

分置

大強度CW電子線形加速器の要素開発(VI)

— 入射部における電子軌道解析(1) —

1994年5月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

大強度CW電子線形加速器の要素開発 (VI) — 入射部における電子軌道解析 (1) —

野村昌弘、山崎良雄、遠山伸一、江本 隆

要旨

大強度電子線形加速器では空間電荷効果が大きいので、この影響を最も受ける入射部の設計は非常に重要である。この入射部の主な加速器要素は 200 kV のDCタイプの電子銃、磁場レンズ、RFチョッパー、チョッパースリット、プリバンチャー、バンチャー及び第1加速管である。これらの要素を効率良く組み合わせて入射部を設計するための電子軌道のシミュレーションを PARMELA と呼ばれる計算コードを用いて行った。ただしPARMELAでは磁場レンズやRFチョッパーは計算できないので大幅な改造を行った。本報告書では、電子銃からソレノイドコイルまで、RFチョッパーからチョッパースリットまでとこれらを合わせた電子銃からチョッパースリットまでの3つのシミュレーション結果を報告する。これらのシミュレーション結果から、電子銃とソレノイドコイルの間に2台の磁場レンズを挿入することによりエミッタンスの増加を低く押さえられること、今回考案した新しいチョッパーシステムを用いることにより入射部出口でのエミッタンスを $10 \pi \text{ mm mrad}$ 程度まで押さえられること等が確かめられた。

**The Key Technology Development of High Power
CW Electron Linac
BEAM DYNAMICS OF INJECTOR FOR HIGH POWER CW
ELECTRON**

M.Nomura, H.Yamazaki, S.Toyama and T.Emoto

ABSTRACT

It is important for a high power electron linac to design the injector, because the space charge effect is large. The injector consists of a 200kV DC gun, two magnetic lens, a RF chopper, a chopper slit, a prebuncher, a buncher and an accelerating tube 1. In order to design the injector, beam trajectories are simulated by PARMELA which is modified by PNC. In this report, three simulation results are shown. The first result is the beam trajectory from the gun to the exit of the solenoid coils. There is a thick concrete wall between the gun to the RF chopper. Low energy electrons are transported through the long solenoid coils. It can be seen from the first result that two magnetic lens between the gun and the solenoid coils can reduce the emittance growth. The second result is for the chopper part. The novel chopper system is designed to reduce the emittance growth. The last result is the beam trajectory from gun to chopper slit. From those simulation results, it can be seen that the emittance at the end of the injector is reduced to about 10π mm mrad by the novel chopper system.

目次

| | |
|-------------------------|----|
| 第1章 序 | 1 |
| 第2章 シミュレーションコード PARMELA | |
| 2.1 PARMELA | 2 |
| 2.2 磁場レンズ | 2 |
| 2.3 チョッパーキャビティ | 3 |
| 第3章 入射部構成 | 3 |
| 第4章 考察 | |
| 4.1 電子銃からチョッパーキャビティ入り口 | 4 |
| 4.2 チョッパーキャビティ | 6 |
| 4.3 電子銃からチョッパースリット | 7 |
| 第5章 まとめ | 8 |
| 第6章 謝辞 | 8 |
| 参考文献 | 9 |
| 図表 | 10 |

図リスト

- 第 1 図 入射部概念図
- 第 2 図 POISSON による磁場計算及びフィッティング
- 第 3 図 f_0+2f_0 によるチョッパーシスムの原理。
- 第 4 図 EGUN による電子銃内での電子軌道解析結果。
- 第 5 図 磁場レンズ及びコイルを用いた場合のビーム輸送系概念図。
- 第 6 図 電子銃出口からソレノイド入口までの軌道解析結果。
- 第 7 図 磁場レンズ前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
- 第 8 図 電子銃出口からソレノイド出口までの軌道解析結果。
下図は上図からコイルのもれ磁場の効果を除いた計算結果。
- 第 9 図 磁場レンズ 2 台を用いた場合のビーム輸送系概念図。
- 第 10 図 電子銃出口からソレノイド出口までの軌道解析結果。
- 第 11 図 f_0 のみによるチョッピングの軌道解析結果。
- 第 12 図 チョッパーキャビティー前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
- 第 13 図 チョパースリット前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
- 第 14 図 チョパースリット前後での位相に対するビームの広がり。
- 第 15 図 f_0+2f_0 によるチョッピングの軌道解析結果。
- 第 16 図 チョッパーキャビティー前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
- 第 17 図 チョパースリット前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
- 第 18 図 チョパースリット前後での位相に対するビームの広がり。
- 第 19 図 電子銃出口からチョパースリットまでの軌道解析結果。
- 第 20 図 チョッパーキャビティー前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
- 第 21 図 チョパースリット前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
- 第 22 図 電子銃出口からチョパースリットまでのエミッタンスの変化。

第1章 序

現在動燃では、核分裂生成物の核種変換等に適用できる大強度の電子線形加速器の開発を目的に試験用の大強度CW(Continuous Wave)電子線形加速器の研究開発を行なっている。加速器の基本パラメータを以下に示す。

- ・ 加速周波数 = 1249.135 MHz
- ・ マイクロ波波長 = 24.0 cm
- ・ 加速モード = $2\pi/3$ モード
- ・ 加速管構造 = 進行波還流型
- ・ クライストロン数 = 2本
- ・ エネルギー = 10 MeV
- ・ 最大ビーム電流 = 100 mA
- ・ 平均ビーム電流 = 20 mA
- ・ パルス幅 = 4 msec
- ・ 繰り返し = 0 ~ 50 Hz
- ・ デューティー = 20 %
- ・ 平均ビーム出力 = 200 kW

この研究開発に伴い、出力1.2MWのL-Band連続波を供給するクライストロン¹⁾、進行波還流型の加速管²⁾、加速器に電子を供給する源である電子銃^{3,4)}等の要素開発を行なっている。

まず初めに入射部の配置図を第1図に示す。主な加速器要素としては、電子銃、チョッパキャビティ、プリバンチャー、バンチャー及び第一加速管が挙げられる。次に入射部内での電子の動きを簡単に述べる。電子銃のカソードから放出された低エネルギーの連続電子線は、まず初めにチョッパキャビティおよびチョッパスリットにより位相角にして90度、つまり四分の一に間引かれる。引き続き電子ビームはプリバンチャーにより数十度まで圧縮させられ、その後バンチャー及び第一加速管により加速及び圧縮(バンチ)させられエネルギー数MeV、位相角約5度のバンチビームとなり加速部に入射される。以上の電子の動きを整理すると、入射部の役割としては以下の2点が挙げられる。

- 1) 電子ビームをバンチさせる。
- 2) 電子ビームを数MeVまで加速する。

次に入射部の重要性について述べる。”電子ビームの品質は入射部で決まる。”と言われるぐらい入射部内での電子ビームの軌道設計は重要である。これは上で述べたように入射部内での電子の速度が遅いこと、更に電子が数度までバンチされることによる空間電荷効果の影響により電子ビームの品質が落ちるからである。特に今回開発している

加速器はL-bandなので電子が低速で走る距離が長く空間電荷効果の影響を受ける時間が長い。そこで通常のS-bandの加速器に比べ入射部の設計はより重要となってくる。

この入射部の特徴としては、電子銃を出てからチョッパーキャビティーに入るまでの距離が長い点、独自のチョッパーキャビティーを使用している点が挙げられる。そこで今回の報告書ではこの2つの点に注目し、電子銃からチョッパーキャビティー入り口、チョッパーキャビティーからチョッパースリット、さらにこれらをあわせた電子銃からチョッパースリットまでの3種類の電子軌道のシミュレーションを行った結果についての報告を行う。

第2章 シミュレーションコード PARMELA

2. 1 PARMELA

電子軌道解析コードPARMELAは、Phase And Radial Motion in Electron Linear Acceleratorの頭文字を取った計算コードで、主に線形加速器、ビーム輸送系の電子軌道解析に利用されている。PARMELAの構成は、主に”PARMELA”と呼ばれる入力データやプログラムの流れを制御する主プログラムと、”PARDYN”と呼ばれる粒子運動を計算する副プログラムから構成されている。PARMELAではこの他にエレメントと呼ばれる加速器一般の構成要素である”DRIFT (自由空間)”、”SOLENOID (ソレノイド磁場)”、”QUAD (四重極磁石)”、”COIL (コイル磁場)”、”TRWAVE (進行波型加速管)”等の副プログラムが用意されている。その他の要素で構成された加速器の電子軌道を計算する際は、このエレメントと呼ばれる副プログラムを各自で作ることになる。今回入射部の電子軌道解析を行うにあたり、”MLENS (磁場レンズ)”と”CHOPPER CAVITY”の2つのエレメントの追加を行った。これらの2つのエレメントについては、2. 2節及び2. 3節で延べる。PARMELAの最大の特長は、時間を独立変数として扱っているため、各粒子(多くの電子を1つの粒子に代表させたもの)の運動を微小時間ステップ毎に計算しているため、空間電荷効果を取り扱えることにある。従って入射部のような低 β (β : 光速度に対する電子の速度の割合)領域における電子軌道解析に適している。

2. 2 磁場レンズ

磁場レンズ内での電子軌道解析を行うに為、まず初めに磁場レンズ内での中心軸上での磁場 B_z を磁場計算コードPOISSONにより計算した。計算結果を第2図に示す。PARMELAでエレメントとして使用するためにはこの磁場を関数系で表す必要がある。そこで数種類の簡単な関数系でフィッティングを行った。この結果を同じく第2図に示す。但しPARMELAでは電子軌道を計算する際には、近軸近似を行っているため磁場レ

