



Title	4重極リニアトラップにおけるトラップ領域の3次元拡張と微粒子のシャットリング制御の実現
Author(s)	
Citation	令和6（2024）年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書．2025
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/101295">https://hdl.handle.net/11094/101295</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 令和6年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業」研究成果報告書

ふりがな 氏名	かりやま しおり 仮山 史織	学部 学科	基礎工学部 電子物理科学科	学年	3年
ふりがな 共同 研究者氏名		学部 学科		学年	年 年 年
アドバイザー教員 氏名	田中 歌子	所属	基礎工学研究科		
研究課題名	4重極リニアトラップにおけるトラップ領域の3次元拡張と微粒子のシャトリング制御の実現				
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)				
<b>1. 概要</b>					
<b>1.1 要約</b>					
本研究では、量子コンピューターの実現に向けたイオントラップ技術の拡張として、四重極リニアトラップを3次元のトラップ構造に発展させ、ポリスチレン粒子を用いたモデル実験を行った。コンピューターシミュレーションを通じて電場の最適化を図り、デバイス設計・製作、トラッピング・シャトリング実験を行った。実験では条件設定を行い、カメラ画像から微粒子の挙動を観測することで、トラップ領域の3次元拡張の可能性とシャトリング制御の有効性について検討を行った。					
<b>1.2 序論</b>					
近年、実用化に向けた活動が活発に行われている分野の一つに量子コンピューターがある。ハードウェア、ソフトウェアの両面で開発が進められているが、本研究では特にハードウェアの研究開発に着目する。さまざまなハードウェアの研究が進む中、イオントラップ型量子コンピューターが注目されている。これはイオンのエネルギー状態を量子ビットとして使い、レーザーなどによって制御を行う仕組みであり、ムーンショット型研究開発制度の目標6（イオントラップによる光接続誤り耐性量子コンピューター）にも関連している。[1]					
さまざまなイオントラップ技術が開発される中、従来の1次元や2次元的なトラップ領域構造では、大規模化に向けた自由度が不足している。本研究では、3次元のトラップ領域構造によるイオントラップ技術の拡張を目指し、微粒子を用いたモデル実験を通じてその可能性を検討する。					
<b>2 原理</b>					
四重極リニアトラップの原理について説明する。四重極リニアトラップとは、交流電圧による電場を利用して微粒子やイオンを空間に閉じ込める装置である。					

リニアトラップとは、回転双曲面の電極を持つパウルトラップを改良したものである。リニアトラップはパウルトラップと違って原点のみではなく、リニア電極の中心の軸上に沿ってポテンシャルの安定領域ができる。これによってイオンを静止状態近くまでレーザー冷却したり、シャットリングを行うための自由度を得ることができる。

リニアトラップは4本の交流のロッド電極とその両端の直流のエンド電極から構成される。そして、対向する1対のロッド電極に $U/2$ 、もう1対の電極に $-U/2$ の電圧を加えるとトラップの対象軸( $x=0, y=0$ )近傍では、2次元の四重極ポテンシャル

$$\Phi = U \frac{x^2 - y^2}{2r_0^2} \quad (1)$$

が発生する。ただし、 $r_0$ はトラップの中心軸(Z軸)と電極表面間の距離である。

電極に rf 電圧と DC 電圧を加えた場合、 $U$ は $U = U_0 + V_0 \cos \Omega_{rf} t$ と置くことができる。このとき、質量 $m$ 、電荷 $e$ を持つイオンの $xy$ 面における運動方程式は、以下のマシュー方程式

$$\frac{d^2 u_\alpha}{d\tau^2} + (a_\alpha + 2q_\alpha \cos 2\tau) u_\alpha = 0, \quad \alpha = x, y, \quad \tau = \frac{\Omega_{rf} t}{2}, \quad u_x = x, \quad u_y = y \quad (2)$$

$$a_x = a_y = \frac{4eU_0}{m\Omega_{rf}^2 r_0^2}, \quad q_x = -q_y = \frac{2eV_0}{m\Omega_{rf}^2 r_0^2} \quad (3)$$

で表せられる。また、この方程式が安定な解を持つための、 $a_\alpha, q_\alpha$ の値の取りうる範囲が存在する。その範囲はおおよそ $|a_\alpha| < 0.25$ 、 $0.1 < q_\alpha < 0.9$ である。

$|a_\alpha|, |q_\alpha| \ll 1$ が成り立つとき、イオンの運動は永年運動とマイクロ運動で近似でき、永年運動の有効ポテンシャルは、

$$\Phi_{eff} = \frac{m}{2e} (\omega_{vx}^2 x^2 + \omega_{vy}^2 y^2) \quad (4)$$

と書ける。ただし、 $\omega_{v\alpha} = \beta \Omega_{rf} / 2$ 、 $\beta_\alpha = \sqrt{a_\alpha + q_\alpha^2 / 2}$ である。

さらに、 $z$ 方向(軸方向)に閉じ込めるために、2つのエンド電極に DC 電圧 $U_z$ を加える。このポテンシャルは、2つの DC 電極に挟まれた空間の中央の対象軸近傍では、

$$\Phi_{DC} = \frac{\kappa U_z}{2z_0^2} (2z^2 - x^2 - y^2) = \frac{m}{2e} \omega_{vz}^2 \left( z^2 - \frac{x^2 + y^2}{2} \right), \quad \omega_{vz} = \sqrt{\frac{2e\kappa U_z}{mz_0^2}} \quad (5)$$

