

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	高強度荷電粒子ビームの縦方向圧縮動力学に関するスケーリング実験
Title(English)	
著者(和文)	酒井泰雄
Author(English)	yasuo sakai
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10428号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:堀岡 一彦,河野 俊之,小栗 慶之,長谷川 純,河村 徹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10428号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

# 高強度荷電粒子ビームの 縦方向圧縮動力学に関する スケーリング実験

酒井 泰雄

東京工業大学 総合理工学研究科  
創造エネルギー専攻

指導教員: 堀岡 一彦 教授

---



# 目次

---

<b>第1章 序論</b>	<b>9</b>
1.1 はじめに	9
1.2 高エネルギー密度科学分野への重イオンビームの応用	10
1.3 大電力ビーム生成と縦方向圧縮	11
1.4 スケールダウン実験によるビーム動力学の解明	12
1.5 本論文の目的と構成	15
<b>第2章 高強度ビームの物理とスケーリング則</b>	<b>17</b>
2.1 ビームの質とエミッタンス	17
2.1.1 トレースエミッタンス	18
2.1.2 規格化エミッタンス	19
2.1.3 縦方向エミッタンス	19
2.2 Liouville の定理とエミッタンスの保存	20
2.3 ビームエンベロープ方程式	22
2.4 縦方向空間電場とエンベロープ方程式	23
2.4.1 g-factor モデル	24
2.4.2 縦方向エンベロープ方程式	25
2.5 高強度ビームの動力学	26
2.5.1 空間電荷波	26
2.5.2 ビーム中におけるデバイ長さと非中性プラズマ振動	29
2.5.3 イントラビーム散乱	30
2.6 エミッタンス成長	31
2.6.1 熱平衡状態とビーム密度分布	32
2.6.2 密度分布不均一に伴うエミッタンス成長	34
2.7 縦方向圧縮における検討課題	35
2.8 相似実験	36
2.8.1 ビーム物理の相似則とスケールダウン実験	36

<b>第3章 速度変調電圧の発生：</b>	
<b>高精度誘導電圧重畳装置の開発</b>	<b>39</b>
3.1 誘導電圧重畳装置	39
3.1.1 基本的特徴と動作原理	39
3.1.2 誘導電圧重畳装置	41
3.2 誘導電圧重畳装置の設計	42
3.2.1 駆動電源の設計	43
3.2.2 ジッターの評価	47
3.2.3 磁性体特性の評価	48
3.3 ビーム圧縮試験	51
3.3.1 実験概要	52
3.3.2 実験セットアップ	52
3.3.3 試験結果	54
<b>第4章 電子源の開発：</b>	
<b>レーザー駆動プラズマカソード</b>	<b>57</b>
4.1 熱陰極とその出力特性	57
4.2 放電生成プラズマカソード	59
4.2.1 真空アークプラズマカソード	60
4.3 レーザー生成プラズマカソード	63
4.3.1 動作原理と電流供給能力	64
4.3.2 プラズマフラックスと供給電流の評価	66
4.3.3 静電プローブによるプラズマの特性の診断	72
4.3.4 プラズマパラメーターと供給電流	75
4.4 レーザー駆動プラズマカソードの実装	77
<b>第5章 縦方向圧縮動力学の評価</b>	<b>81</b>
5.1 小型シミュレーター装置	81
5.1.1 概要	81
5.1.2 ソレノイド輸送ライン	83
5.1.3 ビームモニター	84
5.2 1次元静電 Particle-In-Cell コード	84
5.2.1 支配方程式と計算初期条件	85
5.2.2 速度変調	85
5.2.3 自己電場計算ルーチン	86
5.3 ソレノイド輸送ライン中におけるビームの輸送圧縮特性の評価	87
5.4 縦方向圧縮実験	89
5.4.1 ビームパラメーター	89
5.4.2 バンチビーム電流波形の発展	91

5.4.3	PIC 計算から見積る粒子分布の発展 . . . . .	95
5.4.4	ピーク圧縮率の初期電流値依存性とエミッタンスの推移 . . .	99
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>103</b>
6.1	本研究の結論 . . . . .	104
	<b>参考文献</b>	<b>105</b>
	<b>謝辞</b>	<b>116</b>