レンズ内での磁場も z のみの関数とした。この中で最も計算値を良く再現する Ramberg 近似を採用した。実際の関数形を以下に示す。

$$B_z = B_0 \times (\operatorname{sech}(z))^2 \quad (1)$$

また磁場レンズ内での B_r 成分については B_z の微分形を使用した。

2. 3 チョッパーキャビティ

今回設計しているチョッパーキャビティは、エミッタンスの増加を最小限に押さえる為に、通常使用する基本周波数 f_0 の他に2倍の周波数 $2f_0$ を使用してビームのチョッピングを行う。この原理について簡単に述べる。通常のチョッパーシステムではチョッパースリット通過後の電子もチョッパーキャビティからの横方向の運動量を受ける為にエミッタンスの増加が起こる。そこでチョッパースリット通過後の電子はチョッパーキャビティからの影響を受けないようにすればエミッタンスの増加を押さえることができる。そこで基本周波数 f_0 の他に2倍の周波数 $2f_0$ を適当な割合で重ね合わせることにより、チョッパースリット通過後の電子はチョッパーキャビティからの影響を受けないようにすることができる。この原理を第3図に示す。実際の計算では簡単の為に、チョッパーキャビティ中での磁場は B_y 成分のみとした。磁場 B_y を以下に示す。

$$B_y = B_0(\sin(2\pi f_0 T) + R \sin(2\pi(2f_0)T) + B) \quad (2)$$

B_0 : 磁場強度、 B : バイアス磁場強度割合、 R : f_0 と $2f_0$ との割合。

今回の計算では磁場 B_y は時間 T のみの関数としたが、より現実的なシミュレーションを行うには、実測あるいは MAFIA 等による計算から磁場 B_y の z 方向依存性を調べる必要がある。

第3章 入射部構成

入射部の主な加速器要素としては、電子銃、磁場レンズ、ソレノイドコイル、チョッパーキャビティ、プリバンチャー、バンチャー及び加速管が挙げられる。電子銃は 200kV DC タイプの電子銃である。電子銃グリッドは、大電流を放出できるように通常使用されているメッシュグリッドではなくアパーチャーグリッドを使用する。しかしアパーチャーグリッドでは電流値を変化させたときに、レンズ効果によりビーム径が変化するという短所がある、この短所を補うために今回の電子銃では2つのアパーチャーグリッドを用意し、電流値及びビーム径の制御を行う。つまりアパーチャーグリッド1 (カソードに近い側) で電流値を制御し、アパーチャーグリッド2でビーム径を保つよ

うに制御を行う。磁場レンズは2台使用しソレノイドコイルと共にチョッパーキャビティーまでの電子ビームの収束を行う。チョッパーキャビティーでは、先にも述べたようにエミッタンスの増加を最小限に押さえるために、通常基本周波数 f_0 によりビームを水平方向に振るところを2倍の周波数 $2f_0$ も使用してビームを振り、チョッパースリットを通過したビームは横方向の運動量変化を受けないようにしている。プリバンチャーはリエントラントタイプのキャビティーを予定しており、電場により位相角にして数十度までのバンチを行う。バンチャー及び加速管はともに進行波還流型の加速管を使用する。

上に述べたことを電子の立場からみると以下のようなになる。電子銃内で0.2MeVに加速された電子はまず初めに2つの磁場レンズによりビームのクレストがソレノイドの入り口に来るように収束させられる。ソレノイドを出た電子はチョッパーキャビティーにより水平方向に振られその先のチョッパースリットにより、横方向の運動量の変化を受けない部分だけを通過させることにより位相角にして90度、つまり電子ビームの4分の1だけを取り出す。引き続きビームはプリバンチャーにより数十度まで圧縮させられ、その後バンチャー及び加速管により加速及び圧縮させられエネルギー約2MeV、位相角約5度のバンチビームとなり加速部に渡される。

第4章 考察

4. 1 電子銃からチョッパーキャビティー入り口

先に述べたように、今回の入射部では電子銃を出てからチョッパーキャビティーに入るまでの距離が非常に長い。そこでこの間に長いソレノイドコイルが必要になってくる。電子銃から出た電子ビームの品質を落とさずチョッパーキャビティーまで持ってくる為の重要なポイントは、いかに電子ビームのウエストをソレノイドコイル入り口に持ってくるかである。そのためには電子銃とソレノイドコイルの間に1つの磁場レンズとソレノイドコイルの磁場を延長させる為のコイルを使用する方法や、2つの磁場レンズを使用する方法などが考えられる。今回これら2つの配置に対する電子軌道シミュレーションを行ったのでその結果を示す。まず初めにシミュレーションの初期条件にあたる電子銃内での軌道計算を第4図に示す。この軌道計算には計算コードEGUNを使用した。計算条件を以下に示す。

- ・高圧 = 200 kV
- ・グリッド1電圧 = 5 kV
- ・グリッド2電圧 = 20 kV
- ・電流値 = 400 mA
- ・カソード半径 = 2 mm

電子銃出口での規格化エミッタンスは 10π mm mrad である。まず初めに磁場レンズとコイルを使用した場合の結果について述べる。電子銃からソレノイドコイルまでの配置を第5図に示す。次にPARMELAによる軌道計算結果を第6図に示す。初期条件としては先に示した電子銃内での軌道計算結果を用いた。磁場レンズ、コイル及びソレノイドコイルの中心軸上での磁場はそれぞれ 450, 80, 80, 150 gauss である。規格化エミッタンスを以下に示す。

$$\varepsilon_n = 10\pi \quad [\text{mm mrad}] : \text{磁場レンズ入口}$$

$$\varepsilon_n = 36\pi \quad [\text{mm mrad}] : \text{磁場レンズ出口}$$

$$\varepsilon_n = 38\pi \quad [\text{mm mrad}] : \text{ソレノイドコイル入り口}$$

エミッタンスの増加の原因を調べるために電子銃出口及び磁場レンズ出口における位相空間及び実空間でのビームの広がりを第7図に示す。第7図での比較及び先に示した軌道計算結果の $Z=80 \sim 100$ cm における不自然な軌道の広がりから考えて中心軸方向以外の方向に磁場が存在することが予想される。そしてこの磁場はコイルによるもれ磁場と考えられる。これを確かめるためにコイルの磁場の範囲を $Z=20 \sim 70$ cm の範囲に限定し、もれ磁場の効果を無くした計算を行った。当然ながらその他の計算条件はすべて同じにしてある。この結果を第8図に示す。第8図を見ると確かに不自然な軌道の広がりが無くなり、以下に示すようにエミッタンスの増加も押さえられている。

$$\varepsilon_n = 10\pi \quad [\text{mm mrad}] : \text{磁場レンズ出口}$$

$$\varepsilon_n = 15\pi \quad [\text{mm mrad}] : \text{ソレノイドコイル入り口}$$

これらの結果からエミッタンスの増加の原因はコイルのもれ磁場であることが確かめられた。これは実際にコイルを用いて入射部を構築する場合には磁気シールドを確実に行わなければならないことを意味する。これは現実的にはかなり難しく、この方法ではエミッタンスの増加を押さえるのは難しい。

次に2つの磁場レンズを用いた場合の結果について述べる。電子銃からソレノイドコイルまでの配置を第9図に示す。PARMELAによる軌道計算結果を第10図に示す。初期条件は先に述べたコイルを用いた場合と同じである。磁場レンズ1、磁場レンズ2及びソレノイドコイルの中心軸上での磁場はそれぞれ 600, 500, 200 gauss である。2台の磁場レンズを用いることにより、先ず初めの磁場レンズで電子銃からの発散ビームを平行ビームに直し次の磁場レンズでソレノイドコイルの入り口にビームのクレストを持ってくると言った軌道設計ができる。この設計思想は第10図の軌道計算結果に現われている。このように2つの磁場レンズを用いることにより1つ1つの磁場レンズの負

担が減り、電流値の変化にともない電子銃からのビーム径が変化した場合でもソレノイドコイルの入り口にビームのクレストを持ってくることが容易に出きる。また規格化エミッタンスは

$$\varepsilon_n = 10 \pi \quad [\text{mm mrad}] : \text{磁場レンズ1 出口}$$

$$\varepsilon_n = 14 \pi \quad [\text{mm mrad}] : \text{磁場レンズ2 出口}$$

$$\varepsilon_n = 16 \pi \quad [\text{mm mrad}] : \text{ソレノイドコイル入り口}$$

であり、エミッタンスの増加は低く押さえられている。

以上、1つの磁場レンズとコイルを使用した場合と2つの磁場レンズを使用した場合についての軌道計算を行った。前者の場合はコイルの磁気シールドを完全に行わないとエミッタンスの増加が起こること、後者の場合は電子銃からのビーム径が変化した場合での対処範囲が広いことなどを考慮すると、今回開発している加速器の入射部としては2つの磁場レンズを使用した輸送系が適していると考えられる。

4. 2 チョッパーキャビティ

チョッパーキャビティでは通常基本周波数 f_0 で電子ビームを横方向に振る為に、エミッタンスの増加が起きる。例として以下の理想的な条件でのPARMELAによる計算結果を示す。

- ・電流値 = 400 [mA]
- ・エミッタンス = 6π [mm mrad]
- ・ビーム半径 = 2 [mm]
- ・ B_y (チョッパーキャビティ磁場) = 50 [Gauss]

電子軌道の計算結果を第11図に、チョッパーキャビティ入口、出口及びチョッパースリット前後での実空間及び位相空間でのビームの広がりを第12図及び第13図に、さらにチョッパースリット前後での位相に対するビームの広がりを第14図に示す。規格化エミッタンスを以下に示す。

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_y) = (6.6\pi, 6.1\pi) \quad [\text{mm mrad}] : \text{チョッパーキャビティ入口}$$

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_y) = (112.\pi, 6.2\pi) \quad [\text{mm mrad}] : \text{チョッパーキャビティ出口}$$

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_y) = (107.\pi, 8.0\pi) \quad [\text{mm mrad}] : \text{チョッパースリット前}$$

