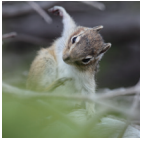


# 量子コンピュータ大規模化のための オンチップ・イオントラップの技術開発

田中歌子\*



技術解説

Development of on-chip ion traps towards a large-scale ion trap quantum computer

Key Words: Ion trap, Laser cooling, Sympathetic cooling, Quantum computer, Quantum charge-coupled device, Ion shuttling, Time-division multiplexing

## はじめに

近年、世界各国に量子コンピュータ関連のスタートアップが存在し、 $10^6$ 個のオーダーの量子ビット操作のような大規模化へのロードマップも公表されている。しかし量子コンピュータのプラットフォームとして注目されているどの物理系でも、このオーダーに達するにはまだ多くの課題を抱えている。

イオントラップは気体原子イオンの高分解能分光のために1980年代には確立されていた技術だが、1990年代から量子コンピュータに適した物理系として基本操作のデモンストレーションが次々と行われた。イオントラップは電気的な力で非接触に原子イオンを空中に保持する手法で、気体原子イオンを理想的な孤立系の状態にして量子ビットとして動作させることができる。同じく量子コンピュータのプラットフォームとして研究開発されている超伝導素子などの人工的なデバイスは、多数個では素子の特性のばらつきが問題になるのに対し、原子イオンは外部磁場などの環境が同一条件下なら均一な特性が保証されているので、大規模化に適しているといえる。また現状では量子状態の初期化、量子ゲート操作、読み出しのすべての操作において低いエラーレートが達成されている。一方で、量子ゲートの速度は原子イオンと相互作用させる電磁波の強度によって決まるという実験的な制約がある。また原子イオンのトラップでは $10^{-8}$  Paまたはそれ以下の超高真空環境が必須なことも考慮しなければならない。

本稿では、イオントラップ量子コンピュータの大規模化の課題解決のために、我々がオンチップ・イオントラップ(図1)を用いて行ってきた研究開発について紹介する。

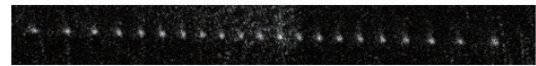
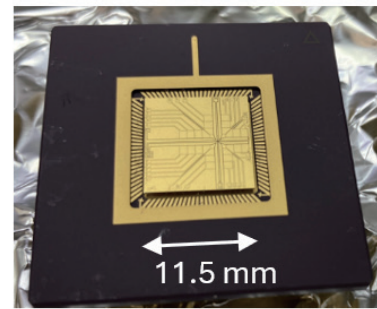


図1 オンチップ・イオントラップ電極(上)と捕獲されたカルシウムイオンの画像(下)。

## イオントラップ量子コンピュータの構成とQuantum Charge-Coupled Device (QCCD)

量子コンピュータの基本単位である量子ビットは重ね合わせ状態を生成できる二準位系で構成される。原子イオンではそのエネルギー状態から適した二準位を選び出し、共鳴する電磁波で量子状態を操作することで量子ゲートを実装する。必要な操作は、

- i) イオン生成・捕獲とレーザー冷却による運動状態の制御
- ii) イオンの量子状態の初期化
- iii) 量子ゲートの実行
- iv) 量子状態の読み出し

である。多数個の量子ビットを扱う場合、単一の捕獲領域に全てのイオンを捕獲しようとする、イオン運動の固有振動モードの数が増大して運動の制御が難しくなり非現実的である。



\* Utako TANAKA

京都大学 大学院理学研究科 物理学第一専攻 博士後期課程修了(1993年)  
現在、大阪大学 大学院基礎工学研究科 講師 博士(理学)  
TEL : 06-6850-6326  
E-mail: utako@ee.es.osaka-u.ac.jp