## 目次

1.1	典型的な HIF ドライバー加速器システム [LBNL]	11
1.2	加速器最終段での縦方向圧縮: ドリフト圧縮	12
2.1	横方向トレースエミッタンス	18
2.2	完全導体輸送管中の荷電粒子ビームが形成する電場分布	24
2.3	二体クーロン衝突のイメージ	30
2.4	集束系中を伝搬する無限に長いビームの熱平衡における密度分布。 (a) $k = const$ , (b) $k \neq const$ , $r_{rms} = const$ [1]。	33
3.1	誘導電圧装置 [2]	40
3.2	誘導電圧重畳装置の等価回路	41
3.3	重畳型誘導電圧装置	42
3.4	誘導電圧モジュール駆動電源回路	43
3.5	半導体スイッチ素子の典型的な動作領域	44
3.6	典型的なクライトロンと等価回路	45
3.7	各駆動電源のジッター	47
3.8	B-H 曲線上に示す磁性体の振る舞い	50
3.9	出力特性の履歴	51
3.10	誘導電圧重畳装置を用いたビーム圧縮試験装置構成	52
3.11	電圧ピックアップ等価回路	54
3.12	誘導電圧重畳装置各モジュール出力と合成電圧波形	55
3.13	速度変調電圧 (a) と圧縮された電子ビーム電流 (b)。電子ビーム電流 は初期電流値で規格化している	56
4.1	真空アークカソード装置	61
4.2	真空アークカソード等価図	61
4.3	典型的なアーク放電電流と引き出されたビーム電流波形	62
4.4	ビーム電流波形の再現性	62
4.5	静止プラズマが粒子源におけるポテンシャル分布と荷電粒子の供給電流	65

4.6 レーザー駆動プラズマ粒子源 . . . . .	66
4.7 プラズマイオン電流の再現性 . . . . .	67
4.8 プラズマイオン電流波形 . . . . .	68
4.9 イオンビームと電子ビーム電流波形のレーザー照射エネルギー依存性	69
4.10 電子とイオンのピーク電流密度比の時間変化 . . . . .	70
4.11 電子とイオンのピーク電流密度とその比率のレーザー照射強度依存性	71
4.12 2方向静電プローブによるプラズマ診断装置図 . . . . .	72
4.13 静電プローブ探針 . . . . .	72
4.14 プローブバイアス電圧 $V_p$ に対する電流特性 $I_p$ . . . . .	73
4.15 電子ビームの輸送特性 . . . . .	78
4.16 レーザーアブレーションカソードを用いた電子ビーム入射部の外観 .	79
5.1 実験装置構成 . . . . .	82
5.2 実験装置外観 . . . . .	83
5.3 パルスソレノイド磁場発生回路 . . . . .	83
5.4 典型的なモジュレーション波形とサンプリング領域 . . . . .	86
5.5 ソレノイド輸送管上流 (a) と下流 (b) で測定したビーム照射蛍光板の イメージ . . . . .	88
5.6 焦点 ( $L_f = 1.6$ m) 付近でのビーム電流波形の発展。ソレノイド磁場強 度依存性 (a) $L = 1.2$ m, (b) $L = L_f = 1.6$ m, (c) $L = 1.9$ m . . . . .	89
5.7 エミッタンス支配領域 ( $I_0 \sim 100\mu\text{A}$ , $B_z \sim 11$ mT) におけるビーム電流 波形の発展 (実験/計算) . . . . .	89
5.8 シミュレーター装置における集団運動と二体衝突の特徴時間の初期 電流値依存性 . . . . .	90
5.9 焦点 ( $L_f = 1.6$ m) 付近でのビーム電流波形の発展 (実験/計算) . . . . .	93
5.10 焦点 $L_f = 1.2$ m 付近でのビーム電流波形の発展 (実験/計算) . . . . .	94
5.11 本装置における縦方向圧縮下での密度分布発展の概念図 . . . . .	95
5.12 粒子数密度分布発展の初期電流値依存性 (計算)。 $I_0 =$ (a) 2 mA, (b) 7 mA, (c) 14 mA, (d) 30 mA . . . . .	96
5.13 縦方向位相空間上における粒子分布の時間発展 (計算)。初期電流値 $I_0 =$ (a) 0 mA, (b) 2 mA, (c) 7 mA, (d) 14 mA, (e) 30 mA . . . . .	98
5.14 電流波形の初期温度依存性 (計算)。 $k_b T_L =$ (a) 0.1 eV, (b) 1 eV, (c) 10 eV。 (いずれも $I_0 = 5$ mA, $L_f = 1.6$ m) . . . . .	99
5.15 圧縮焦点におけるピーク圧縮率と RMS エミッタンスの初期電流値依 存性 ( $B_z = 11$ mT) . . . . .	100
5.16 初期電流値に対するピーク圧縮率の推移。圧縮焦点距離距離依存性 (実験) . . . . .	101

