

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03662

研究課題名(和文) 小型イオントラップを応用した次世代ハドロン加速器における空間電荷効果の系統的研究

研究課題名(英文) Systematic experimental study of space-charge-induced beam instability in next-generation hadron accelerators using a compact ion-trap system

研究代表者

岡本 宏己 (Okamoto, Hiromi)

広島大学・先端物質科学研究科・教授

研究者番号：40211809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：位相空間密度の高い次世代ハドロンビームにおいて顕在化する集団不安定性、とくに強い自己クーロン場を源とする“空間電荷効果”の系統的研究を実施した。この目的のため独自に開発した卓上イオントラップシステム“S-POD”(Simulator of Particle Orbit Dynamics)を活用し、集団的な共鳴不安定化現象の発生機構とそのパラメータ依存性を多角度から明らかにした。加速器中に点在する非線形場の影響を系統的に調べるため、特殊な多極イオントラップのプロトタイプを設計・製作した。

研究成果の概要(英文)：A systematic experimental study is made of the so-called “space-charge effects” induced by the strong Coulomb self-field potential of an intense hadron beam in a next-generation accelerator. The unique ion-trap apparatus “S-POD”(Simulator of Particle Orbit Dynamics) developed at Hiroshima University is employed for this purpose. S-POD provides a many-body dynamical system (non-neutral plasma) physically equivalent to a relativistic charged-particle beam and thus enables us to explore various space-charge effects in a local tabletop environment. We have clarified the fundamental mechanism and parameter-dependence of coherent resonance instability driven by the space-charge potential and by weak imperfection fields. A prototype of a multipole ion trap has also been designed and constructed for the future study of beam stability under the influence of strong external nonlinearities.

研究分野：数物系科学

キーワード：加速器 荷電粒子ビーム イオントラップ 空間電荷効果 集団的ビーム不安定性 非線形共鳴

### 1. 研究開始当初の背景

加速器を用いた荷電粒子の人工的加速実験が始めて行われたのは今から1世紀近く前のことである。当初は最先端の基礎物理研究を目的としていたが、粒子ビームの有用性が多方面で認識されるに伴い、加速器の応用範囲は拡大の一途を辿ってきた。現在では、医療、物質・生命科学、産業などを含む幅広い分野で、実に多種多様な粒子のビームが必要不可欠なツールとなっている。その必然的な結果として、ユーザーが求める加速器の性能(換言すれば、ビームの質に対する要求)は日増しに高度化している。

利用目的に応じた加速器性能の本質的向上(大電流化、超高エネルギー化、など)を実現するためには、技術的な課題の克服に加え、極めて複雑な荷電粒子多体系としてのビームの物理的振る舞いに対する深い理解が必須である。しかしながら、この種の多体問題の取り扱いには実験的にも理論的にも非常に難しく、ビームダイナミクスの専門家にとって挑戦的な研究テーマのひとつとなっている。

### 2. 研究の目的

ビームを構成する個々の荷電粒子はクーロン自己場を介して常時相互作用している。クーロン力の到達距離は非常に長いので、ビームは全体として集団的に振る舞うことが知られている。このクーロン自己場の存在に起因する非線形集団運動、いわゆる“空間電荷効果”を広いパラメータ領域で系統的に調べるのが本課題研究の目的である。とくに、ビーム集束場の周期的変動が原因で起こる共鳴不安定性の発生条件を精査する。

現在、空間電荷効果研究の多くは多粒子シミュレーションコードに依拠して行われている。実験的な努力も勿論続けられているが、既存の加速器を使う限り、基本パラメータの可変範囲には自ずと厳しい限界がある。また、ビームの集団運動を支配する基礎方程式は既知だが複雑極まりなく、その数学的解法はほぼ不可能である。これらの事実および昨今の急速なCPU性能の向上を併せて考えれば、計算機上の仮想世界で数値実験を行ってみるのが最も手っ取り早いアプローチだと言えるだろう。ところが、空間電荷効果がとくに問題となる大強度ハドロンビームは膨大な数の荷電粒子を含むため、高性能の並列計算機を使ったとしても、精度の高いシミュレーションには相当なCPU時間を要してしまう。これら従来手法が抱える難点を克服するため、本課題研究では代表者のグループが独自に開発した小型実験システム“S-POD”を用いる。