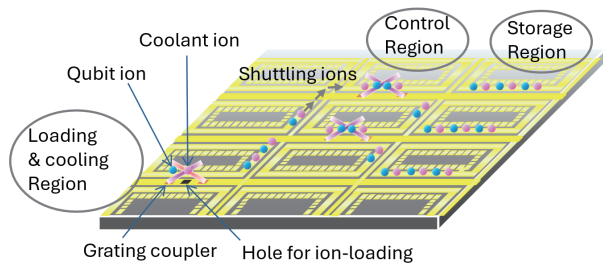


図2 Quantum Charge-Coupled Device (QCCD) [1] [2]の概念図。Loading & cooling Regionでイオン生成と運動制御、Control Regionで量子ゲート操作、Storage Regionでイオン蓄積といった異なる機能を持つ領域間でイオンを輸送して量子計算を進める。各種操作に必要なレーザー光の導入では、トラップ電極基板の下に組み込んだ光導波路からグレーティングカップラーを介してイオンに照射する方法が報告されている [3]。

そこで多数の捕獲領域から成るトラップ電極を用意し(図2)、異なる機能を持つ領域間でイオンを輸送するQuantum charge-coupled device (QCCD)と呼ばれる方式が提案され [1] [2]、直線状の捕獲領域をもつトラップ電極での実証実験 [4]、レーストラック状のトラップ電極での32量子ビットの実証実験 [5] が報告されている。

QCCDの課題の一つは、多数の電極を有するトラップ電極をいかに実装するかである。このような電極作製は、従来行われてきた機械加工で作製したパーツを組み合わせる方式では難しいため、リソグラフィなどの微細加工技術が取り入れられるようになった。我々も図1のような多数の微小電極をもつオンチップ・イオントラップの開発を行ってきた。オンチップ・イオントラップの利点は、電極の自由なレイアウトが可能で、微小電極を精度良く配置し所望のトラップポテンシャルを生成できることである。さらにイオン運動や量子状態制御に用いるレーザー光を導入するための光導波路とトラップ電極との集積化が見込めるため、将来的な社会実装にも見通しが高い。

多数の電極の配線と電圧制御も課題である。QCCDの実証実験では1量子ビットの制御におよそ10個の電極が使われており、単純に考えると例えば1000量子ビットの制御には10000本の配線を要する [6]。超高真空環境では使用できるものの材質に制約があり、大気中で確立されている技術をそのまま適用できないので、なんらかの技術革新が必要で

ある。

以下ではQCCDの基盤技術の研究開発として、我々が行っているイオン生成・捕獲、イオン輸送、そして配線数増加問題を解決する鍵となる時分割多重化方式について述べる。

### QCCDデバイスへのイオン導入方法の確立 — 同位体イオンの選別捕獲と共同冷却 [7]

QCCDではまず、イオンを生成して捕獲し、レーザー冷却によって運動状態を制御する領域がある。我々の実験ではカルシウムイオンを用いており、イオン捕獲でははじめにカルシウムのチップをオープンに入れて熱し、電気的に中性なカルシウム原子ビームをイオン捕獲領域に導入して、レーザー光で光イオン化する。イオン化されたカルシウムはイオントラップの電気的な力を受けて捕獲され、照射されるレーザー冷却用の光によってその運動が抑制される。

この原子ビームの向きがトラップ電極表面に平行だと、電極表面にカルシウム原子が堆積する可能性がある。すると堆積したカルシウムと電極材料である金との間に接触電位が生じ、トラップポテンシャルの経時変化につながる。そこで我々は図3のようなスルーホールを持つオンチップ・トラップ電極を開発し、トラップ電極の背面から原子ビームを導入することでこの問題を回避した。

