

令和 3 年 4 月 20 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03472

研究課題名（和文）高品位ハドロンビームの集団共鳴不安定化とその発生条件の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the fundamental mechanism of collective resonance instability in high-quality hadron beams

研究代表者

岡本 宏己（Okamoto, Hiromi）

広島大学・先進理工系科学研究科（先）・教授

研究者番号：40211809

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：位相空間上で非常に高い粒子密度をもつ次世代高品位ハドロンビームの不安定性、とりわけ集団共鳴不安定化現象に着目し、その発生条件を多角的に調べた。大型装置に依拠した従来の手法とは本質的に異なる独自の実験的アプローチを用いて、先行研究で導かれた2次元共鳴条件仮説の妥当性を検証すると共に、いわゆるベータatron運動の安定領域を知る上で有効なダイアグラム（安定動作領域図）の構築法を提唱した。新ダイアグラムは複数の既存加速器に適用され、実際の観測データをよく説明することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

伝統的な非集団的描像に基づくビーム共鳴理論は粒子間クーロン相互作用の効果を正確には反映できておらず、しばしば実験データと矛盾する結果を与えていた。本研究によって集団的共鳴機構の重要性が認識され、従来の加速器設計基準が含む問題点が明らかとなった。修正された新しい設計基準は非常に簡便で、次世代大強度加速器の初期設計において威力を発揮するものと期待される。また本研究は、小型イオントラップシステムに基づく“実験室加速器物理”という新概念の有効性を示した点でも意義がある。

研究成果の概要（英文）：The stability of next-generation hadron beams that have high particle density in phase space may be affected seriously by collective instabilities induced by the Coulomb self-field potential. In this work, we paid particular attention to the coherent betatron resonances whose detailed understanding is vital in designing a high-intensity hadron synchrotrons. A novel experimental approach developed at Hiroshima University was applied to explore the parameter dependence of the space-charge-driven resonances. We corroborated the two-dimensional coherent resonance conjecture introduced in the preceding theoretical study and proposed a new type of beam stability diagram useful to find the optimum operating condition of a general circular machine. It was confirmed that our diagram can explain actual experimental observations obtained in several existing synchrotrons.

研究分野：ビーム物理学

キーワード：粒子加速器 スマ 大強度ハドロンビーム 共鳴不安定性 空間電荷効果 線形ポルトラップ 非中性プラ

## 1. 研究開始当初の背景

この半世紀の間に加速器技術は長足の進歩を遂げた。加速器が生み出す荷電粒子ビームや放射光はその適用範囲を大きく広げ、今や基礎物理学の領域は勿論、医療、物質・材料開発、生命科学、産業など、多くの分野で積極的に利用されている。必然的な結果として、ビームの質に対するユーザー側からの要求はますます高度化している。とくに、大電流あるいは高密度のハドロンビームのニーズは各方面で急速に高まりつつある。

限られた位相空間領域の中に大量の同種荷電粒子を詰め込めば、クーロン相互作用の長距離性により複雑な非線形集団現象が顕在化する。この種の集団現象の系統的研究は理論的には勿論、実験的にも極めて難しい。基礎方程式を解析的に解くことはほぼ不可能であるため、昨今は並列計算機を駆使した数値シミュレーションが多用されている。しかしながら、精度の高い三次元計算には法外な CPU 時間が必要で、結局何らかの近似モデルの導入を余儀なくされているのが現状である。他方、既存の加速器を使った従来の実験的アプローチにも厳しい限界がある。基本パラメータの可変範囲が限られている上、大型装置には様々なバックグラウンドが存在し観測データを複雑化する。ビームは相対論的速度で運動しているため、観測も容易ではない。これら様々な実際の難点を回避するには、根本的な発想の転換が必要である。

クーロン自己場に起因する大強度ハドロンビームの不安定性は“空間電荷効果”と総称され、古くからビーム物理学上の主要テーマのひとつとして認識されていた。とくに、ビームの大強度化・高輝度化が進む中、空間電荷由来の共鳴的不安定性に対する基礎的理解の重要性が増大している。この問題は伝統的に、いわゆる“チューンダイアグラム”上で個別粒子運動に着目して議論されてきた。本研究開始当初はそれには変わる本質的に新しいアプローチは知られておらず、加えて“集団的共鳴”と“非集団的共鳴”が同列に扱われ、これら 2 つの不安定化機構がビーム核内部に混在するとの見方が主流であった。後述するように、この見解は本研究によって否定されることになる。

