

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340061

研究課題名（和文）次世代ハドロンビームの安定化に関する非加速器実験

研究課題名（英文）ACCELERATOR-FREE EXPERIMENTS FOR THE PRODUCTION AND STABILIZATION OF NEXT-GENERATION HADRON BEAMS

## 研究代表者

岡本 宏己（OKAMOTO HIROMI）

広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授

研究者番号：40211809

研究成果の概要（和文）：次世代の高品位ビームにおいて強く顕在化する、いわゆる“空間電荷効果”の実験的研究を実施した。非常にコンパクトかつ安価な非中性プラズマトラップシステムを開発し加速器中の荷電粒子ビームと物理的に等価な多体力学系を実験室中に再現、これを用いて自己クーロン場に起因する非線形集団現象の発生条件を系統的に調査した。大型加速器に依拠した従来の手法では入手困難な、高品位ビームの安定性に関する定量的データを得た。

研究成果の概要（英文）：We have experimentally studied the *space-charge effects* that might seriously affect the stability of high-quality hadron beams in next-generation particle accelerators. For this purpose, very compact and low-cost non-neutral plasma traps were developed which generate, in the laboratory frame, many-body systems physically equivalent to relativistic charged-particle beams. Employing this novel experimental method, we systematically explored nonlinear collective phenomena caused by interparticle Coulomb interactions and obtained useful quantitative information to improve the stability of high-quality beams.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 / 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器・ビーム物理

## 1. 研究開始当初の背景

大強度イオンビームの需要は国内外で急速に増大しており、我が国でも東海村で J-PARC の建設が進んでいる。また、ビームの“大強度化”と並行して“高品質化（換言すれば、低エミッタンス化）”の傾向も昨今ますます強まっている。実際、最先端の冷却技術を応用することにより、ビームの超高密度化が可能になりつつある。これら次世代高品位ビームの安定供給を実現するためには、

当然のことながら、複雑な非線形多体系としてのビームの振る舞いを十分理解しておかなければならない。しかしながら、一般の加速器は構造上あるいは実用上の制約が多く、ビームが示す集団現象の系統的な実験研究には全く向いていない。このため、多粒子シミュレーションコードを使った数値実験の研究が積極的に行われているが、粒子間クーロン相互作用の高精度計算には相当な CPU 時間を要するため、このアプローチにもやは

り事実上限界がある。

## 2. 研究の目的

大強度ビームは極めて大量の荷電粒子から構成されているため位相空間密度が高く、各粒子の運動はクーロン場を介して結合している。構成粒子全体が集団的に振る舞うことになり、その自己充足的な解析は非常に難しいことが知られている。電流値の低いビームにおいても、冷却法の適用によって低エミッタンス化されると位相空間粒子密度が上がるため、クーロン相互作用に起因する集団効果（空間電荷効果）が無視できなくなる。ところが前節で触れたように、既存の大型加速器を使った実験や数値計算に頼る限り、空間電荷効果の系統的研究は常に大きな困難を伴う。

そこで本研究では、加速器に依拠しない、全く新しい荷電粒子ビームの基礎物性研究手法を考案した。以下で具体的に解説する、小型の非中性プラズマトラップに基づいた実験手法である。過去数年の準備研究を経て獲得したノウハウを背景に高周波イオントラップシステムを設計・製作し、“コヒーレント共鳴不安定性”などの典型的な空間電荷効果を様々な外的条件下で系統的に観測した。また、既存の磁気トラップを改良し、大強度加速器において深刻な問題を引き起こす可能性のある“ビームハロー形成”のパラメータ依存性を調べた。