### 3. 研究の方法

S-PODは Simulator of Particle Orbit Dynamics の略で、高周波イオントラップ技術を応用した国際的に見ても極めてユニーク

なビーム力学専用の実験装置である。この斬新な研究手法は「重心系で見た荷電粒子ビームの集団運動と実験室系における非中性プラズマの集団運動の物理的等価性」に基礎を置いている。20年近く前、本研究代表者の岡本が理論的アイデアを提案し、広島大学でその実用化へ向けた基礎研究が精力的に行われてきた。細かい検討課題・開発要素はいくつか残されているものの、S-PODシステムは概ね完成の域に達している。ちなみに、米国プリンストン大学のグループも同様のビーム力学研究用イオントラップシステムを構築したが、性能は本家本元のS-PODがはつきり上回っている。また、ラザフォードアップルトン研究所とオックスフォード大学のチームは、岡本らの指導の下、S-PODとほぼ同じ実験装置を現在英国に構築中である。

S-PODの主要構成要素は、線形ポールトラップ(LPT)と呼ばれる小型のイオン閉じ込め装置、多数の直流および高周波電源、これらを制御するパソコン、複数のプラズマ計測器、真空ポンプ、レーザー冷却システム、等である。LPTは4本のロッド電極を対称的に配置した構造を持っており、対向する電極に同符号、隣り合った電極には逆符号の高周波電圧を印加する。形成された電気四重極により、ロッド電極に囲まれた狭い空間に大量のイオンを閉じ込めることができる。上で触れたように、このイオンプラズマの集団運動は加速器中を相対論的速度で伝搬する荷電粒子のそれと物理的にはほぼ等価であることが証明できる。本実験では、使用する高周波の基本周波数を1MHzに設定し、イオン種として一価のアルゴン( $^{40}\text{Ar}^+$ )を選んだ。真空容器に中性ガスを導入後、小型電子銃からの電子ビームで電離して $^{40}\text{Ar}^+$ イオンを生成する。プラズマの密度は電子ビーム電流あるいは中性ガスの導入量を調整することによってコントロールする。尚、閉じ込めるイオンの種類は空間電荷効果の本質とは無関係である。

自己クーロン場による集団的なビーム不安定性はごく少数の基本パラメータに支配されている。中でもとくに重要な物理量が“外部集束力の強さ”および“位相空間上での荷電粒子密度”である。前者を端的に表す指標は“チューン(あるいは、ベータatron振動の位相進み)”と呼ばれている。ビームを構成する個々の粒子は四重極場が生む線形集束力により設計軌道の周りで高速振動している。その振動数がチューンで、以下では記号 $\omega$ で表すことにする。また、この振動の単位集束構造当たりの位相進みを $\sigma$ で表す。すなわち、 $\sigma = 2\pi\omega$ とする。一方、位相空間粒子密度の尺度となるのは“チューン降下率”と呼ばれるパラメータである。これを記号 $\eta$ で表す。粒子密度が上昇するとクーロン斥力によって外部集束場の効果が弱まり、チューンが実効的に減少する。減少した実効チューンの値を $\nu$ とすれば、 $\eta = \nu/\omega$ と定義で

きる。S-POD ではこれら基本物理量の制御が容易で、大型加速器に依拠した従来の手法では困難な空間電荷効果の系統的实验研究を展開することができる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 集団共鳴不安定性の实验的・理論的解明

