調振幅動作を確認した。

(1) 多チャンネル光導波路のオンチップ集積化

本研究項目では、透過率が高い光集積導波路回路の作製を進め、イオントラップデバイス内にモジュール化して組み込むことを目指し、可視から近赤外波長領域に広くまたがる広い波長域に適応する光出射素子の検討を行った。光出射部となる回折格子の構造は、光伝搬計算法によって設計し、電子線リソグラフィ法によって素子作製を行った。Sr イオントラップデバイス用の光導波路回路では、回折素子からの光取出し効率は、波長 422 nm で 5.9 %、波長 1092 nm で 0.5 %であった。光取出し効率は、導波路や回折素子の作製精度と光ファイバーと光導波路の入力損失によって決まるが、波長 1092 nm の取出し効率の改善を目的に導波路設計と作製の両面から改良を進め、光取出し効率は 13.2 %に大幅に向上した。これら 2 つの光入力素子は、Sr イオン励起の主要波長となるが、検討した作製技術は光照射を要する 4 波長の短波長側と長波長側に相当している。すなわち、この 2 波長の光照射部を作製できたことで、全光源を入力するための要素技術が完成したこととなる。次にイオントラップ内に組み込む光モジュールとして、これらのレーザー光をトラップイオンの中心部に集光する必要がある。回折素子からの光出射角は、回折格子の設計によって決まる。モジュールの設計上の制約からその角度を 45° 程度で設定し、レーザー光の集光実験を行った。光回折格子の設計においては、出射角度に加えてビームフォーカスの要素も加え、回折格子を扇形に調整することで、高さ 200 μm 付近で集光するように改良も加えた。評価実験においては、各波長の 3 次元イメージングを行うことでレーザー光の出射軌跡を解析し、設計通り基板表面上から 200 μm の高さ地点で 2 光源が結合する集光点を確認した。

(2) イオントラップデバイスの光入力制御技術の実施

光導波路回路のアクティブ・コントローラ部として位相シフタは、高電気光学、低挿入損失、広波長帯域などの特性が求められる。これらの要件を検討し、強誘電体光導波路を使った光導波路型位相シフタを作製した。電気光学係数は 250 pm/V と非常に高く、LN と比べて小型で高効率の位相シフタを作製することができる。光導波路の設計と作製は、これまで実施の LN 導波路とほぼ同じであることから、令和 5 年度までの検討結果をもとに作製実験を行った。作製した位相シフタは、2.5 mm の長さを有し外部 RF 信号による高い位相変調利得を示した。LN 導波路と比べると、1/4 の長さで、2 倍以上の変調効率に相当する。一方、作製した位相シフタの損失は波長が短い場合には増加する傾向があり、波長 450 nm 以下では著しく吸収損失が高くなる。この吸収損失は強誘電体のバンドギャップ(波長換算で 400 nm 付近)に由来する物質固有の特性である。アクティブ・コントローラ部は光導波路回路への光波制御機能を付与することとなるが、光挿入損失と変調効率のトレードオ

フを考え、光挿入損失の影響が最小限にとどまる可能な限り短い光位相シフタの作製について検討した。最終的に長さ 20 μm の超小型位相シフタでも外部 RF 信号による振幅強度変調を得ることができた。令和 6 年度は、光入力制御技術として有望な小型、高変調利得。RF 応答性などを兼ね備えた集積型位相シフタを完成した。

