



目 的

ポールトラップは振動電場を用いて電荷をもった粒子を空間に閉じ込める装置で、粒子・原子物理学の研究や量子コンピューターの手法として有用性が高い。そのため、ポールトラップは現代の最先端の物理に触れることができるツールとして国内・海外の大学の実験教材として広く用いられている^{1,2,3)}。しかし、高圧電源を用意する必要があるため、小中高の教材として活用するには調達・安全面の課題があった。

一方、中学・高校では素粒子・原子物理に関連した実験教材はほとんどなく、また電磁場を用いた実験教材も特に振動電場を用いたものは少ない。そこで、家庭用電源のみで動作し、観察・記録用のカメラまで含むオールインワン型のポールトラップを開発した。

高圧部分もケース内に格納されており、中学・高校での演示や学生実験にも安全に活用することができる。また、目的に合わせて3種類の異なるトラップを利用でき、そのうちリング型はトラップ電極を自分で針金を折り曲げて手軽に作製可能で、電極の形による振動電場分布の違いを体感することができる。

概 要

I. ポールトラップとは

静電場のみで荷電粒子を空間に閉じ込めることは原理上不可能だが、ポールトラップでは z 軸方向と xy 平面とで振動する電場を印加することで、それぞれの方向に交互に収束させて粒子を閉じ込める(図1)。

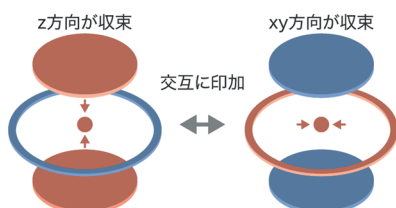


図1 ポールトラップの原理

本装置では鉄粉、小麦粉等のマイクロメートルサイズの粒子を閉じ込め、その様子をカメラで観察できる(図2)。

II. 特徴

1. 簡易: 100 V の家庭用電源のみで動作し、観察用 USB カメラも内蔵している(図2)。
2. 安価: 数万円程度の安価な価格で、中高生でも組み立てが可能である。
3. 安全: 高圧部分はケースで覆われており、電流も μA オーダーなので安全に利用できる(図3)。

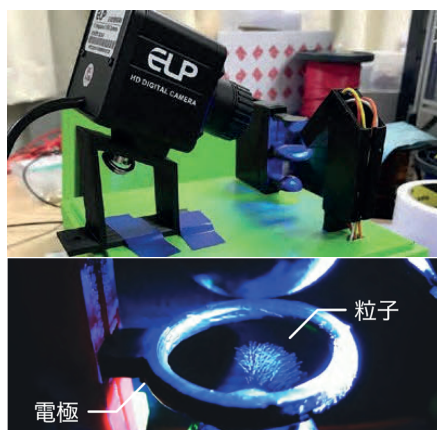


図2 トラップされた微粒子像

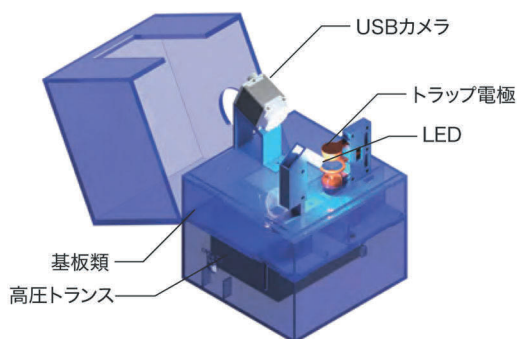


図3 ポールトラップの3Dモデル

*たなか かづお 早稲田大学理工学術院総合研究所 研究院准教授 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

E-mail tanaka@kaduo.jp

4. 拡張：目的に合わせて3種類の電極タイプを利用できる。さらにそのうちリング型は、クリップなどを折り曲げた自作のループを利用できる。

Ⅲ. 原理

リング型の場合、エンドキャップ間を z 軸、リング面を r 座標とする円柱座標系(図4のように $r_0^2 = 2z_0^2$)での電位ポテンシャルは

$$\phi = \frac{\phi_0}{2r_0^2}(x^2 + y^2 - 2z^2) = \frac{\phi_0}{2r_0^2}(r^2 - 2z^2) \quad (1)$$

$$\phi_0 = V_{DC} + V_{AC} \cos \Omega t$$

であり、このとき電荷 Q 、質量 m の粒子の運動方程式は以下ようになる。

$$r: \quad m \frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{Q}{r_0^2} (V_{DC} + V_{AC} \cos \Omega t) r \quad (2)$$

$$z: \quad m \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{2Q}{r_0^2} (V_{DC} + V_{AC} \cos \Omega t) z$$

