



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

終了報告書

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. 研究開発プロジェクトの実施期間

令和2年12月21日～令和7年11月30日

2. 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概要

本プロジェクトでは、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の基盤技術の確立と、関連デバイスの基本動作の実証を主たる目的として研究開発を推進してきた。一部の研究開発項目については目標の見直し等の柔軟な対応を行いつつも、全体としては概ね計画に沿って進展し、所期の目標を達成している。以下に、各研究開発課題における当該研究期間の進展および実施状況の概要を示す。研究開発課題 1-1 では、線形イオントラップに微小光共振器を統合し、イオン鎖中の特定イオンを共振器モードに強結合させる基盤技術の確立を目指した。Selective laser etching (SLE) による一体成形トラップの作製とイオン捕獲評価、高フィネスファイバー共振器の安定作製技術を確立した。共振器統合に関する課題を電極幾何対称性の観点から解析し解決指針を得た。バリウムイオンの D1 遷移(493 nm)の利用に着目し、493nm における共振器特性評価を実施した。低損失導電性ミラーの開発、Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)ミラー構造の試作にも成功し、将来の大規模光接続に向けた技術基盤を構築した。研究開発課題 1-2 では、半導体ミラーによる高フィネス光共振器のイオントラップ集積を目指し、当初の微小ミラー集積方針から、半導体ミラー基板上へのトラップ形成へと方針転換した。作製したトラップでは電気特性評価とイオン捕獲を確認したほか、光ファイバミラーとの組合せにより 1092 nm でフィネス 100,000 の微小共振器を実現した。一方で、共振器を用いたイオン・光インターフェースの実証には至らなかった。研究開発課題 2-1 では、イオントラップ量子コンピュータの拡張性向上を目指し、超伝導技術を導入したクライオイオントラップを開発した。低振動型冷凍機内で動作するイオントラップを実現するとともに、高 Q 値の超伝導ヘリカル共振器を開発し、約 1mW の低強度 RF 入力でイオントラップに必要な大振幅電圧を実現するとともに、イオンの捕獲に成功した。また、低汚染マイクロオープン原子源や極低温対応の時間多重配線回路を開発した。さらに、超伝導回路を集積したフリップチップ型イオントラップにより、従来は数 W 級の電力を要した RF 磁場勾配を約 1mW の RF 入力で発生させることに成功し、イオンの捕獲を実現した。研究開発課題 3-1 では、光定在波によりイオン配列の振動モード間結合を誘起し、ビームスプリッター相互作用を実現するための励起スキームを選定した。熱浴エンジニアリングによりコヒーレント状態生成に成功し、スクイーズド状態生成では偶数振動量子数への占有集中を確認した。紫外連続光源により単一イオンの X・Y モード間結合を実証し、3 イオン配列での分光・個別アドレッシング実験も進めた。単一イオン軸方向振動モードでは 112 ms のコヒーレンス時間を得た。さらに、2 つの振動モードに $|2\rangle|2\rangle$ を生成し、ビームスプリッター結合と個数分解検出により、ボゾニック符号状態の

もつれ操作を評価する計画を立案し、1 モード射影測定実験を行った。研究開発課題 4-1-1 では、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に組み込むイオントラップモジュールを製作するためのイオントラップ作製技術とイオンを用いたイオントラップ評価技術の研究開発を実施した。前者では多機能埋め込みに有利な平面型イオントラップ、ミラーなどの誘電体による電場外乱などにロバストな束縛力に優れた立体型イオントラップ、光とイオンを接続するための光インターフェースの研究開発を行い、後者ではイオンの撮像による評価技術および、狭線幅遷移分光による評価技術を実施した。研究開発課題 4-1-2 では、 $^{171}\text{Yb}^+$ 時計遷移分光を通じて、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) 開発の立体型イオントラップの性能評価と開発への貢献を目的に研究を実施した。冷却・操作技術の高度化として、 $^{174}\text{Yb}^+$ 単一イオン分光によりラム・ディッケ領域までの冷却手法を確立し、 $^{171}\text{Yb}^+$ に適用して時計遷移分光を実現した。さらに冷却性能の評価を進めるとともに、立体型イオントラップおよび真空槽の試作を完了し、基盤技術を確立した。研究開発課題 4-1-3 では、量子ビットとして $^{133}\text{Ba}^+$ の適用を目指し、非放射性 Ba イオンによる平面トラップ構築・評価、同位体選択励起用光源、小型トラップパッケージおよび原子源の開発を行った。平面トラップでは RF 特性評価とドライバ開発を実施し、553 nm 励起光源を構築した。さらにパッケージ試作と真空特性評価、陽子照射による ^{133}Ba 化合物生成にも成功し、基盤技術を確立した。研究開発課題 4-2 では、イオントラップ量子コンピュータのクラウド化に向け、 $^{171}\text{Yb}^+$ を量子ビットとする実験系を構築し、イオンローディング、状態検出、マイクロ波ラビ振動および 355 nm ラマン遷移を実現した。さらに Advanced Real-Time Infrastructure for Quantum physics (ARTIQ) および Open Quantum Toolchain for Operators and Users (OQTOPUS) を用いた遠隔制御環境を整備し、単一イオンに対する遠隔量子ゲート操作を実現した。加えて、平面型トラップ電極によるイオン輸送技術を開発し、高速多チャンネルのデジタル-アナログ コンバーター (DAC) や時分割多重化方式を導入するとともに、量子コンピュータ大規模化のスキームである Quantum charge-coupled device (QCCD) に向けた捕獲・冷却技術やジャンクショントラップの開発、イオン振動の可視化を進めた。研究開発課題 5-1 では、イオントラップデバイスのオンチップ化に向け、光入力および制御を担う光学要素技術の開発を行った。 Sr^+ トラップイオンの励起を目的としていることから、405~1092 nm の広帯域に対応した多チャンネル光導波路回路の開発に取り組んだ。併せて、光ファイバーから低損失で導光する光インターコネクトや、回折格子および集積位相変調器による位相・振幅・周波数制御技術を開発し、デバイスへの高効率な光導入および制御技術を確立した。研究開発課題 5-2 では、コンパクトで量産性のあるイオントラップ装置の開発と光導波路を用いた光回路が一体となったイオントラップの開発を行った。まずフリップチップ集積による独自性の高い光導波路一体型イオントラップを考案し、集光グレーティング素子の実証、イオントラップ系の構築等を行った。また、当グループでのチップの設計や光回路配線の設計と九州大学における光回路素子の作製と光回路への配線を組み合わせ、光回路一体型イオントラップの実証に取り組んだ。研究開発課題 6-1 では、イオントラップ量子コンピュータにおけるイオン配列・輸送制御の実現に向け、3 次元微細加工電極による Y 型ジャンクショントラップの設計、数値解析、製造工程および実験基盤の構築を進めた。電場解析により設計の妥当性を確認するとともに、製造工程を分割して連携実施し加工精度と電気特

性を評価した。顕在化した製造課題の整理と改善を行い、併せて 2D トラップによる基礎実験環境の整備を進め、今後の動作実証に向けた技術基盤を確立した。研究開発課題 7-1 では、イオントラップ型量子コンピューティングにおける補助量子ビットとして中性原子を導入するための基盤技術の開発を行なった。開発においては、イオントラップ装置と中性原子トラップ装置の構築に始まり、単一イオンおよび極低温原子を準備することができた。加えて、イオンと原子の量子インターフェース実現に必要な項目に取り組み、単一イオンの単一量子ビットゲート操作の実装と中性原子のリドベルグ状態への励起が達成された。

(3) プロジェクトマネジメントの実施概要

PM 支援チームを中心とした体制のもと、運営会議や課題推進者会議、個別打合せ等を通じて各機関の進捗状況および課題の把握を行い、必要に応じてサイトビジットやヒアリングを実施することで、研究の着実な推進とリスク管理を行った。また、プロジェクト全体の進捗の可視化と統括的な意思決定を支援した。研究開発体制については、研究の進展に応じた柔軟な運営を行い、令和 4 年度には新規課題推進者の追加により体制を強化した。さらに海外研究機関との連携や研究者派遣を通じて国際連携を推進し、研究開発の高度化を図った。知財戦略および技術動向調査を通じて研究成果の位置付けを明確化するとともに、特許出願による成果の権利化を進めた。広報・アウトリーチでは、ウェブサイトによる情報発信やサマースクール、国際シンポジウムを通じて成果の発信と人材育成を実施した。GakuNin RDM 等を活用したデータ管理基盤を整備し、研究データの適切な管理と利活用に向けた取り組みを推進した。

3. 研究開発プロジェクトの顕著な成果

(1) 目標達成に最も寄与する成果

本プロジェクトでは、光接続型誤り耐性量子コンピュータの実現に向けて、イオントラップモジュールの構成に必要な主要要素技術の確立を目標とし、前期 5 年間に於いて個別技術の実証と基盤構築において顕著な成果を挙げた。特に、イオントラップデバイス、量子制御、光インターフェース、ならびにシステム統合基盤に関する成果は、「イオントラップ内での高精度スピン操作、フォノン符号化、光結合の実現、集積化光回路の統合、イオン輸送技術の確立およびクラウド化基盤」の達成に向けて中核的な貢献を果たした。

「微小光共振器一体型線形イオントラップの開発」では、まず微小光共振器と線形イオントラップの統合に関する解析を進め、従来課題であった誘電体の影響や RF ポテンシャルの擾乱を考慮した統合設計指針を確立した[1]。これにより、光共振器を組み込んだ高対称性トラップ構造の実現に向けた理論的基盤を構築した。これを踏まえ、Selective laser etching (SLE) 法による一体成形式イオントラップ作製技術を確立するとともに、CO₂レーザー加工におけるレーザーパラメーターのばらつきに対して堅牢な加工パルスアルゴリズムを開発した[2]。さらに、導電性高反射ミラーを用いた超低損失光共振器を実現するとともに、MEMS 式微小ミラーを用いたスケラブルな光共振器統合デバイスの概念を提案した。これらの成果は、イオンと光を高効率に結合する量子インターフェースの実現に直結するものであり、光接続型量子計算の中核要素であるトラップ間量子接続の基盤技術として重要である。

