

オンチップ・イオントラップによる冷却イオンの配列制御



研究ノート

田 中 歌 子*

Control of laser-cooled ion configuration using on-chip ion traps

Key Words : on-chip ion trap, laser cooling, quantum technologies, nanofriction model

はじめに

原子レベルで物質を操作する手法には様々なものがあるが、気体原子イオンではイオントラップが広く利用されている。電場の力で真空中の限られた領域にイオンを捕獲し、さらにレーザー冷却で動きを止めると、原子1個1個を識別して個別に操作できるようになる。このような冷却イオンは理想的な孤立系として、原子時計の開発において発達してきた。冷却イオンを用いた量子ゲートが提案されて以降は、量子コンピューティング、量子シミュレーションへと応用範囲が広がった。欧米では昨今、イオントラップ量子コンピューター実現のために、複数のベンチャー企業が創立され、大手電気メーカーに100人規模の部署ができるなど、イオントラップを基盤にした量子技術の研究開発が非常に活発である。同時に求められる制御も高度化しており、イオントラップ電極への要求も変化してきている。

従来、イオントラップ電極は金属加工で作製された部品を組み立てる形状のものであったが、冷却イオン制御の高度化につれて、微細加工技術が適用されるようになってきた。我々はこのようなトラップを「オンチップ・イオントラップ」と呼び、特殊なイオン配列を可能にする電極開発を行ってきた。本稿では、我々が開発したオンチップ・イオントラップによって、従来型では困難であったイオン配列が実現した例を紹介し、その応用について述べる。

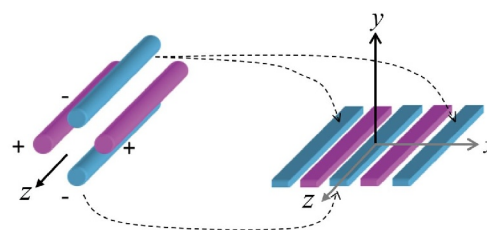


図1 従来型イオントラップ (左) とオンチップ・イオントラップ (右) の概略図。

オンチップ・イオントラップとは

オンチップ・イオントラップとはリソグラフィなどの微細加工技術を駆使して作製したイオントラップ電極のことで、従来の金属加工のものよりもはるかに高精度で複雑な形状が作製できる。従来型イオントラップでもイオンの運動を制御し内部状態を個別に操作することはできるが、オンチップ・イオントラップではさらにイオンの配列を自由にレイアウトできるため、新たな量子システムが実現可能である。

従来のリニア型イオントラップの概略図を図1左に示す。赤と青の電極の間に RF (Radio Frequency) 電圧を印加しイオンを動径方向 (z 軸に直交する方向) に閉じ込め、 z 軸に沿って並べる。オンチップ・イオントラップはこれらの電極を図1右のように平面に配置し、 y 軸上のある高さで z 軸に平行な軸上にイオンを捕獲するものである。

z 軸方向の閉じ込めは、図1の電極を分割したものに DC (Direct Current) 電圧を印加して行う。冷却イオンの配列はトラップポテンシャルによる力とイオン間のクーロン力とのつり合いで決まる。従来型イオントラップが生成するポテンシャルは調和型で近似されるが、この場合のイオンの平衡位置は間隔が一様にならない。しかし量子コンピューターや量子シミュレーション、複数個イオンを用いた光クロックなどの応用では一様なイオン間隔が求められる。



* 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

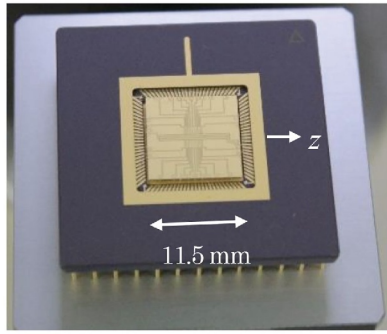


図2 オンチップ・イオントラップ。

イオンの1次元配列と間隔制御

イオン間隔を一樣にするための非調和型のポテンシャルはイオンの個数 N と間隔 d が決まれば求められる²⁾。これを実現するために多数の DC 電極を用意し、それらが生成するポテンシャルの重ね合せによって所望のポテンシャルを得る。図2は等間隔配列のためのオンチップ・イオントラップの写真である。この電極は中央付近に13対のDC電極を配置し、印加電圧をできるだけ低くできるように電極幅を決めている。このトラップ電極ではイオンは約230 μm の高さに捕獲される。