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_y) = (24.9\pi, 7.3\pi) \quad [\text{mm mrad}] : \text{チョッパースリット後}$$

上に示したようにチョッパーキャビティを通過する際にエミッタンスの増加が起きている。これはチョッパースリットを通過した電子もチョッパーキャビティにより横方向の運動量を受けたためであり、このことはチョッパースリット通過後の位相の変化に表れている。そこでこのエミッタンスの増加を押さえるために我々は基本周波数 f_0 だけでなく2倍の周波数 $2f_0$ を使用し、チョッパースリット通過後の電子はチョッパーキャビティからの横方向の運動量を受け無いようにした。基本周波数 f_0 と $2f_0$ との割合は 1.00 対 0.28、磁場 B_y の大きさは 50 Gauss である。先に示した同じ計算条件での $f_0 + 2f_0$ の周波数を使用した場合の電子軌道計算結果を第 15 図に、チョッパーキャビティ入口、出口及びチョッパースリット前後での実空間及び位相空間でのビームのビームの広がり第 16 図及び第 17 図に、さらにスリット前後での位相に対するビームの広がりを第 18 図に示す。規格化エミッタンスを以下に示す。

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_y) = (6.6\pi, 6.2\pi) \quad [\text{mm mrad}] : \text{チョッパーキャビティ入口}$$

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_y) = (116.\pi, 6.2\pi) \quad [\text{mm mrad}] : \text{チョッパーキャビティ出口}$$

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_y) = (112.\pi, 7.6\pi) \quad [\text{mm mrad}] : \text{チョッパースリット前}$$

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_y) = (7.8\pi, 6.2\pi) \quad [\text{mm mrad}] : \text{チョッパースリット後}$$

2つの計算結果を比較すると、後者の場合はエミッタンスの増加が 24.9π [mm mrad] から 7.8π [mm mrad] に押さえられていることが理解できる。このことはチョッパースリット通過後の電子のビームの広がりからも理解できる。以上述べた様に理想的な電子ビームを仮定した場合 $f_0 + 2f_0$ を使用したチョッパーキャビティではエミッタンスの増加を押さえられる事が確かめられた。そこで、次の節では前節 4.1 で得られた電子銃からチョッパーキャビティ入口までの計算結果を用いて、この新しいチョッパーキャビティを用いた入射部のより現実的な電子軌道のシミュレーションを行う。

4.3 電子銃出口からチョッパースリット

電子銃出口からチョッパースリットまでのPARMELAによるの軌道計算結果を第 19 図に示す。初期条件及び磁場レンズ、ソレノイドコイルの磁場強度は 4.1 節で示した数値を使用した。チョッパーキャビティ及びチョッパースリット前後での実空間及び位相空間でのビームの広がりを第 20 図、第 21 図に示す。またエミッタンスの変化を第 22 図に示す。エミッタンスの変化から、電子銃を出て2台の磁場レンズ及びソレノイドコイルを通過してきた電子ビームに対しても $f_0 + 2f_0$ を使用したチョッパーキャビティシステムではエミッタンスの増加を押さえられることが確かめられた。

但し軌道計算結果からチョッパースリット通過後の電子ビームの軌道が発散傾向にあることが分かった。これはチョッパーキャビティとチョッパースリットの間は電子ビームを振る為に収束磁場を設けることができないので、ソレノイドコイルの磁場により収束させられていた電子ビームが発散したと考えられる。この問題を解決するためには、

チョッパースリットの後に磁場レンズ等を用いて電子ビームを収束させる必要がある。

第5章 まとめ

大電流高品質の電子ビームを得るための入射部の設計及び軌道解析をPARMELA等を用いて行った。以下に得られた結果をまとめる。

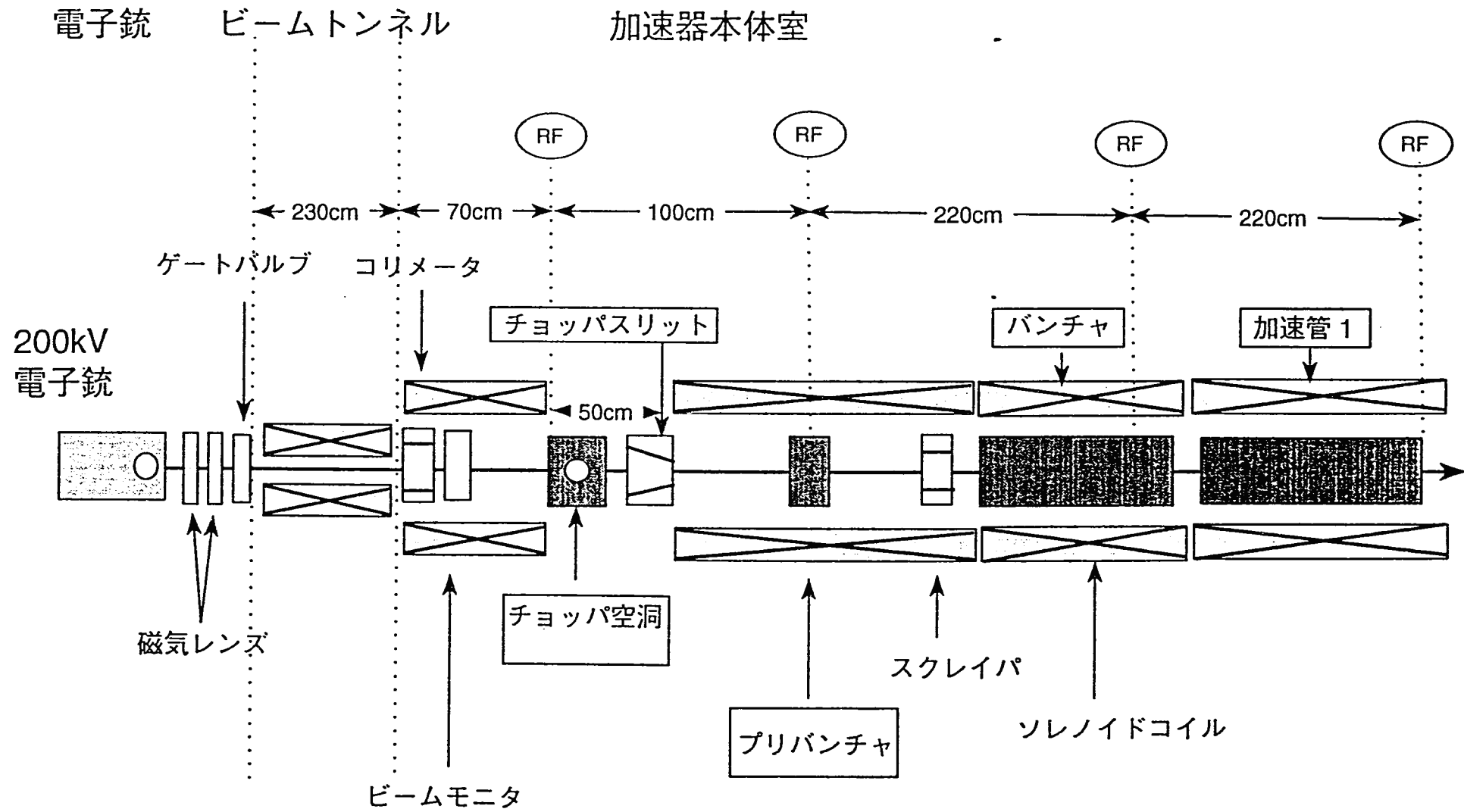
- (1) 電子銃とチョッパークャビティの間に2台の磁場レンズを挿入することにより、電子銃からの電子ビーム径が変化した場合でも対応できるビーム輸送系を開発した。
- (2) 基本周波数 f_0 と2倍の周波数 $2f_0$ を使用した新しいチョッパースystemを用いることにより入射部出口でのエミッタンスを 10π mm mrad 程度まで押さえることができた。しかしチョッパースリット通過後の電子ビームが発散傾向にあることが分かった。対処の方法としては、チョッパースリットの後に磁場レンズ等を用いて電子ビームを収束させる方法が考えられる。この問題に関しては今後の課題である。