「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」では、イオントラップデバイスおよび量子操作基盤の高度化に関して、超伝導回路技術を用いた新たなアプローチを実証した。RF 大電流(約 1A)が印加可能な超伝導回路を開発し、これを集積したイオントラップにおいて実際にイオンの捕獲に成功した。さらに、厚膜ニオブを用いた低損失回路

設計および電流集中を抑制した構造により、従来の常伝導方式と比較して約 3 桁低い電力で同等の磁場勾配を生成することを実証した。加えて、フリップチップ構造を導入することで、磁場勾配生成に最適化された幾何構造の実装を可能とした。これらの成果は、マイクロ波制御による高忠実度量子ゲートの実現に向けた基盤技術として極めて重要である[3]。

「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」では、量子制御および誤り耐性に直結する成果として、振動自由度(フォノン)を活用した量子状態制御技術が大きく進展した。熱浴エンジニアリング法によるコヒーレント状態およびスクイズド状態の生成に成功し、多モード振動状態における量子制御の可能性を実験的に示した。また、単一イオンの異なる振動モード間の結合(ビームスプリッター相互作用)を実現するとともに、112 ms に及ぶ長時間の運動コヒーレンスを確認した。これらの成果は、フォノンを用いたボゾニック符号化および誤り耐性量子計算の基盤となるものであり、本プロジェクトの重要目標である高精度量子操作の実現に大きく寄与している。

イオントラップの大規模化を支える基盤技術として、装置開発・供給体制およびシステム統合技術においても重要な進展があった。「高性能イオントラップ作製・評価技術の確立」では、平面型イオントラップおよび関連実装部品について国内企業による製造体制を確立し、複数研究機関への供給を実現したことにより、国内研究コミュニティの形成と技術基盤の整備に大きく貢献した。「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」では、クラウド接続可能なイオントラップ量子コンピュータシステムを構築し、遠隔からの単一量子ビット操作の実行を実証した。また、イオン輸送に関しては、印加電圧設計手法の確立により 10,000 回規模の安定したシャトルングを達成するとともに、配線数増加というスケーラビリティ上の課題に対して、スイッチアレイを用いた時間分割多重化方式による電圧制御手法を開発し、同手法によるイオン捕獲を実証した。これは QCCD アーキテクチャにおける実装制約を大きく緩和する成果であり、大規模化に向けた重要な技術的進展である[4]。

光接続および光インターフェースに関する要素技術についても着実な進展が得られた。「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」では、高精度な光導波路および回折素子を用いて Sr イオントラップ向け多波長光入力モジュールを開発し、オンチップ集積光回路として実装することでイオントラップデバイスの高集積化を実現した。さらに、イオン捕捉素子と光導波路素子のフリップチップ実装により、レーザー光を高精度に集光可能なイオントラップモジュールを開発するとともに、主要励起レーザー($\lambda=1092\text{ nm}$ および 422 nm)のオンチップ光配送を実現させ、トラップイオンへの高効率照射と高精度集光を可能とした。これにより、イオントラップモジュールにおける多波長量子光制御および小型・高密度集積化の基盤技術を確立した[5]。「光導波路回路一体型イオントラップの開発」では、光回路とイオントラップの集積手法を新たに考案し、その実証を進めたことで、トラップ内への効率的かつ安定な光導入に向けた技術的道筋を示した。また、光導波路を用いた位相制御技術として、リング共振器型変調素子の動作原理を実証しており、通信波長帯での成果を基盤としてイオントラップに必要な波長領域への展開可能性を示した。「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」では、単一ストロンチウムイオンのゼーマン状態を用いた単一量子ビットゲート操作の実装と、冷却ストロンチウム原子のリドベルグ状態準備に成功し、将来的なハイブリッド量子接続の可能性を示した。

以上のように、個別要素技術の実証とそれらを支える製造・運用基盤の確立が計画通り進展し、イオントラップモジュール実現に必要な中核技術が出揃いつつある段階に到達した。これらの成果は、単一トラップ内での性能向上にとどまらず、光接続および量子インターフェースを介したモジュール化・ネットワーク化を可能とする点において、スケーラブルな量子計算アーキテクチャの実現に向けた重要な基盤を形成している。

(2) 代表的な論文

[1] How to integrate a miniature optical cavity in a linear ion trap: shielding dielectrics and trap symmetry

Ezra Kassa, Shaobo Gao, Soon Teh, Dyon van Dinter, and Hiroki Takahashi

Physical Review Applied 23, 024038 (2025).

ファイバー光共振器を線形イオントラップに統合するための解析を行った論文。ファイバーを導電性管体に収めることにより、浮遊電荷や誘電体加熱などの悪影響を大幅に低減できる

ことを示した。一方で、導電性筐体の存在による RF ポテンシャルの擾乱は、位相反転した RF 電圧を同時に印加することにより回避可能なことを示した。また、この知見を一般化し、導電性筐体を含む微小共振器の統合においてどのような電極配置、電圧配置が必要となるのかを数学的に明らかにした。微小光共振器と線形イオントラップの統合に関して一般的な指針を与える成果となった。

[2] Profile control of fiber-based micro-mirrors using adaptive laser shooting with in situ imaging
Shaobo Gao, Vishnu Kavungal, Shuma Oya, Daichi Okuno, Ezra Kassa, William J. Hughes, Peter Horak, and Hiroki Takahashi
Optics Express 33 39009 (2025).

ファイバー光共振器を構成する高反射ミラーの作製には、ファイバー端面を CO₂ レーザーで精密加工する過程が含まれる。本論文では、その過程を段階的に分け、端面形状のその場観測とその結果に基づく適応的なパルスシーケンスの自動制御により、ファイバー端面形状を正確に制御できることを示した。

[3] Superconducting surface trap chips for microwave-driven trapped ions
Yuta Tsuchimoto, Ippei Nakamura, Shotaro Shirai and Atsushi Noguchi
EPJ Quantum Technology 11, 56 (2024).

超伝導回路が集積されたイオントラップチップを作製し、評価した。大きな RF 磁場勾配を発生させるため、通常に比べて厚いニオブを用い、さらに電流集中が少ない設計にすることで、1A 程度の超伝導 RF 電流が流れる回路の実現に成功した。また、2枚の微細加工チップを精度よく向かい合わせる技術を開発し、フリップチップ構造を取り入れた。これにより磁場勾配を生成する理想的な幾何構造を持つアンテナを集積することができ、常伝導を用いた従来の方法に比べて、3桁程度少ない電力で同等の磁場勾配を発生させることに成功した。

[4] Trapping an atomic ion using time-division multiplexed digital-to-analog converters
Ryutaro Ohira, Masanari Miyamoto, Shinichi Morisaka, Ippei Nakamura, Atsushi Noguchi, Utako Tanaka, Takefumi Miyoshi
Applied Physics Letters 127, 234001 (2025).

QCCD アーキテクチャによる配線数増加の問題を解決するため、スイッチアレイを用いた時間領域多重による電圧制御方法を開発し、実際に室温環境下で、この制御方法によって発生させた電圧を用いてイオントラップに成功した。

[5] High-speed micro-ring modulator using ferroelectric PLZT for integrated photonics
Yuexin Yin, Shangci Yang, Sahar Alasvand Yazdani, Hiromu Sato, Guo-Wei Lu and Shiyoshi Yokoyama
APL Photonics 10, 126121 (2025).

光入出力制御技術では、光波の位相制御ができる光導波路素子が必要となる。本論文では、波長選択性が高いリング共振器多素子を使って、その動作原理を示す研究を行った。実験は典型的な通信波長帯を用いたが、イオントラップ用の近赤外域でも動作可能である。

(3) 代表的な特許

課題番号 1-1 「微小光共振器一体型線形イオントラップの開発」

課題推進者：高橋優樹(沖縄科学技術大学院大学)

① 名称：反射鏡、光共振器、及び量子デバイス

出願日：2024 年 12 月 12 日

出願番号：特願 2024-218190、(PCT) PCT/JP2025/043498、(台湾) 114148968

② 名称：ION TRAP ARRAY APPARATUS AND ION TRAP ARRAY APPARATUS DRIVING METHOD

出願日：2025 年 5 月 21 日

出願番号：特願 2025-85178、(PCT)PCT/JP2026/18992、(台湾) 115119884

- ③ 名称：量子デバイス及び量子モジュール
出願日：2025 年 7 月 28 日
出願番号：特願 2025-125884

課題番号：2-1「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」
課題推進者：野口篤史(東京大学)

- ① 名称：ヘリカル共振器及びイオントラップシステム
出願日：2025 年 5 月 15 日
出願番号：PCT/JP2025/017644

課題番号：5-2「光導波路回路一体型イオントラップの開発」
課題推進者：長田有登(大阪大学)

- ① 名称：イオントラップ装置およびイオントラップシステム
出願日：2024 年 3 月 25 日
出願番号：特願 2024-048136

- ② 名称：蛍光捕集装置
出願日：2024 年 9 月 30 日
出願番号：特願 2024-171195

4. 研究開発プロジェクトの実施内容および成果

(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

実施内容：

1) SLE による一体成形イオントラップの作製と特性評価

Selective laser etching (SLE)はガラスなどの基材にフェムト秒レーザーパルスを照射、走査し、レーザー照射した部分のエッチング選択性が大きく変化することを利用して、三次元構造を取り出す手法である。本課題では、この手法のイオントラップの応用にいち早く取り組み、三次元線形イオントラップを同手法と金属蒸着を組み合わせることで作製する技術を確認した。特に、電極間の絶縁を保つための適切な溝構造を開発した。また三次元イオントラップの内部構造を X 線 CT で調べる手法を確認した。この方法の特長は、従来必要だった個別電極の組み立てを排し、完全に一体成形されたイオントラップを可能にする点にある。そのようにして作製されたイオントラップにおいてイオンを捕獲、レーザー冷却することに成功した。マイクロ運動補正を行い、直流電圧だけでマイクロ運動を十分補正できることを確認し、イオントラップ設計の適正を確認した。