この電極にイオンを等間隔に配列させるための電圧を印加し、カルシウムイオンを用いて実験を行った。実際にはイオンは印加電圧だけでなく浮遊電場の影響を受けるので、これを補正しなければならない。そのためにはイオンの位置での電場を知る必要がある。 z 軸方向に1列に並んだ N 個のイオンの i 番目のイオンの平衡位置 z_i は、 z_i での電場の z 成分を $E(z_i)$ 、イオンの電荷を q 、真空の誘電率 ϵ_0 として

$$qE(z_i) + \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=1, n \neq i}^N \frac{z_i - z_n}{|z_i - z_n|^3} = 0 \quad (1)$$

で与えられる。イオンの画像から位置情報がわかれば z_i での電場が求まる。そこでイオン画像取得→電場算出→電圧源へフィードバックを行うシステムを開発し、イオン配列の補正を行った。図3はその結果で、フィードバックにより等間隔性が向上したことがわかる。

また同じ電極を用いて100個のカルシウムイオンの捕獲を行い、図4のような1列配列を実現した。通常の調和型ポテンシャルの場合にはイオンの個数が増えると、動径方向の閉じ込めを強く、即ちRF電圧を高くしないとジグザグ構造になり、イオンの

運動制御が困難になってしまう。1列に並べるためには非現実的なRF電圧の振幅が必要になるが、非調和ポテンシャルではこの条件が緩和される。このような多数個イオンの1列配列はポテンシャルの精密制御によってはじめて可能になるものである。

間隔制御されたイオン列は、量子コンピューターや量子シミュレーションの大規模化に加えて、我々が開発中の複数個イオンを用いた光クロックにおいても有用である。イオンを複数個用いる際の課題は、イオンごとの時計遷移周波数シフトにばらつきが生ずることだが、等間隔配列ポテンシャルではこの周波数シフトが一定になることが見出されている³⁾。このようにイオンの間隔制御は量子情報、量子計測のどちらの分野にも重要な技術といえる。

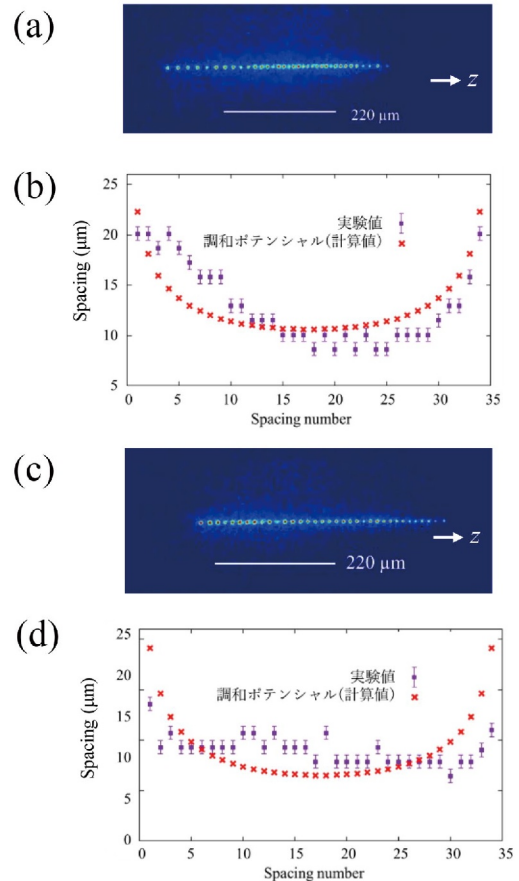


図3 35個のカルシウムイオンの間隔制御。(a) 電圧補正前のイオン画像。(b) 補正前のイオン間隔。紫の■印は実験で測定したイオン間隔、赤い×印は調和ポテンシャルに同数のイオンを捕獲した場合のイオン間隔の計算値である。(c) 電圧補正後のイオン画像。(d) 補正後のイオン間隔。紫の■印は実験で測定したイオン間隔、赤い×印は調和ポテンシャルに同数のイオンを捕獲した場合のイオン間隔の計算値で、等間隔性が向上していることがわかる。