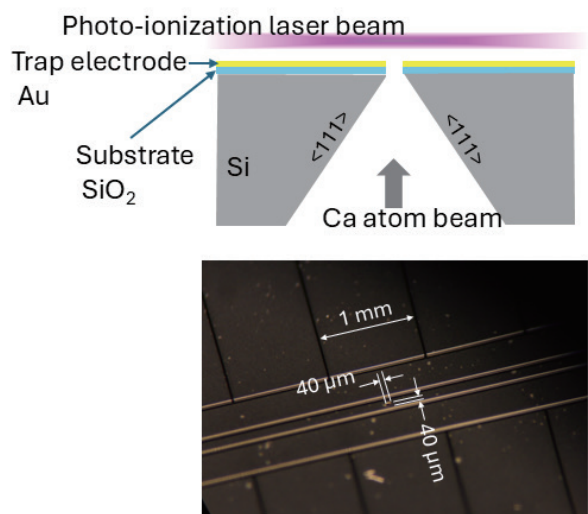


図3 カルシウム原子導入用のスルーホールを有するオンチップ・イオントラップ電極の概略図(上)と電極表面とホールの写真。

図3のトラップ電極は情報通信研究機構で作製されたものである。イオンから絶縁体である基板の側面が見通せる形だと、絶縁体の帯電によるトラップポテンシャルの変形の影響を受ける可能性があるため、シリコンの異方性エッチングを利用して図3のような形状にした。スルーホールのは大きさは、あらかじめシミュレーションにてイオン捕獲位置でのトラップポテンシャルに影響がない大きさを確認して40  $\mu\text{m}$ と決めた。

微小なスルーホールには、電極表面へのカルシウム原子の堆積を防ぐだけでなく、原子ビームの指向性を向上させる効果がある。指向性の良い原子ビームでは、光イオン化用のレーザーの波長を同位体シフトを考慮してうまく選んでやると、選択的に同位体をイオン化することが可能になる。図4に実験装置の概略を示す。真空チェンバー内にトラップ電極を設置し、スルーホールの下にカルシウムチップを入れたオーブンを配置した。トラップ電極にはRF (Radio Frequency)電圧を印加して xy方向の閉じ込めを、DC(Direct Current)を印加して z方向の閉じ込めのポテンシャルを生成する。光イオン化は波長423 nm、375 nm、レーザー冷却と検出は波長397 nm、リポンピング用には波長866 nmのレーザー光を用いる。これらのレーザービームを全て重ねて z軸と平行な方向に照射した。今回用いた電極ではイオンは電極表面から約200  $\mu\text{m}$ 上方に捕獲される。このイオンが発する波長397 nmの蛍光をイメージインテンシファイアで観測しイオンが捕獲されることを確認した(図4挿入図)。そして光イオン化とレーザー冷却用レーザーの同位体シフトを利用して、カルシウムの2種類の同位体、 $^{40}\text{Ca}^+$ と $^{44}\text{Ca}^+$ を選択的に捕獲することに成功した。

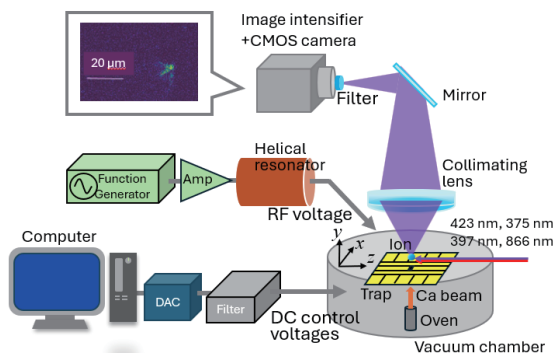


図4 原子導入用のスルーホールを有するオンチップ・イオントラップの実験配置図と捕獲されたイオンの画像。

同じトラップポテンシャル中に異なる同位体イオンを捕獲し、片方の同位体イオンをレーザー冷却すると、共鳴する波長が異なるもう片方の同位体イオンも、クーロン相互作用により間接的に冷却される。これを共同冷却(Sympathetic cooling)という。QCCDでは量子ビットイオンの運動状態を常に理想的な状態に保つために、共同冷却が適用されている。なぜならレーザーによる直接冷却はイオンの量子状態を変えてしまうので、量子ゲートを進める途中では直接レーザー冷却ができないからである。

$^{40}\text{Ca}^+$ と $^{44}\text{Ca}^+$ では同位体シフトが数100 MHzのオーダーなので、冷媒イオンの直接冷却が他方のイオンの量子状態に全く影響しないとはいえず、理想的には異なるイオン種を冷媒イオンにするのが望ましい。しかし今回は共同冷却のテストとして、 $^{40}\text{Ca}^+$ と $^{44}\text{Ca}^+$ を用いて2つの点に着目して実験を行った。共同冷却のみでもイオンの初期捕獲が可能か、異なる同位体から成るイオン列はどのような挙動を示すかの2点である。