成果：SLE を用いた一体成形イオントラップの作製手法の確立、および、一体成形イオントラップによるイオンの捕獲と特性評価の成功

2) ファイバー端面の CO₂ レーザー加工におけるその場観測を用いた適応的アルゴリズムの開発

本課題では、線形イオントラップ中にファイバー光共振器を導入することで単一イオンを用いた共振器 QED 系を構築する。ファイバー光共振器を構成するための高反射ミラーは、

ファイバー端面を CO₂ レーザーで精密加工した上で高反射膜を施すことで作製する。我々の用途に適したこのようなファイバー端面ミラーは市販されていないため、自分達で高精度に作製する技術を有することが重要となる。CO₂ レーザーによるファイバー端面加工では、作製される凹面構造の非対称性が問題となる。この非対称性を解消するため、まず多数のパルスファイバー端面の異なる箇所 に一定のパターンで照射する。その上で、端面形状をその場観察することにより、非対称性を補償するように次のパルス列のパラメーターおよび照射位置を決定するアルゴリズムを開発した。これにより、非対称性が極めて少ないファイバー端面加工を信頼性高く作製することが可能となった。この作製方法を用いて実際にファイバー端面ミラーを作製し、共振器を構成し、評価した。共振器フィネスとしては最大で 75,000 を得た。

成果： 信頼性の高いファイバー端面精密加工アルゴリズムの開発

3) 微小光共振器と線形イオントラップの統合システムの構築

1)と2)の結果を受け、一体成形三次元イオントラップとファイバー光共振器が共存する実験系を設計、構築した。まず、イオントラップおよびその周辺の設計を見直し、更新された設計に基づきイオントラップおよび周辺装置(PCB 等)を作製した。具体的には、イオントラップへの電気信号の伝送のためにより信頼性の高いワイヤボンディングを採用した。マイクロ運動補正のための電極を独立して設置できるようにイオントラップの構造を改変した。加えて、イオントラップ自体を 1/2 程度に縮小し、ファイバー共振器を側方から挿入しやすくした。ファイバー共振器については、ファイバーを格納する筐体の設計を見直し、先端部に局所的に電圧を印加できるようにした。これは、浮遊電荷等の影響を相殺するためである。ファイバーを格納した筐体は多軸電動ポジショナーに設置され、光共振器の位置および共振器調整を可能とした。イオンを導入するための原子源としては、従来の電熱線を用いた手法ではなく、レーザーを用いた加熱方法に変更した。これはレーザー加熱の方が、パワー効率が高く結果として発熱を抑えられるためである。また、レーザー加熱する際の試料の格納容器としては、SiC 製のものが容器の劣化がなく適していることが判明した。これらの要素を真空容器内で組み立て、各要素が問題なく動作することを確認、ベーキングにより所望の真空度に到達した。

成果： イオン共振器結合の実証のための微小光共振器と線形イオントラップを統合したシステムの設計と組み立ての完了

4) 導電性低損失高反射ミラーの開発

イオントラップと微小光共振器の統合では、誘電体ミラー上に蓄積する浮遊電荷が問題となる。ミラー自体に導電性を持たせられれば、浮遊電荷の問題は大きく改善するはずである。透明導電性酸化物(TCO)は光学上の透明性と電気伝導を両立しうる物質であるが、たとえ薄膜であっても通常は共振器 QED に使用できるほど超低損失にはならない。我々は、光共振器内の定在波に着目し、定在波のゼロ点付近に透明導電性酸化物薄膜を設置することで、実効的な損失を大幅に低減することを考えた。この着想を特許としてまとめ、

出願した(特願 2024-218190)。実験においては、通常の誘電体多層膜ミラーの最表面に代表的な TCO である酸化インジウムスズ(ITO)の薄膜を形成し、その前後での共振器内損失の変化を測定した。その結果、暫定的な値ではあるが、ITO 膜厚 10nm において 20ppm の超低損失を達成した。

成果：ITO 膜厚を有する高反射率ミラーを用いて超低損失の光共振器を実現

5) MEMS 式光共振器の開発

微細加工により、MEMS 構造の駆動機構を持つミラーを複数一括で作製できるようになる。これにより、微小光共振器をイオントラップモジュール内に複数配置し、光接続の空間多重が可能になると考えられる。この考えを特許としてまとめて出願した(特願 2025-125884)。シリコン基板上に、カンチレバーを作製し、印加電圧 60V 程度で約 500nm 程度の変位を得た。また、同じくシリコン基板上に直径 100nm 程度の微小な凹面構造をエッチングの組み合わせで実現した。これらは今後のデバイス作製上の基礎となる技術である。また、MEMS 式微小共振器列と組み合わせるイオントラップについて設計を検討し、Mainz 大学のグループの助力を得て、試作を行った。その結果、微小共振器と適合するイオントラップを SLE で作製可能なことが分かった。

成果：スケーラブルな MEMS 式微小光共振器列の発案、および、MEMS ミラーのための微細加工技術の確立

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

実施内容：

転写プリント法による半導体ミラーの集積に向けて、半導体ミラーの微細加工による宙吊り構造の作製を行うことを目標として開発を進めた。まず 80nm の GaAs 層と 92nm の AlAs 層を交互に 50 ペア積層した多層膜が波長 1092nm において反射率 99.9999%を達成可能であることを電磁界計算により確かめ、多層膜構造を GaAs 基板上の AlAs の 3 μ m 厚の犠牲層の上に成長した基板を調達した。紫外線リソグラフィー、反応性プラズマエッチングにより半導体多層膜層をパターンニングする。この時点で短冊状となった半導体ミラーをもう一度フォトリソで埋め込み、再度の紫外線リソグラフィーにより短冊部分だけを覆うような保護膜を形成する。次にフッ酸により AlAs 犠牲層を除去することで短冊状の半導体ミラーが宙吊りとなった構造体を作製する。レジストによる埋め込みの歩留まりが悪いものの、実際に作製した宙吊りの半導体ミラーをシリコンゴムで拾い上げ、トラップチップに転写することにも成功した。

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ー、

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 電圧を印加可能にした。これを真空槽に導入し電圧印加のテストを行った。DC 電圧は問題なく個別に印加することができ、かつ RF 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加可能であり、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。

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ミラーが入手できた。これを用いてファイバ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。なお、当該の光共振器の評価にあたっては広帯域に波長掃引可能なチタンサファイアレーザーを利用していたため、測定波長は 1000nm、フィネスは 5000 程度であった。ミラーコーティングの反射率の測定値から換算して算出したフィネスの値が上記の 1092nm におけるフィネスである。

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その次の段階の目標であったが、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遅れが生じた。結果として実験自体の難しさもありイオントラップへの光共振器の組み込みとイオン・光インターフェースの実証については未達である。

成果：半導体ミラーおよびファイバミラーがイオン・光インターフェースに有用な性能をもつことの実証と、GaAs/AlAs 半導体微小ミラーの転写プリントによる集積が困難であることからミラー基板上のイオントラップ電極作成へと方針転換し、その電極チップの動作実証を行った。

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

実施内容:

1) 低振動型クライオシステムの開発

イオントラップにおいてゲート精度を律速するフォノンの異常加熱の問題を解決するため、クライオイオントラップと呼ばれる冷凍機の中でイオントラップをおこなう技術が研究されている。また、本課題の目標である、超伝導回路技術を取り入れたイオントラップを実現するため、極低温でイオントラップをおこなう必要がある。こうした目的のもと、クライオイオントラップを可能にする低振動型のイオントラップ用の冷凍機の開発を行った。イオントラッ

ブは、外部からレーザー冷却や初期化のためのレーザーを照射する必要があり、冷凍機の振動が問題になる。振動対策として、ガスギャップと呼ばれる構造を導入した。さらに超高真空を実現するため、冷凍機チャンバーを超高真空対応にした。開発した冷凍機は、約 5K までの冷却が実現し、また全帯域の雑音の積分値で 100nm 程度にまで振動を抑えることに成功した。これらの性能は超伝導イオントラップを実現するために十分な性能であると言える。

成果：低振動な冷凍機を開発し、その冷凍機内でイオンを捕捉するクライオイオントラップに成功した。

2) 極低温動作可能な低汚染原子源の開発

1) で開発したクライオシステムにおいて、表面型電極を用いたクライオイオントラップを実装した。この実験では、従来型の常伝導電極を用いた2次元の電極構造を採用した。この実験系で、イオンの捕獲には成功した。しかしながら、イオントラップの安定性が非常に低く、同一条件では一週間程度ですぐにイオンが捕獲されなくなってしまった。さらに実験を繰り返すうちに、表面電極の上に次々に微細な粒子が付着する現象が観測され、こうしたイオントラップの不安定性がレーザーアブレーション原子源から発生した余計な荷電粒子によって引き起こされていると考えられた。そこで、レーザーアブレーション原子源に代わって極低温で動作可能でよりクリーンな原子源の開発を着想した。通常の原子源に用いられるオープン加熱は熱負荷の関係で冷凍機内で動作させることが難しい。そこで、低温動作が可能なオープンを開発するため、MEMS 技術で作られた市販のヒーターを利用した。この MEMS ヒーターを使った予備実験では、2K の冷凍機内に配置して動作を確認した。この実験により、MEMS ヒーターにより、冷凍機への熱負荷はほぼなく、約 1000°C まで温度をあげることができることがわかった。一方で、本研究課題で用いる Sr 原子は、単体の金属としては非常に反応性が高く、空気中で 1 秒以内の速度で酸化することがわかっている。酸化ストロンチウムは 1000°C では分解することができないため、そのままでは MEMS ヒーターによるマイクロオープンで安定して Sr 原子を発生することは難しい。そこで、還元剤として金属 Al の粉末を SrCO_3 の粉末に混ぜ、その混合粉をオープンに配置することで、1000°C 以下の温度でおこる SrCO_3 の還元反応を真空中で発生させた。この手法により、その場で金属 Sr を製錬しながら Sr 原子ビームを生成する新しいタイプの原子源を開発することに成功した。