無次元量 $\tau = \Omega t/2$ で変換すると、

$$\frac{d^2 u}{d\tau^2} + a_u - 2q_u \cos(2\tau)u = 0 \quad (u = r, z)$$

$$a_z = -\frac{Q}{m} \frac{8V_{DC}}{r_0^2 \Omega^2} = -2a_r \quad (3)$$

$$q_z = \frac{Q}{m} \frac{4V_{AC}}{r_0^2 \Omega^2} = -2q_r$$

となり、パラメーター a_z および q_z によって粒子の安定トラップ条件が決まる(図5)。本装置では家庭用交流

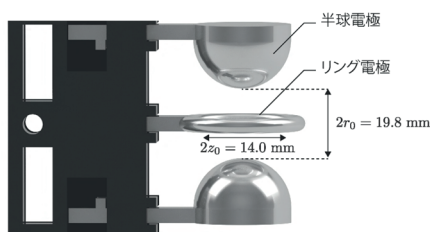


図4 電極の条件

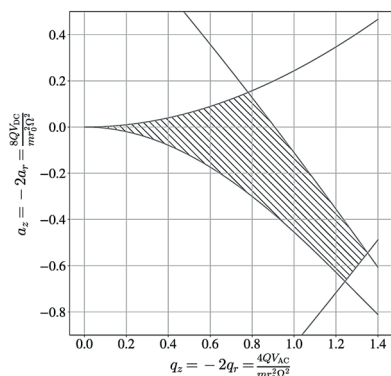


図5 トラップの安定化条件

電源(100 V)を6000 Vまで昇圧し、鉄粉、小麦粉等のマイクロメートルサイズの粒子をアクリル棒等で帯電させることで容易にトラップすることができる。

Ⅳ. トラップの種類

1. リングトラップ

リング形状のトラップ(図2)。リングを様々な形に付け替え可能で、トラップの形状によるトラップ粒子の形状の違いなどを観察することができる。

2. リニアトラップ(横)

横方向に4つの棒電極が並んだ構造(図6)。個々の粒子の軌道を観察しやすい。粒子数を増やすとTrapnadoと呼ばれる粒子集団運動を観察できる。

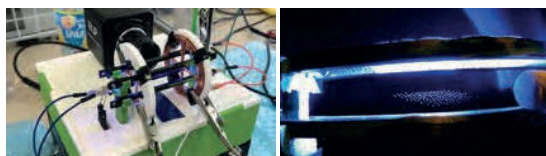


図6 リニアトラップ(横)

3. リニアトラップ(縦)

縦方向に電極が並んだ構造(図7)。底面の電極の静電場と重力でつり合いを測定したり、その状態で強制振動をおこすことで質量電荷比の測定ができる。

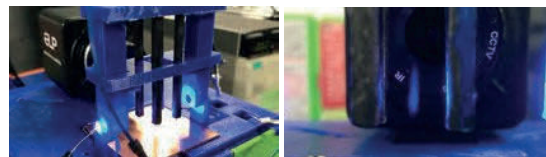


図7 リニアトラップ(縦)

学習指導方法

Ⅰ. トラップ電極形状による違い(小学理科～高校物理)

リング型電極の場合は、自分で針金でつくった電極に交換することができる。例えばゼムクリップを折り曲げることで、三角や四角といった形状のリングにおいてどのような電場ポテンシャルが生成し、トラップ集団がどのような形になるかを観察できる(図8)。