## 2. 研究の目的

古典的な単粒子軌道理論がもたらす最も重要な知見は「周期的ラティス構造や加速器構成要素が含む誤差に起因する共鳴不安定性」の存在である。“ラティス”とはビーム軌道制御用の各種電磁石や高周波加速空洞の空間的配置パターンを意味する業界用語で、ここに加速器デザイナーの思想が反映される。規則的に配列された多数の電磁石によってビームは進行方向に直交する 2 次元平面上で強く集束されており、個々の荷電粒子は設計軌道の周りで擬似的な調和振動（ベータatron振動）を行う。単位ラティス構造（あるいは円形加速器一周）当たりの振動数を“チューン”と称する。水平(x)および鉛直(y)方向自由度のチューンをそれぞれ( $\nu_x$ ,  $\nu_y$ )と書くとき、単粒子軌道理論が予言するところは単純明快で、加速器の動作点が以下の条件を満たすことを禁ずる：

$$k\nu_x + \ell\nu_y = n \quad (k, \ell, n \text{ はいずれも整数}) \quad (\text{a})$$

問題は「クーロン自己場の影響を無視することが許されない場合、共鳴条件(a)に如何なる修正を施す必要が生じるか？」である。

ここ数年の研究成果を踏まえ、代表者のグループは公式(a)を拡張した次のような仮説(粒子間クーロン相互作用の影響を含む 2 次元一般共鳴条件)に到達している：

$$k\nu_x + \ell\nu_y = n / 2 [1 - (1 - \eta)C_m] \quad (\text{b})$$

ここで、共鳴次数  $m$  は  $k$  と  $\ell$  の絶対値の和に等しく ( $m = |k| + |\ell|$ )、 $C_m$  は次数のみに依存する 1 より小さい正定数因子、 $\eta$  はチューン降下率と呼ばれるパラメータである。 $\eta$  はビームの位相空間密度（あるいは温度）の指標と解釈できる。

本基盤研究の最終目標は「ビーム力学において最も基本的とも言える“共鳴不安定性”に対する正しい理解を確立すること」である。より具体的には、一般共鳴仮説(b)の実験的・理論的検証を目指す。あらゆるパラメータ領域で有効な共鳴現象の統一的理解は、次世代加速器の設計あるいは既存の先進加速器の性能向上を実現する上で必要不可欠である。

## 3. 研究の方法

重心系で観測した荷電粒子ビームの集団運動は特殊な高周波イオントラップ中に捕捉された非中性プラズマの集団運動と物理的に等価であることが数学的に証明できる。この事実を念頭に代表者のグループが開発した独創的な卓上実験システムが“S-POD” (Simulator of Particle Orbit Dynamics) である。このシステム特有の高いパラメータ制御性を武器に様々な初期条件下で高品位ビームの集団的振る舞いを小型トラップ中に再現し、共鳴不安定帯のラティス依存性及び粒子密度依存性等を精査した。

初年度の時点で 3 台の独立した S-POD システムが運用可能な状態にあり、そのうち S-POD II 号機と III 号機を本研究に充てた。プラズマ閉じ込めに使う高周波四重極の基本周波数は 1 MHz に設定され、先行研究で実績のある  $^{40}\text{Ar}^+$  イオンを使用した。II および III 号機は、主として円形加速器における共鳴現象の研究を念頭に、断面径に対して軸長の大きなプラズマが生成できるようデザインされている。本基盤研究では、線形加速器において典型的な楕円体状のビームの基礎研究用として S-POD IV 号機を新たに構築した。これらの S-POD システムを並列でフル稼働

させ、高品位ハドロンビームの共鳴不安定性に関する複数の課題を実験的に追究した。

加えて、S-POD で得られた実験観測データに対する理解を深化させるため、自己無撞着なアルゴリズムに基づく数値計算も進めた。Particle-In-Cell (PIC) 法による多粒子シミュレーションを系統的に実施すると共に、摂動論的手法を用いて、加速器のラティス構造に整合した理想的なビーム（定常状態）の安定性を解析した。

#### 4. 研究成果

- (1) 粒子損失の原因となる共鳴不安定性の基本的発生メカニズムは“集団的機構 (coherent resonance)”と“非集団的機構 (incoherent resonance)”の2つに大別できる。本研究以前は、これらの共鳴機構がビーム核（大半の粒子を含むビーム中心近傍部分）に混在するという理解が一般的であった。しなしながら実際には、粒子の密集するビーム核の運動はほぼ集団的で、粒子個々が独立に共鳴して深刻なビーム損失に繋がることはない結論された。一方で、位相空間上でビーム核の周囲に低密度のハローを形成している、初期エネルギーの比較的大きな粒子は非集団的に共鳴し得ることが分かった。