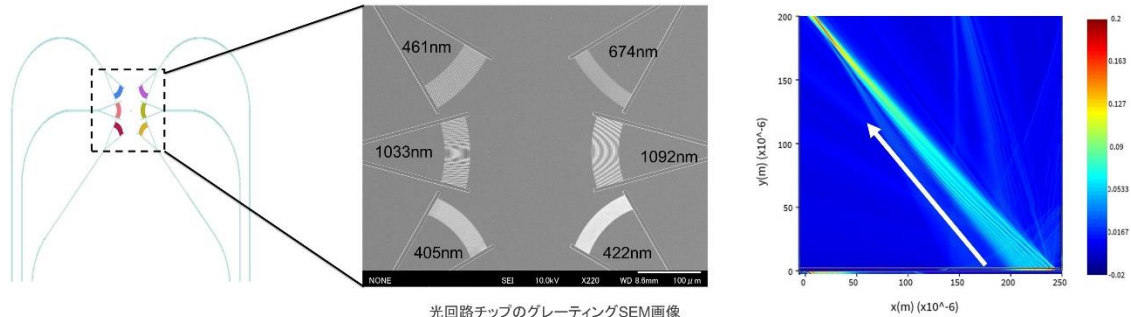


図 10 波長 405 nm～1092 nm の広波長範囲にわたるレーザー光源に対応した光照射ユニット (6 波長回折格子回路) の作製。ビームプロファイルに示す通りレーザー光は集光点に出射される。

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:

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完了し、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。このようなグレーティング素子を、数値計算による最適化ではなく解析的な式による設計で実現できるような知見を得、シミュレーションに要する時間を大幅に短縮することに成功している。

また、大阪大学への異動後、実験系の再立ち上げを行った。現在では再立ち上げも完了しているが、プロセス装置の利用に関しては令和 5 年度まで利用していたシリコン深堀エッチング装置の利用ができなくなったため、新たにシリコン深堀プロセスが可能な装置を探し、プロセスの開発を再度行う必要があった。結果として永山翔太 PM のプロジェクトとの連携の実績から、永山プロジェクトで知り合った慶応大学の学生に協力していただけることとなり、東京大学の微細加工施設を利用しプロセス開発をほぼほぼ終えることができた。令和 7 年度は実際に九州大学によって作成された光回路チップに追加加工する形でイオントラップに組み込み可能な光回路チップを作製し、その動作実証を目指す。

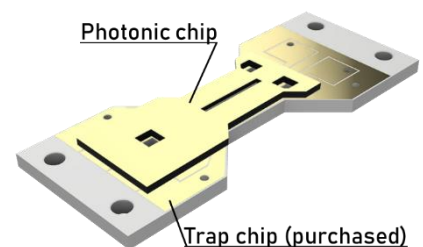


図 11 フリップチップ集積による光回路一体型イオントラップ

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) ジャンクション型 3 次元微細加工電極の製作

1-1 業者選定および製作方針転換

ジャンクション型 3 次元微細加工電極を製作するに当たって、当初これまで平面電極製作実績のある国内加工会社数社と検討を重ねたが、すべての企業が自社での製作は現状の設計では不可能との結論を出してきた。そのため、製作プロセスに立ち返り、製作工程を分割し外部専門業者に各工程を依頼することで電極製作の可能性を検討した。その結果、令和 6 年度上半期までに、下記に示す計 4 社に各工程を実施してもらう体制が整ったため、電極製作を開始した。

- ☒ I. 高純度アルミナ基板の調達 (A 社)
- ☒ II. ピコ秒レーザーを用いたアルミナ基板貫通加工 (B 社)
- ☒ III. 電子ビーム蒸着による Ti/Au メッキ (C 社)
- ☒ IV. ピコ秒レーザーを用いたパターニング (B 社)
- ☒ V. Au 電解メッキ (D 社)
- ☐ VI. 電極の組み立て (課題 4-1-1 NICT)

1-2 電極の製作状況

令和 7 年 3 月までに全 6 工程中 5 工程までを完了した。最後に控える電極の組み立て工程を、課題 4-1-1 (NICT)グループの下で行い、それを以て電極完成となる。以下、各工程で検討した内容を記述する。

工程 I. 微細加工電極基板として使用されている基板材質を調査した。サファイア電極や窒化アルミ電極は極低温平面イオントラップに使用されるが、破壊靱性が低いいため加工性が悪く、また常温トラップにおいて基板温度がイオン輸送に与える影響は小さい。そのため、熱伝導率は相対的に劣るものの、破壊靱性が大きく、かつレーザー加工会社の加工実績のあるアルミナ基板を採用した。