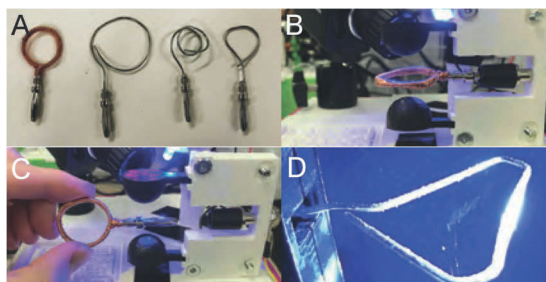


図8 トラップ電極を手作りで製作し交換できる(A-C)。針金を鋭角な三角形にすることで、トラップされた粒子集団はそれに沿った形になる(D)。

II. 比電荷測定 (高校物理)

1. 静電場によるつりあいでの比電荷測定方法

リニアトラップ (縦) 型では z 方向に重力と底電極の電場由来のクーロン力が釣り合っている (図 9)。

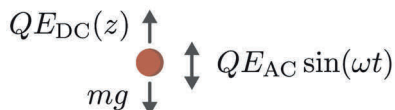


図 9 底電極によるクーロン力と重力の釣り合い

図 10 は、底電極に印加した電圧ごとに測定したトラップ粒子の z 方向の位置を表している。底電極から受ける静電場 $E_{DC}(z)$ は z に対して指数関数的に減衰するため (図 11)、電圧を大きくすると粒子位置は上昇し、この関係から比電荷 Q/m を導出することができる (図 10 の例では $Q/m = (8.3 \pm 0.2) \times 10^{-4} \text{ C/kg}$)。

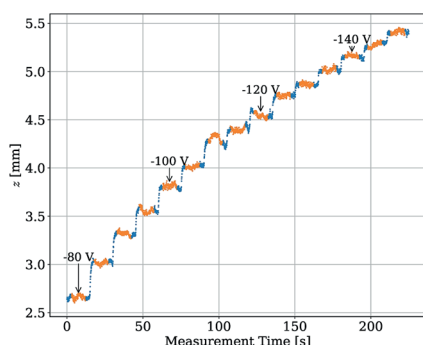


図 10 底電極の電圧と粒子位置の関係

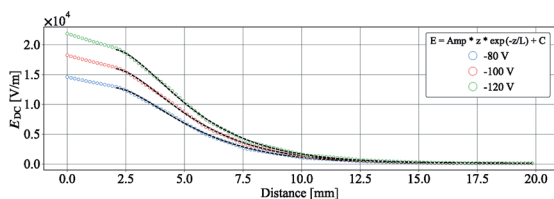


図 11 CST STUDIO で計算した印加電圧 V_{DC} に対する電場分布 E_{DC} の関係

2. 強制振動を用いた比電荷測定方法

静電場による粒子のつり合いに加えて、振動電場を底電極から印加することで粒子の強制振動を起こすことができる。この時の運動方程式および粒子の軌道は粘性係数 k を用いて、

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -k \frac{dr}{dt} + QE_{AC} \sin(\omega t), \quad (4)$$

$$z = A \sin(\omega t + \omega_0)$$

と表すことができ、振動振幅は

$$A = \frac{QE_{AC}}{k\omega} \left[1 + \left(\frac{m\omega}{k} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \approx \frac{QE_{AC}}{m} \frac{1}{k\omega} \quad (5)$$

となる。このように、底電極の振動電場の周波数を変えながら振動振幅を測定することで比電荷を導出できる。図 12 は振動電場の周波数を変化させながら測定した粒子の振幅で、上記の式で表されるように反比例の関係があることがわかる。図 12 の例では $Q/m = (3.5 \pm 0.1) \times 10^{-3} \text{ C/kg}$ となる。

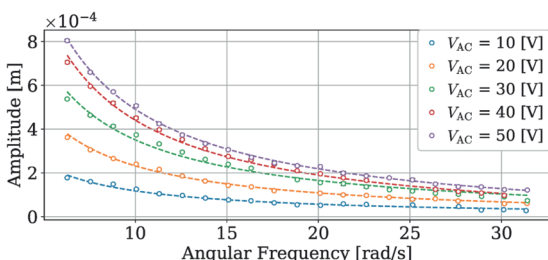


図 12 振動電場と振幅の関係

III. 粒子による違い (小学理科～高校物理)

本ポールトラップはマイクロメートルオーダーの帯電可能なあらゆる粒子をトラップ可能で、実例として鉄粉、塩、砂糖、小麦粉、花粉等があげられる。一例として薄力粉、中力粉、強力粉をそれぞれ同じリニアトラップで閉じ込め、それぞれの比電荷の違いに由来する軌道の振幅の違いを観察することができる。高校生以上の場合には前述したような定量的な比電荷推定が可能であるが、小学生～中学生の場合も直接同じトラップで比較を行うことで定性的な電荷の違いを発見するような探究学習ができる。

IV. トラップ電圧による軌道の違いの観察 (中学理科～高校物理)

トラップ電圧を変えながら、トラップされた粒子の軌道から振幅の変化を観察できる。最も安定な条件からトラップ電圧を変化させると振幅が次第に大きくなり、やがてトラップの構造物に衝突してトラップ内から外れる (図 13)。備え付けたカメラは 30 fps のため、家庭用交流電源 (50 Hz、60 Hz) でトラップされた粒子は軌跡として観察されるが、別途 240 fps 程度でスローモーションで撮影すると、粒子が運動している様子が観察でき、実際に振動電場によってトラップされていることが目視できる。