- (2) 共鳴条件(b)が含む、加速器の動作条件に依存しない自然のパラメータは  $C_m$  のみである。理論上、 $C_m$  は1より若干小さい値をとり、共鳴の次数  $m$  が上がるにつれて1に近づくと考えられている。この理論的予想の正当性を実験的に確認することに初めて成功した。

$C_m$  を決定するにはチューン降下率  $\eta$  を高い精度で知る必要があるが、本研究では線形モード ( $m=2$ ) の振動数を実測して目的を達成した。S-POD III 号機に設置された新型多極ポールトラップの電極表面上に誘起される微弱な誘導電流をフーリエ解析することにより、図1のような周波数スペクトルが得られる。このスペクトルの左端のピークが線形モードの振動数に対応する。複数の理論および PIC シミュレーションのデータから  $C_2 = 0.7 \sim 0.75$  であることが予想されており、この予想と線形モード振動数の実測値からチューン降下率  $\eta$  が演繹できる。この手法を用いて、特定のトラップ動作条件下で蓄積イオン数の関数として  $\eta$  を求めた。

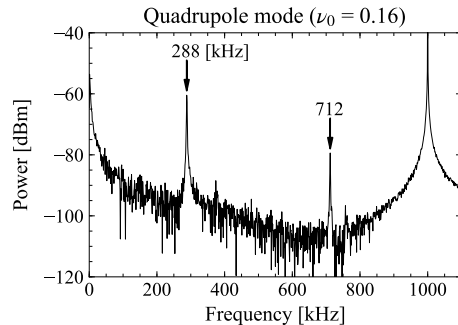


図1 四重極振動モードの周波数スペクトルの一例 ( $\nu_x = \nu_y = 0.16$  の場合)

加速器の動作点、換言すればチューン( $\nu_x, \nu_y$ )が与えられ、同時に $\eta$ が既知であれば、特定次数の非線形共鳴の発生位置を条件(b)からの予言と比較することで  $C_m$  ( $m \geq 3$ ) の評価が可能となる。III 号機の新型トラップには標準的なポールトラップにはない予備電極が付加されており、3次および4次モードを人為的に駆動することができる。これを用いて3次モード ( $m=3$ : sextupole mode) を強制的に励振し、発生したイオン損失の位置から  $C_3$  を求めた。結果は  $C_3 = 0.80 \sim 0.88$  となり、理論的予想とよく一致している。 $C_4$  の測定は現在進行中であるが、集団共鳴条件(b)を支持する予備的データが得られている。

- (3) 集団共鳴条件(b)および上記項目(1)の理解に基づき、ベータatron運動の安定領域を可視化する新しいチューンダイアグラムの構成法を提案した。新ダイアグラムの大まかな構成手順は以下の通りである。

- Step 1: 低次共鳴に対して適切な  $C_m$  因子を定義
- Step 2: 二乗平均エンベロップ方程式からチューン降下率を計算
- Step 3: 共鳴条件公式(b)を使って、3次あるいは4次までの集団共鳴線をプロット
- Step 4: 各共鳴線に適切な幅を付与
- Step 5: 非集団共鳴領域の位置を特定

この手続きに従ってプロットされた、東海村の大強度陽子加速器 J-PARC Main Ring に対する共鳴不安定帯分布を図2に示す。赤い点はこの加速器の実際の動作点を示しているが、新ダイアグラムが予言する最も大きなビーム安定領域の内側にあることが分かる。新ダイアグラムは J-PARC 施設の Rapid Cycling Synchrotron で得られた観測データとも矛盾しないことを確認した。

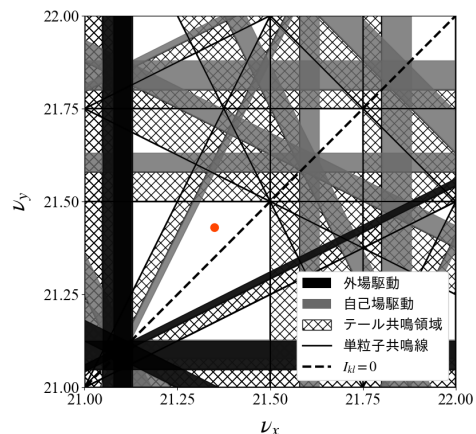


図2 J-PARC MR を想定したビーム安定領域図

- (4) 欧州合同原子核研究機構 (CERN) では大型ハドロンコライダーのアップグレードが現在進行中であるが、結果として、大強度陽子ビームにおける空間電荷由来の共鳴不安定性が問題となっている。CERN の陽子シンクロトロン (PS) のラティス条件を考慮した実験を S-POD II 号機で行い、最近公表された PS での観測データを大まかに再現することに成功した。得られたイオン損失領域の分布は上述の新ダイアグラムを使って簡単に説明できる。S-POD 実

