

非線形ビームダイナミクス研究を目的とした改良型ポールトラップ

A MODIFIED LINEAR PAUL TRAP FOR NONLINEAR BEAM-DYNAMICS STUDIES

伊藤清一*, 青木将晃, 檜垣浩之, 岡本宏己

Kiyokazu Ito*, Masaaki Aoki, Hiroyuki Higaki, Hiromi Okamoto
AdSM, Hiroshima Univ.

Abstract

S-POD (Simulator of Particle Orbit Dynamics) is a non-neutral plasma trap system devised at Hiroshima University to investigate fundamental aspects of space-charge-dominated beam dynamics. Either linear Paul traps or Penning traps have been employed in current systems. For a wider range of beam dynamics studies, we are now developing a modified linear Paul trap which has four extra electrodes in addition to quadrupole electrodes. It can control the strengths and time structure of low-order nonlinear fields independently of the transverse linear quadrupole field. We report on an overview of the design and progress.

1. 序論

加速器中を走行する荷電粒子ビームと荷電粒子トラップ中に捕捉された非中性プラズマの運動は空間電荷効果を考慮しても物理的に等価である。即ち、加速器ビームの運動を非中性プラズマを用いて模擬的に実験することが可能である [1, 2]。広島大学では、小型非中性プラズマトラップシステム“S-POD (Simulator of Particle Orbit Dynamics)”を開発しビームダイナミクスの実験的基礎研究を展開している [3-6]。非中性プラズマを用いた実験には、パラメータの制御性が高く、その可変範囲も広い、現象が眼前で進行するので観測が容易である、放射化の心配が無い、安価である等の多くの利点がある。特に線形ポールトラップ (LPT) は四重極高周波電場により断面方向にイオンプラズマを捕捉するが、その原理は強収束の原理と全く等価である。従って、強収束型の加速器と直接的に対応づけることが可能である。

実際の加速器には四重極場が作る線形力だけでなく、例えば、軌道補正用の六重極場や電磁石の加工・設置誤差に起因する多重極場が作る非線形力も存在する。通常、これらの成分は非常に小さく抑えられている。しかしながら、円形加速器中を周回するビームではこれらの非線形力を繰り返し受けることになる。そのため、特定の条件下で非線形共鳴が励起されビームは不安定化する。非線形共鳴には断面方向の2自由度 (x と y) の結合による結合共鳴も存在するため、ビームが安定に周回できるパラメータ領域を著しく狭小化する。

当然、加速器の動作点はこれらを避けるように設定しなければならない。単粒子の場合には理論・数値計算により理解が十分に進んでおり、その共鳴条件や成長率を容易に予測することが可能である。しかし、空間電荷効果が支配的なビームの場合、その挙動についての理解は十分ではなく、これらを正確に予測することは非常に難しい。その一方で、通常は邪魔者扱いされるこれら非線形力を上手く活用することでより高性能な加速器を建設できるとの指摘もあり、これを実証するための加速器実験計画も進行中である [7]。いずれにしても、加速器ビームの更なる高性能化を目指すには、空間電荷効果と非線

形力の作用を深く理解しなければならない。

S-POD を含む一般の LPT では4本の円柱電極に高周波電圧を印加することで四重極場を励起する。そのため、設置誤差や電極形状に起因する非線形力は存在するが、これを線形力と独立に制御することは出来ない。最近、線形力とは独立に低次の非線形力を励起するために、四重極電極に補助電極を追加した LPT が提案された [8]。広島大学では、このコンセプトに基づいた改良型 LPT を開発中である。ここでは、改良型 LPT の概要とその閉じ込め性能について報告する。

2. 改良型線形ポールトラップの設計と製作

通常の LPT の断面図を Fig. 1(a) に示す。四重極電極に適切な高周波 (rf) 電圧を印加することで実効的な収束場を形成する。ここで、rf の波長は LPT の特徴的な長さよりも十分に長いとし、静電場近似を導入する。また、電極の軸方向長さは電極の断面方向サイズに比べ十分に長いとし、2次元の近似も導入する。LPT に捕捉されたイオンプラズマの断面方向の集団運動は次のハミルトニアンで表される。

$$H = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2} + \frac{1}{2}K(\tau)(x^2 - y^2) + \delta V(x, y; \tau) + I_c \phi_{sc}(x, y; \tau) \quad (1)$$

ここで、 $\tau = ct$ であり、 t は時間、 c は光速、 I_c はイオン種に依存する定数、 ϕ_{sc} はイオンプラズマの自己場である。 K は四重極電極に印加した電圧に比例する関数である。 δV は四重極場以外の多重極場であり、通常の LPT では電極の加工・設置誤差等により発生する。Equation (1) は強収束系のビーム運動を表すハミルトニアンと等価である。

