

## 新博士紹介

氏名	福島 慧* (FRIB, Michigan State U.)
論文提出大学	広島大学
学位種類	博士 (理学)
取得年月日	2016年3月23日
題目	Stability analysis of non-neutral ion plasma in a linear Paul trap and its application to particle beam dynamics

## 1. はじめに

加速器におけるビームの大強度化・低エミッタンス化は様々な研究分野において常に要求される要素である。そのどちらを目指した場合でも、“空間電荷効果”として知られている内的なクーロン相互作用による非線形な集団現象が増大する。空間電荷効果はエミッタンスの劣化やビーム損失などを引き起こす可能性があるため、先の要求に対して大きな問題となる。計算機の発展に伴い、空間電荷効果に対する系統的な研究を行う際に最も一般的な手法が数値シミュレーションである。これはビーム運動の外的要因に関して高い精度で再現が可能となる一方、大強度ビームに含まれる膨大な数の荷電粒子間のクーロン相互作用を厳密に計算するには大規模計算機を用いても膨大なCPU時間を要する。そのため電磁場計算に近似を導入せざるを得ず、計算精度と計算時間がトレードオフの関係になってしまう。

空間電荷効果の研究に付随する以上のような難点を克服するため、広島大学では非中性プラズマトラップを応用した全く新しい実験システムの開発を進めてきた。このシステムは“加速器中の荷電粒子ビームと線形ポールトラップ中の非中性プラズマの物理的等価性”に基礎を置いている。巨大な加速器と等価な力学系を非常にコンパクトかつ安価なトラップ中に再現し、それを使って空間電荷効果に関する様々な情報を獲得するというアイデアである。プラズマトラップはパラメータの

可変性に優れ、高密度なプラズマの生成・観測も比較的容易である。本研究の目的は、このトラップ実験と並行した系統的な数値シミュレーションを通じ、ビーム力学における空間電荷効果に対する基礎的理解を深化させることである。

## 2. 理論的背景

図1に広島大学で使用している線形ポールトラップの模式図を示す。四重極電極に高周波を印加することで、発生する電場により横方向のプラズマを捕捉、軸方向には直流電圧で井戸型のポテンシャルを生成し捕捉する。このとき、プラズマを近似的に軸方向に一様分布していると仮定し、横方向の運動に注目するとトラップ中に捕捉された荷電粒子のハミルトニアンは、

$$H = \frac{p_x + p_y}{2} + \frac{1}{2} K(\tau)(x^2 + y^2) + \phi_{SC}, \quad (1)$$

となる。ここで、 $\tau=ct$ 、 $K(\tau)$ は収束構造に依存する関数、 $\phi_{SC}$ は自己場によるスカラーポテンシャル、つまり空間電荷効果による項である。これは四重極磁場で構成された加速器ビームの横方向ハミルトニアンと係数を除いて等価である。この集団運動は振動数の異なる無数の振動モードの重ね合わせとして表現できることが知られている。特定の振動モードが周期的な外部駆動力と共鳴すると、振幅が増大しそのモードは不安定となる。1次元のブラソフ理論によると、 $m$ 次の振動モードが共鳴によって不安定化する条件は以下の

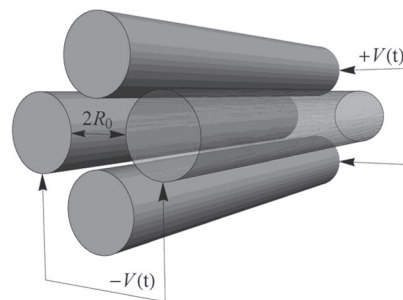


図1 線形ポールトラップの模式図。

\* Facility for Rare Isotope Beams, Michigan State University (E-mail: fukushim@frib.msu.edu)

式で与えられる。

$$m(\nu_0 - C_m \Delta\nu) \cong \frac{n}{2}, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

ここで、 $\nu_0$  はビームのベアチューン、 $\Delta\nu$  は空間電荷効果によるチューンシフト、 $C_m (<1)$  はモード次数に依存する定数である。これは、空間電荷効果に起因する 2 次 ( $m=2$ ) の線形共鳴不安定性が四半整数ごとに存在することを表している。

### 3. 集団共鳴シミュレーション

本研究では LBNL で開発された PIC (Particle In Cell) コード “Warp” を用い数値シミュレーションを行った。トラップの二次元断面を想定し、収束構造、及びプラズマ密度にマッチした初期分布を生成しプラズマの時間発展を計算、共鳴による RMS エミッタンスの変化を調査した。