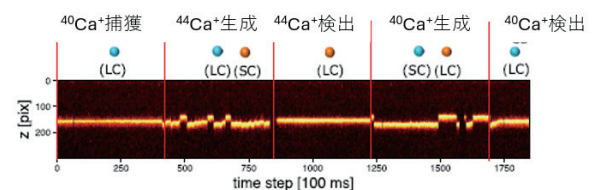


図5  $^{40}\text{Ca}^+$ と $^{44}\text{Ca}^+$ の捕獲、共同冷却される様子のイオン画像のタイムラプス。LC:レーザー冷却、SC:共同冷却。

図5にカルシウム同位体 $^{40}\text{Ca}^+$ と $^{44}\text{Ca}^+$ の捕獲と共同冷却される様子のイオン画像のタイムラプスを示す。本実験では各波長のレーザー光源が1台ずつしかないため、レーザー波長を $^{40}\text{Ca}^+$ に同調したときには $^{44}\text{Ca}^+$ は共鳴から外れて蛍光を発さない。同位体の存在は $^{40}\text{Ca}^+$ の位置が単一イオンのみの場合の位置からずれることで確認できる。逆にレーザー波長を $^{44}\text{Ca}^+$ に同調したときには $^{40}\text{Ca}^+$ は蛍光を発さない。図5の各時間帯では以下のことを行っている。  
 $^{40}\text{Ca}^+$ 捕獲：単一の $^{40}\text{Ca}^+$ を捕獲する。  
 $^{44}\text{Ca}^+$ 生成： $^{40}\text{Ca}^+$ が捕獲されている状態で原子オーブンを加熱し光イオン化用レーザーの波長を $^{44}\text{Ca}^+$ に同調する。検出用レーザーの波長は $^{40}\text{Ca}^+$ に同調したままなので $^{40}\text{Ca}^+$ の蛍光がみえる。 $^{40}\text{Ca}^+$ の位置がずれたことから $^{44}\text{Ca}^+$ が同時に捕獲されたのがわかる。また $^{40}\text{Ca}^+$ と $^{44}\text{Ca}^+$ の位置の入れ替えが起こっ

ているのが観測されている。

$^{44}\text{Ca}^+$ 検出：検出用レーザーの波長を $^{44}\text{Ca}^+$ に同調する。これにより「 $^{44}\text{Ca}^+$ 生成」で捕獲されていたのが確かに $^{44}\text{Ca}^+$ であると確認できる。またこの波長は $^{40}\text{Ca}^+$ に対してはレーザー加熱の効果があるため、 $^{40}\text{Ca}^+$ はトラップ領域からなくなり $^{44}\text{Ca}^+$ のみが残っている。

$^{40}\text{Ca}^+$ 生成： $^{44}\text{Ca}^+$ が捕獲されている状態で原子オーブンを加熱し光イオン化用レーザーの波長を $^{40}\text{Ca}^+$ に同調する。異なるイオンが捕獲される。

$^{40}\text{Ca}^+$ 検出：検出用レーザーの波長を $^{40}\text{Ca}^+$ に同調することで、新たに捕獲されたイオンが $^{40}\text{Ca}^+$ であることが確認できる。

以上の結果から、共同冷却のみでも初期の捕獲が可能なこと、同位体の配置がある頻度で入れ替わることがわかった。後者はポテンシャル形状、真空度、レーザー波長、イオン配列などのパラメータを最適化することで抑えられると考えられ、今後の課題である。

### イオン輸送技術 [8]

QCCDではイオンが捕獲・冷却される領域から、量子ゲート操作、状態読み出し、量子ビット蓄積の領域へと、イオンを輸送する技術が必須である。イオン輸送ではできるだけ高速に、かつ、イオンが加熱されない条件で輸送することが望まれる。