験の結果は、CERNの加速器研究者らが自身の実測データを説明するために導入した仮説に本質的な問題のあることを示唆している。

- (5) 楕円体から球形に近い初期イオン分布が形成可能な線形ポールトラップを設計・構築し、S-POD IV号機に導入した。基本的な性能試験の結果は良好で、 $10^6$ 個を超えるイオンの安定な閉じ込めに成功しており、今後の系統的なビームダイナミクス研究への応用に目処が付いた。

軸に垂直な平面上のベータトロロン振動と軸方向のシンクロトロン振動の両方が関与する、多数の結合共鳴線の実験およびシミュレーションにより確認した。図3は低密度のプラズマを用いて測定した安定領域図で、イオン損失率が色分けして表示されている。横軸はベータトロロン振動のチューン ( $\nu_x = \nu_y$ を仮定)、縦軸はシンクロトロン振動のチューンである。高密度ビームに対して同様の安定領域図を構成するためには上記項目(3)の手順および共鳴条件(b)を3次元へ拡張する必要がある。

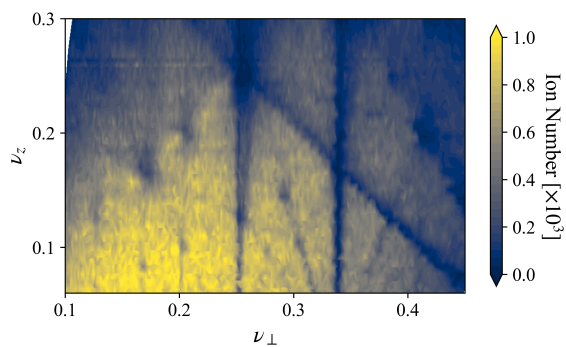


図3 S-POD IV号機で得られた非線形共鳴線の実測例

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Okamoto H., Aoki M., Ichikawa C., Kojima K., Kurauchi T., Yamane Y.	4. 巻 15
2. 論文標題 Coherent and incoherent space-charge effects in high-intensity hadron rings	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P07017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/07/P07017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Okamoto, K. Kojima, and K. Ito	4. 巻 2019
2. 論文標題 A compact Paul ion trap for the study of space-charge effects in drift-tube linear accelerators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 093G01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Kojima, H. Okamoto, and Y. Tokashiki	4. 巻 22
2. 論文標題 Empirical condition of betatron resonances with space charge	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Accel. Beams	6. 最初と最後の頁 74201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.074201	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 -
1. 著者名 K. Kojima, H. Okamoto, and Y. Tokashiki	4. 巻 23
2. 論文標題 Reply to Comment on 'Empirical condition of betatron resonances with space charge'	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Accel. Beams	6. 最初と最後の頁 29002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevAccelBeams.23.028002	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 -

1. 著者名 K. Ito, T. Masuda, H. Higaki, and H. Okamoto	4. 巻 1350
2. 論文標題 Accumulating laser-coolable ions in a linear Paul trap for ultrahigh-density beam dynamics experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conf. Series	6. 最初と最後の頁 12126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1350/012126	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

