

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05120

研究課題名(和文) 加速器模擬実験用イオントラップによる次世代ビームの共鳴現象に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on non-linear resonant instabilities in space-charge dominated beams with a linear Paul trap

研究代表者

伊藤 清一 (ITO, Kiyokazu)

広島大学・先端物質科学研究科・助教

研究者番号：70335719

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：線形ポールトラップ(LPT)に捕捉されたイオンプラズマと加速器の四極収束系を伝播するビームとは物理的に等価なシステムである。従って、LPTに捕捉したイオンプラズマを用いることでビームの安定性について系統的な実験を行うことができる。ただし、実際のビーム輸送系には四極磁石が作る線形場に加え六極磁石や誤差による非線形場も存在し、ビームの挙動に少なからぬ影響を与える。しかし、通常のLPTでは非線形場を制御することができなかった。本課題では最も低次の非線形場である六極場と八極場を制御できる改良型LPTを設計・製作し、実際に多極場を励起できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

荷電粒子を加速したいわゆるビームは基礎物理以外にも医療や産業応用などの幅広い分野で利用されており、現代の生活を支える重要な基盤ツールの一つとなっている。様々な分野における次世代技術の開発のためにはより高性能なビームが必須であり、ビームの高性能化のためには系統的な実験によりその挙動をより深く理解する必要がある。しかし、加速器は非常に高価であり、おいそれと実験することはできない。本課題で製作した実験装置を用いれば、加速器を使わずに安全・安価に加速器ビームの実験的研究が行える。

研究成果の概要(英文)：A charged particle beam traveling in a quadrupole focusing channel is physically almost equivalent to an ion plasma confined in a linear Paul trap (LPT). Its means that we can conduct a systematic experimental study of beam stability with the LPT. Actual beam transport channels contain nonlinear fields generated by sextupole magnets and originated from mechanical errors other than the linear field generated by quadrupole magnets. These nonlinear fields are weak, but they sometimes damage beams seriously. Naturally, nonlinear fields caused by mechanical errors exist in the LPT. However, their strengths and structures are uncontrollable. To overcome this limitation, a new type of LPT have been developed in this study. It is also experimentally verified that the sextupole field and the octupole field can be excited by applying suitable voltages to electrodes.

研究分野：ビーム物理

キーワード：荷電粒子ビーム 非中性プラズマ 非線形共鳴 空間電荷効果 線形ポールトラップ

1. 研究開始当初の背景

荷電粒子を加速した荷電粒子ビーム(以下ビーム)は基礎物理の実験用に開発された。しかし、現在では、この他にも工学、化学、生物学、医療、産業応用等の幅広い分野で様々な特徴をもつビームが積極的に利用されている。このような利用範囲の拡大に伴い、ビームの更なる高性能化が各方面で強く求められている。しかし、その性能向上を追求するとクーロン相互作用に起因する複雑な空間電荷効果が顕在化する。つまり、加速器ビームの更なる高性能化を目指すには、空間的に局所化された荷電粒子群の物理的な性質に対する深い理解が必要である。しかし、その運動を表す方程式系は非常に複雑であり、解析的に自己無撞着な解を得ることは実質的に不可能である。また、実際の加速器を用いてビームの挙動を広いパラメーター領域に渡り系統的に実験することは、様々な制約から困難である。そのためこの種の研究はコンピューターを駆使した数値計算に頼らざるを得ないのが現状である。しかしながら、計算機の性能による制限のためある種の近似を導入せざるをえず、その精度には自ずと限界がある。

ビームと同様に単一の荷電粒子で構成される系に非中性プラズマがある。非中性プラズマはそのままではクーロン斥力により発散してしまうので、通常は電場または磁場により荷電粒子トラップ中に捕捉する。荷電粒子トラップに捕捉した非中性プラズマの運動と重心系で観測したビームの運動は空間電荷効果まで含めて物理的に等価である[1]。従って、荷電粒子トラップを用いると加速器を使わずにビーム物理、特にビーム伝送路においてビームの安定性を阻害する可能性のある主要な現象のいくつかについて、の実験的研究が可能となる。荷電粒子トラップを用いた実験には、パラメーターの制御性が高く、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。

現代の多くの加速器では四極磁石を周期的に配列することでビームを断面方向に収束し伝搬している。一方、荷電粒子トラップの一種である線形ポールトラップ(LPT)は四極高周波電場により断面方向にイオンプラズマ(単一のイオン種だけで構成されるプラズマ)を捕捉する。両者の原理は全く等価であり、従って両者を直接的に対応づけることが可能である。研究代表者等はLPTを使ったビーム物理の実験的基礎研究を展開してきた。