工程 II. 加工ステップが単純で誤差が乗りにくいレーザーカットによる微細加工を行った。当初の設計では電極の串歯部分の間隔が $50\ \mu\text{m}$ 幅であったが、レーザーのテーパー角の発生から入口径 $50\ \mu\text{m}$ に対して出口径が $7\ \mu\text{m}$ となり、後に控えるメッキ工程で間隔が完全に塞がってしまう問題を懸念し、立会加工の際に入口径を $70\ \mu\text{m}$ に広げることで出口径 $30\ \mu\text{m}$ を確保した。基板 1 枚を抽出し 20 箇所での加工精度を評価した結果、標準偏差は入口径が $2.36\ \mu\text{m}(3.3\%)$ 、出口径が $1.15\ \mu\text{m}(3.8\%)$

であり、加工誤差 5%以下の高精度でスリットを構築できていることが明らかになった。

工程 III. 本工程前に東大施設でピラニア洗浄を実施後、電子ビーム及びスパッタ手法を用いて 50 nm の接着性チタン層および 100 nm の金属を形成して導電面を作成した。蒸着結果の SEM 画像を図 12 に示す。基板全面が金蒸着に覆われていることが確認できる。外部専門業者に依頼したすべての基板のすべての面で蒸着が均一に成膜することができた。

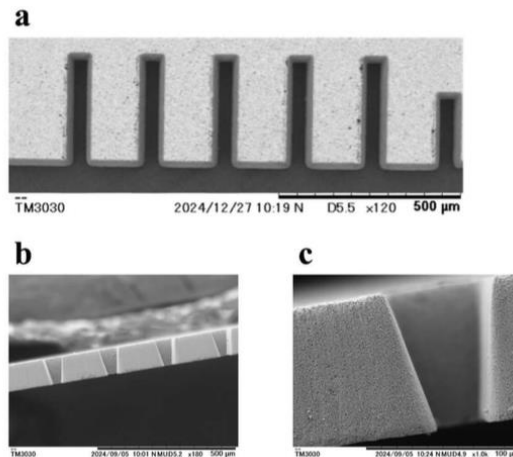


図 12 電子ビーム蒸着を行った基板の SEM 画像。a は上面、b と c は側面の SEM 画像。

工程 IV. 工程 II と同じレーザー加工の専門会社に外注して、基板両面の回路形成のためのパターンニング加工を行なった。さらに、電極同士の絶縁のためには、スリット内側の側壁の金膜を削り落とす必要があり、側壁金蒸着の除去を実施した。また、電極の Y ジャンクション先端の凸部分の蒸着除去も実施した。それらの結果を図 13 に示す。(a)のスリット内壁の側壁においては、イオンに近い領域は電極構造が保たれており、レーザーの照射位置である丸円部分は黒いアルミナ基板が剥き出しになっており、金蒸着が除去されていることが確認できる。(b)のジャンクション先端部分においては、面の金メッキを保持しつつ、側面の金膜のみを選択的に除去できていることが確認できる。

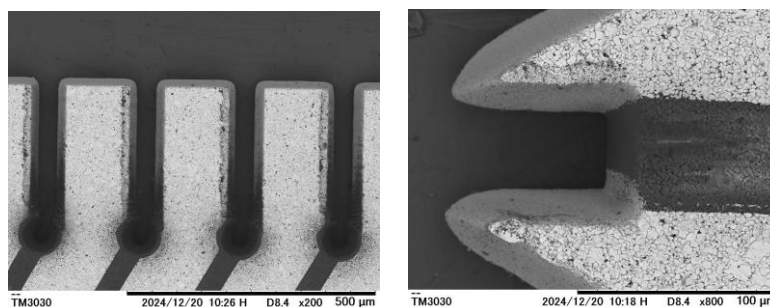


図 13 (左) 側壁蒸着除去後の直線領域の SEM 画像。

(右) レーザーによる側面の金膜の削り落とし後の SEM 画像。

工程 V. 基板表面の 100 nm の金属を目標厚み 4 μ m まで成長させる電解メッキを実施した。金メッキ後の基板は、アルミナ無垢基板の粗さや金メッキの不均一さによって表面に微細な凹凸形状を有し、それが捕獲電場の形成に影響を与える。したがって、