と近似される。 $\kappa$ は電極の幾何学的計上で決まる因子である。 $z$ 方向に調和ポテンシャルが生じるので、イオンは角周波数 $\omega_{vz}$ で振動する。最終的な式は式(4)と式(5)を重ね合わせたものであり、

$$\Phi_{eff} + \Phi_{DC} = \frac{m}{2e} (\omega'_{vx} x^2 + \omega'_{vy} y^2 + \omega_{vz}^2 z^2) \quad (6)$$

$$\omega'_{vx} = \sqrt{\omega_{vx}^2 - \frac{\omega_{vz}^2}{2}}, \quad \omega'_{vy} = \sqrt{\omega_{vy}^2 - \frac{\omega_{vz}^2}{2}} \quad (7)$$

となる。rf 電場が $z$ 軸上で0になるため、マイクロ運動がない場所が直線になることが分かる。[2]

### 3 実験

#### 3.1 実験計画

ここで、実験の流れについて簡単に説明する。まず、電磁場解析ソフト Maxwell3D を用いて電極モデルが適切なトラップポテンシャルを形成するかを解析した。次に、適切なトラップポテンシ

ヤルを形成するため、電極形状や配置の設計を行った。その設計をもとに、材料調達・加工等を行い、組み立てと実験セットアップを実施した。

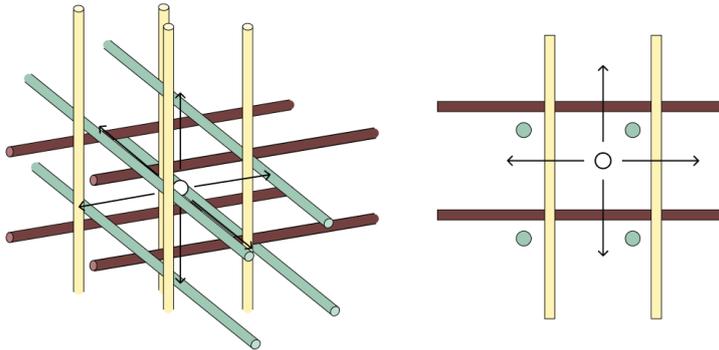


図 1 : 3次元のリニアトラップ構造とその側面図



図 2 : 模型 1

構築した実験系を用いて、電圧値や周波数を変化させながら、微粒子のトラップの様子を実際に観測した。最後に、実験結果をもとに評価および考察を行い、結論を導いた。

### 3.2 初期電極モデルとその模型

自主研究奨励事業の申請書で提示したモデルを図 1 に示した。このモデルは、従来の四重極リニアトラップを 3 方向 (X, Y, Z 軸) に組み合わせた構造である。また、簡易模型を作成し、図 2 に示した。この模型では、ストローを用いて交流ロッド電極を、モールを用いて配線を狂言師、厚紙を用いて電極の支えや DC 電極の配置個所を示した。

### 3.3 シミュレーション

#### 3.3.1 シミュレーション方法

シミュレーションソフトの動作確認と習熟のために、シンプルな四重極リニアトラップのシミュレーションを実施、有効ポテンシャルのプロットを図 3 に示した。

ポテンシャルについては微粒子の電荷が未定のため、相対的な値で示している。式(6)の係数を考慮せずに計算した結果を最大値で正規化し、0～1の範囲でプロットした。また、色が濃い部分はポテンシャルが低く、安定していることを示している。z 軸上のポテンシャルが 1 番低く、粒子が逸脱する箇所も見られず、安定したトラップポテンシャルが形成されていることを確認した。

#### 3.3.2 シミュレーション結果・考察

##### 【初期設計のシミュレーション結果】

次に、初期設計のシミュレーションを行った。作成したモデルは図 4 の通りである。

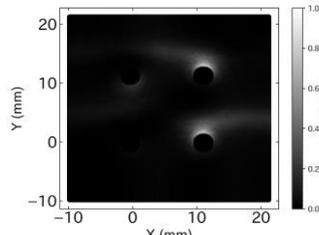
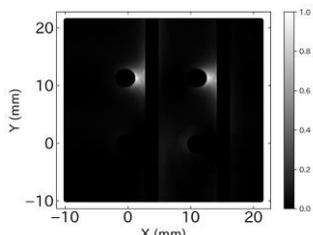
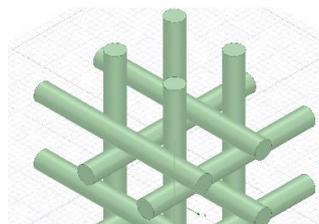
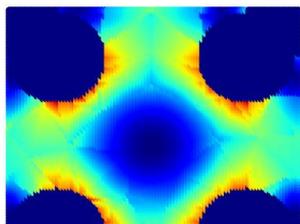


図 5 : 3 方向 rf 電圧印加の  $z = 11 \text{ mm}$  の  $xy$  平面の有効ポテンシャル

図 6 : 3 方向 rf 電圧印加の  $z = 15 \text{ mm}$  の  $xy$  平面の有効ポテンシャル

**x, y, z 方向のリニア電極に電圧をかけた場合**

x, y, z 方向の電極に交流電圧を加えた状態でシミュレーションを行った。xy 平面のデータを取得し、 $z = 11 \text{ mm}$  の時の有効ポテンシャルを図 5 に、 $z = 15 \text{ mm}$  のときの有効ポテンシャルを図 6 に示した。図 5 および図 6 の結果から、初期設計では有効ポテンシャルの対称性が低く、偏りが生じたため、トラップポテンシャルが十分に形成できていないことが示唆された。原因は、電極配置の対称性が不十分であったことに起因すると考えられる。

**1 方向のリニア電極のみに電圧をかけた場合**

3 方向に rf 電圧印加した状態では有効ポテンシャル分布の詳細を評価することが難しかったため、単一方向に電圧を加えた状態の有効ポテンシャル分布を確認するために、z 方向のみに電圧を加えてシミュレーションを行った。この結果を図 7 および図 8 に示し、それぞれ  $z = 10 \text{ mm}$  および  $z = 15 \text{ mm}$  のときの xy 平面の有効ポテンシャル分布を表している。図 8 では、電極間のポテンシャル障壁が十分に形成されておらず、粒子の閉じ込めが不十分であることが確認された。また、図 7 では z 方向の電極の近傍に y 方向の電極が配置されているえいきょうで、円の右側でポテンシャルが低下しており、電極間の遮蔽効果が確認された。