## 3. 研究の方法

非中性プラズマトラップ中に閉じ込められた荷電粒子群の運動は、加速器中を高速で伝搬するビームの運動と物理的にほぼ等価となり得ることが、本研究代表者により 10 年ほど前に証明されている。したがって、或る種の空間電荷効果は、大型加速器に頼らずとも、コンパクトなプラズマトラップシステムを用いて系統的に研究することができる。言うまでもなく、トラップ装置は加速器に比べて遙かに小型かつ安価であり、また重要な物理パラメータをほぼフルレンジで調節することができる。プラズマは実験室系で静止しているため高精度・高分解能の観測が可能で、粒子損失による放射化の危険性も全くない。このように、プラズマトラップ技術を応用した加速器研究手法はただ単に斬新であるばかりでなく、従来の実験手法を凌駕する、極めて有用な選択肢となる可能性を秘めている。

上で触れたように、本研究では 2 種類の非中性プラズマトラップシステムを併用した。加えて、実験データの理解を深めるため、複数の多粒子シミュレーションコードに基づく数値解析も行っている。詳細は以下の通りである：

### (1) 高周波イオントラップ

4本のロッド電極を対象に配置し、対向する電極には同位相、隣り合った電極には逆位相で交流電圧を加えて高周波電気四重極を構成する。これにより、軸に直交する平面上での荷電粒子閉じ込めが実現できる。これは、現代加速器における四重極磁石を使ったビーム集束と原理的に同等である。軸方向の閉じ込めは、ロッド電極両端に配置した別の電極に直流電圧を印加することにより達成する。この種のプラズマトラップは一般に“線形ポルトラップ”と呼ばれている。本研究用に開発した線形ポルトラップを図1に示す。ロッド電極は5分割されており、それぞれ電氣的に独立で、軸方向に複数のポテンシャル井戸を形成できるよう工夫されている。全長は約20cm、イオン閉じ込め領域は直径1cmで、極めてコンパクトな装置と言える。様々な種類のイオンを安定に閉じ込めることができるが、本研究では主に一価の Ar イオンを多用した。図1のトラップ本体はファラデーカップやマイクロチャンネルプレート (MCP) 等の計測器と共に真空容器の中に収まっており、タープ分子ポンプにより  $10^{-8}$  Pa 台の超高真空が実現されている。Ar イオンプラズマの生成は、真空容器中に中性の Ar ガスを導入し、ポルトラップに取り付けた電子

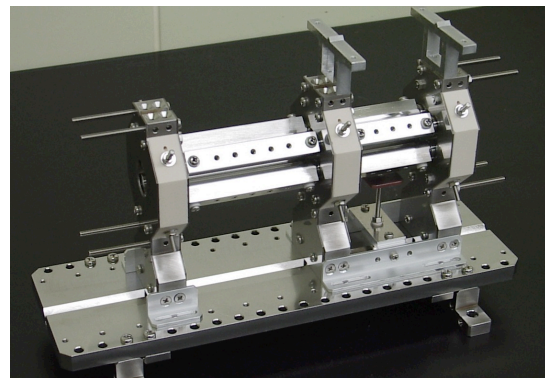


図1：機能分離型線形ポルトラップ



図2：S-POD システムの全景

銃でイオン化することにより行う。

高周波四重極の基本周波数は 1MHz 前後に設定した。このとき、実験で要求される電圧振幅の最大値は 100V 以下で済む。加速器のラティス構造や磁場誤差の影響を考察する場合、周波数の異なる複数の交流電圧を重畳して実験を行っている。加速器中のビームが受ける集束力をより正確に再現するため、矩形高周波増幅器を製作し、これを用いた実験も研究期間後半から開始した。直流・交流電圧の周波数や振幅、プラズマの生成・閉じ込め・射出、イオン数や粒子分布の計測ならびにデータの蓄積など、一連の実験手続きは全てパソコンで自動制御されている。これらトラップを応用した基礎ビーム物性研究のための実験システム全体を“S-POD (Simulator for Particle Orbit Dynamics)”と命名した。S-POD の全景を図 2 に掲げる。尚、準備段階で構築した S-POD のプロトタイプにはドップラーレーザー冷却システムが完備されており、Ca<sup>+</sup>プラズマの極低温化が可能である。このプロトタイプも本研究のため随時活用した。