基板表面の粗さをレーザー顕微鏡および取得した分布データのフィッティング結果から、標準偏差 $0.32 \mu\text{m}$ の粗さを持つことが分かった。

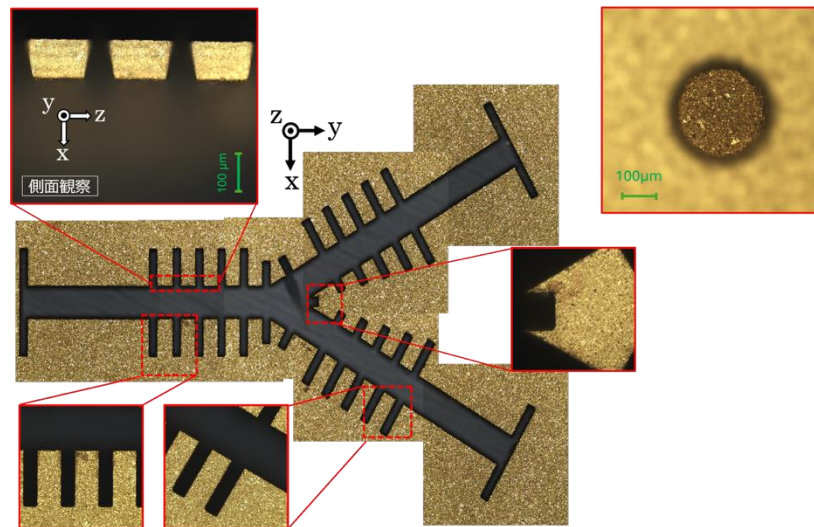


図 14 工程 V まで終えた 3 次元 Y 型ジャンクション微細加工電極の SEM 画像。

(2) D-Sub ソケット型チャンバーを用いた平面電極トラップ

当初の計画では、NICT などによる微細電極の試作品の供与を受けた上でトラップ実験を実施する予定であったが、試作品の調達ができていない。そのため、課題 4-1-1(NICT) から別で供与を受けた平面型イオントラップを用いてシステムの構築を行い、Ca イオンの捕獲実験を進めている。平面電極を収納する真空容器として、D-Sub ソケット型チャンバーも同様に供与を受けた。本チャンバーは、D-Sub コネクタで DC/RF 配線を統合し、真空装置内の煩雑な配線作業を減らし、なおかつ多様なレイアウトのトラップ電極をプラグアンドプレイで動作できることに利点がある。これを用いたトラップ実験は本課題 6-1 に加えて、課題 4-1-1(NICT)、4-1-3(QST)、4-2(大阪大学)でも並行して実施中であるが、まだイオン捕獲に成功した報告はなく早期の捕獲が待たれる。

