

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Theoretical Analysis of Emittance Growth for Intense Charged Particle Beam with Thermal Equilibrium Distribution During Longitudinal Pulse Compression
著者(和文)	菊池崇志
Author(English)	Takashi Kikuchi
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4136号, 授与年月日:2017年3月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:堀岡 一彦,河野 俊之,小栗 慶之,長谷川 純,林崎 規託,河村 徹
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4136号, Conferred date:2017/3/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

(2000字程度)

報告番号	乙 第 号	学位申請者	菊池 崇志	
	氏 名	職 名	氏 名	職 名
論文審査員	主査 堀岡 一彦	教授	林崎 規託	准教授
	河野 俊之	教授	河村 徹	講 師
	小栗 慶之	教授		
	長谷川 純	准教授		

本論文は、「Theoretical Analysis of Emittance Growth for Intense Charged Particle Beam with Thermal Equilibrium Distribution During Longitudinal Pulse Compression (進行方向パルス圧縮過程での熱平衡分布による高強度荷電粒子ビームのエミッタンス増加の理論的解析)」と題し、空間電荷効果に支配される状況下での荷電粒子ビームの縦方向圧縮に伴う潜在的なエミッタンス増加を準解析的に見積る手法を提案しており、英文で記述され8章で構成されている。次世代のエネルギー源として期待される熱核融合反応に基づいた発電システムとして、重イオンビームを用いた慣性閉じ込め方式(重イオン慣性核融合)が検討されており、この重イオン慣性核融合においては、加速器システムの最終段でビーム進行方向に対して急激なパルス圧縮を行う。このような状況下では、荷電粒子ビームの挙動はエミッタンス(熱的な運動)が支配的な状態から空間電荷効果が支配的な状態へ短時間で移行するため、ビームパラメータが動的に変化するとともに多数の構成粒子が集团的に関与した複雑な軌道を描くため、既存の理論では挙動の予測が困難であった。

荷電粒子ビームは同じ極性の電荷を持つ多数の粒子の集合体である。粒子ビームへ電場や磁場を印加して軌道を制御し、半径方向の大きさを維持しつつ標的までビームを輸送する。外部から印加される閉じ込め場とビームの持つ熱的な運動とクーロン相互作用による反発力とが釣り合うことでビーム半径と内部の粒子分布が決定され、平衡状態が形成されることを述べている。一定の閉じ込め力の下で形成された平衡な粒子分布が非線形な場を持つと、擾乱が生じたときにビームの電磁エネルギーが熱エネルギーへ転換され、異なる平衡状態が形成されるとともにエミッタンスが増加することを指摘している。本論文では、単粒子軌道として振舞いを記述できる領域から空間電荷効果が支配的な状態へ動的に移行するビームの物理を理論的に取り扱うことを検討し、大電流ビームのパルス圧縮に伴うエミッタンス増加の上限を解析的に見積もる方法を提案している。

第1章「Introduction(序論)」では、本論文の背景と位置づけについて述べている。また、重イオンビーム照射による慣性閉じ込めを利用する重イオン慣性核融合において、必要とされるビームのパラメータを紹介し、本論文で扱う荷電粒子ビームの特徴や重イオン慣性核融合システム実現に向けた問題点を示している。

第2章「Charged Particle Beam Dynamics During Longitudinal Pulse Compression(縦方向圧縮の際の荷電粒子ビームの動力学)」では、重イオン慣性核融合の最終段パルス圧縮過程を例として粒子コードを用いた数値シミュレーションでビーム動力学を検討し、進行方向パルス圧縮に伴うビーム挙動やエミッタンス増加についての概要を示している。