## (2) 磁気トラップ

線形ポルトラップの他、一様磁場を使った非中性プラズマトラップも集団的ビーム不安定性の基礎研究に応用可能であることが示されている。研究代表者のグループは京都大学から数年前に移管された磁気トラップシステム (図 3) を所有しており、これを本研究目的のため流用した。図 3 の磁気トラップはビーム物性研究用に最適設計されているわけではないが、ビームハロー形成過程等に関する一定の有益な情報が入手可能である。

図 4 はプラズマの閉じ込め原理を模式的に示したものである。真空容器中に多数の独立なリング状電極が並んでおり、それぞれに適切な直流電圧を与えることによって多様な軸方向閉じ込めポテンシャルを形成することができる。一方、軸に直交する方向の閉じ込めを実現するためソレノイド磁

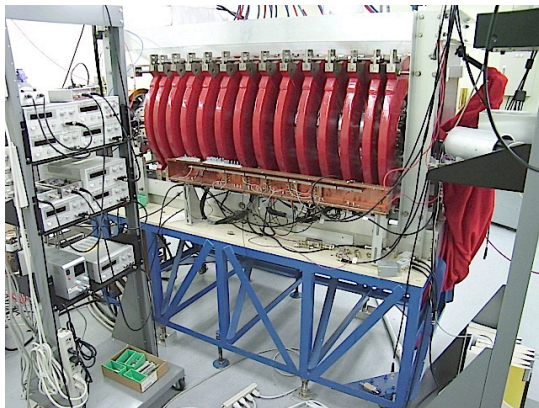


図 3 : 多重リング電極型磁気トラップ

場を用いる。磁束密度は数十から数百ガウス程度の範囲で調整可能で、必要に応じてミラー磁場を創ることもできる。これまでの実験では、リング電極電圧の高速スイッチにより、電子銃から撃ち込まれた大量の電子を閉じ込めている。所定の実験過程を経た後、純電子プラズマは電子銃の反対側にはき出され、ファラデーカップあるいは蛍光面付き CCD カメラで計測される。

本研究では、ビーム不整合に起因するハロー形成過程の観測に焦点を当て、プラズマの閉じ込め条件を変えながら系統的实验を行った。“ビーム不整合”とは、加速器のラティス構造によって決まる理想的な定常粒子分布関数からのずれを意味し、現実の装置では不可避である。不整合の度合いが大きい場合、ビーム中心核の周囲に低密度のハローが発生する。大強度ビームではハロー自体が相当数の粒子を含むため、その形成過程やパラメータ依存性を正確に把握しておかなければならない。さもなければ、大量のハロー粒子が真空容器と衝突して損失し、加速器全体が放射化してしまう恐れがある。ここでは、一定量 (10<sup>8</sup> 個程度) の純電子群を短時間捕捉した後、軸方向の調和ポテンシャル井戸を急激に変形することによって擬似的な不整合をプラズマに与えた。変形の度合いやタイミング、閉じ込め時間、電子プラズマの初期温度などを調整し、CCD を用いて粒子分布の変化を観測した。

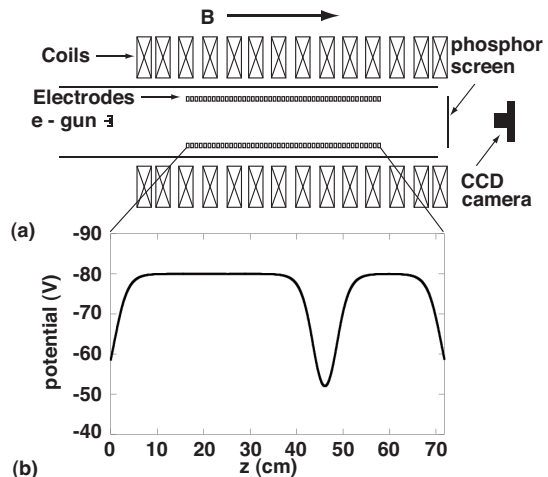


図 4 : 磁気トラップの模式図

## (3) 多粒子シミュレーション

S-POD のプロトタイプ設計を目指した準備研究の段階で、機能分離型線形ポルトラップの複雑な 3 次元構造が考慮可能なシミュレーションコードを開発した。市販の電磁場解析ソフト“CST-STUDIO”を併用することにより、様々な形状のトラップ中で荷電粒子がどのように運動するかを正確に予測できる。しかしながら、計算時間節