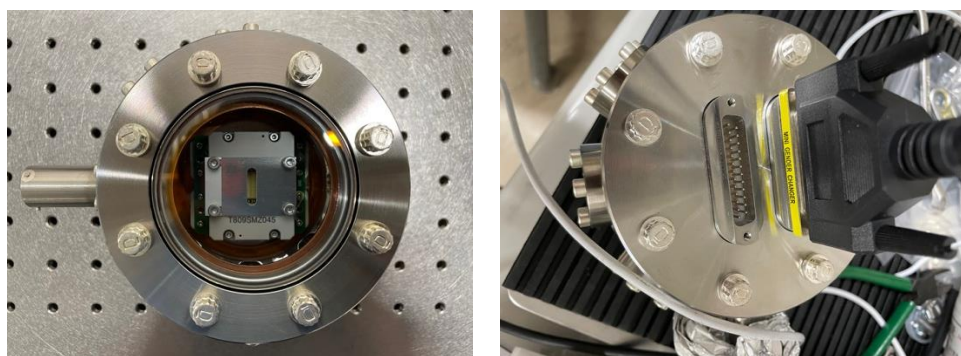


図 15 課題 4-1-1(NICT)から供与を受けた D-Sub ソケット型チャンバー。

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ストロンチウム原子のリドベルグ励起に取り組み、レーザー励起によって D 状態リドベルグ原子が生成できることを確認した。また、狭線幅遷移を用いたレーザー冷却により原子の温度が 10 マイクロケルビン以下にまで冷却することができた。加えて、冷却イオンのリドベルグ励起のために必要となるレーザー光源の製作に取り組み、波長 244nm の深紫外励起光源の開発を行なった。また、イオンのリドベルグ励起のための中間準位への光学遷移分光にも成功した。

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)には、プロジェクトマネージャー(PM)を支援するチームが設置され、以下のメンバーで構成されている:

- ・ アシスタント PM(Administration): 事務全般の統括管理
- ・ 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や知財戦略の統括
- ・ 事務職員: 課題推進者との会議日程調整、雇用・労務・経理、成果公表申請、広報・アウトリーチ、ウェブサイト管理等の事務的補佐
- ・ アシスタント PM(Research): JST との調整、最新研究動向の調査、計画書・報告書取りまとめ支援、知財調査の補佐、プロジェクト間連携の窓口対応

PM および PM 支援チームにより、予算運営会議、知財戦略に関する打合せ、データマネジメントの現状と今後の展開に関する会議等を随時実施し、体制的な連携を図っている。また、Slack 等のツールを活用し、各課題の進捗状況の把握や関係者間の情報共有を日常的に行っている。課題推進者および研究参加者を含めた課題推進者会議(ハイブリッド形式)を OIST にて開催した。会議では、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、進捗状況、年次計画が発表され、プロジェクト全体の進捗状況を共有・把握した。また会議には NDA を締結した企業(2 社)からも 2 名が参加し、技術的観点からの意見提供や、今後の連携の方向性についても議論された。現地参加した課題推進者などに対しては、OIST での研究環境や進捗状況を直接確認した。

研究開発プロジェクトの展開

令和 6 年度においても各研究課題において策定済みの計画に基づきつつ、研究の進展に応じて柔軟な運営が可能となる体制を整え、研究開発を推進した。新たな機器の導入とそれに伴う実験環境の整備も進み、具体的なデータの取得が本格化しており、論文投稿や学会発表といった形で成果も現れつつある。これらの動きは、研究体制の立ち上げから着実に進展していることを示している。研究機関間では、会議やオンラインツールを活用した情報共有を通じて密に連携し、研究課題の進捗状況を把握することで、必要に応じた方針転換が可能となる体制を維持している。国際連携においては、OIST 高橋 PM とドイツ・Johannes Gutenberg 大学 Mainz (Schmidt-Kaler グループ)との間で NDA を締結し、技術交流を進めている。令和 6 年度には、OIST から博士課程の学生(1 名)を 4 か月間現地に派遣し、量子ビット制御、狭線幅レーザーによる操作技術、QCCD 制御技術の習得を行った。これらの技術は、本プロジェクトの線形イオントラップと微小共振器を統合した光接続型量子コンピュータの研究開発への応用を見据えている。このような連携を通じ、先進的な技術の吸収と活用が可能となり、今後の研究開発の加速と成果創出が期待される。社会実装に向けた取り組みとしては、令和 6 年 8 月に JST 主催で開催された知財セミナーにプロジェクト関係者が参加し、研究成果の権利化や事業化に向けた知見を共有した。