以上の結果より、電極配置の対称性を改善し、電極間の適切な距離を確保することが安定したポテンシャル形成のために必要であることが示唆された。

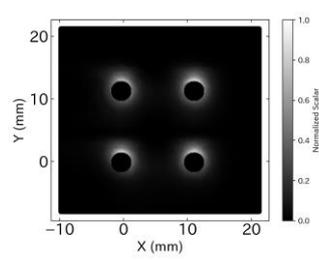
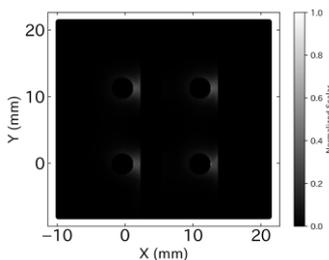
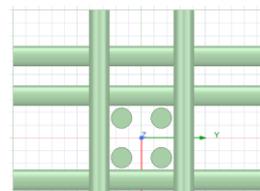
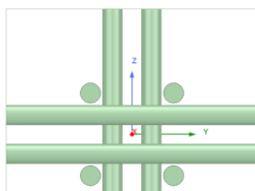
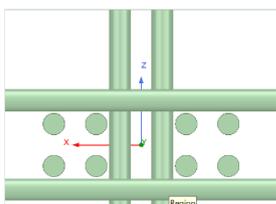


図 7 : 3 方向 rf 電圧印加の  $z = 10 \text{ mm}$  の  $xy$  平面の有効ポテンシャル

図 8 : 3 方向 rf 電圧印加の  $z = 15 \text{ mm}$  の  $xy$  平面の有効ポテンシャル



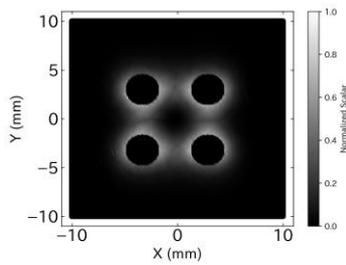


図 12 : 電極モデルの xz 平面

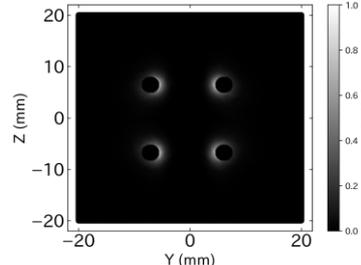


図 13 : 電極モデルの yz 平面

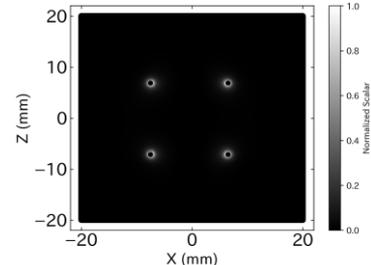


図 14 : 電極モデルの xy 平面

### 【対称性を良くした電極モデル】

まず、9 図から 11 図に示したように電極配置の対称性を完全したモデルを考え、シミュレーションを行った。内側に電極がない場合の xy 平面の有効ポテンシャル分布を図 12 に示した。この結果、図 3 の四重極リニアトラップの有効ポテンシャル分布と類似しており、遮蔽の効果やポテンシャルの偏りが観察されず、トラップポテンシャルが形成されている 3 が確認された。

次に、内側に電極のあるときの yz 平面の有効ポテンシャル分布を図 13 に示した。この結果、電極間のポテンシャルが遮蔽され、図 8 と同様にポテンシャルの形成が難しい状態であることが確認された。

さらに、遮蔽の効果を軽減するために電極棒を細く調整したモデルでシミュレーションを実施したが、図 14 に示したようにポテンシャルの形状に顕著な改善は見られなかった。この結果から、電極棒の調整のみでは遮蔽の効果を十分に軽減することが難しいことが示唆された。

### 【課題】

この時点での主な課題として、対称性の確保と金属遮蔽の影響の排除の 2 点が挙げられた。これらの課題を克服するために、棒状でない電極の導入や、3 方向のリニア電極が重なる中心部分の形状を変更することとした。

その結果、図 15 に示したような薄い板状の電極を 12 枚組み合わせさせた設計と、図 17 に示したテトラポッド型の電極（3 方向のリニア電極を結合した形状）12 形状の 2 つのモデルを考案した。

まず、板状電極を組み合わせた設計のシミュレーションを行い、 $xy$  平面のポテンシャル分布を図 16 に示した。この図は有効ポテンシャルへの計算前のポテンシャルであるが、 $x$  軸および  $y$  軸上が安定したポテンシャルが確認された。しかし、電圧設計において対称性が不十分であることが判明し、2 方向ではトラップポテンシャルが形成されたものの、残りの 1 方向にはトラップポテンシャルが形成されなかった。