約のため、初期のコードでは粒子間クーロン相互作用が無視されていた。そこで本研究用として、空間電荷ポテンシャルの効果が導入可能な3次元分子動力学コードを新たに用意した。他方、より高速な多次元シミュレーションを実行するため、米国で開発されたPICコード“WARP”を活用した。これら数値計算コードが出力するデータを実験観測の結果と比較することにより、現象の物理的理解を深めることができる。

#### 4. 研究成果

研究成果の概要を以下に列記する：

##### (1) 新S-PODシステムの設計・構築

過去の原理検証実験を通じて蓄積したノウハウを基に、基礎ビーム物性研究用のテーブルトップシステム“S-POD”を新たに構築した(図2参照)。発展的な共鳴実験等に対応するため、コンピュータ制御系や電子回路に随時改良を加えた。今後も必要に応じて改良を施し、システムの完成度向上を目指したいと考えている。

新システム用の線形ポルトラップ(図1参照)も設計・製作し、その動作試験を実施した。本研究目的にとって十分な性能を持つことを確認後、以下で報告する共鳴実験の一部に使用した。旧システムも新システムと併用され、獲得データの信頼性確認ならびに研究計画遂行の効率化が図られている。

##### (2) 集団共鳴不安定性に関する研究

###### ① 共鳴条件の基本パラメータ依存性

プラズマの高周波閉じ込めポテンシャルが正弦的に変動する場合について、コヒーレント共鳴不安定性が発生する条件を実験的に確認した。実際の加速器で用いられる強集束ラティスは離散的な集束ポテンシャルを生むが、多くの場合周期的なので、フーリエ展開(換言すれば、無数の正弦的フーリエ成分に分解)できる。したがって、共鳴現象の基本メカニズムは、複雑な離散の高周波電圧を用いずとも、少数の正弦波

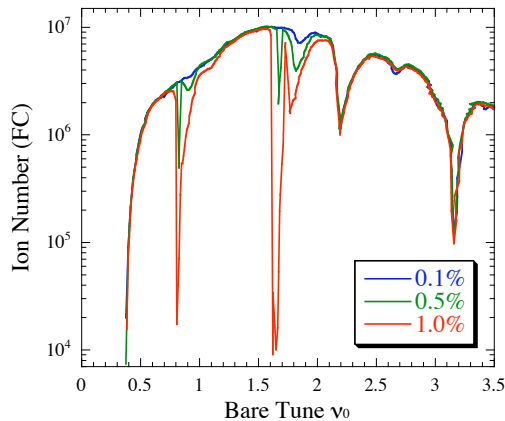


図5：共鳴不安定領域の観測例

電圧を重ね合わせることにより一定の精度で研究できる。この点を念頭に、周波数の異なる複数の正弦波電圧を四重極電極に重畳して、不安定領域の変化を観測した。図5はその一例である。縦軸はポルトラップ中に安定に捕獲できたイオン数、横軸はいわゆるベータトロンチューン $\nu_0$ (高周波電圧の振幅に対応)である。この実験例では、3回対称性を有する蓄積リングが想定されており、単一の基本周期構造長は基本正弦波の4波長分である。すなわち、リング一周は $4 \times 3 = 12$ 個の正弦波から成る。重畳された長周期の正弦波ハーモニクス(0.1%, 0.5%, 1.0%)の振幅を、基本波振幅の0.1%、0.5%、1.0%に設定した場合の結果が色分けして示されている。3回対称性が強まるにつれて、複数のチューン領域で非常に顕著な粒子損失が新たに発生している。他方、 $\nu_0 \approx 2.2$ および $\nu_0 \approx 3.2$ 付近の共鳴不安定領域はラティス対称性の変化とは無関係に存在していることがわかる。リング一周分の波長を持つ、さらに長周期の正弦波電圧を印加すると、不安定領域の数が増えることも確認できた。