電極に印加した rf の作る静電ポテンシャル $\phi_{rf}(x, y; t)$ についてもう少し詳しく検討する。前述の近似のもとでは、 $\phi_{rf}(x, y; t) = F(x, y)T(t)$ と分離することができ、 $F(x, y)$ はラプラス方程式を満たす。 $F(x, y)$ を極座標形式で表すと次のようになる。

$$F(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \left(\frac{r}{R_0} \right)^n \cos(n\theta + \varphi_n) \quad (2)$$

* kzito@hiroshima-u.ac.jp

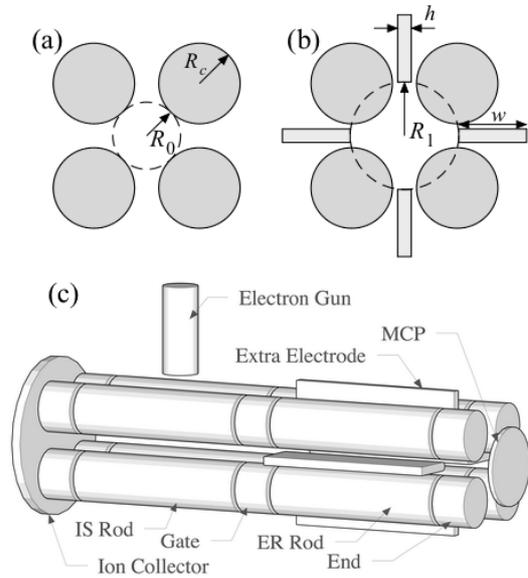


Figure 1: Cross sectional view of (a) a regular Paul trap and (b) a multipole trap. (c) Schematic of the ion trap for a study of nonlinear beam dynamics.

ここで、 a_n と φ_n はそれぞれ場の強さと傾きを表す定数であり、 R_0 は四重極電極に内接する円の半径である。 n は自然数であり、 $2n$ が極数になる。従って、 $n = 2$ の項が四重極場、すなわち Eq. (1) の K に対応し、 $n \neq 2$ の項が δV に対応する。

電極形状が双曲線であり、完全に四回対称性を持つように配置されていれば四重極場のみを励起できる。ただし、多くの場合、加工の容易さから円柱型の電極が LPT には採用されており、S-POD も同様である。この場合は、電極が理想的に設置されていても $n = 6, 10, 14, \dots$ の多重極場が存在する。最も低次の $n = 6$ (十二重極) に関しては、円柱電極の半径を R_c とすると、 $R_c = 1.15R_0$ の時に a_6 が最小となることが知られている。S-POD でもこの関係を満たすように作られている。実際にはこれらに加え電極の加工・設置誤差による多重極場も存在する。前述のように、これらの多重極場は四重極場と独立に制御することは出来ない。

$n = 1$ の双極場は四重極電極のみでも、四重極場と独立に制御可能である [4]。一方、 $n > 2$ の場合は、単純には電極数を増やしてそれに四重極場とは別の構造を持った rf 電圧を印加すれば良い。参考文献 [8] によれば、Fig. 1(b) に示すように四重極電極に 4 つの補助電極を追加し、これらに適切な組み合わせの電圧を印加することで、四重極場に六重極場 ($n = 3$) と八重極場 ($n = 4$) をそれぞれ選択的に重畳することが可能となる。また、補助電極を接地して四重極電極のみに電圧を印加 (四重極モード) すると、補助電極がない場合に比べ a_6 を更に減少させることも可能である。 a_6 を最も小さくするための補助電極の厚み h と、補助電極に内接する円の半径 R_1 の関係は次式で与えられる。

$$\frac{R_1}{R_0} = 1.948 + 0.153 \log \frac{h}{R_0} \quad (3)$$

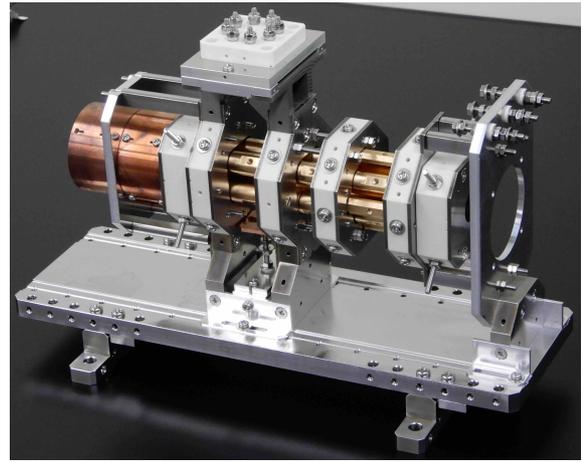


Figure 2: The constructed multipole trap; however, the electron gun and the MCP are unmounted in this photo.