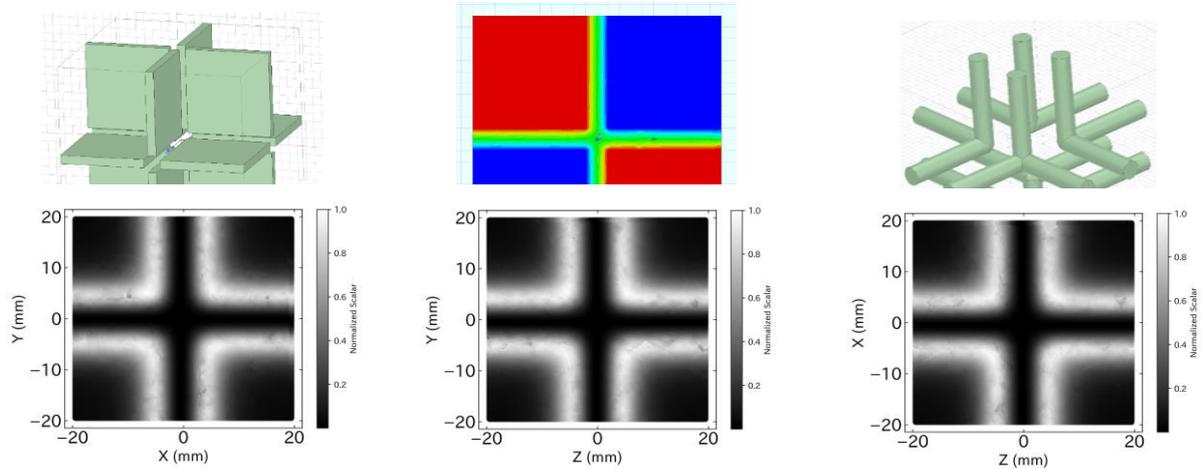


図 18：テトラポッド形電極の  $xy$  平面の有効ポテンシャル

図 19：テトラポッド形電極の  $yz$  平面の有効ポテンシャル

図 20：テトラポッド形電極の  $zx$  平面の有効ポテンシャル

次に、テトラポッド型電極

を用いた設計についてシミュレーションを行い、 $xy$  平面を図 18、 $yz$  平面を図 19、 $zx$  平面を図 20 に示した。この設計では、3 方向すべてでバランスの取れたトラップポテンシャルが形成され、対称性の向上および金属遮蔽の影響の排除が達成されていることが確認された。

### 【改善モデルのシミュレーション】

次に、このテトラポッド型のモデルを用いて、 $z$  軸の高さを変化させながら有効ポテンシャル分布を計算した。その結果を図 21 から図 26 に示し、順に  $z = 0, 1, 2, 3, 5, 10$  mm の高さにおける有効ポテンシャル分布を表している。

すべての結果において、原点付近でポテンシャルが最も低いことが確認された。また、 $z = 0$  mm のときには  $z$  軸上のポテンシャルも低いことが示されており、直流電圧を適切に操作することでシャットリングが可能なのであることが示唆された。

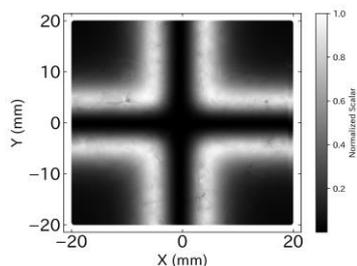


図 21 :  $z = 0$  mm 面での有効ポテンシャル

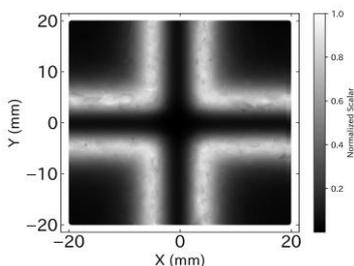


図 22 :  $z = 1$  mm 面での有効ポテンシャル

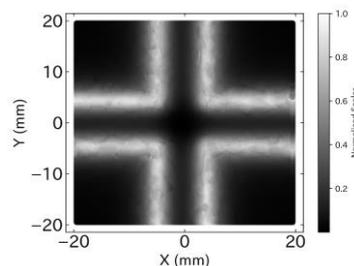


図 23 :  $z = 2$  mm 面での有効ポテンシャル

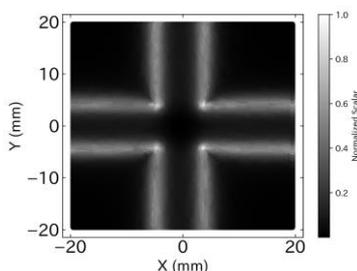


図 24 :  $z = 3$  mm 面での有効ポテンシャル

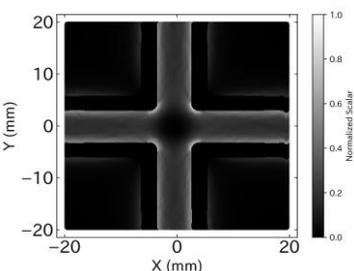


図 25 :  $z = 5$  mm 面での有効ポテンシャル

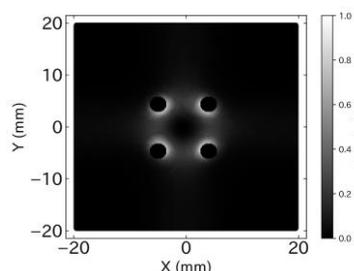


図 26 :  $z = 10$  mm 面での有効ポテンシャル

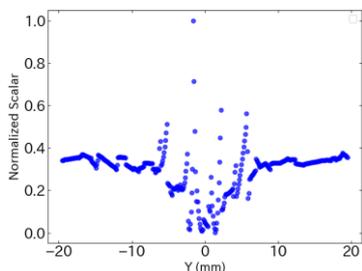


図 27 :  $x=0$  上の有効ポテンシャル

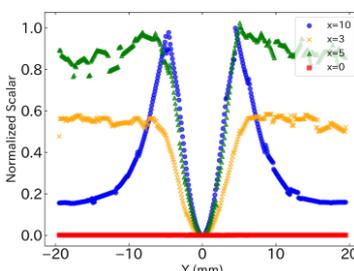


図 28 :  $x=0, 3, 5, 10$  mm 上の有効ポテンシャル

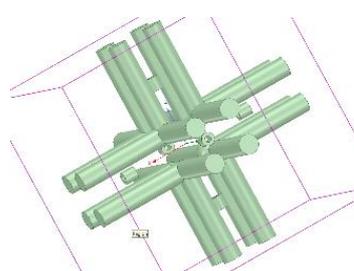


図 29 : 直流電極を配置したモデル図

**【改善モデルの直線プロット】**

今までのプロットでは、ポテンシャルの全体的な傾向を把握できた。ここからは、より詳細なポテンシャルの状態を解析するために軸上のポテンシャル分布をプロットした。図 18 と同様のデータを使い、y 軸上のポテンシャルを図 27 に示した。規格化前のポテンシャル値は全体として小さな値を示していたが、原点付近に凹凸が見られ、その原因についてはさらなる検討が必要である。