荷電粒子が四極場から受ける力は、中心からの距離に比例する線形力である。従って、加速器やLPT中に荷電粒子を一つだけ捕捉すると、その運動は「擬似的な調和振動」となる。この振動数をベアチューン ν_0 と呼ぶ。荷電粒子が複数存在するとクーロン力を介して全体が集団的な運動を行うようになる。集団運動は様々なモードの振動の重ね合わせでありそのチューン Ω_m は

$$\Omega_m = m(\nu_0 - C_m \Delta \bar{\nu}) \quad (1)$$

と表される。ここで、 $2m$ はモード数であり四極モードでは $m = 2$ となる。 $\Delta \bar{\nu}$ はクーロン反発力によるチューンシフトである。 C_m はモードに依存する定数で、理論解析や数値計算から1以下となることが予想されている。実際の加速器には四極磁石だけではなく、軌道補正用の六極磁石や磁石の加工・設置誤差に起因する多極場が存在する。四極場以外の多極場による力は中心からの距離に比例しないので非線形力と呼ばれる。通常、非線形力の大きさは非常に小さく抑えられている。しかし、例えば円形加速器を周回するビームではこれらの非線形力を周期的に受けることになる。そのため、特定の条件を満たす時ビームは共鳴的に不安定になる。当然、加速器の動作点はこれを避けるように設計しなければならない。集団運動が無視できる場合は理論・数値計算により共鳴条件や成長率を精度良く予測することが可能である。一方、集団運動まで考慮して、これらを正確に予測することは非常に難しい。ただし、一次元の場合に限れば共鳴条件は次式で表すことができる。

$$\Omega_m \approx \begin{cases} nN_{SP} & (\text{外場駆動}) \\ nN_{SP}/2 & (\text{自己場駆動}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 n は整数であり、 N_{SP} は加速器の対称性を表す自然数である。

一般的な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極場を励起する(図1(a)を参照)。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。そのため、非線形力が及ぼす影響について系統的な実験を行うことは出来なかった。そこで、線形力とは独立に低次の非線形力を励起するために、円柱電極に補助電極を追加した改良型LPTが考案された[2]。

2. 研究の目的

本課題では以下の3つを主目的とした。

- (1) 参考文献[2]で提案された改良型LPT(図1(b)を参照)を実際に製作し、その閉じ込め特性を調べる。
- (2) 補助電極に適切な電圧を印加することで、引用文献[2]に示されているような六極場、八極場を選択的に励起できることを確認する。
- (3) 円柱電極をプローブにして低次集団振動モードの直接測定を試みる。通常のLPTではイオンプラズマ捕捉のための高周波電場が大

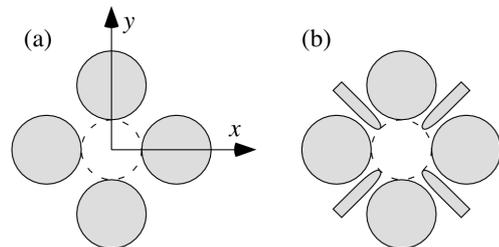


図1 線形ポールトラップの電極配置。(a) 通常型。(b) 非線形場励起用補助電極付き。

大きく、プラズマの集団振動モードによる微弱な信号を捉えることは困難である。しかしこの改良型 LPT では補助電極が静電シールドになるため、集団振動モードを直接的に検出できる。集団振動モードの直接測定は理論・数値計算と実験を定量的に比較・検討する上で非常に重要である。

3. 研究の方法

図2に本課題で製作した改良型 LPT の模式図を示す。円柱電極は軸方向に5つに分割されており、イオンを生成する IS と、生成したイオンを蓄積し実験を行う ER の二つの LPT を繋げた構造となっている。実験の制約上、非線形場励起用の補助電極は ER のみに設置している。