イオン付近のトラップポテンシャルは2次関数(調和ポテンシャル)で近似的に表され、その形状で決まる固有のトラップ周波数 $\omega_z$ でイオンは平衡位置のまわりを微小振動している。輸送後にイオンが加熱されないための条件は、輸送の速さを $\omega_z$ の逆数の時間よりもゆっくり、即ち断熱的に輸送することである。この方法では $\omega_z$ が輸送の速さを決める上限となる。一方、非断熱的に輸送したあと、加熱を打ち消すようにうまく電圧を印加する方法もあり、原理検証実験が行われている。この場合は断熱的な輸送よりも電圧を速く高精度に制御するシステムが必要になる。以下では我々が行ってきた断熱的な輸送について述べる。

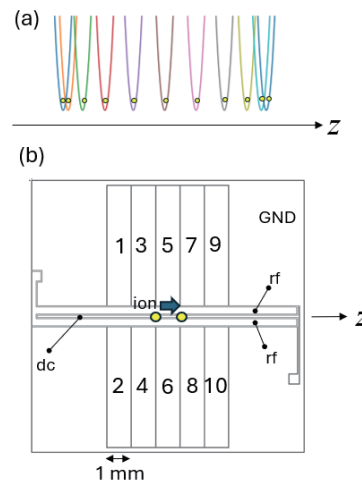


図6 (a)イオン輸送のために生成するトラップポテンシャルと(b)輸送実験に用いたトラップ電極のレイアウト。

図6(a)にイオン輸送のために生成するポテンシャルと図6(b)にトラップ電極のレイアウトを示す。z軸方向に生成した調和ポテンシャルの底にイオンが捕獲されるので、色分けしたポテンシャルを各ステップで生成し、イオンを輸送する。イオンは図6(b)の電極の表面から約200  $\mu\text{m}$ 上方のz軸に平行な軸上に捕獲される。このポテンシャルは図6(b)の電極1と2, 3と4, 5と6, 7と8, 9と10のペアにそれぞれ同じDC電圧を印加して、これらを時間変化させることで図6(a)のポテンシャルを生成する。平面上の矩形電極が生成するポテンシャルは解析的に求められているが [9]、所望のポテンシャルを生成するために電極にどのような電圧を印加すればよいかは自明ではない。そこでそれぞれの電極に単位電圧を印加したときのポテンシャルの重ね合わせが所望のポテンシャルになるように、2次計画法を用いて印加電圧を導出した。図7にその一例を示す。

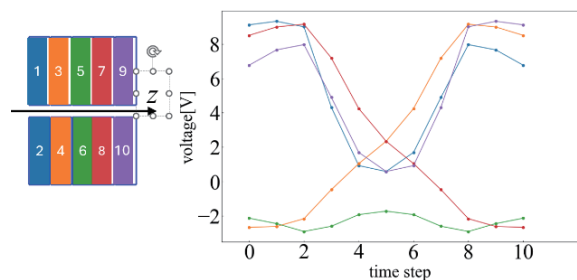


図7 イオン輸送のための印加電圧の例。左図は図6(b)の番号のついた電極を表している。左図の電極に右図で同じ色の電圧を各ステップで印加することで所望のポテンシャルが得られる。

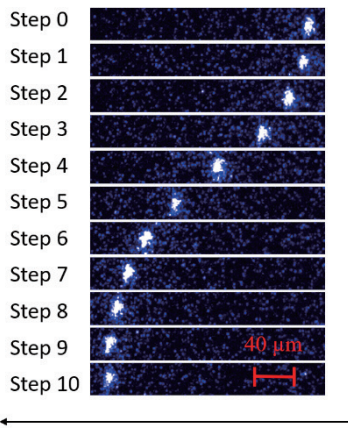


図8 単一カルシウムイオンの輸送実験結果。Reproduced with permission from Ref. [10]. (C) 2000 一般社団法人日本物理学会。

図8に単一カルシウムイオンの輸送実験を行った結果を示す。イオンが図6(a)で示したように、輸送のはじめとおわりではゆっくり、中間では早く輸送されており、意図した通りにポテンシャルが生成されていると言える。