また、 $x = 0$  mm、3 mm、5 mm、10 mm と変化させた場合の y 軸上のポテンシャルを図 28 にプロットした。赤い四角のプロットは、図 27 と同じデータのプロットである。スケールの観点から、原点付近での凹凸は数値誤差である可能性が高いと考えられる。この点については、実験の実際挙動を確認し、考察を行った。

さらに、 $x$  の値に依存せず、 $y = 0$  mm 付近のポテンシャルが最も低いことが確認された。また、y 軸から離れると、x 方向の電極の影響により、M 字状のポテンシャル分布を示すことが確認された。

### 【直流電圧印加のシミュレーション】

最後に、図 29 に示すように各方向の四重極リニアの端の中心に直流電極を配置し、x 軸上の直流電圧を印加した際のシミュレーションを行った。rf 電圧は 1 kV、直流電圧は 500 V とした。xy 平面の有効ポテンシャルは図 30 にしめし、z 軸および x 軸上の有効ポテンシャルをそれぞれ図 31 と図 32 に示した。

図 30 を見ると、全体的にポテンシャルの変化が小さく、交流電圧印加の場合と比べて明確な変化は確認できなかった。また、直流電極が配置されている  $(x, z) = (10, 0), (-10, 0)$  付近にでも顕著なポテンシャルの変化は観察されなかった。

一方で直線プロットを見ると、ポテンシャルの変化がより明確に示された。図 31 では  $x = 10$  mm および  $z = -10$  mm 付近 2 つの大きなピークが確認され、これは円筒形の直流電極の端部の影響に

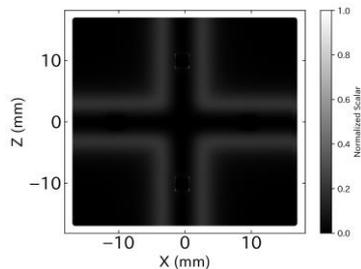


図 30 : rf 電圧と DC 電圧を印加したときのポテンシャル図

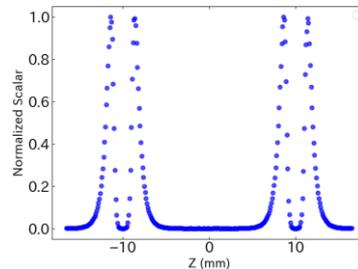


図 31 : DC 電圧印加時の z 軸の有効ポテンシャル

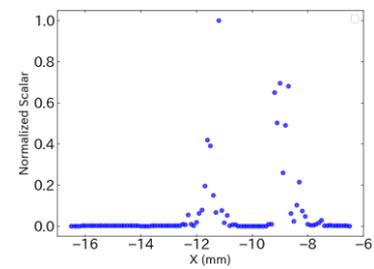


図 32 : DC 電圧印加時の x 軸の有効ポテンシャル

よるものと推測される。また、原点付近では、このピークと同程度の凹凸が見られた。これについては計算誤差の可能性も考えられるが、他の要因によるものである可能性も否定できない。

さらに、直流電極のサイズが小さいため、ポテンシャルへの寄与が限定的になったと考えられる。しかし、設計の実現可能性やレーザーを通して粒子を観測するための要件を考慮すると、直流電極の形状は現状で適切であると判断した。また、図 32 に示すように、電圧を印加していない x 軸上の直流電極は、周囲の影響により僅かにポテンシャルが上昇していた。

以上のシミュレーションの結果より、いくつかの考察が必要な箇所はあるものの、電極の設計はテトラポッド型で適切であると判断した。この結果を踏まえ、次の段階として実験装置の具体的な設計を進めた。

## 3.3 設計と制作

### 3.3.1 電極の最終形状

設計を開始した当初、当初設計した電極形状をそのまま作製することは技術的に困難であることが判明した。非常に小さな電極棒を直角に接続し、高電圧を印加する必要があるため、既存のパーツでは対応できず、材料加工による作製も困難であった。このため、電極を立方体の金属を 8 個組み合わせた構造に変更する案を採用した。この変更後の電極構造を図 33 に、ポテンシャルのプロットを図 34 に示した。この変更により、対称性が維持され、遮蔽の影響も回避されていることが確認された。

一方で、リニアトラップを形成する立方体部分が双曲面形状ではなくなるため、形成されるポテンシャルに予期せぬ影響が及ぶ可能性がある。この点については、実際の実験結果を基に詳細な考察を行

った。

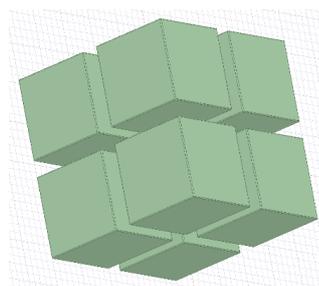


図 33 : 立方体を用いた  
電極モデル

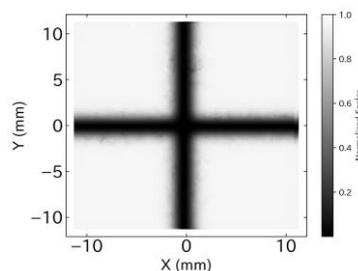


図 34 : 図 33 のモデルの  
有効ポテンシャル

### 3.3.2 模型作成・3D モデリング・材料および加工

まず、図 35 に示す簡易模型を作成し、設計の概要を検証した。直流電極については、アクリル製の十字スペーサーの中心に埋め込む構造とした。次に、Blender を用いて図 36 および図 37 のような 3D モデリングを行い、必要な材料の調達を行った。また、3D プリンターによる部品作成や、レーザーカッターおよびフライス盤での加工が必要な部分については、3D CAD を用いてデータおよび図面を作成した。