## 表目次

---

3.1	RF-MOSFET DE475(IXYS 社) の定格 . . . . .	44
3.2	Krytron KN-22 (EG&G 社) の定格 [3] . . . . .	46
3.3	ジッター評価試験結果 . . . . .	48
3.4	FINEMET FT-1H (日立金属社) の静特性 . . . . .	48
3.5	誘導電圧重畳装置の回路パラメーター ( $L_f = 1.6$ m 実験時) . . . . .	53
3.6	寄生キャパシタンスのインピーダンス $Z_{CS}$ . . . . .	54
4.1	アブレーションプラズマパラメータのレーザー照射強度依存 . . . . .	69
4.2	静電プローブ法により見積ったアブレーションプラズマのパラメーター . . . . .	75
5.1	シミュレーター装置におけるビームパラメーター . . . . .	90

## 1.1 はじめに

1932年にコッククロフト等は彼らが建設していた高電圧発生装置，コッククロフト-ウォルトン回路を加速器へ応用した。これにより陽子を 700 keV に加速することに成功するとともに金属リチウム標的に照射することによって，人工的に加速された粒子を使って人類初の原子核反応を観測した。これを皮切りにして，核物理や素粒子実験のための高エネルギー粒子の生成を目指した加速器研究が盛んになった。第2次世界大戦以降の進歩は目覚ましく，1944年の位相安定性原理の発見によりシンクロトロンやサイクロトロン等の開発がなされた。粒子の加速能力は1950年代には当初の約1000倍の GeV 級となり，加速器技術は飛躍的に加速した。加速器科学の発展に伴って，新粒子の発見と高エネルギー物理学が急速に発展した。現在では，フェルミ国立加速器研究所の陽子シンクロトロンや欧州原子核研究機構 CERN の大型ハドロン衝突型加速器 LHC などに代表されるように，高エネルギー加速器はその加速能力が TeV レベルにまで達している [4]。

一方で，近年の大電流粒子加速技術の進歩により高エネルギー密度科学と呼ばれる分野が大きく発展しつつある。粒子衝突ではなく，バルク物質へのエネルギー付与によって高エネルギー密度状態を形成するには，ビームの運動エネルギーよりもフラックス（電流）を増加させることが重要になるため，大電流化を目指した新しい加速器科学が展開されようとしている。

## 1.2 高エネルギー密度科学分野への重イオンビームの応用

粒子ビームを用いると、固体や気体、プラズマ状態の標的を制御性良く体積加熱できる。これは高速の荷電粒子ビームが大きな飛程を持つために、物質内部にまでエネルギー付与できるためである。また、近年の重粒子線の医療への応用に象徴されるように、標的へのエネルギー付与は精度よく見積もることができる。これは粒子ビームと物質との相互作用が古典的な衝突モデルで予測できるためであるが、粒子種と入射エネルギーを適切に選んだ短パルス大電流ビームを用いることによって、ターゲットへのよく定義された高エネルギー密度付与が可能である。この特徴のために、荷電粒子ビームは Warm Dense Matter (WDM) 領域の物性評価や状態方程式の解明に代表される高エネルギー密度科学分野を発展させる重要なツールとして期待されている [5]。実際、ドイツの重イオン科学研究所 (GSI) ではパルスあたり kJ 級のビームエネルギーを生成できる加速器 SIS-18 を用いて高エネルギー密度状態の物性研究が進められているとともに、100GeV, 1kA, MJ 級の重イオンビームを発生できる加速器 SIS-100 の建設が検討されている [6, 7]。また、アメリカ Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) では特に WDM 物性評価を目的とした試作加速器 NDCX [8, 9]、実用機 NDCX-2 の建設が進行している [10, 11]。