これらの観測結果から、コヒーレント共鳴不安定条件は以下の式で与えられると結論できる：

$$\nu_0 - C_m \Delta\nu \approx N_{sp} \cdot \frac{n}{2m}$$

ここで、 $\Delta\nu$ は粒子間クーロン斥力によるチューンシフト、 $N_{sp}$ はリング一周に含まれる単位集束構造の数、 $m$ および $n$ は正の整数である。また $C_m$ は不安定性の次数に依存する、1より小さい定数である。チューンシフト $\Delta\nu$ は粒子密度に依存するので、初期の蓄積粒子数が変わると、不安定領域の位置も変化すると予想される。この予想を確認するために行った実験の結果が図6である。粒子数の増大に伴って、実際に共鳴領域が移動している。実験と並行して行ったWARPシミュレーションでも、上記共鳴条件の妥当性が確認されている。尚、本実験

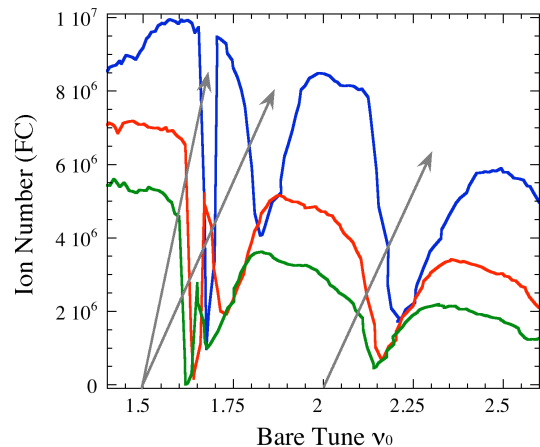


図6：不安定領域の粒子密度依存性

で実現されたチューンシフト  $\Delta v$  は、 $v_0$  のおよそ 20% に達するが、これは現在稼働中の最高性能の大強度円形加速器で実現されているシフト量と比べても有意に大きい値である。

### ② 強集束ラティスの導入

生成・制御の容易な正弦波電圧の重畳による共鳴実験に続いて、実際の強集束ラティス構造をより正確に反映した、離散的な矩形高周波電圧を使いプラズマの安定性を調査した。まず、最も基本的な強集束構造である“FODO セル”に対応した矩形波電圧を自作の高周波増幅器を用いて発生させ、正弦波実験と同様の手順で、イオン損失領域のベータトロンチューン依存性を調べた。その結果、不安定領域の分布は上の①の実験で観測されたものとほぼ同じであることが確認できた。これは正弦波と FODO 型波形の類似性から予想された結果であり、また WARP シミュレーションのデータとも矛盾しない。現在、いわゆるフィリングファクター (FODO セルの全長に対する四重極場存在領域の比) を当初の 50% から大きくずらした場合に生じる共鳴条件の変化を調査中である。

平成 23 年度後半には、FODO 型とは異なるラティス構造 (FFDD 型、FDF 型など) を念頭に置いた共鳴実験の準備も開始した。印加電圧の複雑化に伴う制御系やソフトウェアの改良ならびにその動作確認を経て、初期データの蓄積が進捗している。ただし、信頼性の高いデータを定常的に生産できるようになるまでには、さらなる予備実験の遂行が不可欠である。WARP シミュレーションやブラソフ解析等も含め、集団共鳴現象のラティス依存性に関する実験・理論両面からの綿密な検討を今後も引き続き行っていかなければならない。