電極の材料としては、rf 電極にジュラルミン、DC 電極に真鍮を使用した。絶縁体部分はアクリル板と PLA を用いて作成し、実験の安全性を確保するため、アクリル製のカバーでトラップ装置全体を覆う構造とした。



図 35 : 模型 2

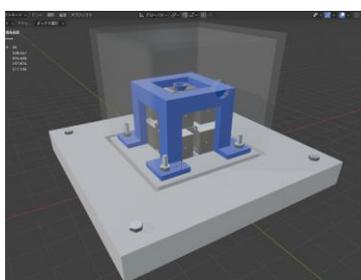


図 36 : 3D モデリング俯瞰

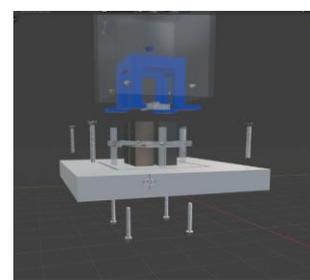


図 37 : 3D モデリング分解

## 3.4 トラップ実験

### 3.4.1 実験装置のセットアップ

最終設計に基づき回路図を作成し、トラップ装置の組み立てと実験系の構築を行った。実験系の概要図は図 38 のとおりであり、実際に作成したトラップ装置と実験系の様子を図 39 に示した。

ヘリウムネオンレーザーを用い、円筒形の直流電極の穴を通して前方から後方にレーザーを照射することで、微粒子が光軸上にあるときに散乱光が生じ、微粒子の存在を確認できる。

直流電極は、図 38 に示すようにトラップ装置の前後、左右、上下の 6 方向に配置されており、それぞれ独立した直流電圧源に接続されている。また、交流電源はトラップポテンシャルを形成するため、隣接する電極に印加される電圧が同じ値にならないように設計されている。一部の電極は GND に接続され、他はアンプで増幅された交流電圧 (最大振幅  $V_{amp} = 1.5kV$ ) に接続されている。

微粒子の測定は、レンズとカメラを用いて行った。撮影画像では、右側が装置の後方、左側がレーザーの入射部に対応しており、光軸上にピントを合わせた状態で撮影している。この方法により、レーザーが照射されている部分に限り、粒子の状態を観測することができた。

### 3.4.2 実験方法

まず、交流電圧のみを用いて実験を行った。ファンクションジェネレータで電圧と周波数を変化させ、トラップ装置に印加する電圧値を 700 V から 1.5 kV までおよそ 100 V 間隔で変化させた。さらに、それぞれの電圧値において周波数を 1 Hz から 250 Hz まで 10 Hz 間隔で変化させ、粒子の挙動をカメラで観測した。トラップが確認できなかった場合には、他の周波数や電圧値でも追加の実

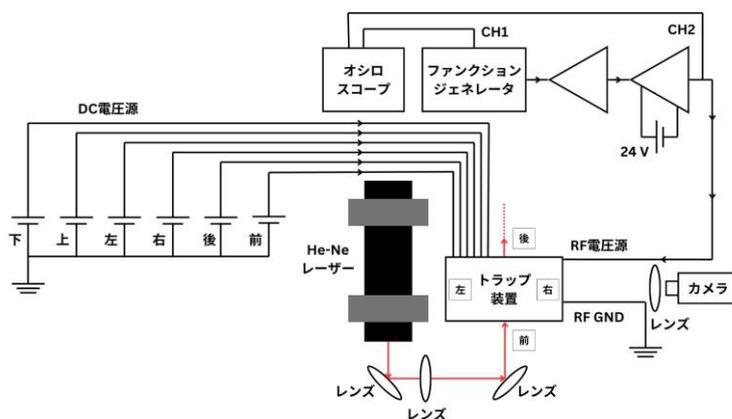


図 38：実験装置の概要

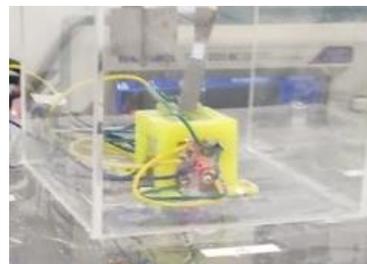


図 39：実験装置の様子

験を実施した。

このとき使用した微粒子はポリスチレン微粒子であり、粒子径はおよそ  $1 \mu\text{m}$  のものと  $0.3 \mu\text{m}$  の 2 種類である。 $0.3 \mu\text{m}$  の粒子については、コロイド溶液を乾燥させて使用したため、乾燥過程で粒子が凝集し、 $0.3 \mu\text{m}$  を超えるサイズの粒子が含まれる可能性があると考えられる。微粒子は、スポイトを接続したチューブを通じて装置の上部から吹き込む方法を採用した。

### 3.4.3 実験結果・考察

#### 【微粒子観測の確認】

まず、粒子が装置内部に適切に導入されることを確認した。試験的に設定した電圧と周波数において粒子を装置内に投入したところ、図 40 に示す画像を取得した。装置内で巻き上がりながら落下する粒子の中で、レーザー光軸上に位置する粒子が散乱光を発していることが確認された。

#### 【トラップ条件の探索】

次に、トラップ条件を特定するため、電圧値を 700 V から 1.5 kV までおよそ 100 V 間隔で変化させ、さらにそれぞれの電圧値において周波数を 1 Hz から 250 Hz まで 10 Hz 間隔で変化させた。その結果、どの条件においても微粒子がトラップされないことが確認された。