加速器の性能向上に伴ってビームの大電流化が進み、空間電荷効果に対する基礎的理解の重要性が強く認識されるに至っている。とくに、大強度イオンビームのコヒーレント共鳴不安定性に関する理論的・实验的成果の報告が近年増加している。しかしながら、クーロン自己場が駆動する集団パラメータ共鳴の役割（あるいは存在そのもの）を見落とした論文が数多く発表されており、誤った認識が定着しつつあった。本基盤研究を通して得られた实验的知見およびその理論的解釈は、この混乱に終止符を打つ成果であると言える。観測データを統一的に理解する上での鍵となったのが、共鳴条件

$$m(v_0 - C_m \Delta v) = \frac{n}{2} \quad (a)$$

である。 $m$  および  $n$  はいずれも自然数で、前者はビームの集団振動モードの次数を表す。 $C_m$  は次数  $m$  に依存する 1 より小さい定数、 $\Delta v$  はクーロン斥力によるベータトロン振動数の平均的シフト量である。この条件式は 15 年以上前、岡本と横谷によって始めて公式化されたが、その実用的価値は最近まで十分に認識されていなかった。半世紀近く前、Frank Sacherer は式(a)と非常に似通った有名な“コヒーレント共鳴条件”を理論的に導いたが、彼の条件式には右辺の因子  $1/2$  が無い。この僅かな差が観測データの物理的解釈に際して本質的な差を生むことが、本基盤研究で疑問の余地無く証明された。

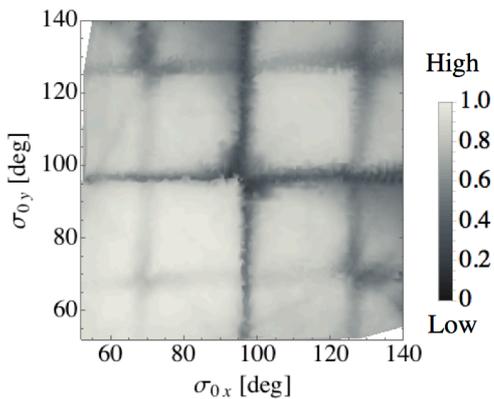


図1 ダブルレット集束のチューンダイアグラム

図1は最も標準的なビーム集束構造として知られる“ダブルレット型ラティス”を想定した、S-POD 実験データの一例である。蓄積時間 10 ミリ秒後の残存イオン数がグレースケールで表現されており、粒子損失が多い部分ほど黒色に近づく。添え字の  $x$  と  $y$  はビーム進行方向に垂直な平面上の二自由度を表す。

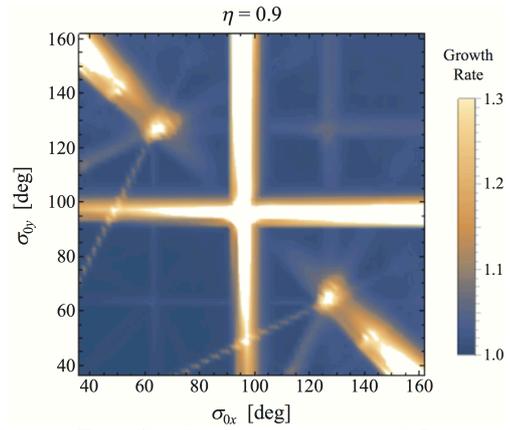


図2 多粒子シミュレーションの結果

両方向のチューンあるいはベータトロン振動の位相進み( $\sigma_{0x}$ ,  $\sigma_{0y}$ )を軸としてビーム安定領域をプロットした“チューンダイアグラム”には、加速器の動作点を決定する上で有益な情報が集約されている。公式(a)から、図1上で縦横に走る6本の粒子損失帯の源は主に2次および3次の集団パラメータ共鳴であると解釈できる。同様の図は数年前のS-POD 実験でも得られているが、本研究ではチューンの探索範囲を広げ、測定点の数も増やしてみた。その結果、新たに（自己クーロン場が駆動していると考えられる）複数の結合共鳴不安定帯の存在が初めて確認された。本実験を念頭に置いた多粒子シミュレーションを並行して実施したところ、図2のように、観測事実と非常によく合致する結果が得られた。色調の変化は不安定性の成長率を表している。この数値データに基づいて、公式(a)を結合共鳴まで含む形に拡張した仮説

$$k v_{0x} \pm l v_{0y} = \frac{N_{sp}}{1 - (1 - \eta) C_m} \cdot \frac{n}{2} \quad (b)$$