図 13 トラップ電圧を徐々に大きくしたときのトラップされた粒子の軌道

V. 粒子の集団運動の観察 (小学理科～高校物理)

帯電した粒子はポールトラップによって束縛されながら互いにクーロン力を感じて一定の距離で規則的に配列する。これをクーロン結晶といい、トラップ粒子

数を最適化することで様々な結晶構造をつくることのできる(図14)。また、初期の運動状態によって、粒子がプラズマ的に集団運動を起こす。これを Trapnado といい、腹・節構造をもった任意のモードを観察することができる。

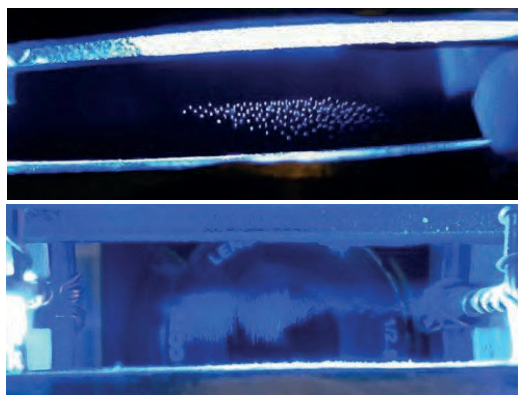


図14 各粒子が互いにクーロン力を感じて規則的に配列しクーロン結晶化(上)、粒子が Trapnado という集団運動を行う様子(下)

実践効果

I. 授業での演示実験としての実践

2021年2月26日に、早稲田大学本庄高等学院の高校2年生の授業においてリング型ポルトラップを用いた演示授業の実践を行った。コロナ禍のためオンラインで授業を行い、教員が教室で実演を行い、トラップ像を画面共有を用いて生徒に配信する方式で行った。「どれぐらいの大きさまでトラップできるのか」、「粒子運動のシミュレーションはどのようなジオメトリを想定しているのか」等踏み込んだ質問も多く、高校生がこの授業においてトラップの仕組み等を理解できていることが伝わった。

II. ポルトラップを用いた授業というテーマで行った探究活動事例

早稲田大学本庄高等学院の高校3年生が探究活動として、ポルトラップを用いた授業開発および実践に取り組んだ。合計2回の研究授業を行い、そのフィードバックをもとにポルトラップを活用した授業案作成を卒業課題として行った。加速キッチン合同会社(<https://accel-kitchen.com/>)によるオンラインサポートのみで高校生が使いこなし、本ポルトラップが十分簡易的で高校生でも実験可能であることを示している。

III. 探究活動利用を想定した大学生による実践

東北大学の学部1年生(2020年当時)に、中高生の探究活動を想定して昇圧トランス(UFO-6K-001-P100、UNION ELECTRIC)を用いて、ポルトラップの作製およびこれを用いた比電荷測定に取り組んでも

らった。本稿に記載したリニア(縦)型を用いた方法に加えて、独自の手法を考案してリング型でも比電荷測定に成功し、リニア(縦)型と矛盾がないことを示した。本活動は日本物理学会第76回年次大会にて当該学生が発表を行い、最年少での学生優秀発表賞を受賞している。

IV. 科学イベント等での展示

これまで東京大学のオープンキャンパス、理化学研究所一般公開、仙台市科学館で行われたアースサイエンスウィークのブース展示等、様々な学校・教育機関のブース展示を行い、多くの参加者に紹介を行ってきた(図15、16)。

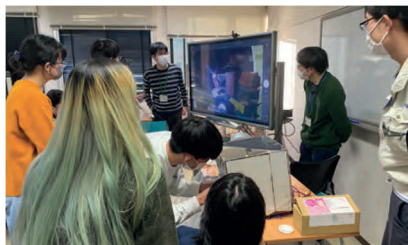


図15 東京大学原子核科学研究センターでの授業内実演



図16 仙台市科学館での展示

その他補遺事項

本ポルトラップの製作活動は東北大学理学部学生の齋藤隆太氏を中心として加速キッチン合同会社に関わる多くの大学生・大学院生によって行われたものである。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 中野健一他：大学の物理教育, 20, S46 (2014).
- 2) K. G. Libbrecht et al.: American Journal of Physics, 86, 539 (2018).
- 3) L. McGinness et al.: Journal of Open Hardware, 3, 1 (2019).