粒子を吹き込んだ直後は、吹き込みによる風の影響で運動エネルギーが大きく、すぐに落下した。1 分ほど経過すると風の影響は収まり、粒子の落下速度は非常に遅くなったが、トラップされることはなく、ゆっくりと落下して最終的にレーザー光の範囲外へ移動した。

また、3.3.2 節で観察された原点付近のノイズについては、原点付近およびその周辺で微粒子の動きに変化が見られなかったことから、計算誤差によるものであり、実験結果に影響を及ぼさないことが確認された。

トラップされない原因として、ポテンシャルが十分に深くないことや、 $q, a$  パラメータの値が安定領域を外れている可能性が考えられる。アンプの性能の制約によりポテンシャルをこれ以上深くすることは困難であったが、周波数を 1000 Hz 程度まで上昇させ、 $q$  および  $a$  パラメータの値を小さくするよう調整を試みた。しかし、トラップの状態に顕著な変化は確認されなかった。

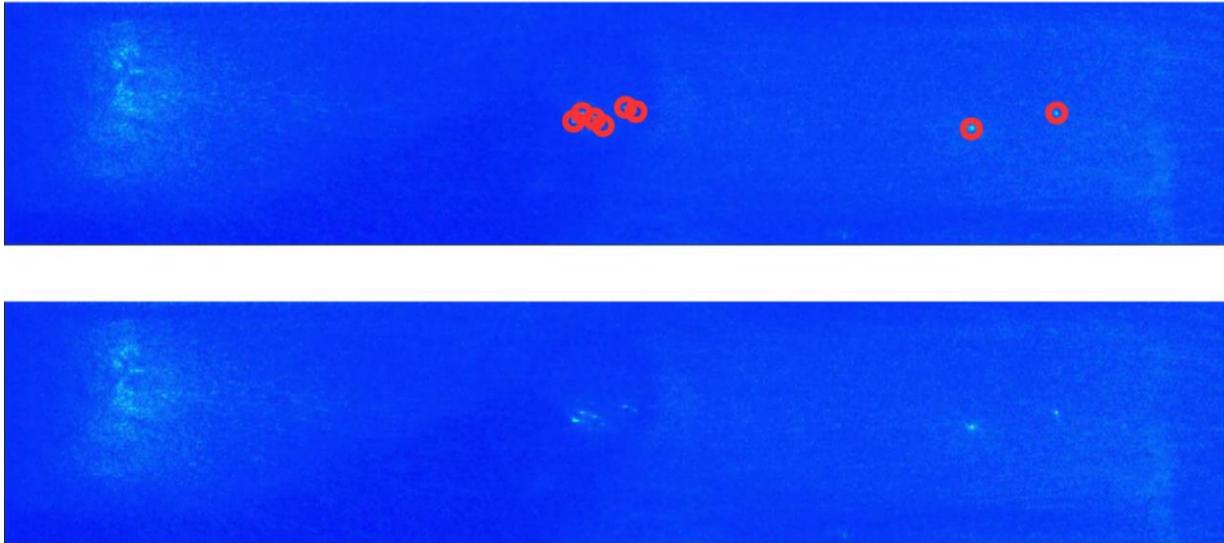


図 40：微粒子をカメラで撮影したもの（上）と微粒子の位置を赤い丸で示したもの（下）

#### 【低周波での電圧印加の確認】

田中グループでの先行研究によれば、電圧値は 1 kV から 1.5 kV、周波数は数十 Hz から 200 Hz の範囲に収まるとされている。そのため、前提条件として電圧が正しく印加されていること、および微粒子が電荷を帯びていることの確認を行った。

1 Hz から 3 Hz の範囲で観測を行った結果、周波数に合わせて微粒子が上下に揺れる様子が確認された。これにより、微粒子が電荷を帯びており、交流電圧の影響を受けていることが示された。また、微粒子は上下に揺れながらも徐々に下に落下していく様子が観測された。10 Hz 程度までは微粒子の揺れが確認され、尺取虫のような動きをしながら徐々に落下していく様子が観測された。さらに、原点から離れた場所では端部の影響を受け、上下ではなく斜めに揺れる様子が確認された。

[3]

#### 【端の粒子の動きについて】

後方の端部に位置する粒子は、高周波を印加した場合でも他の場所とは異なる挙動を示し、落下するのではなく直流電極の方向に向かい、装置外へ移動するような動きが観察された。端部の影響について、直流電圧を印加することでより具体的な情報を得るための実験を実施した。

端部の粒子の動きが顕著に観察できる後方および前方の直流電極に対し、前方には 120 V、後方には 360 V の直流電圧を印加した。この結果、引き続き粒子が装置外に向かう動きや、上下ではなく斜めや左右に大きく揺れる様子が確認された。また、外側に引き寄せられる力が若干強くなったことから、微粒子が負の電荷を帯びている可能性があるかと推測された。

次に、同じ大きさで負の直流電圧を印加した。この場合、粒子が装置外へ引き寄せられる動きは観察されなくなり、微粒子が負の電荷を帯びていることが示唆された。

以上の結果より、電圧が適切に印加されていることが確認されたが、微粒子がトラップされない原因は他に存在することが示された。特に、双曲面形状ではない電極設計についてさらなる検証が必要である。

## 5 結論

本研究では、四重極リニアトラップの三次元拡張を目指し、電極設計および理論的な検証を行った。しかし、微粒子を安定的にトラップする当初の目標は達成に至らなかったものの、電極設計における重要な課題が明らかになり、今後の改良に向けた有益な知見を得ることができた。

特に、本研究では双曲面電極ではなく立方体状の電極を採用したため、従来の理論で用いられるポテンシャル近似式が適用できず、ポテンシャル分布が設計から逸脱していることが判明した。双曲面電極では理想的な四重極ポテンシャルが近似的に成立するが、立方体電極ではその形状の影響によりポテンシャルの深さ、対称性、および安定性が十分に確保されなかった。このため、微粒子をトラップする条件を満たすことが困難であることが示された。