が提案された。ここで、 $k$  および  $l$  は整数で、共鳴の次数  $m$  と  $m = k + l$  なる関係にある。また、 $v_{0x(0y)} = \sigma_{0x(0y)} / 2\pi$ 、 $N_{sp}$  はラティス超周期数と呼ばれるパラメータで円形加速器を構成する単位集束構造の数を表す。上式は

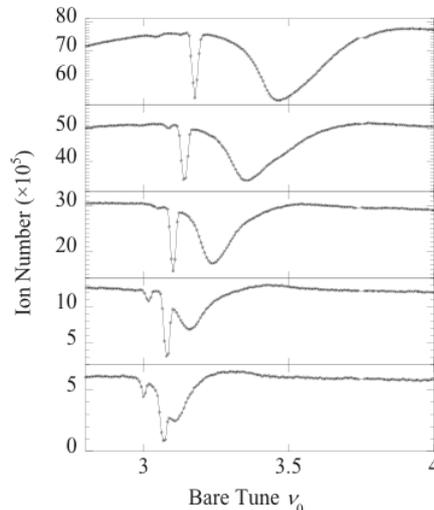


図3 半整数チューン近傍における二重共鳴構造

1次元公式(a)の美しい一般化になっている。その妥当性の実験的検証は今後の大きな課題の一つである。

四重極集束場に周期的双極場を重畳し、故意に整数共鳴を誘起する S-POD 実験が数年前に実施された。固定磁場強集束加速器 (FFAG) における整数共鳴横断の実験的研究を意図していたが、共鳴条件(a)は外場が双極成分を含まない場合でも双極振動 ( $m=1$  のモード) が増幅される可能性を示唆している。また、理論上は  $C_1=0$  なので、双極モードの共鳴不安定性はビームの密度に依らないはずである。先行研究で見落とされていたこの可能性を実験的に調査した。図3は完璧な3回対称性をもつ円形加速器 ( $N_{sp}=3$ ) を想定して行った S-POD 実験のデータで、所定の蓄積時間後の残存イオン数がチューンの関数としてプロットされている。この場合、式(a)右辺の  $n$  として3の倍数のみが許されるため、四重極モード ( $m=2$ ) の共鳴はチューン  $\nu_0$  が 1.5 の倍数に近い値をとる時に起こると予想される。一方、双極モード ( $m=1$ ) の共鳴は  $\nu_0=3, 6, \dots$  のとき発生するはずである。実際、図3から、 $\nu_0=3$  近傍に複数の異なる不安定帯が重なり合って存在していることがわかる。初期蓄積イオン数を増やすと、幅の広い不安定帯は右方向に移動する。このイオン損失は四重極共鳴によるもので、損失領域のシフトは式(a)中の  $\Delta\nu$  の増加が原因である。同時に、幅が狭く強い不安定性が低チューン側で成長しているが、これは双極共鳴によるものである。予想通り、双極共鳴帯はイオン密度の変化に対する影響をほとんど受けていない (高チューン側への僅かなシフトの原因は電極表面上に誘起された鏡像電荷の影響であることが、多粒子シミュレーションにより指摘されている)。この鋭い共鳴は、ラティス対称性の破れの効果を追求した過去の S-POD 実験でも観測されていたが、発生原因は不明であった。本基盤研究により、その起源と発生のメカニズムが明らかとなった。

## (2) ノイズによるビーム安定性劣化

現実の加速器は非常に複雑で、多数の独立した要素で構成されている。個々の構成要素は多かれ少なかれ必ず人為的な誤差を含んでいる。たとえば、ビーム集束用四重極電磁石を励磁する電流は完全には安定でなく、電源の性能に応じたリップルがある。その影響で、線形集束場の強度は理想値の周りで常時僅かに揺らいでいる。このランダムな場の揺らぎは多くの場合、単に無視あるいは軽視されている。しかしながら、次世代の高性能加速器ではビームの長時間安定性の確保が重要な課題のひとつとなっており、微弱なノイズの効果も慎重に検証しておかなければならない。この種の課題の系統的研究は、従来の手法を使う限り、ほぼ不可能に近い。実際、大型加速器でノイズレベルの効果を制御す