また、大電力荷電粒子ビームは慣性閉込め核融合のドライバーとして期待されている。荷電粒子ビームは加速器由来のために、短パルス高出力レーザーと比較して基本的に高い繰り返し運転能力をもつ。加速器そのもののプラグイン効率は、潜在的には 20-40% とレーザーと比較すると 10 倍以上高いと見積もられている。これらの観点から、実証炉以降の慣性閉込め核融合の発電炉用ドライバーとして有力視されている [12, 13]。

慣性閉じ込め核融合そのものの点火は高強度レーザーの発展により実証されつつある。2009 年にアメリカ Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) において稼働を開始した MJ 級のレーザー施設 National Ignition Facility (NIF) は実績を積み上げている。NIF では、2014 年に核融合で放出するエネルギー量が燃料に吸収される量を上回る自己加熱による燃焼、すなわちコア利得 1 以上となる爆縮が世界で初めて実証された。核融合点火に向けた実験は今現在も国内外の研究機関において継続的に進められてきてきており、NIF プログラムのほか、フランスの Laser Mega Joule: (LMJ)、国内では大阪大学で高強度レーザー激光と、超短パルスレーザー LFEX を併用した高速点火方式による試みが続けられており、高利得核融合の実証は時間の問題となりつつある [13]。核融合標的の爆縮の物理はレーザーでドライブする場合でも大電力ビームでも基本的には同じである。したがって、繰り返し能力を持つ大電力荷電粒子ビーム生成の技術が確立されれば、核融合発電プラントの実現も遠く

はないと期待される。

## 1.3 大電力ビーム生成と縦方向圧縮

大電力荷電粒子ビームを生成するにはどのような手法を確立する必要があるのか。ここでは究極的な応用例である重イオン慣性核融合 (Heavy Ion Fusion, HIF) のドライバーを例に紹介する。

1970年代にその概念が提案されてから今日に至るまでにドライバーである大電力加速器技術や関連するビームの物理から燃料標的の設計まで幅広い方面での研究が進められてきている。HIFのドライバーとしての加速器システムは幾つか提案されているが、ここではその代表的なものであるLBNLで提案された線形誘導加速器をベースにした例を紹介する [12]。

図 1.1 は線形誘導加速器を基盤とした慣性核融合用の重イオンドライバーシステムの概念である。このシステムでは、基本的には空間電荷効果によるビームの縦横方向の発散を避けるためにマイクロ秒級の長パルスイオンバンチを、縦方向には線形誘導加速器で発生するバリアバケツ、また横方向には静電もしくは磁気レンズにより輸送加速してゆくが、大電力化のために2つのビーム操作が盛り込まれている。粒子が加速されるとビームの空間的長さが増大することにより時間的な長さを圧縮することが可能になる。1つ目の操作は、徐々に短パルス化をするとともに電流値の増大を図ることである。つまり、準静的な圧縮操作によって、ビームの品質を保ちながら加速し、短パルス大電流化 = 大電力化を行うというものである。LBNLの概念設計ではこの1つ目の過程によって、イオン源時点では粒子エネルギー 10 MeV、電流値 50 A、ビームパルス時間幅 20  $\mu\text{s}$  (500MW) の64本のイオンビームを最終的には 10 GeV、100 kA、100 ns ( $10^3\text{TW}$ ) のレベルにまで大電力化することを想定している。

一方で、ドライバーとしてのビームに要求される条件は、時間空間的に圧縮され

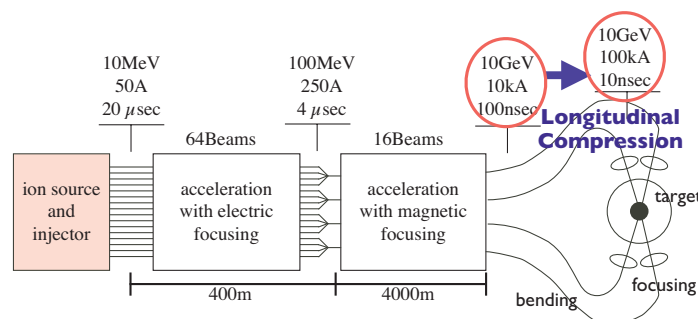


図 1.1: 典型的な HIF ドライバー加速器システム [LBNL]