(2) 研究成果の展開

令和 6 年度においては、研究成果の権利化に向けて知財戦略を進め、各研究開発機関の知財担当部門より、2 件の特許出願が行われた。これらの出願は、将来的な技術移転や

社会実装を見据えたものであり、継続的な知財マネジメントの一環として取り組まれている。また、プロジェクト全体としての技術的ポジショニングの確認を目的に、関連分野における特許情報や研究動向について、既存の調査データ等も活用しながら把握に努めた。現段階では初期技術の確立を優先しており、社会実装に向けたステップとして、今後のプロトタイプ開発や企業連携の強化を視野に入れている。

(3) 広報、アウトリーチ

本プロジェクトの研究成果や最新動向について、広く社会へ発信するため、専用ウェブサイト(<https://www.oistmoonshot.jp/>)を通じた広報を継続的に行っている。同サイトでは、プロジェクトの全体像や将来ビジョン、参画研究機関、課題推進者の紹介に加え、PM へのインタビュー動画等を掲載しており、プロジェクトの内容を理解できる構成となっている。また、各課題推進者の個別ホームページとも連携しており、研究成果や活動報告へのアクセスを容易にしている。

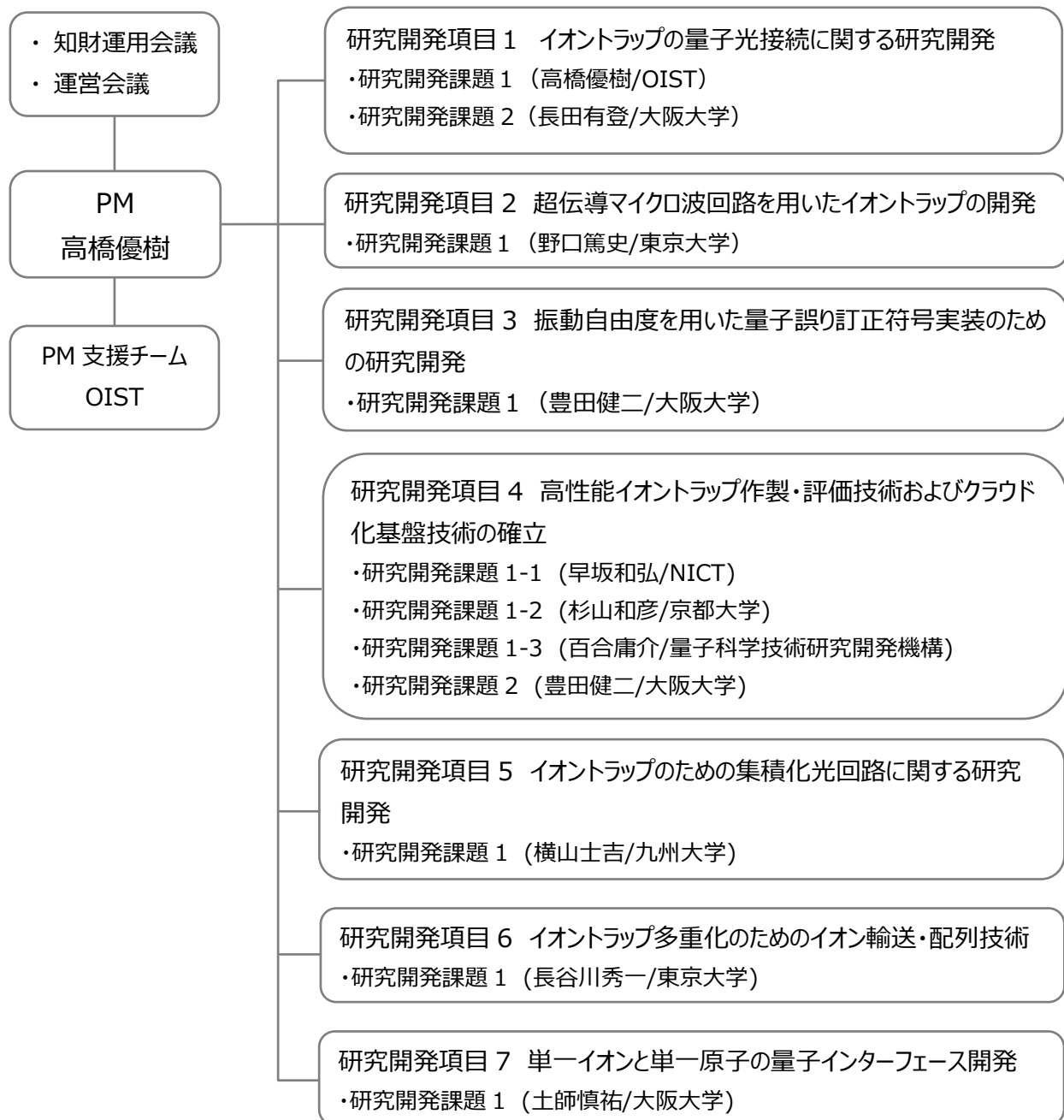
アウトリーチ活動においては、令和 6 年 9 月に OIST にて国際シンポジウム「Advanced Quantum Technologies for Trapped Ions (AQTTI)」を開催し、国内外の研究者との交流と技術発信を図った。本シンポジウムでは、量子技術分野の第一線で活躍する招聘講師 24 名を迎え、最新の研究成果に関する講演を実施したほか、受講生は 58 名となりポスター発表を通じて、活発な意見交換と若手研究者の育成を促進した。本取り組みは、研究成果の国際的な可視化および将来的な技術展開に向けた基盤づくりとしても機能している(<https://groups.oist.jp/AQTTI>)。

