

## 論文の要旨

題目     Theoretical study of high-intensity hadron beam stability in linear and circular accelerators

(線形および円形加速器中の大強度ハドロンビームの安定性に関する理論的研究)

氏名     小島 邦洸

加速器技術の目覚ましい進歩に伴い、荷電粒子ビームの利用範囲はますます拡がりつつある。このような背景の下、各方面でビームの更なる高品質化・大強度化が求められている。ビーム強度は単位時間内に或る平面を通過する粒子の数として定義され、ビームの質は粒子群が位相空間上で占有する体積（エミッタンス）の大小によって決まる。エミッタンスが小さいほどビームのクオリティは高く、同じレンズ系でより細く絞ることができる。大強度化あるいは高品質化のいずれを目指す場合でも、必然的にビームの位相空間密度は上昇する。その結果、特に比較的低速のハドロンビームにおいては、粒子間のクーロン相互作用に由来する多体现象（空間電荷効果）が顕著に現れることになる。したがって、次世代の先進ハドロン加速器の設計は言うに及ばず、現在稼働中の大強度加速器の性能向上を達成する上でも、空間電荷効果に対する基礎的理解の深化が必要不可欠である。とりわけ外場の周期性に起因して発生する“共鳴”はビームクオリティの深刻な劣化や粒子損失に繋がる恐れがあり、自己クーロン場の影響が無視できない状況下での共鳴不安定性の基本メカニズムとその発生条件の解明は加速器物理学上最も重要な研究テーマのひとつとして位置付けられている。

本論文の冒頭（第 1 章および 2 章）でまず、後の議論に必要ないくつかの基本的物理量を定義すると共に、よく知られた空間電荷効果の理論的取り扱いについて簡単に解説する。ハドロンビームの共鳴不安定化現象に関する、本研究独自の成果は第 3 章と第 4 章にまとめられている。

第 3 章では、円形の大強度ハドロン加速器に特徴的な、設計軌道に沿って非常に長く伸びたビーム（長バンチ）の安定性について詳しく考察する。粒子分布は進行方向に一様と仮定し、設計軌道に直行する横方向自由度の共鳴（ベータトロン共鳴）のみに焦点を当てた 2 次元的な枠組みの中で議論を進める。設計軌道が閉じているため、円形加速器中のビームは周回毎に全く同じ外場（ビーム収束および偏向磁場）の影響を繰り返し受け続ける。ビームの位相空間密度はさほど高くはない（クーロン斥力によるベータトロン振動数のシフトは数パーセント程度に過ぎない）が、加速器中に長時間留まるため、比較的弱い高次

の共鳴不安定性にも一定の配慮が必要である。これまで業界で広く用いられてきた円形加速器の動作点決定法は、ビーム構成粒子個々の運動に着目したインコヒーレントな描像に基づいている。しかしながら、実際にはクーロン相互作用があるため各粒子の運動は独立ではない。密度の高いビーム中心部近傍（ビームコア）の粒子群は集団的に運動しているはずで、インコヒーレント描像ではコアの安定性を正確には予測できないと考えるのが自然であろう。この点を確認するため、Particle-In-Cell (PIC) コードによる多粒子シミュレーションを実施した。結果、予想通り、従来のインコヒーレント共鳴条件ではビームコアの安定性を正しく判定できないことが分かった。一方、コアから遠いビーム外側部（ビームテール）に位置する粒子の運動は集団性に乏しく、ほぼインコヒーレントに振る舞うことも判明した。すなわち、大強度ハドロンビームにおける共鳴不安定性は“コア部のコヒーレント共鳴”と“テール部のインコヒーレント共鳴”に大別できるということである。専門家の間では長らく「インコヒーレント共鳴はビームコアでも発生し得る」との見解が主流を占めていたが、本研究により、この主張には本質的な問題のあることが明らかとなった。

2次元以上のビームに関する限り、コヒーレント共鳴の発生条件を記述する簡便な公式は知られていなかった。そこで本研究では、岡本・横谷による1次元ブラソフ理論の帰結を物理的洞察に基づいて2次元へ拡張した。導入された2次元コヒーレント共鳴仮説からの予想を系統的なPICシミュレーションおよび一様分布関数を使ったブラソフ方程式の数値解析結果と比較し、広いパラメータ領域で仮説の妥当性を確認した。この検証の過程で「各空間自由度における初期エミッタンスの比を適切に設定すれば、特定の差共鳴の発現を強く抑制できる」という、実用上重要な新しい知見が得られている。以上の成果に基づき、チューン空間上で共鳴フリーな加速器動作条件を明示する、全く新しいタイプの安定領域図（ストップバンドダイアグラム）の構築手順を提案した。一例として、東海村の大強度陽子加速器施設“J-PARC”で稼働中の3 GeVシンクロトロンを念頭に置いたストップバンドダイアグラムを作製し、現行の運転条件と矛盾がないことを確認した。

第4章の議論は線形の加速構造、特にハドロン入射器の典型であるアルバレ型ドリフトチューブ線形加速器（DTL）を対象としている。ビームが線形加速器内に留まっている時間は非常に短い、その一方で円形加速器中の長バンチに比べて遙かに高い位相空間粒子密度を持ち得るので空間電荷効果の影響を無視することは許されない。また、線形加速器中のビームは楕円体から球形に近く（短バンチ）、横方向のベータatron運動だけでなく進行方向のシンクロトロン運動も併せて考慮しなければならない。要するに、3次元的な考察が不可欠となる。軌道が閉じておらず、加速によるエネルギー増加に伴って単位構造長が伸びるため、外場の変化は厳密な周期性を持たないことにも注意する必要がある。加えて、

エネルギー増大と共にチューンダイアグラム上で加速器の動作点が大きく動く。このため、条件によっては動作点が 1 つ以上の共鳴不安定帯を横切ってしまう可能性があり、基本パラメータの最適化手順は円形加速器の場合と比べて複雑になる。

線形加速器の動作条件最適化へ向けた系統的なパラメータサーベイを行うため、アルバレ型 DTL を想定した数学モデルを構築し、米国で開発された PIC コード “Impact” に実装した。J-PARC の大強度陽子 DTL の設計パラメータを仮定した多粒子シミュレーションを行い、いわゆる熱平衡条件下では低次差共鳴による深刻なビームクオリティの劣化が回避できることを示した。ただし、これは熱力学的な効果ではなく、第 3 章で触れた「初期エミッタンス比に依存する差共鳴不安定性の抑制効果」と密接に関係している。長バンチと同様、短バンチにおいても、加速器の動作条件を最適化することにより特定の差共鳴を抑止できるということである。逆に、不十分な最適化は動作点が低次共鳴帯を横切る危険性を著しく高め、結果としてビームクオリティの劣化に繋がり得る。実際、いくつかの異なる加速モデルを使った PIC シミュレーションで、差共鳴不安定帯の横断に起因する 3 自由度間のエミッタンス交換の発生が確認されている。

第 3 章で導入した 2 次元コヒーレント共鳴条件式をさらに 3 次元へ拡張し、ビームコア部が不安定化するパラメータ領域を十分な精度で予想できるかどうか検証した。シンクロトロン共鳴まで含めた 3 次元コヒーレント共鳴条件により、PIC シミュレーションのデータが概ね説明可能であることを確認した。これにより、3 次元バージョンのストップバンドダイアグラムの作製が可能となり、大強度線形加速器の基本的な設計指針を与える基盤が確立された。