第6章 謝辞

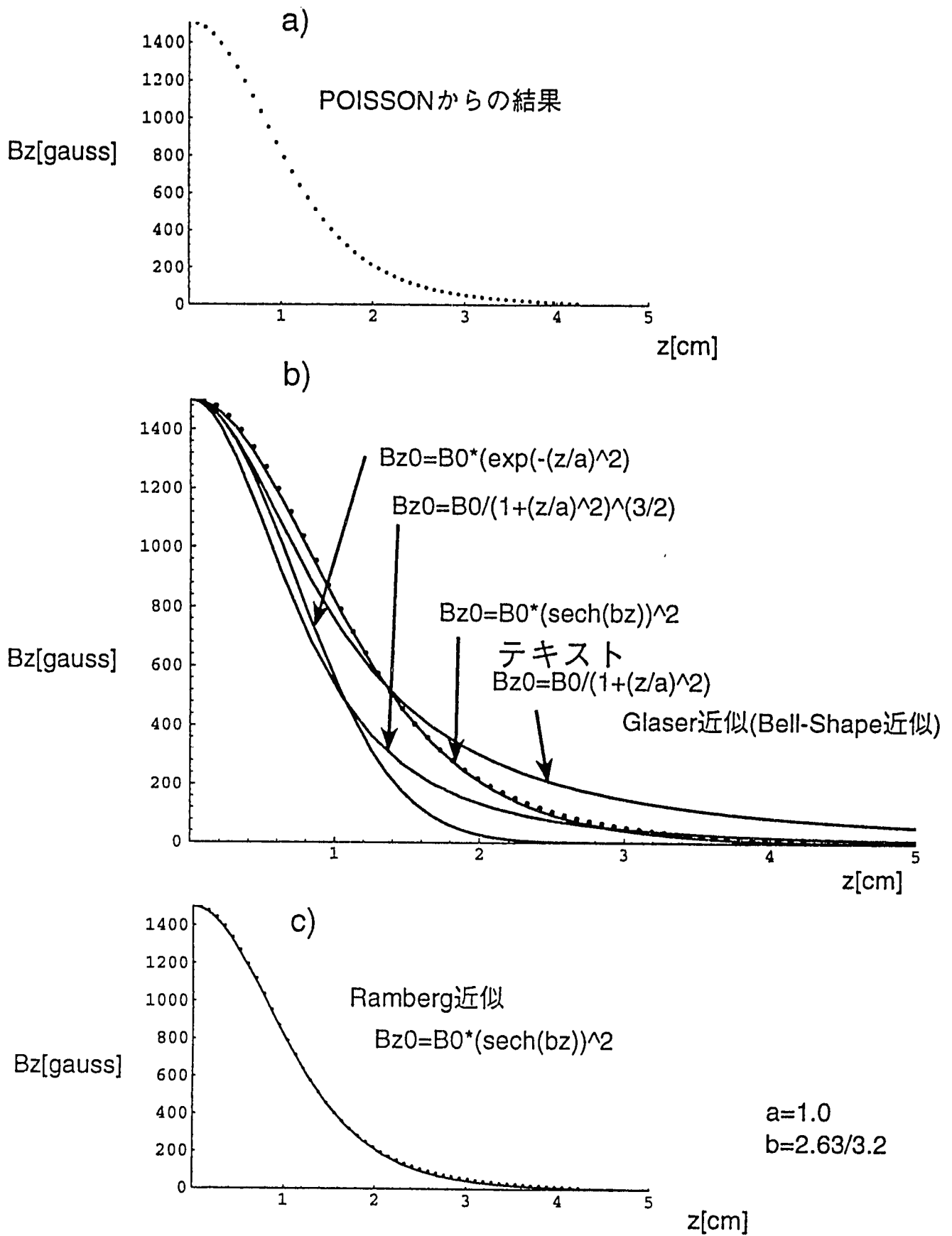
本研究を行うにあたり有益な助言をしてくださった、高エネルギー物理学研究所の佐藤勇主幹、大沢哲助教授及び日本大学原子力研究所の鳥塚賀治教授、早川健講師、田中俊成講師に感謝いたします。

参考文献

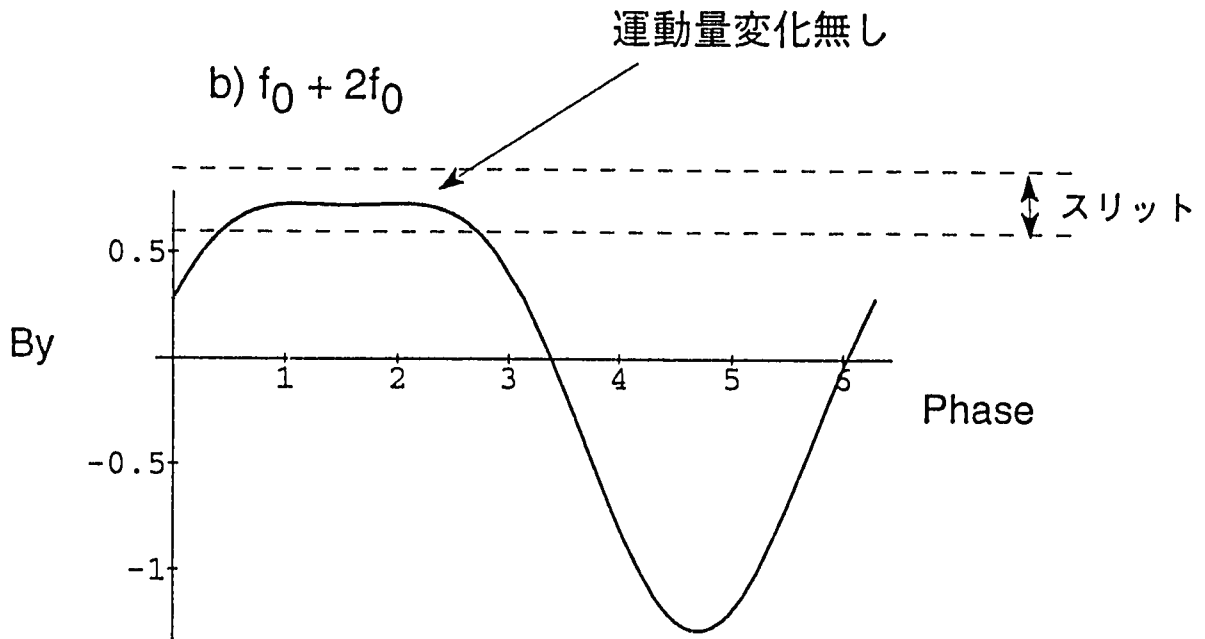
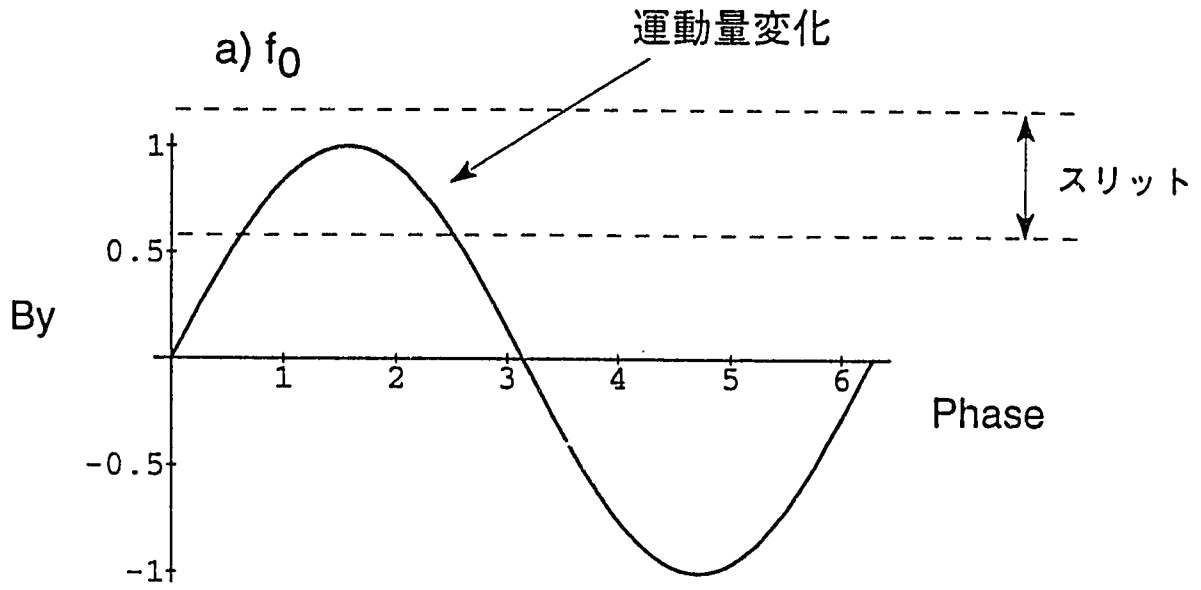
- 1) K.Hirano *et. al.* : Proc. of the 18th Linear Acc. Meeting in Japan,228(1993)
- 2) H.Oshita *et. al.* : Proc. of the 18th Linear Acc. Meeting in Japan,280(1993)
- 3) M.Nomura *et. al.* : Proc. of the 18th Linear Acc. Meeting in Japan,37(1992)
- 4) M.Nomura *et. al.* : Proc. of the 18th Linear Acc. Meeting in Japan,73(1993)