(4) データマネジメントに関する取り組み

GakuNin RDM を活用した研究データの保管・共有環境は既に整備されており、課題推進者ごとに利用可能な状態にある。今後は、必要に応じてメタデータの付与を行い、研究の進捗や知財の状況に応じて、NII Research Data Cloud (NII-RDC) でのデータ公開の可能性も検討していく。

研究データの管理と共有を目的として、GakuNin RDM を活用したデータ保管環境を整備し、課題推進者ごとにデータを保存・共有できる体制を整えた。今後は、GakuNin RDM 上で研究データに対してメタデータを付与し、それを NII Research Data Cloud (NII-RDC) と連携させて、これまでの研究成果をもとに、特許出願との関係を考慮しつつ、公開可能なデータの選定・整理を進め、段階的なデータ公開を目指していく。

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

本プロジェクトにおける知財運用会議には、参画研究開発機関のうち、協議対象案件に関わる機関に加え、PM および JST が基本的に参加する構成としている。また、プロジェクト内での知的財産の権利化に関しては、代表機関の知財担当部門との協議を視野に入れ、今後の対応を検討している。

運営会議 実施内容

令和 6 年 9 月 25 日：高橋プロジェクト全体会議を OIST にてハイブリッド形式で開催し、課題推進者、関係研究者・学生、NDA 締結企業 2 社が参加した。各課題推進者による研究発表を通じて、進捗状況、プロジェクト内での位置づけを共有するとともに、企業からも 1 名ずつ発表があり、ムーンショット事業への参画や連携の方向性についても意見が交わされた。会議全体を通じて、研究の進捗や課題に関する有意義な情報交換・議論が行われた。

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	3	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	3	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	5	6	11
口頭発表	21	2	23
ポスター発表	1	16	17
合計	27	24	51

原著論文数(※proceedings を含む)			
	国内	国際	総数
件数	1	6	7
(うち、査読有)	1	5	6

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	1	0	1
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	1	0	1

受賞件数		
国内	国際	総数
0	1	1

プレスリリース件数
0

報道件数
1

ワークショップ等、アウトリーチ件数
1