実際に製作した改良型 LPT の全体写真を図3(a)に示す。左側が IS、右側が ER である。各部電極の軸方向長さは $L_{IS} = L_{ER} = 50 \text{ mm}$, $L_{Gate} = L_{End} = 14 \text{ mm}$ である。これらの電極は 0.5 mm の間隔をあけて設置されている。図3(b)は ER の断面を拡大した写真である。円柱電極の半径は $R_c = 5.75 \text{ mm}$, 捕捉領域中心から円柱電極表面の最近接距離は $R_0 = 5 \text{ mm}$ である。補助電極の厚みは $h = 1 \text{ mm}$ であり、捕捉領域中心から補助電極表面までの距離は $R_1 = 8.5 \text{ mm}$ である。円柱電極と補助電極は銅を母材とし、金メッキを施してある。なお、補助電極は構造が複雑なため放電加工により製作した。電極は快削性セラミクスを切削加工したマウントに保持している。加工・設置精度は $\pm 20 \mu\text{m}$ 程度である。

改良型 LPT はベース圧力 $< 1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ の真空容器中に封入してある。実験に用いるイオン種は何でも良いが、これまでの経験から Ar^+ を採用した。以下に典型的な実験手順を示す。まず、真空容器中に $P_{\text{Ar}} \sim 10^{-5} \text{ Pa}$ 程度まで Ar ガスを導入する。各円柱電極には振幅 V_2 , 周波数 $f_2 = 1 \text{ MHz}$ の正弦波電圧を、End 電極はこれに加えて $V_p = 20 \text{ V}$ の直流電圧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。電子ビーム (135 eV , $\sim 100 \mu\text{A}$) を IS へと入射し、生成した Ar^+ を ER へと流し込む。電子ビームを止めると同時に Gate にも $V_p = 20 \text{ V}$ を印加し、 Ar^+ を ER のみに閉じ込める。その後、補助電極に適切な電圧を印加することで、非線形場を励起する。適当な時間経過したらイオンを検出器 (MCP またはイオンコレクター) へと排出し、ER に捕捉されていたイオン数を測定する。イオンを安定に捕捉できる V_2 には上限があり、この場合は $\sim 94 \text{ V}$ である。この上限では、1 周期当たりのベアチューンは $\nu_0 = 0.5$ となる。

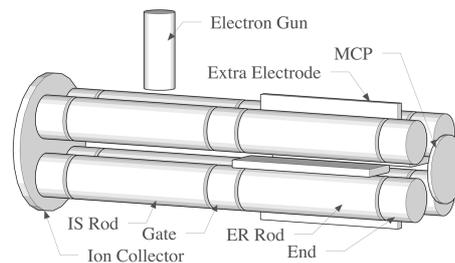


図2 トラップの模式図

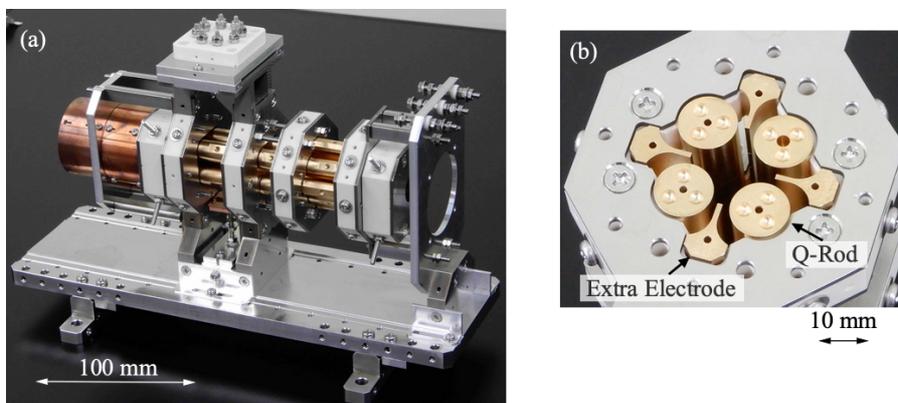


図3 製作した改良型 LPT の写真。(a) 全体像。(b) ER (補助電極有り) の断面図

4. 研究成果

(1) 特性の確認[3]

最初に、改良型 LPT と通常型 LPT の閉じ込め特性を比較するべく、非線形場を励起しない状態で、各種特性を測定した。一例として、ER に残存したイオン数 N_i の捕捉時間 t に対する依存性を図4に示す。この時、 $V_2 \sim 42 \text{ V}$ で、 $\nu_0 \sim 0.15$ である。改良型 LPT の結果を四角で、これまでに使っていた通常型 LPT の結果を丸で示す。 $t > 2 \text{ s}$ ではいずれの $1/e$ 寿命も $\tau \sim 10 \text{ s}$ である。一方、 $t < 2 \text{ s}$ では改良型の $1/e$ 寿命が若干短く $\tau \sim 0.5 \text{ s}$ である。ただし、本課題での典型的な実験におけるイオン捕捉時間は 10 ms 程度であ