### ③ 共鳴横断効果の検討

固定磁場型円形加速器 (FFAG) やビーム冷却蓄積リング等で問題となり得る“共鳴横断効果 (resonance crossing)”に関する系統的实验の準備作業を進めてきた。低密度領域における観測データの S/N 比を向上するため、ファラデーカップに加え、より感度の高い MCP も必要に応じて使用した。本実験用の電圧制御回路を製作する一方、イオン捕獲領域の四重極電極を伸長するなど、本格的な実験開始に向け S-POD の改良を進めてきた。現時点で既に、多くの興味深いデータの獲得に成功している。図 7 はつい最近イギリスに建設された非スケール型 FFAG の原理検証器“EMMA”を想定した共鳴横断実験のデータである。横軸は共鳴横断の速度 (右に行くほど低速度)、縦軸は共鳴横断後トラップ中に残存したイオン数を表す。初期イオン数が  $10^5$  個 (低密度)、

$10^6$  個、 $10^7$  個 (高密度)、それぞれの場合に残存イオン数が共鳴横断速度の関数としてどのように変化するかが示されている。この結果から、密度の高いビームほど強く共鳴横断の影響を受け、横断速度の低下に呼応して顕著な粒子損失が発生すると結論できる。粒子損失の主要因は四半整数チューン近傍で誘起される線形共鳴であることも確認済みである。

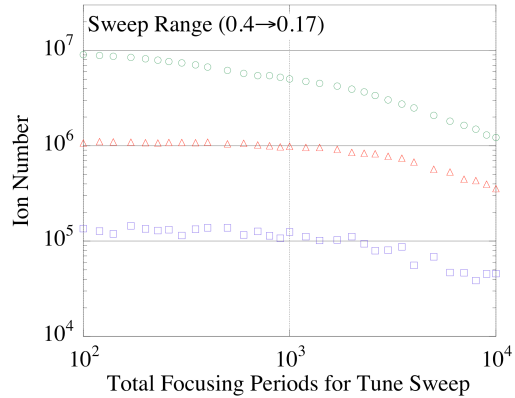


図 7 : 共鳴横断実験のデータ例

### (3) ビームハロー形成に関する実験的研究

多重電極型の磁気トラップシステムを用いて、ビーム不整合由来のハロー形成過程を実験的に確認した。現有の磁気トラップは老朽化している上、本課題研究目的に特化されたものではないが、にもかかわらず大型加速器に依拠した従来の実験手法では達成困難なビームハローの明確な可視化に成功した。この成果は、大強度加速器の基礎研究に対する、この種の磁気トラップ実験の有用性を端的に証明するものである。図 8 は観測データの一例である。上図(a)および(b)は蛍光面によるプラズマ断面方向の観測結果で、対応する粒子密度分布が下図(c)に示されている。(a)はプラズマに攪乱(不整合)を与えなかった場合、(b)は蓄積中に一定の不整合を加えた場合のデータである。不整合により、大きなハローが形成されていることがわかる。現在までに実施された様々な予備実験から、不整合の度合いやプラズマの初期温度に依存するハロー生成量の変化が確認されている。しかしながら、獲得した実験データの多くは、過去の理論的予想を大きく上回るハロー粒子の生成を示唆している。WARP によるモデルシミュレーションでも、この観測結果を再現できていない。このデータは次世代大強度加速器の基礎設計に大きな影響を与える可能性があり、今後更なる検証が是非とも必要である。この目的のため、現有磁気トラップに代わる、大強度ビーム研究用として最適化された後継機的设计を進めている。