このような実験をもとに、制御DC電圧生成用 Digital-to-Analog Converter (DAC)のFPGAを用いた高速化や、DAC出力を市販の $\pm 10V$ から $\pm 50V$ まで高出力化したデバイスの開発を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で行い、断熱的な輸送の上限である $\omega_z$ を上げることに成功している [8]。

#### 配線数増加問題を軽減する時分割多重化方式 [11]

先に述べたように、QCCDでは多数の電極の電圧制御に伴い、電圧の供給源と電極をつなぐ配線数が膨大なものになる。大気中であれば集積回路技術が適用できるが、イオントラップ実験は超高真空内で行うので事情が異なる。電圧供給には超高真空用のフィードスルーを用いるが、先に例を挙げた1000量子ビット用に10000の配線数が必要となった場合、同数の端子をもつフィードスルーは実装が困難であることが予想される。

QCCDにおける配線数増加問題は文献 [6]で指摘され、出力電圧を切り替えて多数の電極に供給する提案がなされた。またこの問題に対し、キューエル株式会社と東京大学によって時分割多重化方式が提案され、そのためのエレクトロニクスデバイスが開発された [12]。そこでこのデバイスを我々のオンチ

ップ・トラップに適用し、実証実験を行った [11]。

図9にその概念図を示す。図9(a)は従来の電圧供給方法で、電極の数だけDACの出力があり、それぞれの出力はフィードスルー端子を介して真空装置内の制御電極に接続されている。図9(b)が本研究で実証実験を行った時分割多重化方式で、一つのDACで複数の電極を制御するものである。DACは各電極に印加する制御電圧を順番に生成し、“Select input”信号によってタイミングを制御しDemultiplexerで各電極に分配する。シリアルに送った信号をパラレルに変換し各電極に印加しているともいえる。図9(a)と(b)を比較すると、緑色で表したフィードスルー端子数が(b)では軽減されていることがわかる。なお図では省略しているが、このように電圧を分配しただけでは印加電圧がとぎれとぎれになってしまうので、トラップの各DC電極の前には電圧保持のための回路を設置し、電圧が連続してDC電極に印加されるようになっている。

実験は先に紹介したイオン輸送実験で用いたものと同じオンチップ・イオントラップで行った。そしてカルシウムイオンの捕獲、さらに輸送実験に成功した [11]。これはQCCDにおける配線数増加問題の解決策を示す結果として注目され、American Institute of Physicsが運用する科学広報メディア「Scilight (Science Highlight)」にも取り上げられた [13]。

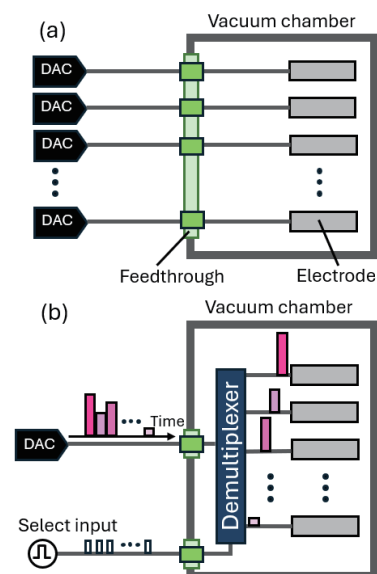


図9 時分割多重化方式の概念図。(a) 従来の電圧供給方法。(b) 時分割多重化方式。(a)に比べてフィードスルーの端子数が軽減されている。DAC : Digital-to-Analog Converter。

我々の実験によって時分割多重方式がイオントラップに適用可能なことが示されたが、残された課題がある。まず、本方式がイオンの加熱に影響があるかどうかの検証である。次に、真空装置内の電気回路部品の実装方法の検討である。図9(b)ではDemultiplexerが真空装置内に設置されることでフィードスルーの端子数が軽減されているが、我々が今回行った原理実証実験では、まだこうした回路部品を真空装置内に設置していない。一般に超高真空装置内で使えるものはアウトガスの少ない材質に限られている。電気回路部品が超高真空への到達に支障がないか、丹念なテストが必要である。また放熱の悪い真空下でデバイスが正常に動作するかも確認し、問題がある場合はそれを考慮した実装方法の確立が求められる。時分割多重化方式の有効性を示すため、今後はこうした真空テストや回路の実装を予定している。