第1図 入射部概念図

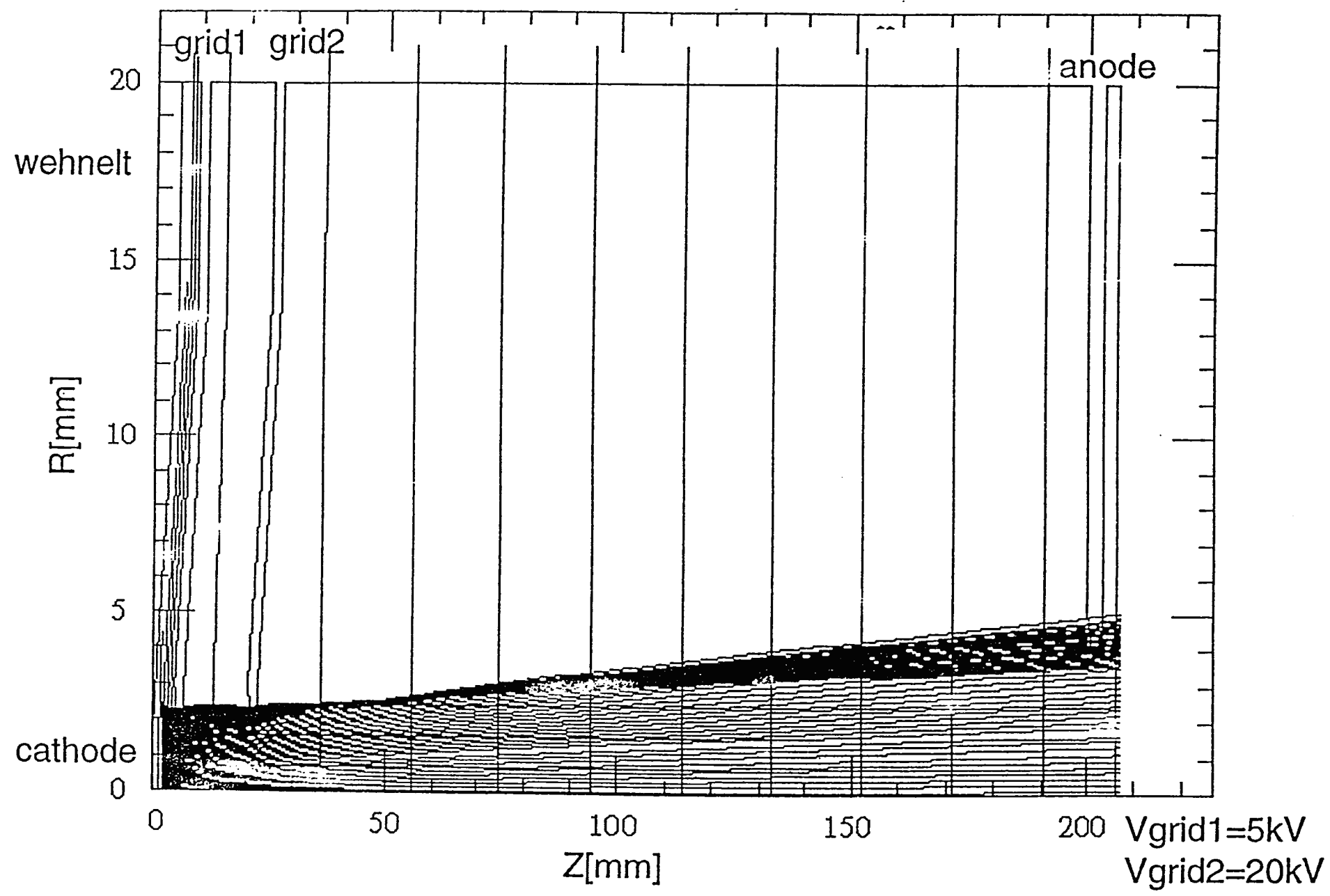


第2図 poisson による磁場計算及びフィッティング
 a) はpoisson による計算結果、b)及びc)はフィッティングの結果を示す。

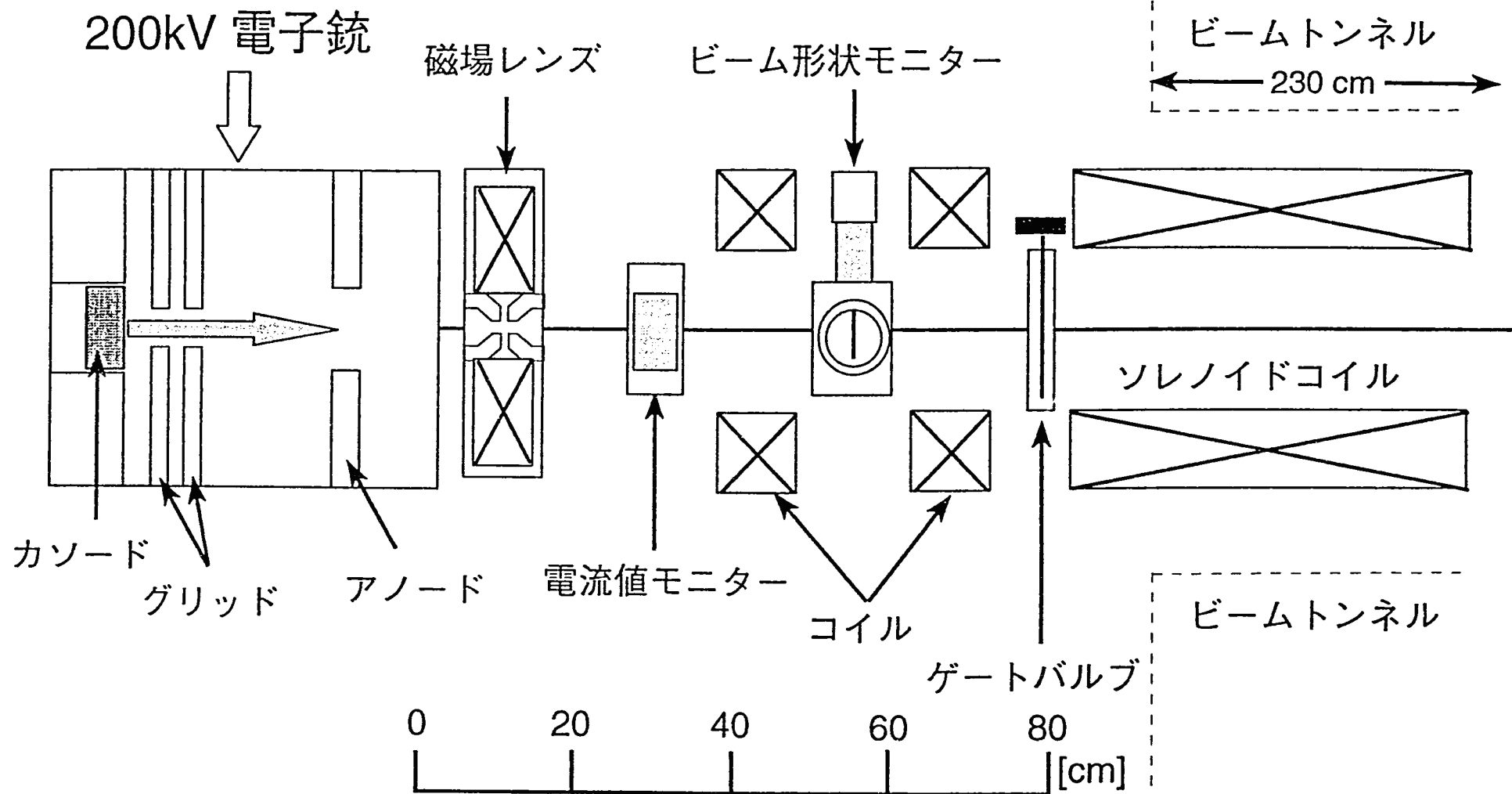


第3図 $f_0 + 2f_0$ によるチョッパーシステムの原理

図a) は f_0 のみによるチョッピング、図b) は $f_0 + 2f_0$ によるチョッピングを示す。図b) の場合はスリット通過後の電子は運動量の変化を受けない