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: Conf. Series	6. 最初と最後の頁 12125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1350/012125	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Okamoto, Y. Tokashiki, and K. Kojima	4. 巻 -
2. 論文標題 Stability tune diagram of a high-intensity hadron ring	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 10th International Particle Accelerator Conf.	6. 最初と最後の頁 3141-3144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPTS022	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 H. Okamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Hamiltonian formalism of intense beams in drift-tube linear accelerators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 10th International Particle Accelerator Conf.	6. 最初と最後の頁 3145-3147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPTS023	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 M. Aoki, K. Ito, and H. Okamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Preliminary beam-dynamics experiment on the excitation of nonlinear resonances using a modified Paul ion trap	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 16th Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 738-741
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 K. Ito, T. Kurauchi, H. Higaki, and H. Okamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Direct measurement of the tunes of low-order coherent oscillation modes in a strong focusing lattice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 16th Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 441-444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 H. Okamoto, K. Kojima, and Y. Tokashiki	4. 巻 -
2. 論文標題 On the construction of a stability tune diagram for high-intensity hadron rings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 16th Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 218-222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 K. Ito, M. Aoki, H. Higaki, and H. Okamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 A modified linear Paul trap for nonlinear beam-dynamics studies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. 15th Meeting of Particle Accelerator Society of Japan	6. 最初と最後の頁 865 - 868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 L. K. Martin, S. L. Sheehy, D. J. Kelliher, S. Machida, K. Ito, and H. Okamoto	4. 巻 1067
2. 論文標題 A new method to measure the beta function in a Paul trap	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conf. Series	6. 最初と最後の頁 62016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1067/6/062016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 小島邦洸、岡本宏己、伊藤清一、五藤誠人
2. 発表標題 短パンチビーム実験用線形ポールトラップの基本構造定数の補正について
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五藤誠人、小島邦洸、伊藤清一、檜垣浩之、岡本宏己
2. 発表標題 短パンチイオンビーム実験用線形ポールトラップを用いた共鳴不安定帯の確認
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 室尾健人、伊藤清一、岡本宏己、宮脇信正
2. 発表標題 線形ポールトラップからの単一カルシウムイオンの超高精度射出に関する研究
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 倉内太道、伊藤清一、檜垣浩之、岡本宏己
2. 発表標題 線形ポルトラップを使った線形および非線形集団振動モードのチューン測定
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 市川智聡、山根裕也、岡本宏己
2. 発表標題 大強度ハドロン加速器における共鳴不安定性の数値解析
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田昂、市川智聡、伊藤清一、岡本宏己、檜垣浩之
2. 発表標題 CERN陽子シンクロトロンにおける共鳴不安定性の再現実験
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本宏己、小島邦洸、渡嘉敷雄士
2. 発表標題 大強度ハドロンリングのチューンダイアグラム構成法について
3. 学会等名 第16回日本加速器学会
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
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試験
3. 学会等名 第16回日本加速器学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Okamoto, Y. Tokashiki, and K. Kojima
2. 発表標題 Stability tune diagram of a high-intensity hadron ring
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 H. Okamoto
2. 発表標題 Hamiltonian formalism of intense beams in drift-tube linear accelerators
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 市川智聡、小島邦洸、山根裕也、岡本宏己
2. 発表標題 コヒーレント共鳴条件に基づくチューンダイアグラムの構築
3. 学会等名 第75回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山根裕也、岡本宏己
2. 発表標題 大強度ハドロン線形加速器中の短バンチビームの安定性に関する数値解析的研究
3. 学会等名 第75回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020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 第75回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小島邦洸、岡本宏己、伊藤清一、五藤誠人、檜垣浩之
2. 発表標題 短バンチビーム実験用線形ポルトラップの設計と構築
3. 学会等名 第75回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五藤誠人、小島邦洸、伊藤清一、檜垣浩之、岡本宏己
2. 発表標題 短パンチビーム実験用線形ポルトラップの閉じ込め特性
3. 学会等名 第75回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田昂、市川智聡、伊藤清一、檜垣浩之、岡本宏己
2. 発表標題 線形ポルトラップを用いた空間電荷駆動非線形共鳴の実験的研究
3. 学会等名 第75回日本物理学会年次大会
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降下率の決定
3. 学会等名 第75回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2020年

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
4. 発表年 2018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 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山根裕也, 岡本宏己
2. 発表標題 大強度ビームにおける四重極振動モードの共鳴不安定化に関する数値解析
3. 学会等名 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島邦洸, 岡本宏己, 渡嘉敷雄士
2. 発表標題 大強度ハドロンビームの集団共鳴不安定性に関する数値解析的研究
3. 学会等名 第74回日本物理学会年次大会
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 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉内太道, 伊藤清一, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 イオンプラズマに励起された集団振動の観測
3. 学会等名 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 益田龍海, 伊藤清一, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 線形ポールトラップに捕捉したイオンプラズマの共鳴不安定帯の非破壊測定
3. 学会等名 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

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

1. 発表者名 檜垣浩之, 平塚雅健, 伊藤清一, 岡本宏己
2. 発表標題 ペニングトラップ中のNe+プラズマを用いた空間電荷効果の実験
3. 学会等名 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019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
研究 分担 者	伊藤 清一  (Ito Kiyokazu)  (70335719)	広島大学・先進理工系科学研究科(先)・助教   (15401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------