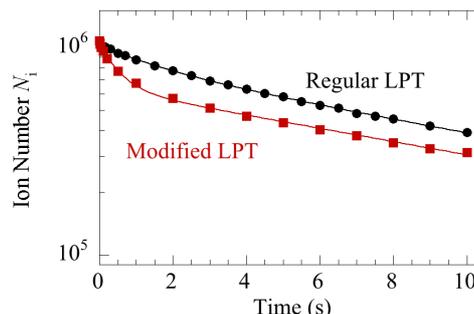


図4 捕捉イオン数の時間変化

り、これよりも十分に長いので問題にはならない。

この他に捕捉可能なイオン数の上限と、非線形場を励起しない状態でも存在する（即ち電極の設置誤差に起因する）非線形場の大きさも調べた。いずれも研究代表者が使ってきた通常型 LPT に比べ遜色のない性能であり、本課題遂行に十分な性能であることを確認している。

(2) 六極場励起実験

四極場に微弱な六極場を重畳した結果を図 5 に示す。ここでは、 $f_3 = 1/3$ MHz の正弦波で六極場を励起した（具体的な電圧印加方法は引用文献[3]を参照のこと）。横軸はベアチューンであるが、この場合は $f_2 / f_3 = 3$ 、すなわち四極場 3 サイクルで六極場が閉じる。従って四極場 3 サイクルでの振動数をチューンとする。なお、四極場のみの場合には $N_{SP}=3$ 、六極場を重畳した場合は $N_{SP}=1$ となる。縦軸はそのチューンで 10 ms 間イオンを捕捉した時の残存イオン数である。解析を容易にするために、 $\Delta\bar{v}$ を無視できる程度のイオン数で実験を行った。黒線は四極場のみを励起した場合であり、赤太線は六極場を重畳した場合である。 a_2 と a_3 はそれぞれ四極場、六極場の強度であり電極に印加した V_2 と V_3 から引用文献[3]に従って計算した。

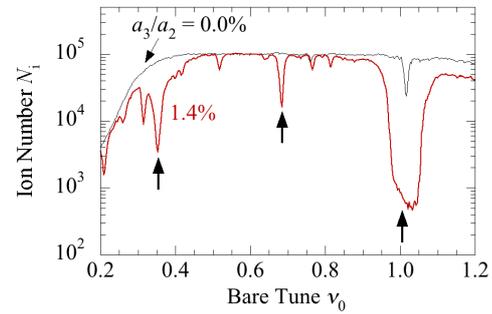


図 5 捕捉イオン数のチューン依存性

いずれの場合も特定のチューンにおいて急激なイオン数の減少（ストップバンド）が観測される。これは共鳴によりイオンプラズマが不安定化しイオン損失が生じたためである。四極場のみの場合には $v_0 \sim 3/4$ と 1 にストップバンドが存在する。共鳴条件から、それぞれ、プラズマの自己場の四極成分と、電極の設置誤差に起因する六極場によるストップバンドである。六極場を重畳すると新たなストップバンドが複数発生し、 $v_0 \sim 1$ のストップバンドはより強くなった。矢印で示した $v_0 \sim 1/3, 2/3, 1$ は明らかに六極場による非線形共鳴のストップバンドであり、六極場の励起に成功したことを示している。それ以外のストップバンドは十極場まで考慮すればほぼ説明が可能である。これは六極場以外の余計な非線形場も励起されたことを意味している。これらの余計な非線形場は各電極に印加する電圧の比を調整することで抑制できる可能性がある。

(3) 八極場励起実験[4]

四極場に微弱な八極場を重畳した結果を図 6 に示す。ここでは、 $f_4 = 1/2$ MHz の正弦波で八極場を励起する。横軸のベアチューンは $f_2 / f_4 = 2$ サイクルの四極場から計算した。この場合、四極場のみでは $N_{SP}=2$ 、八極場を重畳すると $N_{SP}=1$ となる。やはり解析を容易にするために、 $\Delta\bar{v}$ の影響を無視できる程度のイオン数で実験を行った。捕捉時間は 10 ms である。黒線は四極場のみを励起した場合であり、赤太線は八極場を重畳した場合である。 a_2 と a_4 はそれぞれ四極場、八極場の強度である。