ただし、通常の LPT と同様、 $R_c = 1.15R_0$ である。

上の条件下で、六重極場重畳モード時に補助電極に印加する電圧を V_S 、四重極電極に印加する電圧を V_Q とすると、六重極場と四重極場の比は次の式で与えられる。

$$\frac{a_3}{a_2} = 0.0135 \frac{V_S}{V_Q} \left(\frac{h}{R_0} \right)^{-0.454} \quad (4)$$

同様に八重極場重畳モード時に補助電極に印加する電圧を V_O とすると、八重極場と四重極場の比は次のようになる。

$$\frac{a_4}{a_2} = 0.0166 \frac{V_O}{V_Q} \left(\frac{h}{R_0} \right)^{-0.441} \quad (5)$$

以上を参考に、S-POD 用にデザインした改良型 LPT (Md-LPT) の模式図を Fig. 1(c) に示す。四重極電極は軸方向に 5 つに分割されており、主にイオンを生成する Ion Source (IS) と生成されたイオンを蓄積し実験を行う Experiment Region (ER) の二つの LPT をつなげた構造となっている。補助電極は ER にのみ設置しており、これを除けば、これまでの S-POD で使用してきた LPT (Rg-LPT) とほぼ同じ構造である。

実際に製作した Md-LPT の写真を Fig. 2 に示す。右側が ER、左側が IS である。Rg-LPT と同様に捕捉領域の半径は $R_0 = 5$ mm、四重極電極の半径は $R_c = 5.75$ mm とした。各部電極の軸方向長さはそれぞれ、 $L_{IS} = L_{ER} = 50$ mm、 $L_{Gate} = L_{End} = 14$ mm である。これらの電極は 0.5 mm の間隔を空けて配置されている。

ER 領域の断面方向を拡大した写真を Fig. 3 に示す。四重極電極間の最短距離は約 3.7 mm であり、当然、 h はこれより薄くなければならぬ。補助電極への電圧印加には四重極場印加と同性能の rf アンプを用いるとして、 $V_S \approx V_Q$ 、 $V_O \approx V_Q$ と、 a_3 と a_4 を a_2 の数 % 程度励起できれば、我々の当面の目的のためには十分である。従って、補助電極の厚みを $h = 1$ mm とし、 $R_1 = 8.5$ mm とした。参考文献 [8] では h は補助電極の端から端まで、一定値である。実際には Fig. 3 に示すように外側の端を太くすることで歪みや反りを抑制すると

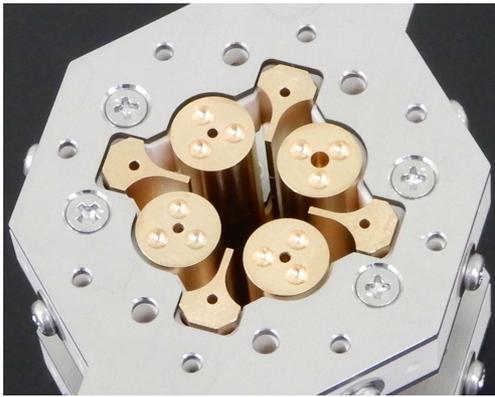


Figure 3: Close up view of the quadrupole and extra electrodes of the ER.

ともに、固定を容易にしている。なお、この変形が六重極場や八重極場の励起に影響を与えないことは数値計算により確認済みである。

四重極電極と補助電極は銅を母材とし、表面に金メッキが施してある。これをマシナブルセラミックスを切削加工したマウントに保持している。これにより、加工・設置精度を機械加工精度 ($\pm 20 \mu\text{m}$) で実現している。

3. 閉じ込め性能の評価

ここでは、本格的な六、八重極場の重畳実験に先立ち行った、これらを重畳しない四重極モードでの Md-LPT の閉じ込め特性評価について報告する。実験に用いるイオン種は何でも良いが、これまでの S-POD 実験と同様に Ar^+ を採用した。以下に典型的な実験手順を示す。