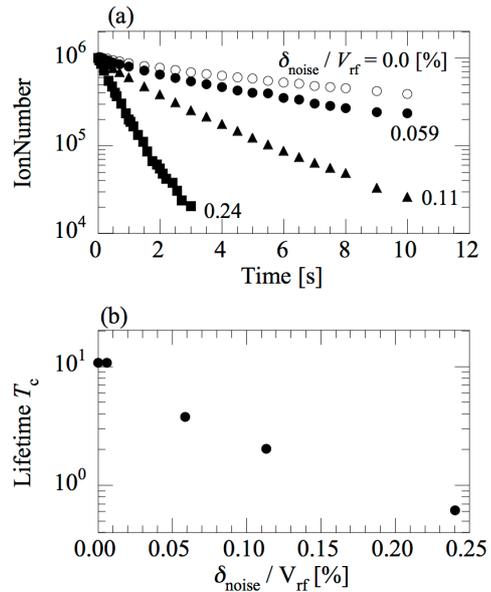


図4 LPT 中の残存粒子数の時間発展およびプラズマ寿命のノイズ強度依存性

るのは困難である。他方、精度の高い長時間多粒子シミュレーションには (仮に高速並列計算機を駆使したとしても) 法外な CPU 時間を要するだろう。

S-POD を用いれば、ノイズ問題に対する系統的アプローチが可能となる。具体的には、四重極電極に加える高周波電圧 (振幅  $V_{\text{rf}}$ ) にランダムなノイズ電圧  $\Delta V$  を重畳するだけでよい。ノイズはファンクションジェネレータで生成するため、その周波数バンド幅や振幅は自在に調節できる。以下ではノイズの二乗平均強度を記号  $\delta_{\text{noise}} = \sqrt{(\Delta V)^2}$  で表す。図4は S-POD による実験データで、上図は残存イオン数の時間発展、下図は測定されたプラズマ寿命のノイズ強度依存性をプロットしたものである。 $V_{\text{rf}}$  は 42 V に固定されており、このとき強集束セル当たりのチューン  $\nu_0$  は 0.145 である。また、この実験では白色のノイズが用いられている。まず、閉じ込め場がノイズを含まない場合 ( $\delta_{\text{noise}} / V_{\text{rf}} = 0$ )、図からプラズマの寿命  $T_c$  はおよそ 10 秒あることがわかる。これはビームが 1 千万の強集束セルを大きな損失なく通過したことに対応し、通常の LPT 運転条件下ではイオン群の運動が非常に安定であることを示している。ノイズを印加すると、プラズマの長時間安定性が明確に損なわれてしまっている。下図から、寿命  $T_c$  はノイズ強度の増大と共に指数関数的に短くなることがわかる。ビームを円形加速器中に極めて長時間保持しなければならない場合、四重極電磁石用電源が含むごく微弱なリップルに対しても十分な注意を払う必要のあることが実験的に示唆された。

この弱い不安定性を説明するため、1次元ブラソフ・ポアソン方程式の摂動解析を試みた。その結果、ノイズによって共鳴的な集団不安定性が誘起され得ることが判明した。この理論的予想が正しければ、限られた周波数

帯のノイズ成分のみが粒子損失に寄与するはずである。共鳴条件を満たすノイズ帯の中心周波数を  $f_{\text{noise}}$ 、円形加速器におけるビームの周回周波数を  $f_{\text{rev}}$  で表すと、ブラソフ理論から次の式が結論できる：

$$2(v_0 - C_2 \Delta v) = \left| n \pm \frac{f_{\text{noise}}}{f_{\text{rev}}} \right| \quad (\text{c})$$