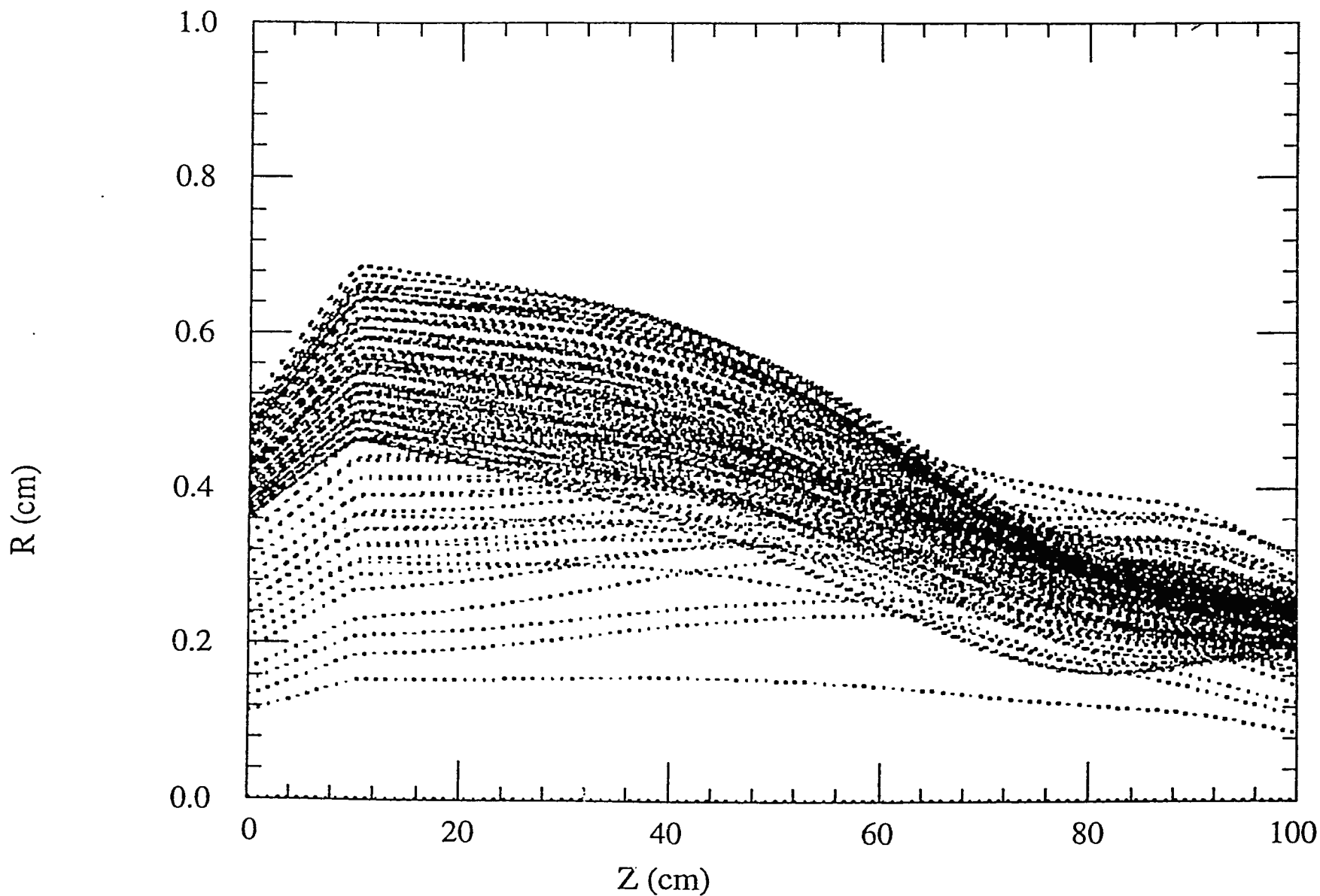


第4図 EGUN による電子銃内での電子軌道解析結果。

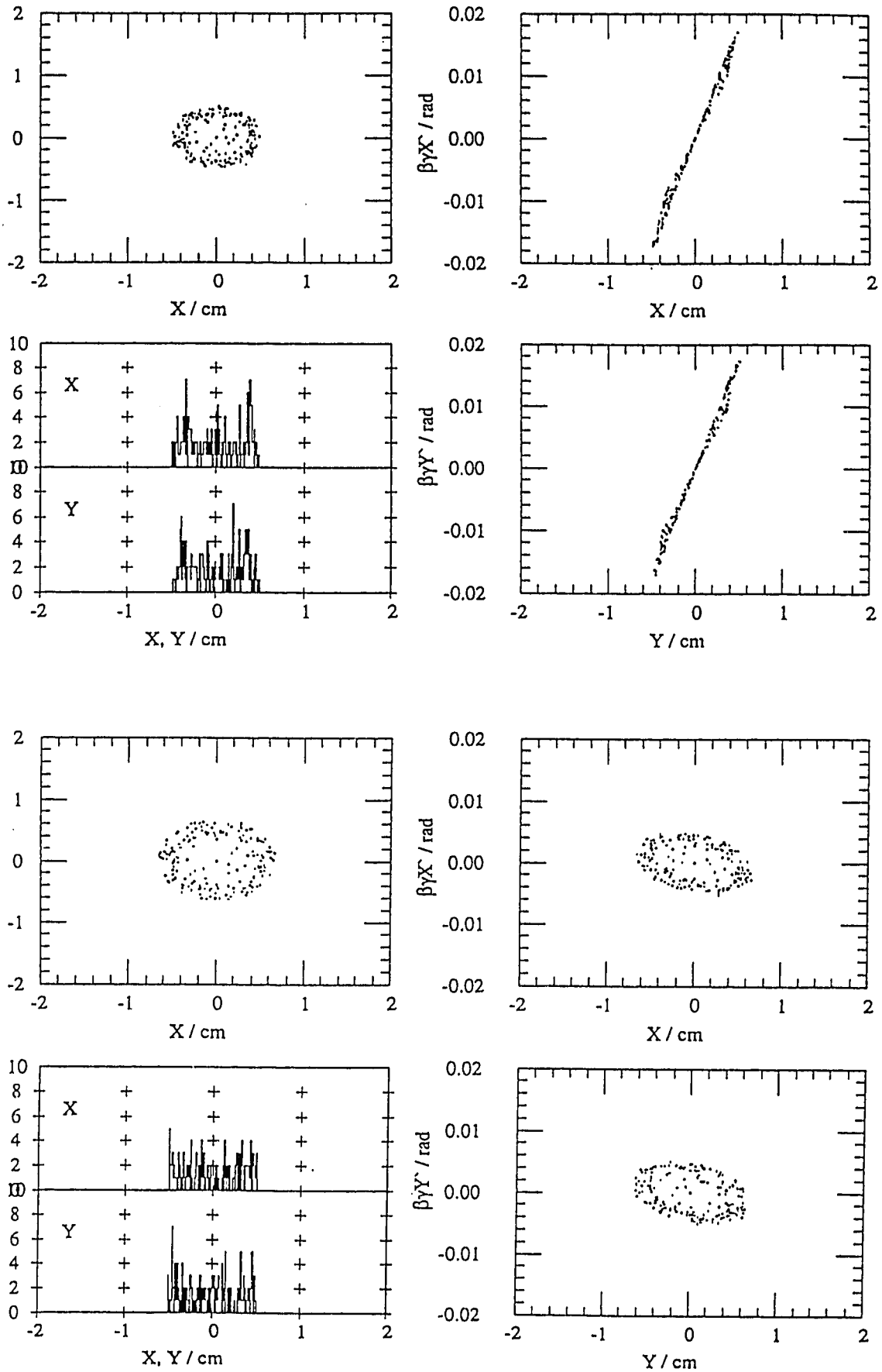


第5図 磁場レンズ及びコイルを用いたビーム輸送系

Z -R profile

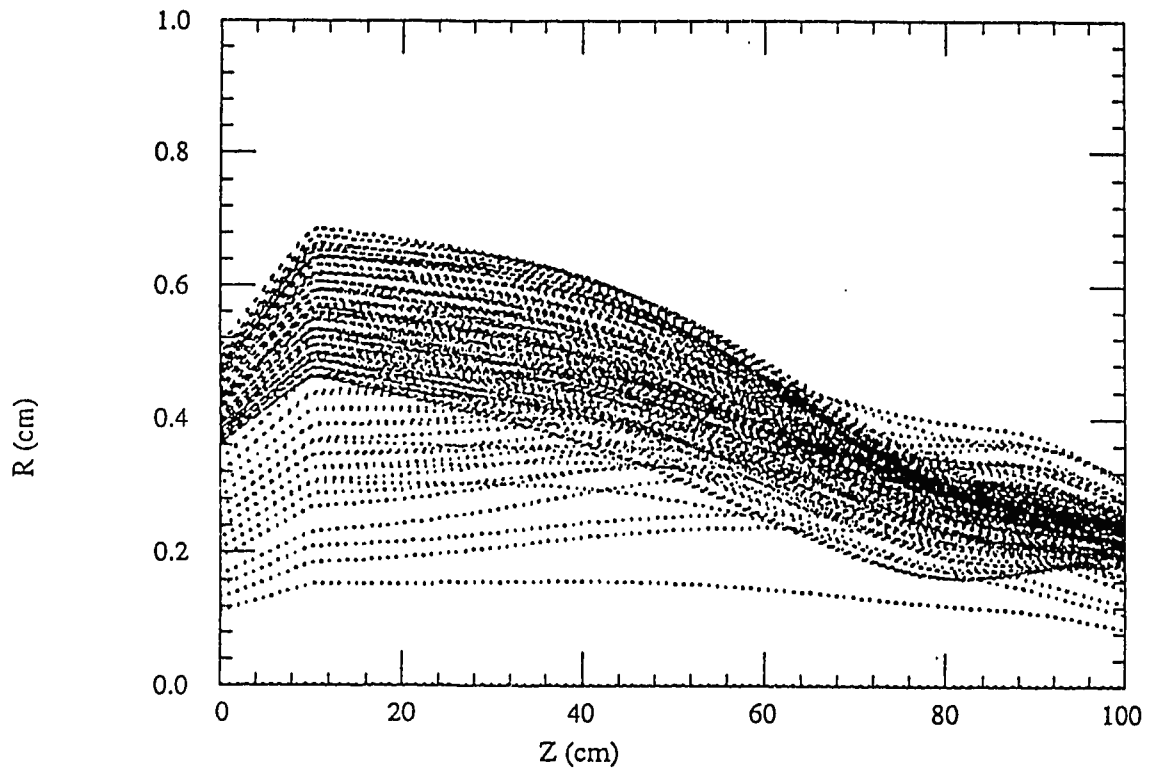


第6図 電子銃出口からソレノイド入口までの軌道解析結果。

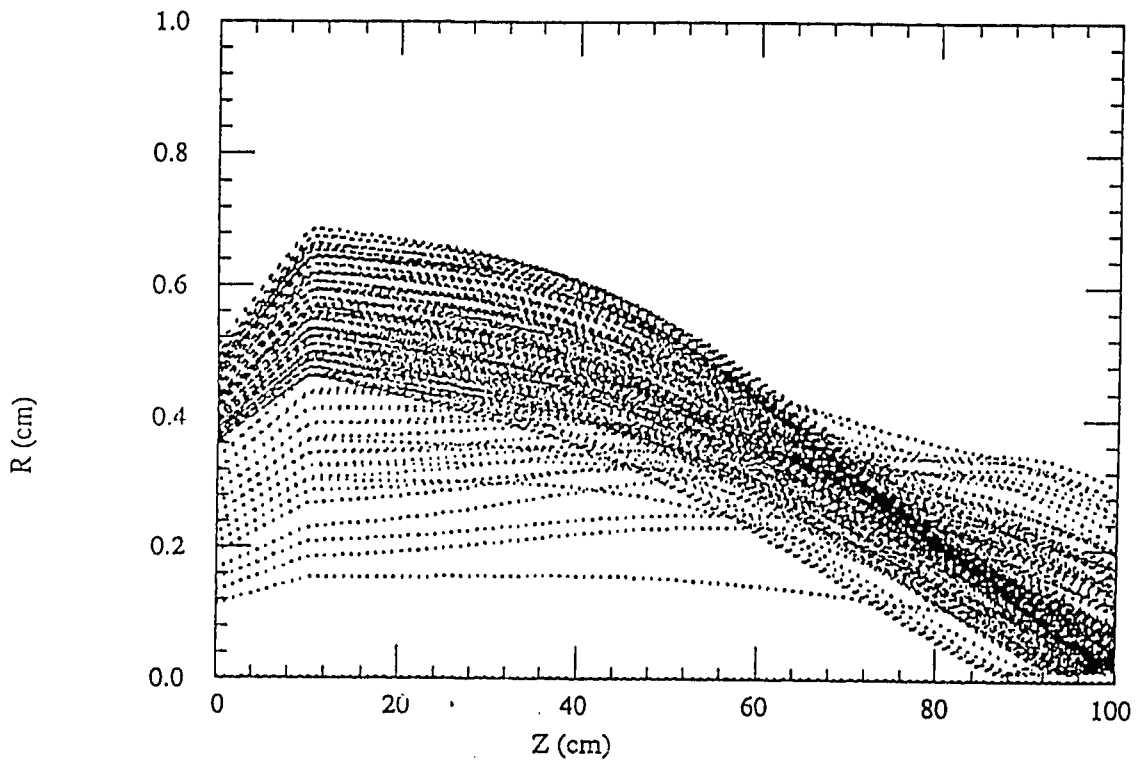


第7図 磁場レンズ前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
 上の4図が磁場レンズ前、下の4図が磁場レンズ後の実空間（左側）及び位相空間（右側）でのビームの広がりを示す。