成果：低温環境下で動作するマイクロオープンと、それを使った化学反応に基づく、汚染の少ない Sr 原子源の開発に成功した。

3) 配線の時間領域多重化技術の開発

QCCD における多数電極の配線数増加の問題と、それにともなう冷凍機への熱負荷を軽減するため、配線数を大幅に削減可能な時間領域多重化技術を用いた配線方法の研究を行った。イオントラップの配線の特徴として、配線あたりの信号帯域は高々 100 kHz 程度で十分であり、高速制御が要求されないことが挙げられる。そのため、広帯域な制御信号をスイッチアレイに通すことで時間的に各配線の制御に振り分けることができる。時間領

域多重化と呼ばれるこの技術により、少数の信号・配線によって多数の電極の制御をおこなうことができる。この手法により、多チャンネル電圧生成回路を開発し、実際にイオントラップにつなぐことで、イオンを捕獲し、電圧によってイオンの位置を制御できることを確かめた。この研究は大阪大学と共同で行った。

また、クライオイオントラップに本技術を実装するため、極低温で動作するスイッチアレイの探索をおこない、Texas Instruments 社製の TMUX6208 などのシリーズは 2.5 K でもほとんど室温と同様に動作することが確かめられた。

成果：イオンを制御する電圧の時間領域多重配線の原理実証に成功した。また、低温で問題なく動作するスイッチを見つけ、動作を確認した。

4) フリップチップ技術と超伝導イオントラップ

超伝導回路が集積されたイオントラップ電極の開発を行った。高性能な超伝導回路はシリコン基板上に作製されるが、バンドギャップの小さなシリコンは、大きな電圧の印加によってリーク電流が流れてしまうため、低い電圧でイオンを捕獲可能な電極の設計が必要になる。表面電極型イオントラップでは、イオンの捕獲に比較的大きな電圧が必要になる。そこで、2次元の回路を複層化することで3次元的な電極配置が可能になるフリップチップ実装に着目した。フリップチップ実装によって配置した電極を用いることで、表面電極型に比べて 1/10 程度の電圧でイオンを捕獲することが可能になる。高精度なフリップチップ実装のため、ガラスビーズを用いたアライメントとワイヤーボンディングによる2層配線技術を開発し、フリップチップイオントラップを作製した。

イオントラップ内に RF 電流を流し、それによって発生した磁場勾配をイオンに照射することで、量子ゲートをおこなうことができる。フリップチップ構造では、イオンの両側に対向したアンテナを用いることができるため、より効率的に磁場勾配を発生させることができる。このように開発した超伝導回路が集積されたイオントラップチップの性能を評価するため、超伝導回路に RF 電流を印加し、どの程度の RF 電流が超伝導薄膜内に流せるかを測定した。この実験により、イオンから 80 μ m 程度はなれたアンテナに 1A の超伝導電流を流せることがわかった。対応する磁場勾配は約 100 T/m であり、従来の最も高速な量子ゲートを実現している磁場勾配と同程度の値が実現した。さらに、超伝導 RF 共振器による増幅機構を用いることで、従来の方法に比べて、約 1000 分の 1 の RF 入力強度で大きな磁場勾配が実現していることがわかった。

成果：マイクロ波回路が集積された超伝導電極イオントラップチップの開発に成功した。
そのトラップチップを用いてイオンを捕獲することに成功した。

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

実施内容:

(励起スキームの選定について): 光定在波によりイオン配列に時間依存の力を加えることで、イオン配列の振動モード間に結合を誘起し、ビームスプリッター相互作用を実現することを目指し、光定在波による具体的な励起スキームの候補を選定した。

(非古典的振動状態(振動スクイズド状態等)の準備について): 熱浴エンジニアリング法によってコヒーレント状態を生成する実験に成功した。熱浴エンジニアリングによるスクイズド状態生成実験を行い、スクイ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。

(複数の振動モードの結合について): 紫外連続光源システムを用い、ビームスプリッター相互作用(単一イオンの X, Y モード間結合)を誘起することに成功した。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。

(振動状態コヒーレンスの評価について): 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。

(複数振動モード(ボゾニック符号状態)の量子もつれ操作実現にむけて): 実証実験の具体的な計画を立案した。まず、初期状態として、2 つの振動モードに個数状態 $|2\rangle|2\rangle$ を生成する。これは、ボゾニック符号の一種である二項状態の符号状態とみなせる。次に、2 つの振動モード(単一イオンの動径 x,y 方向)間のビームスプリッター結合を適用する。最後に、2 つの振動モードの状態検出(個数分解検出)を行う。最後の 2 つの振動モードの状態検出(個数分解検出)については、まず 1 モードにおける個数状態の射影測定($n=0-3$)を行う。そして、これに条件づけたもう一つのモードの振動準位占有数同定($n=0-4$; サイドバンドラビ振動観測による)を行う。これにより、 $|n_x\rangle|n_y\rangle$ ($0 \leq n_x, n_y \leq 4$) のほぼ全ての占有数を測定可能であり、したがって 2 モードのフォック状態の同時占有確率を同定できると考えられる。また、以上の方針に基づき、1 モードにおける個数状態の射影測定($n=0-3$)にむけた実験を行った。

成果: 熱浴エンジニアリング法によってコヒーレント状態を生成する実験に成功した。熱浴エンジニアリングによるスクイズド状態生成実験を行い、スクイ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。紫外連続光源システムを用い、ビームスプリッター相互作用(単一イオンの X, Y モード間結合)を誘起することに成功した。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。

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

実施内容：

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に組込むイオントラップモジュールを製作するためのイオントラップ作製技術とイオンを用いたイオントラップ評価技術の研究開発を実施した。前者では多機能埋め込みに有利な平面型イオントラップ(1-A)、ミラーなどの誘電体による電場外乱などにロバストな束縛力に優れた立体型イオントラップ(1-B)、光とイオンを接続するための光インターフェース(1-C)の研究開発を行い、後者ではイオン撮像による評価技術(2-A)および、狭線幅遷移分光による評価技術(2-B)を実施した。

(1-A)平面型イオントラップの研究開発

チーム内でビア付き平面型イオントラップ等の試作を行い、チーム外に供給した。また、国内企業に製作を依頼できる体制を構築して製作を実施し、チーム外に供給を実施した。

成果： 東大チームにビア付き平面型イオントラップを供給した。国内企業で平面型イオントラップ、LGA(Land Grid Array)、真空対応ソケットを製造し、阪大チーム、東大チーム、QST チームに供給を実施した。国内企業により排熱に優れた窒化アルミ(AIN)基板で、メッキ無しで 6um 厚電極の平面型イオントラップが製造できる状況となっている。

(1-B)立体型イオントラップの研究開発

レーザー加工によりスリットを作成し、電極を形成した AIN 基板を組み合わせる立体型イオントラップを製作する技術の研究開発を実施した。アSEMBルするボード上にフィルタを形成するチップの実装方法や配線方法も含めた研究開発を実施した。

成果： 京大チームに試作版、最終版の立体トラップを供給するとともに、OIST チームにチップ実装技術を提供した。

(1-C)光インターフェースの研究開発

選択的レーザーエッチングによりガラス基板および感光性硝材基板についてトラップやミラーアレイの形状を模した構造を製作するための試作を行い、レーザー照射パラメーター等の最適化作業を実施した。

成果： ガラス基板のみならず感光性硝材基板でもミラー様の構造を作製できる可能性と、残留粒子の発生などの問題点が明らかとなった。また、ガラス基板にこの技術を提供してガラストラップを作製して東大チームに提供した。

(2-A)イオン撮像によるトラップ評価技術

イオントラップ実験で最も基本的なイオンの撮像から温度、マイクロ運動、内部量子状態などを高速に評価するための光学システム、微弱光カメラ制御技術の研究開発を実施した。

成果：市販単レンズを組み合わせて高 NA 光学システムを設計する方法を見出し、阪大チーム、東大チームに技術提供した。低雑音 CMOS カメラと従来のイメージインテンシファイアーベースの撮像系と比較実験を行い前者が優れていることを明らかにした。

(2-B)狭線幅遷移分光による評価技術

特にカルシウムイオン(Ca^+)を用いたトラップの評価で、電気四重極子遷移($^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ および $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{3/2}$)の分光法による評価法とそのための計測装置に関する研究開発を実施した。

成果：市販の半導体レーザーが入手しにくい波長帯(730nm)近辺でコヒーレント光源を実装する手法を実証した。また、電気四重極子遷移を含む二光子遷移を用いることで紫外域のレーザーなしでレーザー冷却、量子状態計測ができることを実証した。紫外域レーザーを除くことでイオントラップと光集積回路の共集積の可能性を示すことができた。

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

実施内容：

1) $^{171}\text{Yb}^+$ 冷却・操作技術の向上の実施

本研究課題をとおして、 Yb^+ を光領域でラム・ディッケ領域に閉じ込める技術が、大前提として必要である。本研究課題開始以前に、従来型 3 次元 RF トラップに単一 $^{174}\text{Yb}^+$ を閉じ込め、 $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 時計遷移を用いて、ラム・ディッケ領域閉じ込めを確認していた。しかし、その再現が難しいことも明らかになっていた。本研究の中で、冷却レーザー光のパワーを強く飽和しないように下げることなどが有効であることがわかり、ラム・ディッケ領域閉じ込め