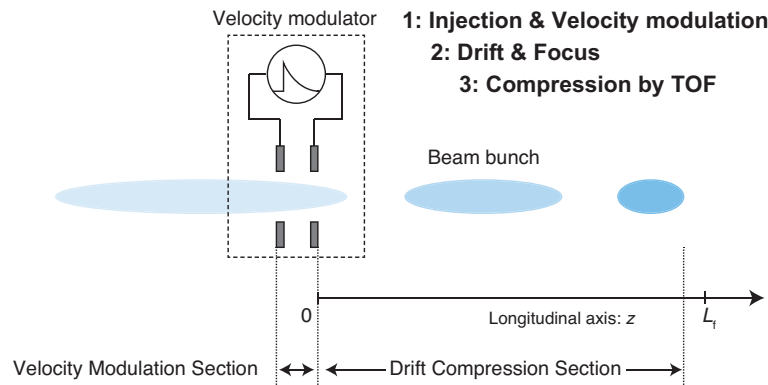


図 1.2: 加速器最終段での縦方向圧縮: ドリフト圧縮

た高いエネルギーをターゲットに確実に付与することである。つまり、ターゲット材質や形状、ビームの粒子種およびエネルギーに強く依存する *stopping power* を大きくすることを考慮する必要があるためにビームの粒子あたりのエネルギーには制約がある。そこで要求される重要な操作が2つ目の過程、加速器最終段での急激な縦方向圧縮である。

図 1.2 に縦方向圧縮の概念を示す。最終段での縦方向圧縮 (Final Compression) とは、荷電粒子ビームに時間変動するパルス電圧を印加することで進行方向速度を変調するとともに、これを縦方向圧縮の焦点距離まで輸送伝搬する際の飛行時間差に基づき時間的、空間的に圧縮する操作である。この縦方向圧縮を用いた大電流化によって、原理的にはビームの平均的な粒子あたりエネルギーの増加を回避しつつさらに 10 倍程度の大電力化が実現できる。

速度変調のための制御された電圧波形の発生は、誘導加速器を用いて波形合成することで実現できるが [14]、最終段での操作はビーム自身が持つ空間電荷の影響が避けられないと予想されている [15]。急激な圧縮操作を受ける高強度ビームのみせる集団的効果に伴うビーム品質の劣化 (エミッタンス増大) は圧縮率を低下させるため、ビーム高出力化の重要な検討課題と考えられている。

## 1.4 スケールダウン実験によるビーム動力学の解明

従来の高エネルギー加速器のめざすところ、(例えば原子核衝突実験では)、十分に加速した高エネルギー粒子同士を確実に衝突させることである。したがって、粒子そのものを高エネルギーまで加速することとビームの輝度が重要であって、ビームは必ずしも大電流である必要はなかった。通常の高エネルギー加速器にて生成さ

れる高エネルギーのビームはせいぜい mA 程度であり、希薄で単粒子的な軌道で扱える場合が多い。結果として、既存のビーム物理体系の大部分はハミルトン系で記述されるビームを対象としてきた。しかもそれらの大部分は平衡状態を仮定することに基づく理論的研究である [16, 17]。

これに対して、高エネルギー密度を付与するドライバーとしてのビームの電流値は kA、バンチ当たりの粒子数は  $10^{16}$  オーダーに達する。また、進行方向速度は、高々  $\beta = v_z/c = 0.1$  程度の低速度であるために、非相対論的な取り扱いができる一方、ビーム粒子群の振る舞いは強い空間電場の影響が無視できないと考えられている [15]。空間電場の影響については、従来のビーム物理では考慮されていなかった電場を介した粒子間の相互作用が予想され、散逸的な影響を検討する必要があることが明らかにされつつある [17, 18]。