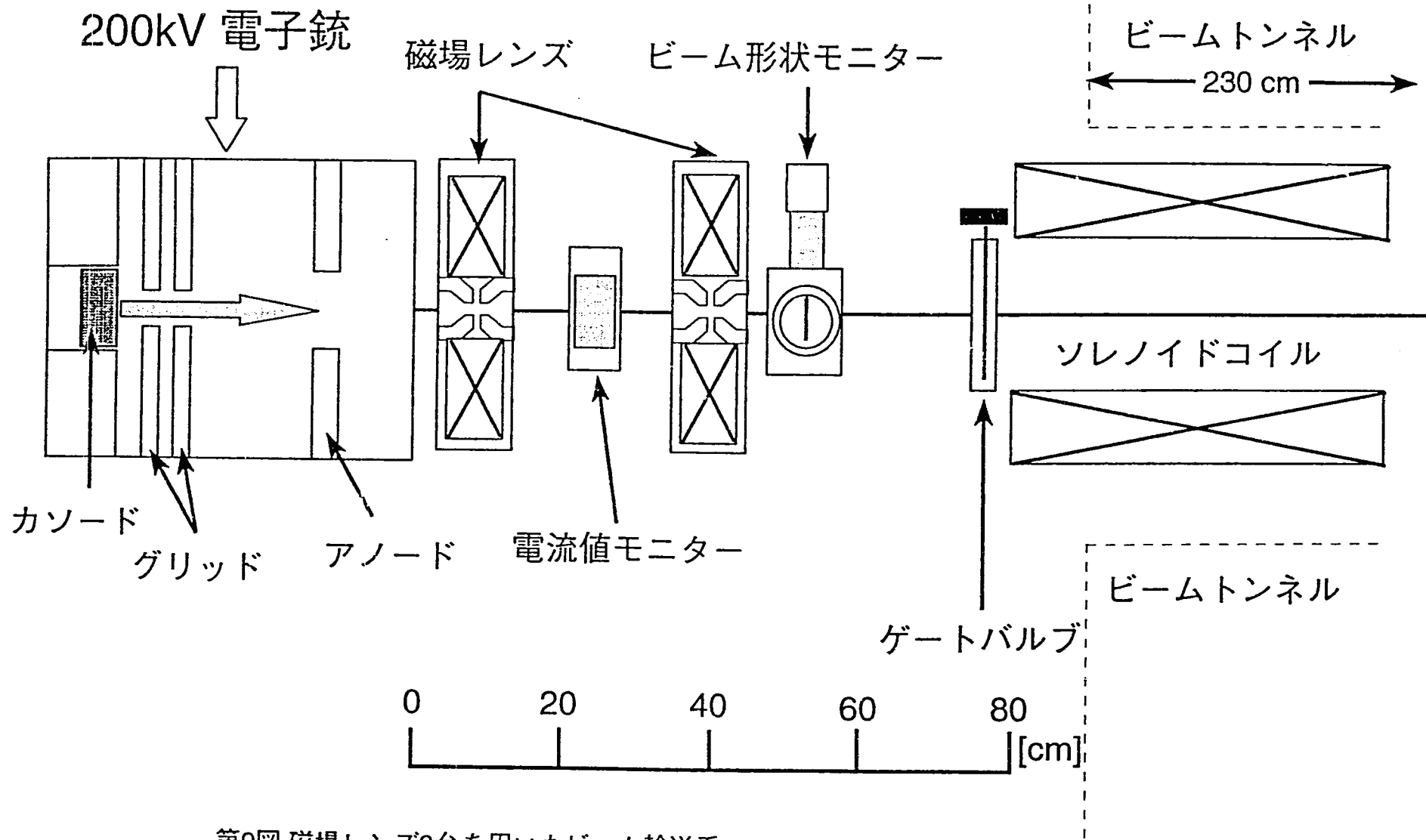
Z -R profile



Z -R profile

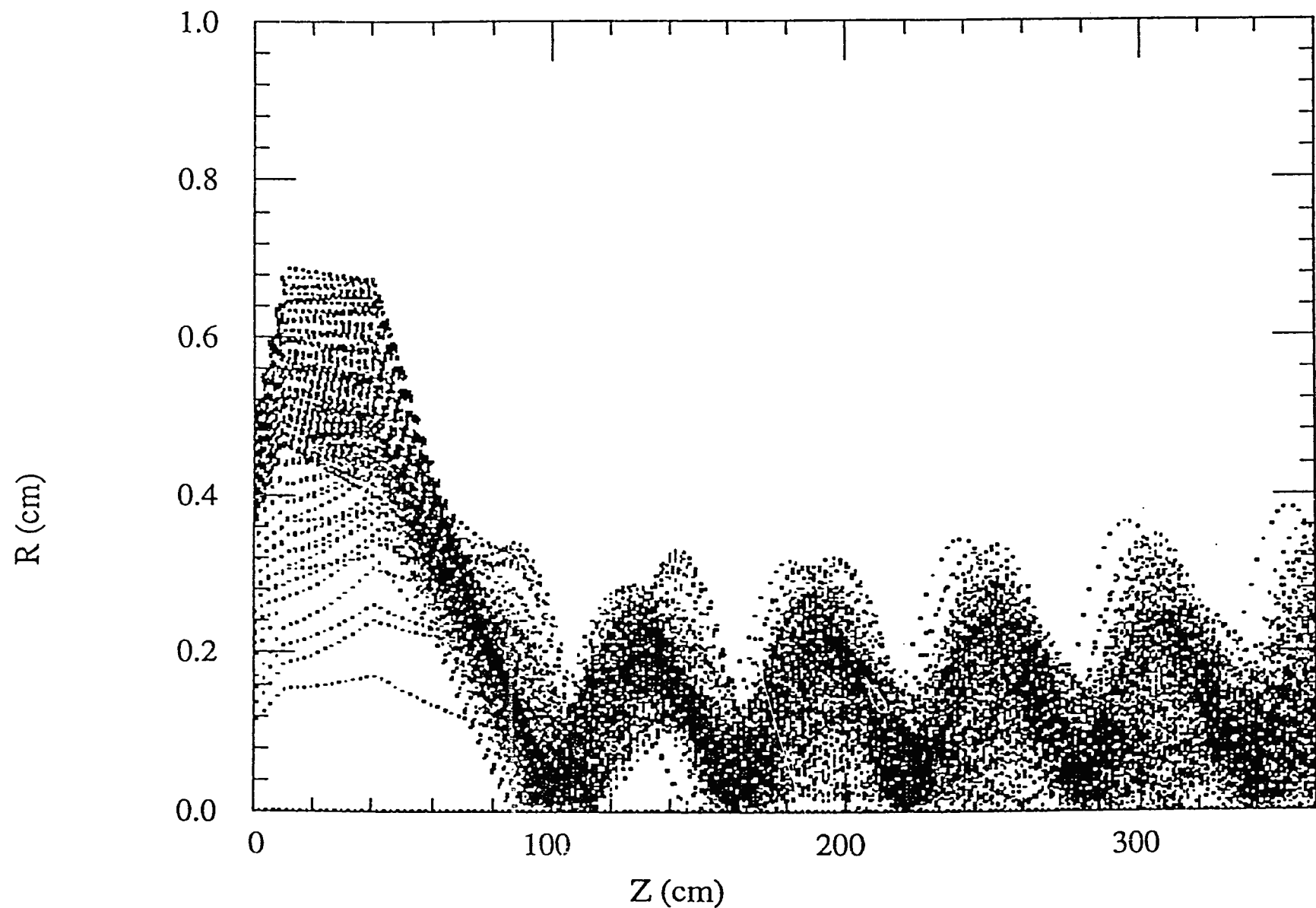


第8図 電子銃出口からソレノイド出口までの軌道解析結果。
 下図は上図からコイルのもれ磁場の効果を除いた計算結果。