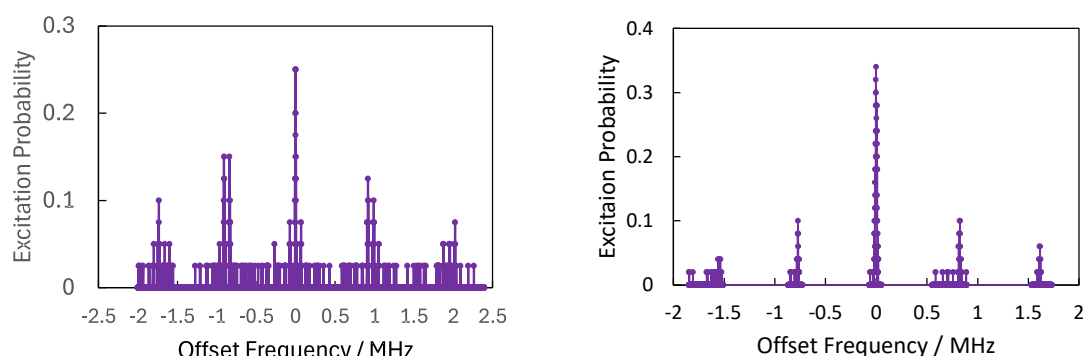


図 1 単一 $^{174}\text{Yb}^+$ $^2\text{S}_{1/2}-^2\text{D}_{5/2}$ 時計遷移スペクトル。

左：1 台目、右：2 台目。

ぎりぎりまでであれば、再現性よく冷却できるようになった。2 台目の従来型 3 次元 RF トラップでも同等のスペクトルを再現性よく検出でき、ラム・ディッケ領域閉じ込めまでの冷却方

法はほぼ確立できたと考える。

量子計算で用いる $^{171}\text{Yb}^+$ に関しては、我々は本研究開発以前には 2 次元の冷却技術しか導入していなかった。そこで、 $^{174}\text{Yb}^+$ で確立した 3 次元冷却技術を $^{171}\text{Yb}^+$ に導入した。到達温度は $^2\text{S}_{1/2}(\text{F}=0) - ^2\text{D}_{3/2}(\text{F}=2)$ 時計遷移の単一イオン分光でスペクトルを観測しおこなった。 $^{171}\text{Yb}^+$ には超微細構造があるため、レーザー冷却と分光に際して偶数同位体にはない条件があり、一つひとつ確認して進めた。バイアス磁場によって最適な冷却レーザーパワーが変わることなど、新しい知見も得られた。最終的に、ゼーマン分離が大きい $\Delta m_F = \pm 2$ 成分 2 つのみを検出するように磁場と偏光を設定し観測した時計遷移スペクトルから、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が分かった。さらに、磁場変動に鈍感で長いコヒーレンス時間をもつ、 $m_F=0$ 間成分の検出に成功した。

成果：単一 Yb^+ の光領域の波長に対するラム・ディッケ領域閉じ込めを達成し、そのための冷却方法を確立した。量子計算に使われる $^{171}\text{Yb}^+$ の時計遷移の単一イオン分光法を確立した。

2) NICT 立体型イオントラップの評価の実施

NICT の早坂博士と議論を重ね、汎用型立体型トラップの設計を確定させた。トラップに関しては、立体構造を球状の絶縁体で支えること、可能な限りはんだ付けを避ける給電方法とすることとした。完成したトラップを図 2 に示す。真空槽は、蛍光を検出するための出窓を有する構造とし、試作まで完了した。

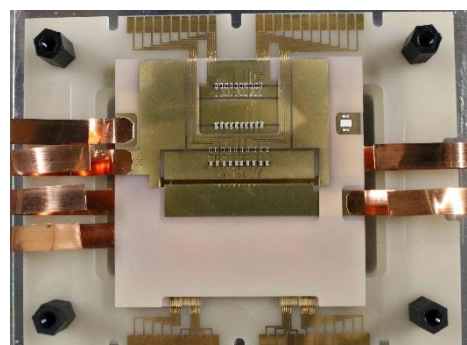


図 2 NICT で作成された立体型イオントラップ。

成果：汎用型立体型トラップを設計し試作した。

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

実施内容：

1) 平面トラップシステムの構築・評価

$^{138}\text{Ba}^+$ (核スピン $I=0$) および $^{137}\text{Ba}^+$ ($I=3/2$) に対する平面トラップシステムを構築し、その特性を評価した。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光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。平面トラップを超高真空容器にインストールし、電圧が適切に印可できることを確認するとともに、RF 応答特性は構築した回路モデルにより評価・予測できることが分かった。また、イオンをトラップするための高電圧 RF ドライバとして、通常入手可能なインダクタやキャパシタを用いて容易に製作・使用できるドライバの開発を進め、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(論文執筆中)。

成果：バリウム用の平面イオントラップシステムおよび同位体選択的励起のためのレーザー光源を開発・構築し、RF 特性の評価やトラップへのイオンローディングに向けた Ba 原子の生成や誘起蛍光の観測を達成した。

2) トラップモジュール用フラットパッケージの開発

NICT、大阪大学、小型真空パッケージ製作の実績を有する企業と連携して、小型イオントラップモジュールの真空パッケージを設計し試作品の作製を行った。平面トラップおよび真空内基板をリッド内に封止する設計とした。リッド内面は NEG コーティングとし、原子源以外は実際に使用する状況に近い(ワイヤーボンディング、光学ウインドウ等)。初期排気およびベーキング後に長時間ビルドアップ法(>10日)で真空を評価し、パッケージの NEG 排気速度が全ガス放出率を上回っていることを確認した。さらに、初期排気時間を長く確保した条件で再評価したところ、到達圧が低下する傾向を確認した。一方で、短時間での超高真空への到達には、パッケージ下部のコンダクタンスの強化が必要であることが判明した。また、RF 応答特性を S パラメーターにより評価した。

成果：小型イオントラップパッケージのプロトタイプを開発し、RF 応答特性を評価するとともに、真空排気挙動を検証し、短時間での超高真空到達に向けたコンダクタンス強化の必要性を特定した。

3) 核スピン $I = 1/2$ を持つ Ba 同位体原子源の開発

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。これまでの米国等の先行研究によると、通常入手できる塩化物 $^{133}\text{BaCl}_2$ 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。そこで、QST サイクロトロン加速器を利用して Ba または Cs の炭酸化合物等に陽子ビームを照射し、核反応に基づいた、新しい化学形で取り扱いの容易な ^{133}Ba 化合物の直接生成に成功した(論文執筆中)。

成果：核反応を用いた RI 製造技術により、標的材料や照射条件を最適化することで十分な濃度の ^{133}Ba を含む実用的な ^{133}Ba 原子源が自作できる見込みを得た。

課題推進者：百合庸介(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

実施内容:

1) イオントラップ量子コンピュータクラウド化のための研究基盤となるイオントラップ実験系の仕様について、量子ビットとして用いるイオン種および遷移を選定し、そのイオン種に対する光イオン化スキーム・冷却スキーム・量子ビット励起スキーム等を検討・決定した。各スキームに必要なレーザーに対する要件を明らかにし、本研究に必要な実験系の整

備を行った。イオン冷却実験に必要な物品の調達を行い、イオントラップサポートおよび原子オープン等の設計を行ったうえで、真空チェンバーの組み立て等を進めた。冷却レーザーの光コム・波長系による周波数安定化を行うとともに、パルス生成系のハードウェア・ソフトウェア開発を行なった。

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。

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。

ARTIQ 等に基づく実験系の制御システム構築に取り組み、全ての実験機器を遠隔制御できるシステムを完成させた。

上記の技術をベースとして、クラウド接続可能なイオントラップ量子コンピュータの実証を行った。具体的には、 $^{171}\text{Yb}^+$ を 1 個用い、マイクロ波照射による 1 量子ビットゲートを遠隔から行うことに成功した。クラウド接続用のソフトウェア群として、大阪大学 QIQB などにより開発された Open Quantum Toolchain for Operators and Users (OQTOPUS)を用いた。このクラウド実行環境では、イオンがいるかどうかをモニターし、いなくなれば新しくイオンをロードするようなシステムを常に動作させた。OQTOPUS を通じて新たなジョブが入って来たときに、イオンが存在すれば与えられたジョブを実行し、いない場合はエラーを返す。このシステムを使って $\pi/2$ ゲートの測定を行った。1000 回の測定のもと、状態 $|0\rangle$ の確率として 0.567 が得られた。状態 $|0\rangle$ が $|1\rangle$ より多く得られたことについては、主に光子収率が十分高くないことに由来する測定エラーが原因だと考えている。

成果: クラウド接続可能なイオントラップシステムを開発し、クラウドからの単一量子ビット演算実行を実証した。

2) イオン輸送実験の実施

複数の捕獲領域をもつ平面型イオントラップを用いてイオン輸送実験を行った。まずイオン輸送のために電極に印加する制御電圧を導出し、輸送実験を行った。印加電圧制御用に高出力・多チャンネル・高速なデジタルアナログコンバーター (DAC) をキエール株式会社、株式会社イーツリーズ・ジャパンと共に開発した。

成果: 単一カルシウムイオンの往復 10,000 回の輸送に成功した。開発した高出力 DAC による永年周波数の向上を実験的に確認しその有用性を示した。

3) ジャンクション構造を持つトラップ電極開発の実施

X 型のジャンクション構造を持つ平面型イオントラップを設計・実装し輸送実験を行った。

電極形状は、ジャンクション部でのイオンの捕獲位置の変化、ポテンシャルの変化ができるだけ小さくなるように最適化した。またイオン輸送に用いる34個の電極の電圧制御システムを構築した。

成果：イオンの捕獲と直線領域での輸送を確認した。

4) 時分割多重化方法の実証実験の実施

QCCD では多数の領域間でのイオン輸送が必須であり、膨大な数の電極に印加する電圧制御と真空装置内への配線をどうするかが課題である。そこで電極の数だけ DAC 出力を用意して接続するのではなく、1つの DAC 出力電圧を複数の電極に時間的に分配し、一定時間電圧値を保持する「時分割多重化方式」によって DAC のチャンネル数と配線数を軽減する。キューエル株式会社、東京大学との共同研究によりこの方式の実証実験を実施した。

成果：時分割多重化方式でイオン捕獲と輸送が可能なことを世界で初めて実験で示した。

5) 多数個 2 次元配列イオンのイオン運動制御の実施

多数個 2 次元配列イオンでは多数の振動モードをドップラー冷却限界以下に冷却する手法として、電気四重極遷移を用いたブロードバンドな冷却に取り組み、そのための光源開発を行った。また 2 次元配列のイオン間の相互作用を観測することを目指し、イオンの微小振動の時間分解イメージングによる可視化を行った。

成果：多数個イオンの振動モード観測のための時間分解イメージングの系を構築し、重心モード、ストレッチモードについて、位相情報を含む観測に成功した。

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

実施内容:

1) 多チャンネル光導波路のオンチップ集積化

可視から近赤外域の波長範囲において高い透明性と屈折率を有するシリコン窒化膜(SiON)を用いて、光集積導波路回路を作製した。この光導波路回路は、大阪大学で進められている Sr イオントラップデバイス内の電気・光学系モジュールへの組み込みを目指し、モジュール内の光入力設計に基づいて開発を進めた。Sr イオンを用いた量子コンピューティングにおいては、6 つの遷移エネルギーに対応するレーザー光が必要となるが、その中で主な準安定遷移は $[5p^2P_{1/2} \rightarrow 4d^2D_{3/2}]$ および $[5s^2S_{1/2} \rightarrow 5p^2P_{1/2}]$ であり、それぞれ

波長 1092 nm および 422 nm に対応する。これらは、最終的に導入する全励起波長のうち近赤外側および紫外側の両端にあたる。本研究では、この 2 波長に焦点を当て、対応する光照射素子の作製を行った。光出射部では、トラップイオン直下に各レーザー波長に対応した回折素子を配置する。レーザー光は規定された角度で放射され、かつ一点に集光する必要がある。このような高精度光学素子を実現するため、回折素子の構造は光伝搬シミュレーションに基づいて設計し、電子線リソグラフィ法によって作製した。作製した回折素子からの光取出し効率はデバイス性能の重要な因子であり、設計および作製の両面から最適化を行った結果、波長 422 nm で 5.9%、波長 1092 nm で 13.2%という、当初計画通りの光取出し効率を得た。これら 2 波長の光入力素子は、Sr イオン励起に必要な主要波長であり、他の励起波長群の短波長側と長波長側を代表する。したがって、この 2 波長に対応する光照射部の作製により、同様の方法でその間の波長域もカバーできる光源入力が可能となると考えられる。さらに、イオントラップ内に組み込む光モジュールでは、複数のレーザー光をトラップイオンに集光する必要がある。回折素子からの光出射角は、その設計により決定される。イオントラップモジュールでは、入射角度が 45° に規定され、集光点は基板表面から $200\ \mu\text{m}$ の高さに位置する。光回折格子の設計では、出射角度に加えてビームの集光性能も考慮し、回折格子を扇形に設計・調整することでレーザー光が一点に集光するように改良を加えた。評価実験では、各波長の 3 次元イメージングを行い、レーザー光の出射軌跡を解析した結果、設計通り、基板表面から $200\ \mu\text{m}$ の高さ地点で 2 つの光源が結合する集光点を確認した。

最終的に、作製した光導波路回路素子は、別途開発したフリップチップ方式により電気系モジュールと積層され、イオントラップデバイスを完成させた。

成果：光導波路回路を用いた Sr イオントラップ向け光入力モジュールを開発し、フリップチップ実装素子を完成した。

2) イオントラップデバイスの光入力制御技術

光導波路回路のアクティブ・コントローラ部として、強誘電体結晶導波路(ニオブ酸リチウム)を用いて検討を進め、位相変調利得 $19\ \text{V}\cdot\text{mm}$ および周波数応答性 40 GHz を確認した。変調利得は強誘電体結晶の電気光学係数に依存するが、得られた結果から、光導波路回路内に集積可能な位相シフタには 10 mm 以上の長さが必要であることが分かった。しかしこれは、可視波長域での光伝搬損失の増大や、RF 信号に対する速度整合性の低下といった課題を生じる可能性がある。このように、小フットプリントが求められる光集積デバイスにおける課題を解決するため、本研究では、格段に高い電気光学係数を有する金属複酸化物(ランタンジルコン酸鉛:PLZT)の強誘電体光導波路を用いた回路の開発を行った。その結果、従来のニオブ酸リチウムの 2 倍以上の変調利得を持つ位相シフタの開発に成功した。得られた位相変調利得は $7.0\ \text{V}\cdot\text{mm}$ であり、長さ 2.5 mm の位相制御用導波路回路の作製に至った。作製した光導波路は近赤外波長域で高い光透過性を示し、波長 800 nm において位相変調が可能であることを確認した。一方で、波長 450 nm 以下では顕著な吸収損失が観測され、この損失は強誘電体材料のバンドギャップ(波長換算で約 400 nm)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、光導波路回路にお

いて光波制御機能を実装するものであり、光挿入損失と変調効率のトレードオフを考慮しながら、可能な限り短い位相シフタの作製を検討した。最終的には、最小で長さ 20 μm という超小型位相シフタにおいても、外部 RF 信号による振幅強度変調が得られることを実証した。

このようなアクティブな光導波路回路は、イオントラップデバイスに入力するレーザー光の位相や周波数を高精度に制御するためのキーコンポーネントである。従来はデスクトップ装置で空間的に制御されていた光入力を、オンチップで実現可能とする点において、本課題において完成した小型・高変調利得・高 RF 応答性を備えた集積型位相シフタは、光入力制御技術として有望である。

成果：光波制御用の集積位相シフタを用いて、イオントラップ向けオンチップ光入力制御素子を開発した。

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

実施内容：

近年、量子コンピュータは従来計算機では困難な問題を高速に解く次世代情報処理技術として世界的に研究開発が進められている。特にトラップドイオン方式は、長いコヒーレンス時間、高精度な量子ゲート操作、高忠実度な量子状態読み出しが可能であることから、有力な量子計算プラットフォームの一つとして注目されている。一方で、実用的な量子コンピュータを実現するためには、多数のイオン量子ビットを高密度に集積し、安定かつ再現性良く制御可能な装置技術が必要となる。しかし従来のトラップドイオン実験系では、多数のレーザー光学系や原子源、真空機器などが大型自由空間光学系に依存しており、装置の大規模化・複雑化が課題となっていた。このため、量子コンピュータの大規模化・量産化に向けては、光学系を含めたイオントラップシステム全体の小型化・集積化が不可欠である。

本研究課題では、このような背景のもと、量子コンピュータ向けのコンパクトかつ量産性の高いイオントラップ装置の実現を目的として、光導波路を集積した光回路一体型イオントラップの研究開発を行った。特に、量子ビット制御に必要な複数波長レーザーをチップ上で扱うための集積フォトリソ技術と、表面電極型イオントラップ技術を融合することで、将来的な大規模量子プロセッサに適した新しいアーキテクチャの構築を目指した。

研究期間中には、まず光導波路基板とイオントラップ電極基板を個別に作製し、それらを高精度に接合するフリップチップ実装方式を採用した独自構造を考案した。本方式では、電極設計と光回路設計を独立して最適化できるため、高度な電場設計と複雑な光配線を両立できる特徴を有している。また、量子状態操作に必要なレーザー光をイオン位置へ効率的に照射するため、導波路終端に形成する集光グレーティング素子の設計・試作・評価を実施した。その結果、導波路から出射された光をイオントラップ中心へ集光可能であることを確認し、チップ内光学系による量子ビット制御実現に向けた基盤技術を確立した。

さらに、当研究グループにおいてイオントラップチップや導波路配線構造の設計を行い、

九州大学におけるシリコンフォトニクス・光導波路作製技術と連携することで、実際の光回路一体型イオントラップデバイスの試作・実証を進めた。このなかで、複数波長のレーザー光を単一チップ上で取り扱うための多波長集積フォトニック構造の検討を行い、将来的な量子コンピュータ向け大規模光配線技術への応用可能性を示した。これらの成果は、“Integrated Multi-Wavelength Photonic Architectures for Future Scalable Trapped Ion Quantum Devices” arXiv:2505.07445.と題した論文としてまとめられ、イオントラップ量子コンピュータ向け集積フォトニクス技術として発表した。

また、量子コンピュータの小型化・高安定化には、イオン生成に必要な原子源技術も重要である。本研究では周辺技術として、パルスレーザーアブレーション(PLA)を用いた小型原子源および単一イオンローディング技術の研究開発も進めた。従来広く用いられている熱オープン型原子源では、常時原子を放出するため、イオントラップ電極への汚染や真空環境悪化が問題となっていた。これに対し、PLA 法では必要なタイミングのみレーザー照射によって原子を生成できるため、不要な原子供給を抑制しつつ低消費電力化を実現できる。本研究では、表面電極型イオントラップへの単一ストロンチウムイオンの決定論的ローディングを実証し、量子ビット初期化技術として有効であることを示した。

さらに、レーザー導入に光ファイバーを用いた小型 PLA 原子源も開発した。外部レーザーを光ファイバーで真空槽内部へ導入することで、従来必要であった複雑な自由空間光学系を簡素化し、高い配置自由度と小型化を実現した。この技術により、将来的な可搬型量子デバイスや集積型量子コンピュータへの応用可能性を示した。

これらの研究成果は、論文発表に加えて、「イオントラップ装置およびイオントラップシステム」(特願 2024-048136)、「蛍光捕集装置」(特願 2024-171195)として特許出願を行い、知的財産化も進めた。本研究を通じて、量子コンピュータの実用化に向けた光集積型イオントラップ技術、小型原子源技術、および多波長フォトニック集積技術に関する重要な基盤を構築し、将来的な大規模トラップドイオン量子プロセッサ実現に向けた有望な技術的方向性を示した。実際の光導波路一体型イオントラップの実証は未達となったが、実現のための重要な基盤技術の開発を行った。

成果：光導波路回路集積イオントラップの実装手法の提案と開発、その周辺技術としての高安定な原子源の小型化、集積光回路化のスケラビリティに関する知見を得た。

課題推進者:長田有登(大阪大学)

(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:ジャンクシヨントラップを用いた捕獲イオンの配列技術

実施内容:

1) 3D ジャンクシヨントラップの設計および数値解析

本課題では、捕獲イオンの配列および輸送を実現するため、3D 微細加工電極を用いた Y 型ジャンクシヨントラップの設計を進めた。ジャンクシヨントラップは、複数のイオン列を結