1. Md-LPT を設置したベース圧力 $P_0 < 10^{-7} \text{ Pa}$ の真空容器中に Ar ガスを導入する。
2. 各四重極電極に振幅 V_Q 、周波数 $f_Q = 1 \text{ MHz}$ の正弦波電圧を、End 電極にはこれに加え直流電圧 $V_{\text{plug}} = 20 \text{ V}$ も印加してイオン捕捉のためのポテンシャルを形成する。
3. 電子ビーム (135 eV , $\sim 100 \mu\text{A}$) を IS へと打ち込み、生成した Ar^+ を ER へと流し込む。
4. 電子ビームを止めると同時に Gate にも $V_{\text{plug}} = 20 \text{ V}$ を印加し、イオンプラズマを ER のみに閉じ込める。
5. ER にイオンプラズマを適当な時間閉じ込めた後、検出器へと排出し残存イオン数を測定する。

なお、従来の S-POD 実験ではイオン生成から閉じ込めまでの過程を IS のみで行っている。

加速器のラティス構造に相当するのは LPT においては高周波の波形である。S-POD では実際の加速器のラティス構造により近づけるために、高周波として矩形波を印加することも可能である。最も基本的な構造である“FODO”を正弦波で良く再現できることを実験と理論から確かめている [5]。そのため本実験では、より単純で取り扱いの容易な正弦波を採用した。捕捉イオンが Ar^+ の場合、 $f_Q = 1 \text{ MHz}$ の正弦波では単位収束セル当たり (正弦波 1 周期当たり) のベアチューンを $\nu_0 = 0.5$ とす

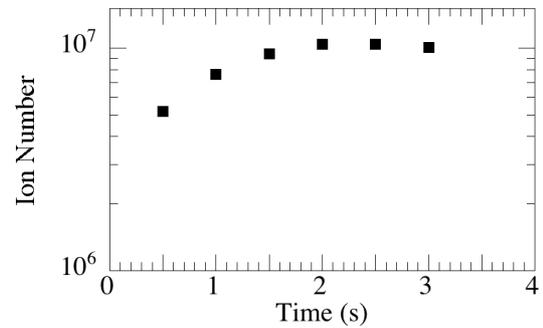


Figure 4: Dependence of the number of Ar^+ ions trapped in the ER on the ionization period.

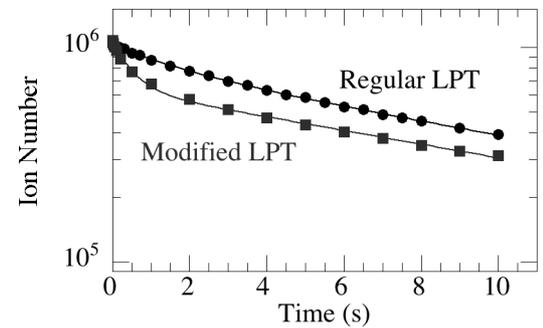


Figure 5: Time evolution of the number of Ar^+ ions remaining in the regular LPT of S-POD and the modified LPT. A sextupole field and an octupole field are not excited in the case of modified LPT.

るには、 $V_Q = 95 \text{ V}$ あれば良い。以下の実験では x, y 方向のベアチューンは等しく $\nu_{0x} = \nu_{0y} = \nu_0$ である。

Figure 4 に ER 内に捕捉できたイオン数を ER へのイオン入射時間の関数として示す。イオン入射中のベアチューンは $\nu_0 \sim 0.15$ 、 Ar ガス圧は $P_{\text{Ar}} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ である。入射時間が 1.5 s 程度で捕捉イオン数は $N_{\text{ion}} = 1 \times 10^7$ に達する。これらは Rg-LPT とほぼ同等であり、当面の実験には十分な性能である。なお、 $N_{\text{ion}} = 1 \times 10^7$ の Ar^+ プラズマの rms チューンデプレッションは、Md-LPT での実測はまだ行っていないが、経験的には 0.85 程度である。

Figure 5 にイオン化終了後に LPT 内に残存したイオン数の時間変化を、Rg-LPT の場合については黒丸で、Md-LPT の場合を黒四角で示す。イオンプラズマ捕捉時のベアチューンは $\nu_0 \sim 0.15$ 、 Ar ガス圧は $P_{\text{Ar}} = 5 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ である。Rg-LPT では、イオン数は時間に対し指数関数的に減少するが、よく見ると、 $t < 2 \text{ s}$ での早い損失とそれ以降の遅い損失が存在する [6]。前者の $1/e$ 寿命は $\sim 1 \text{ s}$ で、イオン生成直後のミスマッチが原因の損失と考えられる。後者の $1/e$ 寿命は $\sim 10 \text{ s}$ (セル数に換算すると $\sim 10^7$ 個) で、イオンと中性ガスの衝突が原因の損失である。

Rg-LPT に比べ、Md-LPT では $t < 2 \text{ s}$ での損失がより多く、かつその $1/e$ 寿命は $\sim 0.5 \text{ s}$ とより短い。その原