#### おわりに

イオントラップ量子コンピュータの大規模化の手法として提案されているQCCDについて紹介し、その基盤技術であるイオン生成と運動制御、イオン輸送、配線数増加問題を軽減する時分割多重化方式の実験について紹介した。イオントラップ量子コンピュータの開発は、微細加工技術、集積化光回路、真空装置の高性能化と小型化、制御用エレクトロニクスとミドルウェアの開発など、原子物理学の範疇に留まらず関連する分野を拡げながら発展している。大規模化は産学官で連携し幅広い分野の最先端技術を結集してはじめて実現すると考えられる。本稿がこのような関連分野の方々の目に留まり、情報交換や技術交流のきっかけになって、イオントラップ量子コンピュータの更なる発展につながれば幸いである。

#### 謝辞

本研究を精力的に遂行してくれた研究室のメンバーに感謝します。また情報通信研究機構、キューエル株式会社、株式会社イーツリーズ・ジャパン、東京大学の共同研究者の皆様へ感謝いたします。本研究はJST【ムーンショット型研究開発事業】 Grant 番号【JPMJMS2063】の支援のもとに行われました。ここに感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] D. Wineland, C. Monroe, W. Itano et al., "Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped atomic," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 103, p. 259–328, 1998.
- [2] D. Kielpinski, C. Monroe, and D. J. Wineland, "Architecture for a large-scale ion trap quantum computer," *Nature*, vol. 417, p. 709–711, 2002.
- [3] Karan K. Mehta, Chi Zhang, Maciej Malinowski, Thanh-Long Nguyen, Martin Stadler, Jonathan P. Home, "Integrated optical multi-ion quantum logic," *Nature*, vol. 586, p. 533, 2020.
- [4] J. M. Pino, J. M. Dreiling, C. Figgatt et al., "Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer," *Nature*, vol. 592, p. 209–213, 2021.
- [5] S.A. Moses, C.H. Baldwin, M.S. Allman et al., "A race-track trapped-ion quantum processor," *Phys. Rev. X*, vol. 13, p. 041052, 2023.
- [6] M. Malinowski, D.T.C. Allcock, and C.J. Ballance, "How to Wire a 1000-Qubit Trapped-Ion Quantum Computer," *PRX Quantum*, vol. 4, p. 040313, 2023.
- [7] Masanari Miyamoto, Takashi Higuchi, Kentaro Furusawa, Norihiko Sekine, Kazuhiro Hayasaka, Utako Tanaka, "Isotope-selective Ion trapping via sympathetic cooling using a surface-electrode trap with a hole for collimated atomic loading," *scientific reports*, vol. 16, p. 300, 2026.
- [8] T. Oshio et al., "Development of a bipolar 50 V output Digital-to-Analog Converter system for ion-shuttling operations," *J. Appl. Phys.*, vol. 137, p. 144401, 2025.
- [9] M. G. House, "Analytic model for electrostatic fields in surface-electrode ion traps," *Phys. Rev. A*, vol. 78, p. 033402, 2008.
- [10] 大塩達也, 樋口嵩, 早坂和弘, 田中歌子, "量子CCDに向けた $^{40}\text{Ca}^+$ イオンのシャトルング," *日本物理学会講演概要集*, 第巻78, p. 678, 2023.
- [11] Ryutaro Ohira, Masanari Miyamoto, Shinichi Morisaka, Ipeei Nakamura, Atsushi Noguchi, Utako Tanaka, Takefumi Miyoshi, "Trapping an atomic ion using time-division multiplexed

Digital-to-Analog Converters," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 127, p. 234001, 2025.

- [12] Ryutaro Ohira, Shinichi Morisaka, Ipei Nakamura, Atsushi Noguchi, and Takefumi Miyoshi, "Multiplexed Control at Scale for

Electrode Arrays," *arXiv:2504.01815*, 2025.

- [13] Mara Johnson-Groh, "Time-division multiplexing opens path for larger quantum computers," *Scilight 2025*, p. 501101, 2025.