合し、任意のイオン配列や輸送を実現するための重要な要素技術であり、将来のイオントラップ量子コンピュータの多重化および光接続に不可欠である。

設計した 3D-Y 型ジャンクション電極について、電場解析およびイオン輸送シミュレーションを実施した。特に、実際の加工工程で生じるスリット幅のばらつき、レーザー加工に伴うテーパ角、Au 電解メッキ後の表面粗さなどを反映した電極モデルを作成し、理想電極との比較を行った。その結果、加工特性を反映した電極においてもイオン捕獲が維持され、輸送中の運動エネルギー増加はトラップポテンシャル深さに対して十分小さいことが示された。これにより、実加工誤差を含めても 3D ジャンクション電極によるイオン輸送が成立しうることを確認した。

成果：加工誤差を反映した 3D-Y 型ジャンクション電極モデルでも、イオン捕獲が維持され、輸送中のエネルギー増加が十分小さいことを確認した。

2) 3D 微細加工電極の製造工程構築

3D ジャンクション型微細加工電極の製作においては、当初、単一の企業による一貫製作を想定していた。しかし、電極形状の複雑さ、微細加工精度、金属膜形成、絶縁処理、組立て精度などの要求が高く、全工程を一括して担える企業を確保することは困難であった。そこで、製造プロセスを 6 つの工程に分割し、各工程を担当可能な企業および共同研究機関に委託する方針へ転換した。

具体的には、高純度アルミナ基板の調達、ピコ秒レーザーを用いたアルミナ基板貫通加工、電子ビーム蒸着による Ti/Au 成膜、ピコ秒レーザーによるパターニング、Au 電解メッキ、電極組立ての工程を設定した。令和 6 年度までに、これら 6 工程のうち 5 工程を完了し、最終的な電極組立て工程については共同研究機関との連携により進めた。

各工程では、加工精度および電極特性の評価を行った。レーザー加工工程では、スリット幅および出口径を評価し、加工誤差が 5%以下に収まる高精度な微細加工が可能であることを確認した。また、Ti/Au 成膜および Au 電解メッキ後の表面状態を評価し、電極として必要な導電性および膜厚形成に関する知見を得た。これらの成果により、3D ジャンクション型微細加工電極の実製作に必要な工程条件と評価項目が明確化された。

成果：3D 微細加工電極の製造工程を 6 工程に分割して具体化し、レーザー加工、成膜、メッキ等の主要工程の加工精度と電極特性を評価した。

3) 電極端部処理、電氣的独立性、およびアライメント評価

製造工程の進展に伴い、薄膜形成、金属パターニング、およびエッジ切削工程に起因する短絡・断線が確認された。特に、電極端部では絶縁不良が生じやすく、これが製造歩留まりを低下させる主要因であることが明らかとなった。これらの欠陥は、後続の組立てや接続工程に進んだ後では修復が困難であるため、端部処理およびパターニング工程の改善が重要であることが示された。

この課題に対し、再切削を行わず、レーザーアブレーションにより短絡部のみを局所的に除去する手法を検討した。その結果、1 電極を除き、ほぼ全電極で良好な絶縁性および電

氣的獨立性が回復した。これは、短絡の主要因が電極設計そのものではなく、主にエッジ切削および端部加工に起因するものであることを示す結果であり、今後の製造フロー改善に向けた重要な知見となった。

また、ガラスビーズを用いた電極アライメントを実施し、所定の精度で 3D 電極配置が可能であることを確認した。試験用チップに加え、実使用チップを用いた位置合わせも成立し、3D ジャンクショントラップの基本構造およびアライメントコンセプトの妥当性が示された。

成果：電極端部の短絡・断線要因を明確化し、レーザーアブレーションによる局所修復により、ほぼ全電極で絶縁性と電氣的獨立性を回復した。

4) 接続工程における課題抽出

3D ジャンクショントラップの組立てにおいては、上部チップの電氣的接続方法が大きな課題となった。当初は上部チップに対してワイヤーボンディングを用いる予定であったが、チップ端部における絶縁不良の影響を避けるため、スペーサ基板を介してトラップ側背面と PCB 基板を直接接続する構成へ変更した。この接続には、表面実装型デバイスに対応するため ACF ボンディングを適用した。しかし、ACF ボンディング時に加わる圧力により、アライメントに用いたガラスビーズ近傍に応力集中が生じ、複数のチップにクラックが発生した。また、X 線検査の結果、上部チップのトラップ側とスペーサ基板との間で電氣的導通が失われていることが確認された。100 μm 厚アルミナ基板は極めて脆弱であり、プローブ接触、テープ除去、顕微鏡下での操作などの軽微な力でも破損しうることが確認された。

これに対し、上部チップ端部をレーザーにより薄化し、銀ペーストを用いて上部チップとスペーサ基板間の導通回復を試みた。今後は、この修復によりトラップ側とスペーサ基板間の電氣的接続が確実に回復しているかを評価するため、信頼性の高い導通確認手法を確立する必要がある。これらの検討により、製造歩留まりの主なボトルネックは設計概念そのものではなく、ボンディング工程、ハンドリング条件、および接続評価方法にあることが明確になった。

成果：ACF ボンディング時のクラック発生と導通不良を確認し、今後の再製作に向けて低応力接続方式および信頼性の高い導通確認手法の必要性を明確化した。

5) 2D イオントラップによる実験基盤整備

3D ジャンクショントラップの製造・組立てと並行して、2D 表面型イオントラップを用いた基礎実験環境の構築を進めた。当初予定していた微細電極試作品の供与が遅れたため、共同研究機関から供与を受けた D-sub ソケット型チャンバーおよび平面型イオントラップを用いて、イオン観測実験およびトラップ駆動系の検討を行った。

2D イオントラップでは、表面トラップの構築を進め、Ca 原子ビームの蛍光観測に成功した。また、RF/DC 電源系の立ち上げを行い、RF および DC 電圧を電極に印加できることを確認した。これにより、イオン源、光学系、および基本的な電源供給系が動作することを確認した。

一方で、DC 電極への RF 混入が 200-400 mVp-p 程度観測され、安定なイオン捕獲に

向けて 100 mV 未満への低減が望ましいことが示された。この問題に対して、 π 型ローパスフィルタの設計・評価を行うとともに、D-sub コネクタ内で RF 線と DC 線が近接していることに起因する電磁誘導の可能性を検討した。その結果、RF 電極を D-sub コネクタ系統から切り離し、RF 専用入力ラインを導入することが根本的な対策となりうることが示された。これらの検討により、3D ジャンクショントラップの動作実証に先立ち、トラップ駆動環境において RF/DC 配線分離、低ノイズ化、および低汚染リスクの配線構成を確立する必要があることが明確になった。

成果：2D イオントラップ実験系を構築し、Ca 原子ビーム蛍光観測と RF/DC 電源系の立ち上げを行い、RF 混入低減に向けた配線分離の課題を整理した。

課題推進者：長谷川秀一（東京大学）

（7）研究開発項目5: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

実施内容：

1) 「イオントラップおよび冷却原子トラップ装置の開発」の実施

イオンと中性原子間のインターフェース実装に向けて、イオントラップおよび原子トラップ装置の開発に取り組んだ。イオントラップ装置については、単一イオンを強く閉じ込めるためのトラップ設計を行い、それに基づいて線型イオントラップ装置を実装した。続いて、製作されたイオントラップ装置を超高真空装置内に配置し、トラップに必要な RF 電場や静電場を印加するためのセットアップも行なった。同時にレーザー冷却のためのレーザー光源やその周波数制御のためのシステムを整備し、最終的に単一のストロンチウムイオンをトラップすることに成功した。冷却パラメータの最適化によりドップラー限界温度 (500 マイクロケルビン) までのイオン冷却も確認できた。

中性原子のトラップに関しては、まず真空装置の構築から取り組み、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、排気ポンプ用チャンバーの開発を行なった。さらに冷却、トラッピングに必要なレーザー光源および磁場コイルなどもセットアップし、磁気光学トラップ中に十分な原子数のストロンチウム原子をロードすることができた。続いて、より低温領域へと原子を準備するために狭線幅レーザー冷却も行い、数マイクロケルビンへの冷却も確認された。さらに、原子を光双極子トラップへとロードすることも確認され、操作性の高いトラップシステムを構築することに成功した。

成果：単一イオンの捕獲と中性原子の光双極子トラップの実装

2) 「単一イオン量子ビットゲート実装と中性原子のリドベルグ励起」

上記項目により準備されたイオンと原子のトラップ装置を用いて、イオン・原子インターフェースに向け、イオンと原子の量子状態操作技術の開発を行なった。具体的には、イオン

トラップについては、単一ストロンチウムイオンのゼーマン状態間を量子ビットとして利用することで単一量子ビットゲート操作が実装できた。量子ビットの駆動には RF 磁場を用い、最大で 100 回転程度量子ビットの回転操作が可能であることが確認された。なお、量子ビットの状態読み出しには四重極子遷移を用いた。

続いて、中性原子のリドベルグ状態への励起実験に取り組んだ。リドベルグ状態準備においては、基底状態ストロンチウム原子をレーザー光を用いた二光子遷移により励起した。それにより、広い範囲(主量子数 30-100)において nS および nD 系列のリドベルグ状態への準備が可能であることが確認された。今後はこれらの技術を統合することで、イオンと原子のブロッケード効果の検証が期待される。

成果: 単一イオン量子ビットゲート実装と中性原子のリドベルグ励起

課題推進者: 土師慎祐(大阪大学)

5. 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

- 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

これらの体制のもと、以下の方法により研究開発の進捗状況の把握を実施した。

- ・ 運営会議および課題推進者会議(研究参加者を含めた内部会議)を開催し、各機関からの進捗報告、課題共有および対応方針の確認を実施
- ・ 必要に応じて個別打合せやヒアリングを行い、進捗の遅延やリスク要因の早期把握に努めた
- ・ 研究開発機関に対するサイトビジットを通じて、研究実施状況の現地確認および課題抽出を実施
- ・ 成果報告書および内部進捗資料の取りまとめを通じて、全体進捗の可視化と PM による統括的な評価・判断を支援