また、観測機器の分解能や視野の制限により、装置内部で微粒子が一部トラップされていた可能性を完全には否定できない。この点については、より高精度な観測機器を用いた検証が必要である。

本研究の結果は、双曲面以外の形状を用いたトラップ技術における課題を明確化し、今後の研究に向けた基礎データを提供するものとなった。特に、角形電極を用いたポテンシャル分布の理論計算の確立、加工精度の向上、および三次元的な電場設計の導入が課題として挙げられる。また、非線形項を含む詳細な解析を行うことで、より安定したトラップポテンシャルを実現できる可能性がある。

これらの知見は、量子コンピュータの大規模化や設計簡素化に関する電極設計の指針を示すものであり、本研究の成果はその基礎を築く重要な意義を持つと考えられる。

## 6 参考文献

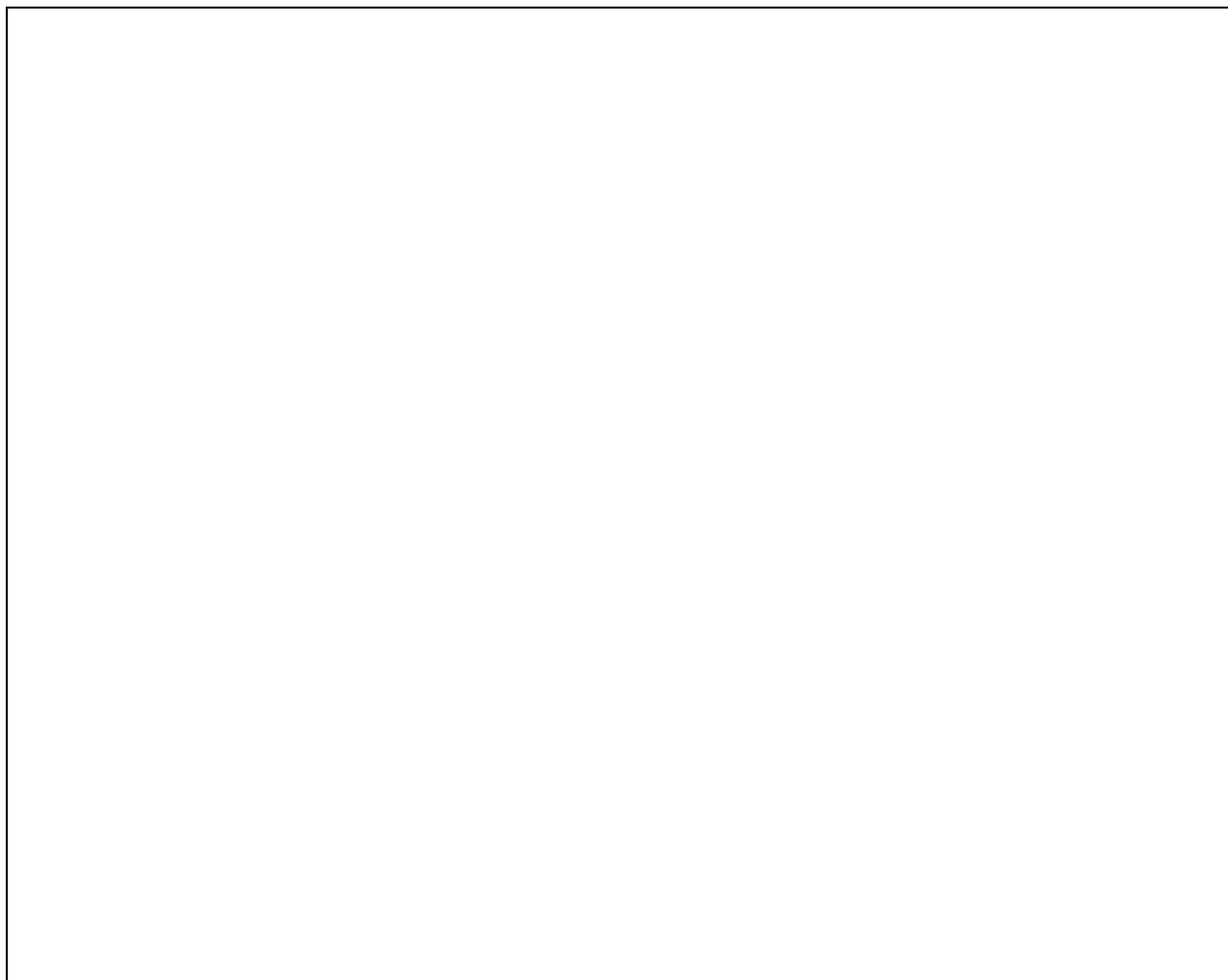
[1] MOONSHOT Research & Development Program, "ムーンショット型研究開発制度 目標 6: イオントラップによる光接続誤り耐性量子コンピュータ," [Online]. Available: <https://www.oistmoonshot.jp/>. Accessed: Dec. 19, 2024.

[2] 占部伸二, *個別量子系の物理—イオントラップと量子情報処理—*, 朝倉書店, Oct. 15, 2017, ISBN: 978-4-254-13123-9.

[3] 斎藤隆太, 酒見泰平, 柳生正義, 田中香津生, "大気壁中で使用可能なポールトラップによる微粒子の比電荷測定," [Online]. Available: <https://accel-kitchen.com/wp/wp-content/uploads/2022/07/paultrap02.pdf>. Accessed: Dec. 19, 2024.

## 7 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導をいただきました田中先生に心より感謝申し上げます。また、工作支援センターの職員の皆様、研究室の先輩方にも多大なご助力を賜りました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

A large empty rectangular box with a thin black border, occupying most of the page. It is likely a placeholder for a drawing or diagram related to the application.