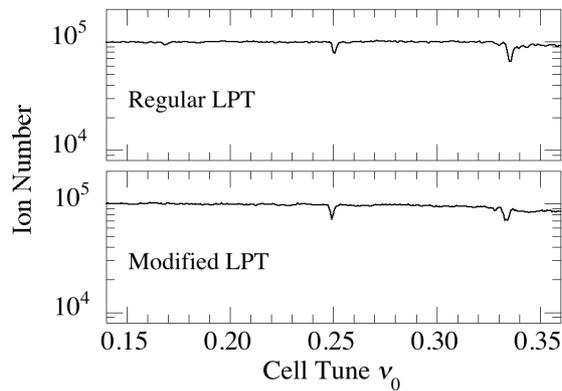


Figure 6: Stopband distributions of the regular LPT of S-POD (top panel) and the modified LPT (bottom panel). A sextupole field and an octupole field are not excited in the case of modified LPT.

因としては、イオン化終了時に Gate 付近にいた粒子が Gate ポテンシャルの上昇 (実験手順 4) により加速されることで寿命の短いイオン群となった可能性が高い。一方、 $t > 2$ s での $1/e$ 寿命は 10 s 程度あり、Md-LPT においても Rg-LPT と同程度の寿命が得られている。

Figure 6 に LPT 内に捕捉したイオン数をベアチューンの関数として示す。上段が Rg-LPT の、下段が Md-LPT の結果である。簡単のため、空間電荷効果を見捨てる $N_{\text{ion}} \sim 10^5$ までイオン数を減らして実験を行った。LPT 内の捕捉時間は 10 ms である。Rg-LPT では $\nu_0 \approx 1/3, 1/4, 1/6$ に粒子損失が確認された。これらは電極の加工・設置誤差や四重極電極を円柱電極で近似したことにより生じた $n = 3, 4, 6$ 次の非線形力が駆動する非線形共鳴による粒子損失である [5]。Md-LPT でも $\nu_0 \approx 1/3, 1/4$ に非線形共鳴による粒子損失が確認され、損失の度合いは Rg-LPT と同程度であった。一方、Md-LPT では $\nu_0 \approx 1/6$ には粒子損失がほぼ観測されない。これは、補助電極による 6 次の非線形力 (十二重極場) の抑制効果かもしれないが、そもそも Rg-LPT でも $\nu_0 \approx 1/6$ の粒子損失は非常に少なく、現在のところその確証はない。いずれにしても、補助電極を付けることで構造が複雑化しているにもかかわらず、非線形場は Rg-LPT と同程度に小さく抑えられており、加工・設置が十分な精度で行われていることが確認された。

4. まとめ

広島大学では小型の非中性プラズマトラップシステム S-POD を使って、ビームダイナミクスの実験的研究を行っている。これまでは非中性プラズマトラップに線形ポールトラップやペニングトラップを使用してきたが、ビームダイナミクスのより広範な研究に対応するために非線形力を積極的に励起可能な補助電極付き線形ポールトラップを現在開発中である。

今回、製作した補助電極付き線形ポールトラップを四重極モード (四重極電極のみに rf 電圧を印加し、補助電極は接地) で動作させ、その基本的な閉じ込め特性を評価した。

1. 捕捉イオン数は最大で 1×10^7 個に達した。
2. イオンプラズマの $1/e$ 寿命は約 10 s であり、およそ 10^7 セルに相当する。
3. 電極の加工・設置誤差に起因する制御できない六極場、八極場が僅かながら存在するが、十分に小さく抑制されている。

以上の結果より、このトラップが我々の目的に対し十分な閉じ込め性能を有することが確認された。また、これは従来の線形ポールトラップに比べても遜色ない性能であり、補助電極は上記の特性に大きな影響を与えないことを示している。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15H03662 と JP17K05120 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Okamoto, H. Tanaka, Nucl. Instrum. Meth. A **437**, p. 178 (1999).
- [2] H. Okamoto, Y. Wada, R. Takai, Nucl. Instrum. Methods **485**, p. 244 (2002).
- [3] R. Takai, H. Enokizono *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, p. 5332 (2006).
- [4] K. Moriya, K. Fukushima *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **18**, p. 034001 (2015).
- [5] K. Ito, H. Okamoto *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **20**, p. 064201 (2017).
- [6] K. Ito, M. Matsuba, H. Okamoto, Prog. Theor. Exp. Phys. **2018**, p. 023G01 (2018).
- [7] <https://cdcv.s.fnal.gov/redmine/projects/iota/wiki>
- [8] K. Fukushima and H. Okamoto, Plasma Fusion Res. **10**, p. 1401081 (2015).