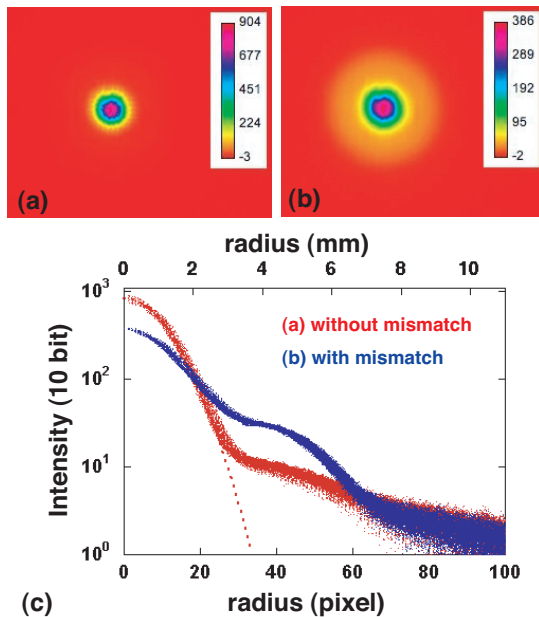


図8：ビームハローの実験観測例

以上のように、次世代高品位ビームの基礎研究を（既存の大型加速器に頼ることなく）より高精度かつ系統的に実行するための全く独自の小型実験ツールを考案・構築し、その有用性を実証した。この新手法に基づくビームダイナミクス研究は始まったばかりであり、近い将来、加速器科学への様々な応用展開が期待される。S-POD が含む各種コンポーネントの性能向上や研究目的毎に最適化された多様なトラップを使用することによって、新手法の適用範囲を拡大し、その完成度を高めていきたいと考えている。また、高周波トラップだけでなく、加速器研究専用の磁気トラップシステムを新たに設計・構築することが望まれている。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 11 件）

- ① 岡本宏己 他（分担執筆），“ビーム物理の世界 ～近くて遠い隣分野～”，プラズマ・核融合学会誌 (Journal of Plasma and Fusion Research), Vol. 86, No. 8 (2010) pp. 451 – 480. 査読有
- ② H. Higaki, K. Fukata, K. Ito, H. Okamoto, and K. Gomberoff, “Density and potential profiles of non-neutral electron plasmas in a magnetic mirror field”, Phys. Rev. E **81** (2010) 016401. (8 pages) 査読有
- ③ H. Sugimoto and H. Okamoto, “Indirect transverse laser cooling of ions in a linear Paul trap”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 084501. (8 pages). 査読有
- ④ S. Ohtsubo, M. Fujioka, H. Higaki, K. Ito, H.

Okamoto, H. Sugimoto, and S. M. Lund, “Experimental study of coherent betatron resonances with a Paul trap”, Phys. Rev. ST Accel. Beams **13** (2010) 044201. (12 pages) 査読有

- ⑤ Y. Yuri, H. Okamoto, and H. Sugimoto, “Simulation study of emittance growth from Coulomb collisions in low-temperature ion beams”, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 124501. (10 pages) 査読有
- ⑥ H. Okamoto, H. Sugimoto, and Y. Yuri, “Coulomb coupling and heating of charged particle beams in the presence of dispersion”, J. Plasma Fusion Res., Vol. 8 (2009) pp. 950 – 954. 査読有

〔学会発表〕（計 19 件）

- ① H. Okamoto (invited talk), “Non-neutral plasma traps for accelerator-free experiments on space-charge-dominated beam dynamics”, 2011 Particle Accelerator Conf. (New York, USA, March 28, 2011).
- ② H. Okamoto (invited talk), “Modeling of ultra-cold and crystalline ion beams”, 10th International Computational Accelerator Physics Conference (San Francisco, USA, September 3, 2009).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡本 宏己 (OKAMOTO HIROMI)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授

研究者番号：40211809

### (2) 研究分担者

檜垣 浩之 (HIGAKI HIROYUKI)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：10334046

伊藤 清一 (ITO KIYOKAZU)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教

研究者番号：70335719

池上 雅紀 (IKEGAMI MASANORI)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：20332116

### (3) 連携研究者

生出 勝宣 (OIDE KATSUNOBU)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：50150008