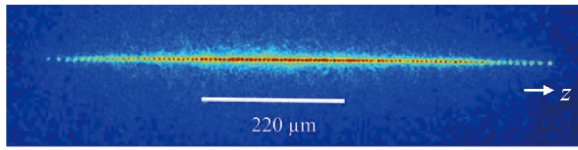


図4 オンチップ・イオントラップに捕獲されレーザー冷却された100個のカルシウムイオン。

イオンの2次元配列

オンチップ・イオントラップでは、従来型では困難な2次元配列も可能になる。従来型でも印加電圧の条件によってイオンがジグザグに配列することがあるが、中心軸からはずれたイオンはRF電圧の周波数での微小振動が避けられず、イオン運動を十分に制御できない。我々の開発したトラップ電極は、3つの微細RF電極に印加するRF電圧の比を変えることで、 z 軸に沿ったポテンシャルの軸を1列から2列に変化させることができる⁴⁾。

図5(a)はこの電圧比を変えたときのRF電圧が動径方向につくるポテンシャルのシミュレーションである。左の図は両端のRF電極にのみ電圧をかけたときで1列配列、右の図は3つのRF電極に同じ振幅の電圧をかけたときで2列配列のポテンシャルが生成できることがわかる。図5(b)は2列配列のポテンシャル中でレーザー冷却されたカルシウムイオンの画像である。

このような2次元系への拡張は、量子コンピューターや量子シミュレーションの大規模化において、多数の量子ビットの環境を一樣に保つためのレイア

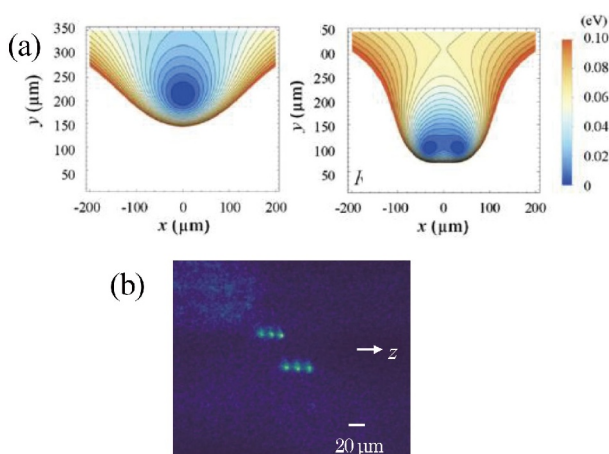


図5 (a) RF電圧によって動径方向に生成されるポテンシャルのシミュレーション。左：1列配列のポテンシャル。右：2列配列のポテンシャル。
(b) 2列配列のポテンシャルに捕獲されたカルシウムイオン。

ウトに適している。また、2列配列イオンは、原子レベルで摩擦力を解明するナノフリクションモデルのエミュレータとして利用できる⁵⁾。そこでイオン個数の増加や、さらなる運動制御の手法の確立などに取り組んでいるところである。

おわりに

オンチップ・イオントラップの特徴である微細電極を用いれば、多様なイオン配列が可能となる。例としてまず、35個のイオンの等間隔性向上や、100個のイオンの1列配列について述べた。このような多数個イオンの配列制御は、大規模化が課題となっている量子コンピューターや量子シミュレーションに必須の技術である。もう一つの例として、イオンの2列配列を紹介した。こちらも量子コンピューターや量子シミュレーションの大規模化に有用であることに加え、ナノフリクションモデルへも応用できる技術である。

オンチップ・イオントラップのもう一つの利点は、電気回路や光導波路との整合性が優れていることである。現状ではレーザー冷却の実験は大規模なシステムであるが、トラップ電極に電気回路や光導波路を作りこむことで集積化への道がひらける。こうした展望をもとにオンチップ・イオントラップに組み込むカルシウムイオン用光導波路の研究開発もはじまっている⁶⁾。オンチップ・イオントラップは量子計測、量子情報の分野を担う重要なデバイスとして今後ますます発展すると期待できる。本研究は科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(CREST) Grant#JPMJCR1776、および大阪大学国際共同研究促進プログラムの支援のもとに行われたものである。

参考文献

- 1) J. I. Cirac and P. Zoller, PRL **74**, 4091 (1995)
- 2) M. Johanning, Appl. Phys. B **122**, 71 (2016)
- 3) K. Hayasaka, CLEO/Europe-EQEC 2019, 8871750 (2019)
- 4) U. Tanaka *et al.*, J. Phys. B **47**, 035301 (2014)
- 5) U. Tanaka *et al.*, Quantum Sci. Technol. **6**, 024010 (2021)
- 6) 古澤他, 信学技報 OFT2021-60 (2021)