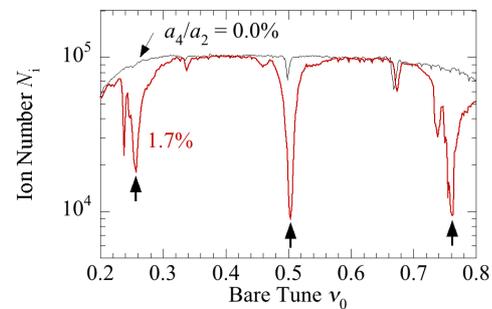


図 6 捕捉イオン数のチューン依存性

四極場のみの場合には $v_0 \sim 1/3, 1/2, 2/3$ にストップバンドが存在する。それぞれ、自己場の六極成分と四極成分、電極の設置誤差に起因する六極場によるストップバンドである。八極場を重畳すると複数の新たなストップバンドが発生し、 $v_0 \sim 1/2$ のストップバンドは強くなる。矢印で示した $v_0 \sim 1/4, 1/2, 3/4$ に見られるストップバンドは八極場によるストップバンドであり、八極場の励起に成功したと結論づけられる。ただし、 $v_0 \sim 1/4$ と $3/4$ には明らかに二つのストップバンドが出現している。理論や数値計算からはこのような構造は予測されなかった。このダブルピーク構造が発生する原因については現在調査中である。

(4) 集団振動の測定[5, 6]

荷電粒子が運動すると導体にイメージ電流が流れる。従って、イメージ電流を測定することで、荷電粒子の運動を推測することができる。二つの対向する円柱電極に流れるイメージ電流の位相と周波数を解析することで、イオンプラズマの集団振動モードの直接測定を行った。

最も低次のモードは $m = 1$ の双極モードである。双極モードはプラズマ断面形状の変化を伴わない剛体的な重心振動であり、対向する電極の電流は逆位相となる。従って片方の信号からもう一方の信号を引けば双極モードの振動による信号が抽出される。これを周波数解析することで

Ω_1 を決定できる．測定した Ω_1 の捕捉イオン数に対する依存性を図 7(a) に示す．図中の破線は外場から計算した ν_0 であり，粒子数 0 の極限における Ω_1 に一致する．イオン数の減少に伴い Ω_1 は増加し， ν_0 に漸近していく．前述のように双極モードは剛体的な振動なので，自己場によるチューンシフトは生じない ($C_1 = 0$)．従って，観測された粒子数による Ω_1 の変化は電極に誘起されるイメージ電荷による影響であり，加速器で言うところの Laslett チューンシフトに相当する．

四極モードは $m = 2$ であり，イオンプラズマの x 方向が伸びる（縮む）と y 方向は縮む（伸びる）．従って対向する電極の電流は同位相となるので両者の和から四極モードの振動による信号が抽出される．測定した Ω_2 の捕捉イオン数に対する依存性を図 7(b)に示す．図中の破線は外場から計算した $2\nu_0$ であり，粒子数 0 の極限における Ω_2 に一致する．やはり，イオン数の減少に伴い Ω_2 は増加し， $2\nu_0$ に漸近していく．ただし， Ω_1 にくらべチューンのシフト量は大きい．さて，一次元の理論からは $C_2 = 0.75$ と予想されている．これを用いると観測した Ω_2 のチューンシフト量からいわゆる rms チューン効果率を評価することができる． Ω_2 から評価したチューン効果率はストップバンドの位置から評価したチューン効果率と一致する．ただし，ストップバンドは幅を持つため， Ω_2 の直接計測から rms チューン効果率を評価する方が精度・確度とも 1 桁程度改善する．