共鳴条件(c)の左辺は四重極振動モードのチューンで、式(a)において  $m=2$  とおいたものに他ならない。図4の実験条件、すなわち  $\omega_0 = 0.145$  および  $f_{\text{rev}} = 1$  [MHz]を上式に代入すると、プラズマの不安定化に関わる(チューンシフトを無視した)ノイズ周波数として  $f_{\text{rev}}$  [MHz]  $\approx 0.29, 0.71, 1.29$  が得られる。ファンクションジェネレータで狭い周波数帯に制限したノイズを生成し、図4と同様の実験を行った結果、実際にこれらの周波数近傍のノイズ成分のみが粒子損失に関与していることが確認された。

### (3) 非線形多極イオントラップの設計と試作

S-PODで現在使われているLPTは、上で触れた通り、ロッド電極4本で四重極場を生成する。ごくありふれた最も簡便な構造で、信頼性が高いと言える。しかしながらその一方で、この従来型LPTは極の数が4であるため、原理的に非線形場をコントロールできない。電極の設置誤差や製作精度等に依存して弱い非線形場が誘起されるが、これらの摂動は電極に電圧が印加されたときのみ生じる。すなわち、非線形摂動の時間構造と強度はプラズマ閉じ込めのための四重極場と不可避的に強い相関をもつ。この制約を排除するため、新型のLPTを設計・試作した。図5は試作1号器の全体写真である。プラズマ閉じ込め領域の空間的サイズや運転周波数はこれまでのLPTと同じである。イオン生成領域の構造も従来型のままであるが、プラズマを集積して実験を行う領域には4枚の板状補助電極が追加されている。補助電極は四重極ロッドの間に挿入され、外観的には全体として八重極を構成する。補助電極の形状や位置は、四重極ポテンシャルを乱さないよう最適化されている。これらの電極に適切な電圧を印加することにより、六重極あるいは八重極場を所

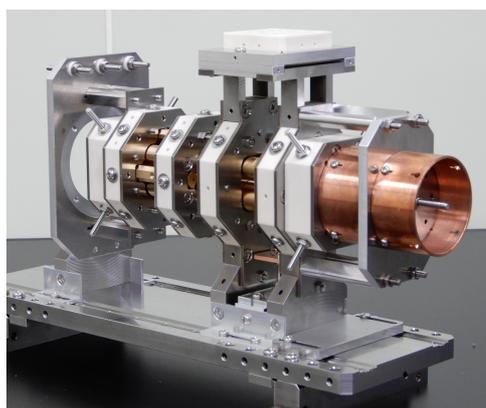


図5 非線形多極イオントラップのプロトタイプ

定のタイミングで大幅に強めることが可能となる。この新型LPTを使えば、円形加速器の局所に設置される軌道補正用非線形磁石がビームの安定性に及ぼす影響を系統的に調べることができる。図5のLPTはS-POD III号器に導入され、現在その動作試験が行われている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件)

- ① K. Ito, H. Okamoto, Y. Tokashiki, and K. Fukushima, “Coherent resonance stop bands in alternating gradient beam transport”, *Phys. Rev. Accel. Beams* **20** (2017) 064201. (18 pages) 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevAccelBeams.20.064201
- ② K. Moriya, M. Ota, K. Fukushima, M. Yamaguchi, K. Ito, and H. Okamoto, “Double stop-band structure near half-integer tunes in high-intensity rings”, (Editors’ suggestion) *Phys. Rev. Accel. Beams* **19** (2016) 114201. (13 pages) 査読有  
DOI:10.1103/PhysRevAccelBeams.19.114201
- ③ K. Fukushima and H. Okamoto, “Design study of a multipole ion trap for beam physics applications”, *Plasma and Fusion Res.* **10** (2015) 1401081. (9 pages) 査読有  
DOI: 10.1585/pfr.10.1401081

[学会発表] (計15件)

- ① Hiromi Okamoto, “Experimental simulation of intense beam dynamics with a Paul ion trap”, Workshop on the Frontiers of Intense Beam Modeling (Boulder, Colorado, USA, October 3, 2016). 招待講演

## 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

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

### (3) 連携研究者

發知 英明 (HOTCHI, Hideaki)  
日本原子力研究開発機構・原子力化学研究部門・副主任研究員  
研究者番号：00391334