研究開発プロジェクトの展開

研究開発体制については、当初の研究計画に基づき各機関が研究を推進する一方で、運営会議や課題推進者会議、個別打合せ等を通じて進捗状況や課題の共有を行い、機関間の連携を強化した。令和 4 年度にはプロジェクトの更なる発展を目的として新規課題推進者を 6 名追加し、研究体制の拡充を図った。これにより、研究分野の広がりや専門性の強化を実現するとともに、複数機関間での相互補完的な研究推進を可能とした。研究開発の進展に応じた柔軟な運営にも注力しており、内部会議や個別調整を通じた進捗把握により、研究課題ごとの状況に応じた計画の見直しや方針転換を適宜実施できる体制を維持している。これにより、研究の遅延リスクへの対応や重点分野へのリソース配分の最適化を可能としている。

国際連携については、世界的に先進的な研究グループとの連携を段階的に推進してきた。Mainz 大学 (Schmidt-Kaler グループ) との間では NDA を締結し、技術交流を実施したほか、Oxford 大学 (Lucas グループ) への研究者派遣(令和 5 年 7 月～令和 6 年 3 月)や、OIST からの学生派遣(令和 6 年度)を通じて、量子ビット制御やレーザー操作技術等の先端技術の習得を行った。これらの取り組みにより、国外の知見を取り込みつつ研究開発の高度化を図っている。

さらに、知財戦略としては、イオントラップ型量子コンピュータに関する国内外の特許動向調査を実施するとともに、知財セミナーへの参加により権利化や事業化に向けた知見の共有を図った。

これらの取り組みにより、本プロジェクトは研究体制の継続的な高度化と柔軟な再構築を進めつつ、国際的競争力の強化および社会実装を見据えた基盤形成を推進している。

(2) 研究成果の展開

本プロジェクトでは、研究成果の社会実装を見据え、知財戦略の構築、技術動向調査および研究成果の権利化に向けた取り組みを実施してきた。知財戦略および技術動向の把握に関しては、外部委託を活用し、「イオントラップ型量子コンピュータ」に関連する国内外の特許出願状況および研究開発動向の調査を実施した。これにより、競合技術の特徴や出願動向を把握するとともに、本プロジェクトの研究開発の位置付けを明確化した。調査結果は各課題推進者に共有され、研究の方向性や知財戦略の検討に活用されている。また、知的財産の創出に関しては、研究の進展に伴い各機関の知財部門と連携しながら出願準備を進め、令和5年度以降、研究の進展に伴い複数の特許出願が実施されており、研究成果の権利化が着実に進展している。プロジェクトの認知向上および成果発信の基盤として、ホームページを整備・公開し、各課題推進者の研究内容や成果へのアクセスを可能とする体制を構築した。

今後の展開としては、確立された要素技術を統合したプロトタイプ開発を進めるとともに、企業との連携強化や技術移転の可能性について引き続き検討を進めていく。また、グローバルな研究動向を踏まえながら戦略的な知財マネジメントを継続し、将来的な展開も視野に入れつつ、研究成果の活用に向けた基盤整備を進めていく。

(3) 広報、アウトリーチ

研究成果の発信、人材育成および国際連携を目的として、代表的な広報・アウトリーチ活動を以下に示す。

広報活動として、令和3年6月よりプロジェクトの公式ウェブサイトを開示し、継続的な情報発信を行っている(<https://www.oistmoonshot.jp/>)。同サイトでは、プロジェクト概要、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を掲載し、研究内容を専門外の来訪者にも理解しやすい構成としている。また、公表可能な研究成果や最新の活動状況を随時更新するとともに、各課題推進者のウェブサイトとも連携することで、関連情報へのアクセス性を高めている。

人材育成を兼ねたアウトリーチ活動として、令和4年9月に Q-LEAP 量子技術教育プログラムと連携し、OIST においてサマースクールを開催した。本サマースクールでは、国内外から講師24名、受講生49名(加えてオンライン受講登録者164名)が参加し、講義に加えてグループワークやポスターセッションを実施した。これにより、参加者間の活発な議論と交流を促進し、量子技術分野における次世代人材の育成に貢献した。

国際的な研究交流および成果発信の場として、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)」を開催した。本シンポジウムでは、量子技術分野を牽引する国内外の研究者24名による講演が行われるとともに、受講生58名によるポスター発表を通じて活発な意見交換が行われた。本取り組みは、研究成果の国際的な可視化と研究ネットワークの強化に寄与するとともに、将来的な研究展開の基盤形成にも貢献した。

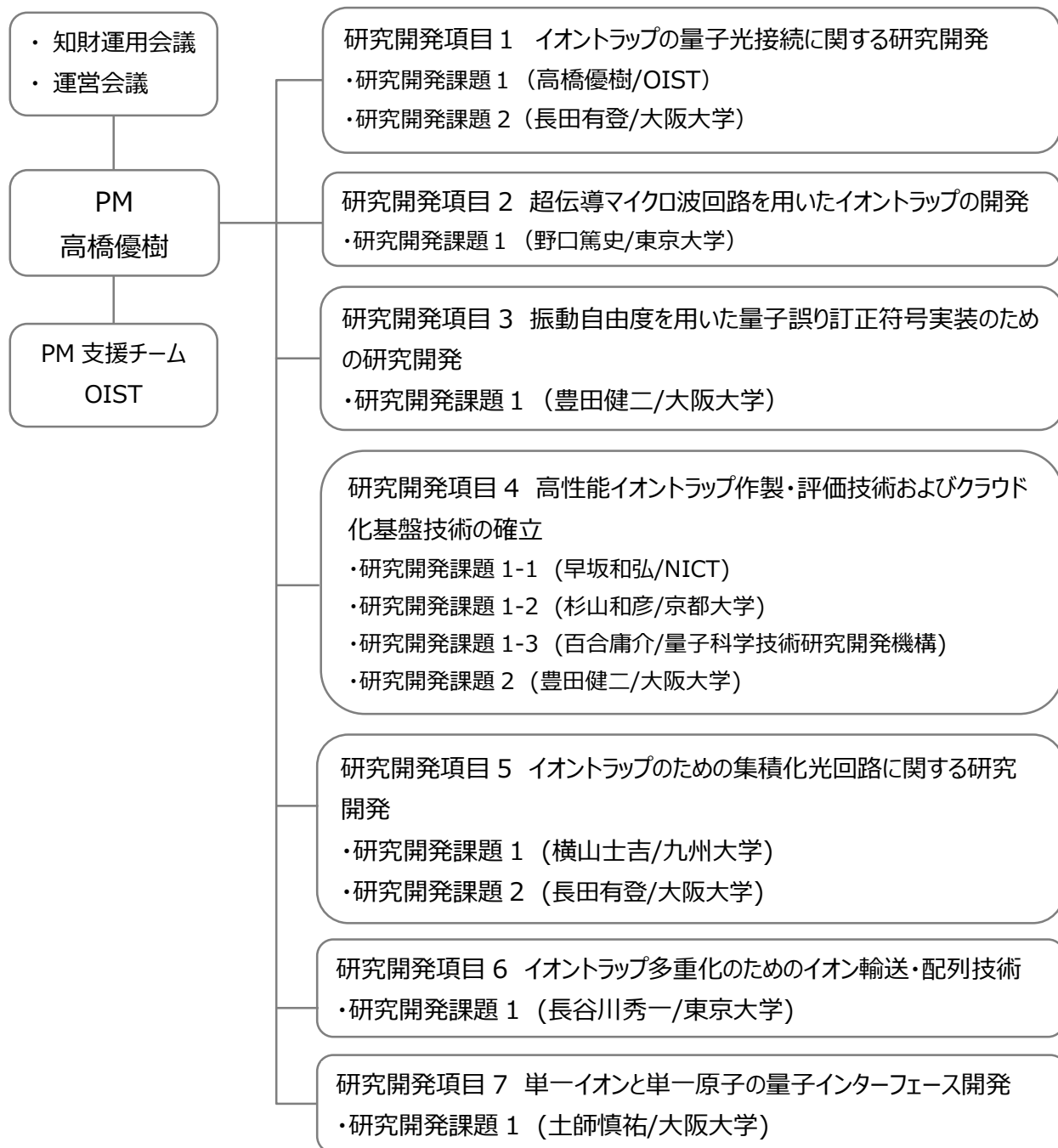
(4) データマネジメントに関する取り組み

研究データの適切な管理・共有・公開を目的として、研究開発プロジェクト実施期間を通じて以下の取り組みを実施した。データマネジメントに関する体制整備として、PM 支援チームメンバーが国立情報学研究所等が主催するワークショップ(令和3年9月28日 第一回 AXIS-JPCORE 研究データポリシー策定WS)に参加し、データマネジメントプランおよびポリシーに関する理解を深化させた。次に、研究データの管理・共有基盤として、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、GakuNin RDM を導入し、研究データの保管・共有環境を整備した。これにより、課題推進者ごとに研

究データを適切に管理しつつ、安全に共有できる体制を構築した。研究データの利活用を見据え、登録データに対するメタデータ付与およびその集約の検討を進めるとともに、研究成果や知的財産との関係を踏まえたデータ公開の方針について整理を行ってきた。

今後の展開としては、引き続き GakuNin RDM を基盤とした研究データ管理を継続するとともに、メタデータ付与の運用を段階的に進め、NII Research Data Cloud との連携によるデータ公開の推進を図る予定である。また、特許出願等の知的財産戦略との整合性に配慮しつつ、公開可能な研究データの選定・整理を進め、研究成果の可視化および利活用の促進につなげていく。

6. 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は、参画研究開発機関のうち協議対象案件に関係する機関に加え、PM および JST が参加する体制としている。また、プロジェクト内で創出された知的財産の権利化については、代表機関の知財担当部門との連携を基本とした運用としている。

運営会議 実施内容

プロジェクト全体会議の実施により課題間の連携促進と研究開発の円滑な推進に貢献した。各課題の進捗状況、研究目標、マイルストーン、人員体制等の共有を行うとともに、研究開発上の課題や方向性について継続的な議論と情報交換を実施した。企業を交えた意見交換を通じて、研究成果の展開や連携の可能性について検討し、プロジェクト全体としての一体的な推進体制の強化に寄与した。