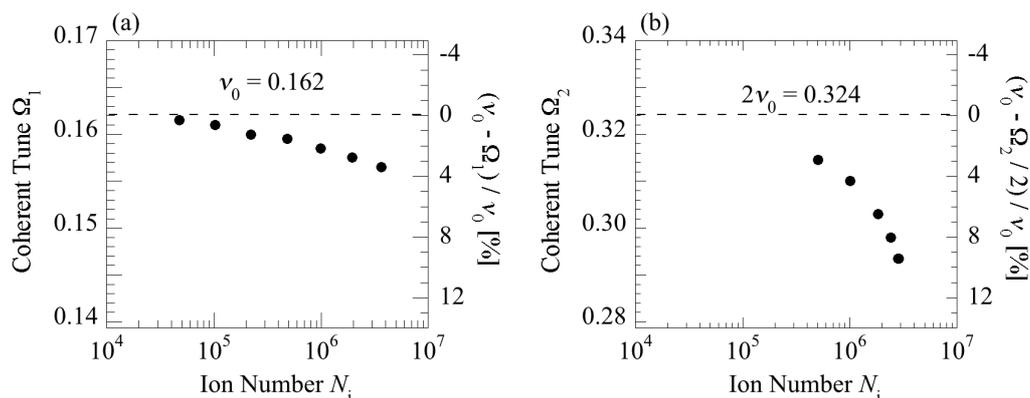


図 7 集団振動のチューンのイオン数に対する依存性．(a) 双極モード．(b) 四極モード．

(5) まとめ

本課題では非線形場がビームの挙動に与える影響を実験的に調査するべく，非線形力を励起・制御可能な補助電極付き線形ポールトラップを製作した．この改良型 LPT を用いて実験を行い，主に以下の結果を得た．

- ①線形場のみを励起して，その閉じ込め特性の評価を行った．最大捕捉イオン数は 1×10^7 個， $1/e$ 寿命は約 10 s であり，電極の加工・設置誤差による多極場は十分に小さく抑制されている等，必要十分な性能を備えていることを確認した．
- ②空間電荷効果が無視できる程度の少数個のイオンを捕捉して，実際に六極場，八極場を励起できることを確認した．
- ③円柱電極をプローブに使い，双極モードと四極モードの集団振動の振動数を直接計測した．また，四極モードのチューンシフト量から rms チューン効果率を評価した．この方法によれば rms チューン効果率を 0.5% 程度の確度で決定できる．

今後，本課題で開発した改良型 LPT を用いた系統的な実験と理論・数値計算との定量的な比較から空間電荷効果が非線形共鳴に及ぼす影響を明らかにすることが期待される．

<引用文献>

- [1] H. Okamoto, Y. Wada, R. Takai, Nucl. Instrum. Method Phys. Rev. Sect. A **485** (2002), p.244.
- [2] K. Fukushima, H. Okamoto, Plasma Fusion Res. **10** (2015), p.1401081.
- [3] 伊藤清一，青木将晃，檜垣浩之，岡本宏己，第 15 回日本加速器学会年会プロシーディングス，p.865
- [4] 青木将晃，伊藤清一，岡本宏己，檜垣浩之，第 16 回日本加速器学会年会プロシーディングス，p.738
- [5] 伊藤清一，倉内太道，檜垣浩之，岡本宏己，第 16 回日本加速器学会年会プロシーディングス，p.441
- [6] K. Ito, T. Kurauchi, H. Higaki, H. Okamoto, J. Phys: Conf. Ser. **1350** 012125

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 K Ito, T Kurauchi, H Higaki and H Okamoto	4. 巻 1350
2. 論文標題 Experimental observation of low-order collective oscillation modes in a strong-focusing lattice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012125-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1350/1/012125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 伊藤清一, 青木将晃, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 非線形ビームダイナミクス研究を目的とした改良型ポルトラップ
3. 学会等名 第15回日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤清一, 服部将哉, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 イオンプラズマの集団振動の測定
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤清一, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 バッファ冷却されたイオンプラズマの特性
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木将晃, 伊藤清一, 岡本宏己, 檜垣浩之, 白井拓海
2. 発表標題 非線形多極イオントラップを用いた非線形共鳴の励起実験
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 白井拓海, 青木将晃, 伊藤清一, 檜垣浩之, 岡本宏己,
2. 発表標題 多極イオントラップにおける非中性プラズマ位置の最適化による非線形場の抑制
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤清一, 川村現, 岡本宏己
2. 発表標題 ビーム物理研究用多重極イオントラップの開発
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青木将晃, 伊藤清一, 岡本宏己, 檜垣浩之
2. 発表標題 非線形ビームダイナミクス研究用多極イオントラップ
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K Ito, T Kurauchi, H Higaki and H Okamoto
2. 発表標題 Experimental observation of low-order collective oscillation modes in a strong-focusing lattice
3. 学会等名 10th International Particle Accelerator Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤清一, 倉内太道, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 強収束ラティスにおける低次コヒーレント振動モードの直接的チューン計測
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木将晃, 伊藤清一, 岡本宏己, 檜垣浩之
2. 発表標題 ビームダイナミクス研究用小型イオントラップによる非線形共鳴励起実験
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木将晃, 伊藤清一, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 改良型イオントラップを用いた低次非線形共鳴の励起実験
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 倉内太道, 青木将晃, 伊藤清一, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 線形コヒーレント振動モードの直接観測によるチューン効果率の決定
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----