シミュレーションを様々なチューンで実行して得られたビームの不安定条件 (ストップバンド) を図 2 に示す。 $\nu_0 \approx 1/6, 1/4, 1/3$  の位置に共鳴による不安定性が確認できる。これらは、式 (2) と一致しており、それぞれ 3 次, 2 次, 3 次の集団共鳴不安定性によるものだと考えられる。また、 $\nu_0 \approx 1/4$  の共鳴は、チューンディプレッション  $\eta (=1-\Delta\nu/\nu_0)$  に強く依存していることがわかる。つまり、次世代加速器で想定されているようなビームの大強度化・低エミッタンスを目指した場合、現世代の  $\eta \approx 1.0$  のビームでは無視することができた  $\nu_0 \approx 1/4$  の集団共鳴によるエミッタンスの劣化が顕在化すると考えられる。

実験ではエミッタンスの劣化によって、粒子損失が引き起こされるため、共鳴によるストップバンドでは、捕捉粒子数が減少する。実験結果はシミュレーションとよく一致しており、 $\nu_0 \approx 1/4$  では粒子数の増加に伴い、粒子の損失率が増加するというシミュレーションと同様の結果が得られている。

### 4. 非線形ビーム力学への応用

プラズマトラップでは工作精度の問題上、円形の電極を使用していることに加え、据え付け誤差等によりわずかではあるが非線形場が存在している。実際の加速器では誤差による非線形成分に加えて、意図的に Sextupole や Octupole を挿入し軌道補正等を行うことがある。そこで、線形ポルトラップに図 3 (b), (c) のような補助電極を

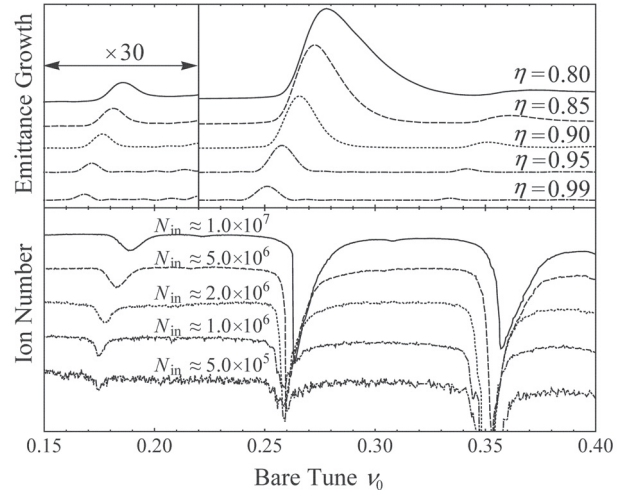


図 2 ストップバンド。Warp シミュレーション (上図), 実験結果 (下図)。

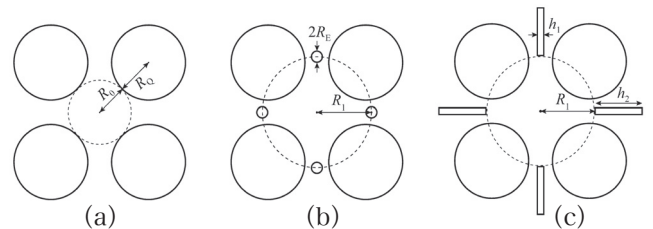


図 3 (a) 従来の線形ポルトラップ断面図。 (b), (c) 非線形場制御電極の挿入例。

挿入し、非線形場の強度、及び時間構造の制御を試みた。電場解析を用いて各電極への印加電圧を最適化し、Warp を用いてシミュレーションを行った。その結果、計 8 本の電極に適切に電圧を印加することで Sextupole、及び Octupole の非線形場を独立に制御可能であることを示した<sup>1)</sup>。

### 5. 今後の抱負

現在、私が所属するミシガン州立大学の大強度不安定核ビーム加速を行う FRIB プロジェクトではビームコミッショニングに向け、建設が佳境を迎えている。私自身もビーム物理に基づいたコントロールシステムの開発に取り組んでいる只中である。実際の加速器建設、そして運転に取り組むことは、シミュレーションに取り組んで来た私にとって、加速器の現実と斬り結ぶ絶好の機会だと考えている。

### 参考文献

- 1) K. Fukushima and H. Okamoto. Plasma and Fusion Research **10**, 1401081, pp. 1-9 (2015).