高強度ビームを非中性プラズマや非平衡統計力学的な系として捉えてその解釈が進められてきている。ビームエミッタンスを増大させるような非線形現象は簡単な扱いが困難であるが、定常なビームや弱い摂動が付与された場合を仮定したモデリングによる理論研究が進められてきている。また、半解析的なコードや、粒子コードを用いた数値計算による現象解明が進められてきている。一方で実験によるそれら研究の妥当性や評価が着手されていないという状況にあった。これまでに主として先に挙げたような LBNL や LLNL において大出力加速器や縦方向のビーム操作のための変調電圧発生用の線形誘導加速器技術の研究・開発が進められてきているものの、kA 級の大電流重イオンビーム加速器建設は実現されていない。何より未だその高強度重イオン加速器が存在していないため設計の指針が得られないところが大きい。ビーム出力増大のために確立していないビーム操作を要求することと予想される膨大なコストが研究・開発を妨げている。このような状況を打開するために、ごく最近になって相似則に基づいた『スケールダウン実験』が提案され、研究が進められてきている。

スケールダウン実験とは、実験室の小型装置で、規格化されたパラメーターを適切に選ぶことによって、同様な現象を再現する試みである。アメリカの Princeton 大学においては、従来から非中性プラズマの動力学評価として広く用いられていた Paul trap 装置を用いて、加速器中のビームの物理の評価が進められている。Paul trap 装置により空間的に閉じ込められた電離イオン気体に対して高周波電場を印加することにより、周期集束系中を伝搬するビームを模擬することにより、集束系とビームのミスマッチや、集束電圧のエラーがビームエミッタンスの増大に及ぼす影響の評価が可能である [19, 20]。

また、特に慣性が小さく比電荷  $q/m$  の大きい電子を用いれば、実験室レベルの小型の加速器により、大型の加速器中を伝搬するイオンビームの挙動を模擬することができるので、大幅にスケールダウンした実験が実現できる。電子を keV に加速することにより重イオンビームの GeV レベルに相当する  $\beta$  値と応答時間を模擬できる。したがって、GeV - kA レベルの重イオンビームの空間電荷効果の影響を、keV - mA

程度の小型の電子ビームを用いる事で模擬することができる。アメリカ Maryland 大学では, Long Solenoid Experiment と称した長ソレノイド集束系をもつ小型ビーム装置と University of Maryland Electron Storage Ring (UMER) [21] と称した小型の円形電子貯蔵リングを構築するとともに, 高強度マルチビームレットの輸送やバケット輸送に伴うエミッタンス増大の実験的検討が進められてきているが [22–25], 大電力加速器の最終段で必要とされる Final Compression については着手されていなかった。

## 1.5 本論文の目的と構成

前節までに見たように、慣性核融合を駆動できるような大型の加速器内部のビームの挙動は、核物理実験等に用いられる高エネルギー加速器で生成・輸送されるビームと大幅に異なり、これまでに構築されてきた希薄かつ準定常ビーム(動的な電場の影響が比較的小さい)の振る舞いを記述するビーム物理の枠組みを超えることが予想される。また、縦方向圧縮に付随するビーム品質の劣化や出力増幅率(圧縮率)に関する検討が主に数値計算によってなされてきているが[26–29]、多くの粒子が複雑に相互作用する大電流ビームの挙動を理解するには実験との比較検討が不可欠である。

本論文は、『電子ビームを用いたスケールダウン実験により縦方向圧縮に伴うビームの動力学の知見を得ること』を目的としている。本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、研究の背景と位置付けを述べた。第2章では、現在までに得られている高強度ビーム物理の知見について述べる。その下で、ビームの縦方向圧縮における検討課題を明らかにする。加えて、相似則やスケール実験の一般論と、ビーム物理におけるスケール則について述べる。本研究では、電子ビームを用いた小型のシミュレーター装置を構築した。ビームシミュレーター装置には、縦方向圧縮のための高精度の速度変調電圧の発生と、大電流電子源の確保が不可欠である。第3章では、高精度誘導電圧重畳装置の開発、また4章では大電流電子の開発に関して述べる。5章では、シミュレーター装置を用いた縦方向圧縮実験の結果を述べる。また、粒子コードシミュレーション結果とを比較、検討することによりビームの動力学を考察する。6章では、以上の本研究によって得られた結果をまとめ、本論文の結論とする。