第3章「Static Analysis of Possible Emittance Growth of Intense Charged Particle Beam with Thermal Equilibrium Distribution(熱平衡分布を持つ高強度ビームの潜在的エミッタンス成長の静的解析)」では、ビーム電流が増加し熱平衡が仮定できる粒子分布を持つビームに対する潜在的なエミッタンス増加の解析的なモデルの構築について述べている。ビーム内部の熱的な運動エネルギーと空間電荷が作る電磁的なポテンシャルエネルギーとのバランスによって平衡な粒子分布が決まることを指摘し、空間的に非一様な粒子分布から生じる自由エネルギーを介してビームが持つ電磁エネルギーが熱的なエネルギーへ移行し、エミッタンスが増加するモデルを紹介している。

第4章「Maximum Possible Emittance Growth in Static Analysis of Intense Charged Particle Beam with Thermal Equilibrium Distribution(熱平衡分布を持つ高強度荷電粒子ビームの静的な解析に基づく最大エミッタンス成長)」では、前章で導出した熱平衡分布での潜在的なエミッタンス増加レートの近似解をフィッティング関数として、空間電荷効果の度合を示す指標の関数として求めている。また、この近似解より、空間電荷効果が支配的なビームパラメータにおいて潜在的なエミッタンス増加が最大になる条件を示している。

第5章「Possible Emittance Growth Induced by Nonlinear Space Charge Field without Constant Radius Ratio Approximation for Arbitrary Particle Distribution(任意の粒子分布の解析を目的とした半径一定の近似を用いない非線形空間電場に誘起された潜在的なエミッタンス成長)」では、従来の潜在的なエミッタンス増加モデルはビーム半径が一定であることを条件に導出されてきたが、重イオン慣性核融合の最終段パルス圧縮過程ではパルス圧縮に伴うビーム電流と電荷密度の増加によってビーム半径が増すことを指摘した後、半径が一定であるという仮定を用いずに潜在的なエミッタンス増加を導出している。一方、エミッタンス増加はビーム半径の増加を考慮した場合でも従来モデルによる結果と有意には変わらず、これまでに用いられてきている近似モデルで十分に見積もることが可能であることを明らかにしている。

第6章「Estimation of Dynamic Emittance Growth with Tune Depression and Nonlinear Field Energy Factor During Longitudinal Bunch Compression for Space Charge Dominated Beams(非線形場エネルギーとチューンディプレッションを有する空間電場に支配されたビームの動的エミッタンス成長の見積り)」では、従来はビームの空間電荷効果の影響を表す指標が一定のときの潜在的なエミッタンス増加をモデル化してきたが、重イオン慣性核融合の最終段ではパルス圧縮に伴い空間電荷効果が動的に変化することを指摘し、動的に空間電荷効果の度合が変化する条件でのエミッタンスの増大率を求めている。また、見積もった動的なエミッタンス増加を第2章で示した粒子コードを用いて算出した数値シミュレーション結果と比較している。

第7章「Dynamic Analysis of Possible Emittance Growth of Intense Charged Particle Beams with Thermal Equilibrium Distribution(熱平衡分布を持つ高強度荷電粒子ビームの潜在的なエミッタンス成長の動的解析)」では、前章で扱った動的なエミッタンス変化に対して第3章と第4章で構築した熱平衡分布による潜在的なエミッタンス増加モデルを適用し、進行方向パルス圧縮過程で想定される潜在的なエミッタンス増加を見積もっている。また、第2章で示した重イオン慣性核融合の最終段パルス圧縮過程に関する粒子コードによる数値シミュレーション結果や、以前に行われた実験結果との比較を行い、本論文で提案したモデルの有効性を示している。

第8「Conclusion(結論)」章では、以上の空間電荷効果が動的に変化する状況下での荷電粒子ビームのエミッタンス増加に関する理論的な解析結果を総括し、本論文の結論を述べている。

以上を要するに、本論文は多粒子で構成され空間電場に影響を受ける高強度ビームの統計力学的な挙動を準解析的に評価する手法について包括的に議論したものであり、理学的に貢献するところが大きい。よって、本論文は理学博士の学位論文として十分な価値があると認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。