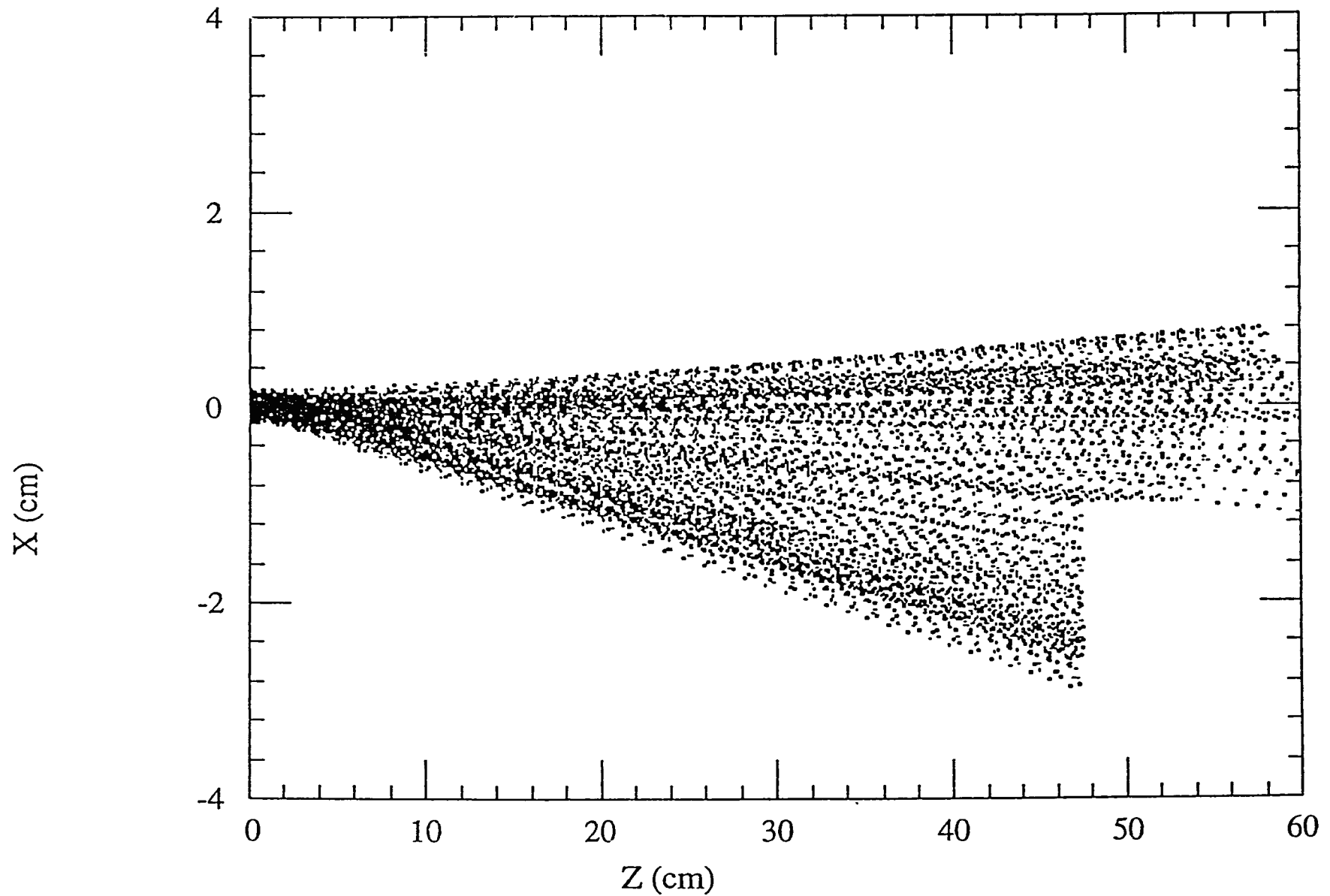
第9図 磁場レンズ2台を用いたビーム輸送系

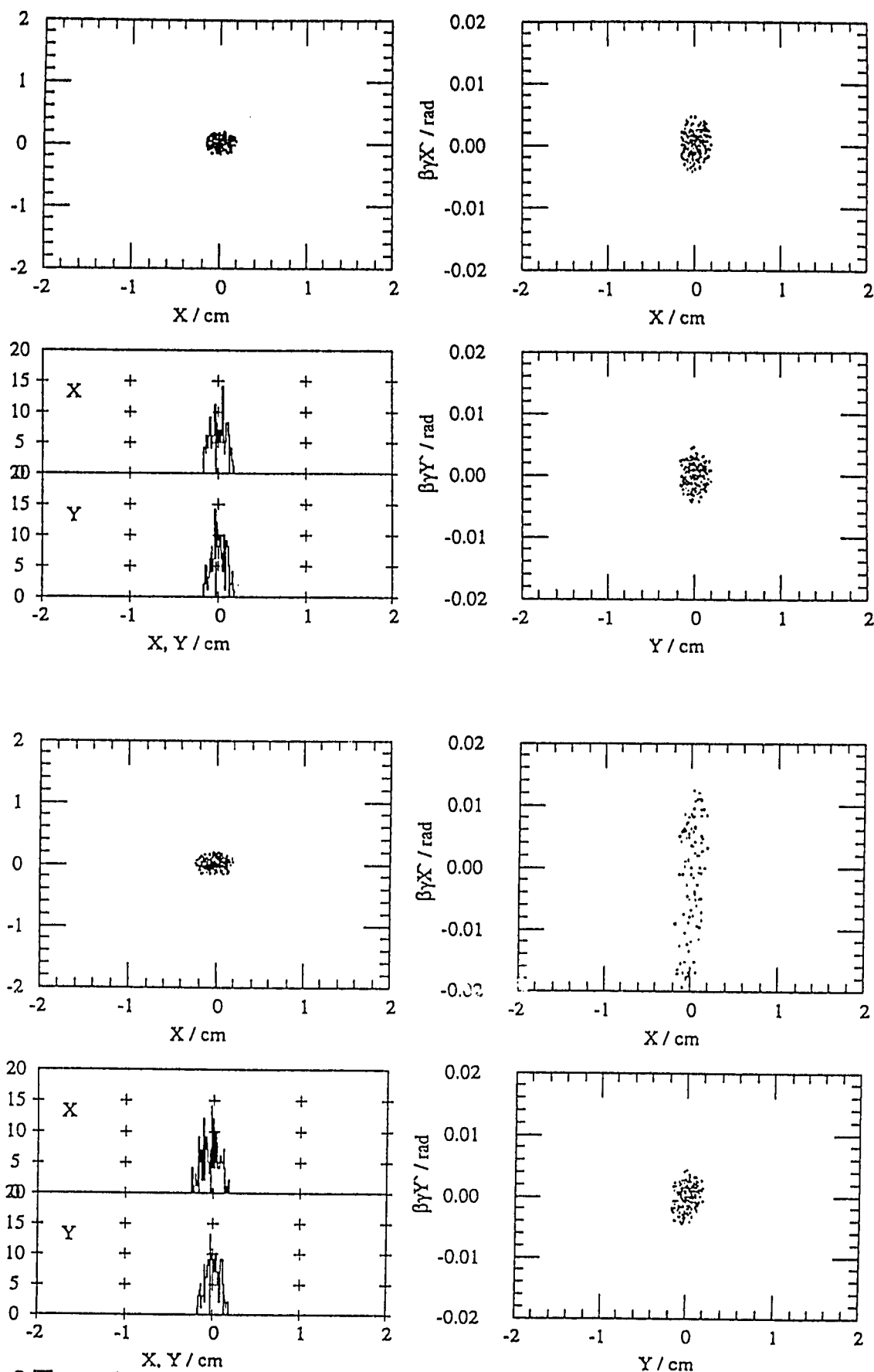
Z -R profile



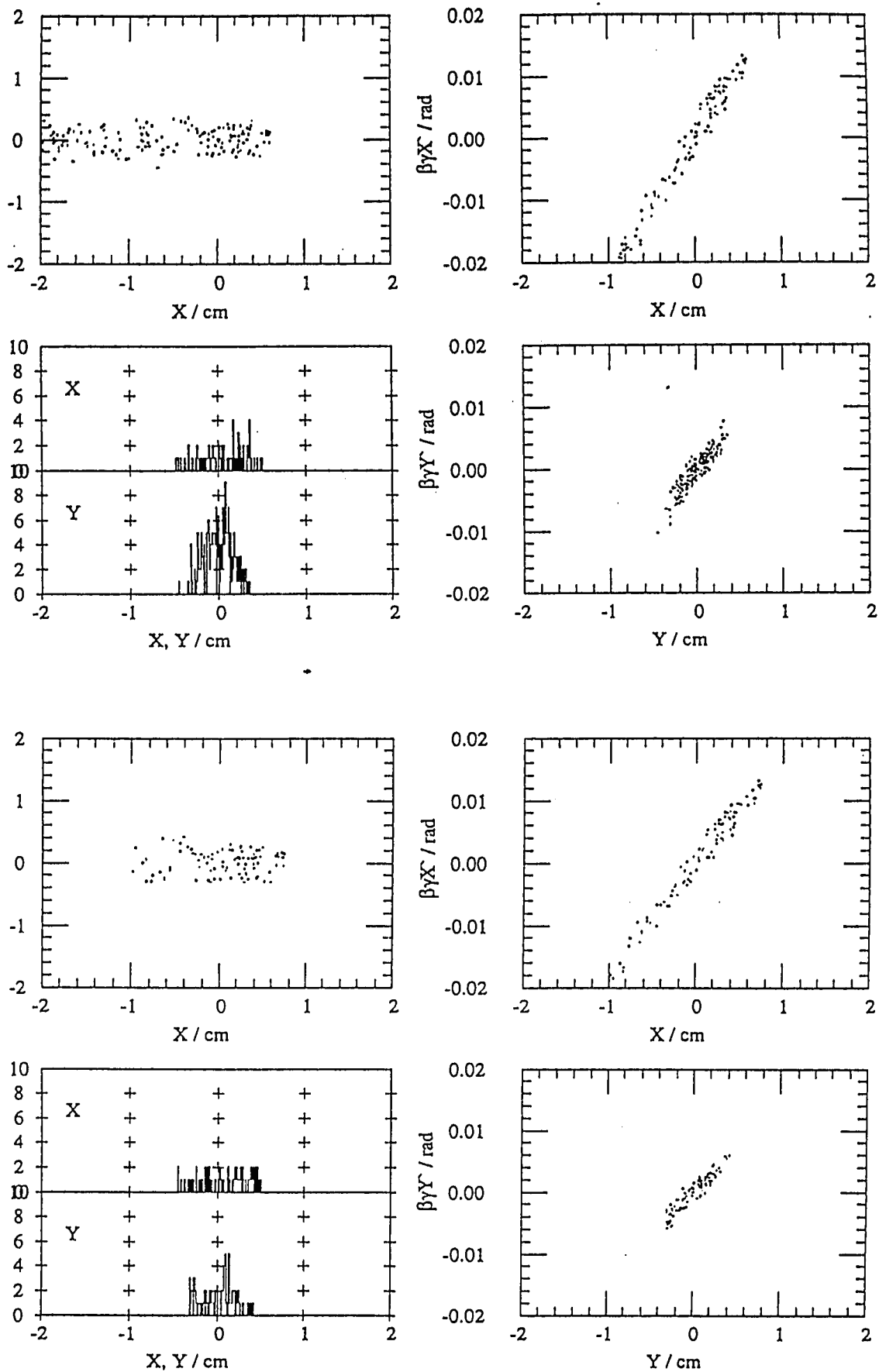
第10図 電子銃出口からソレノイド出口までの軌道解析結果。

Z -X profile

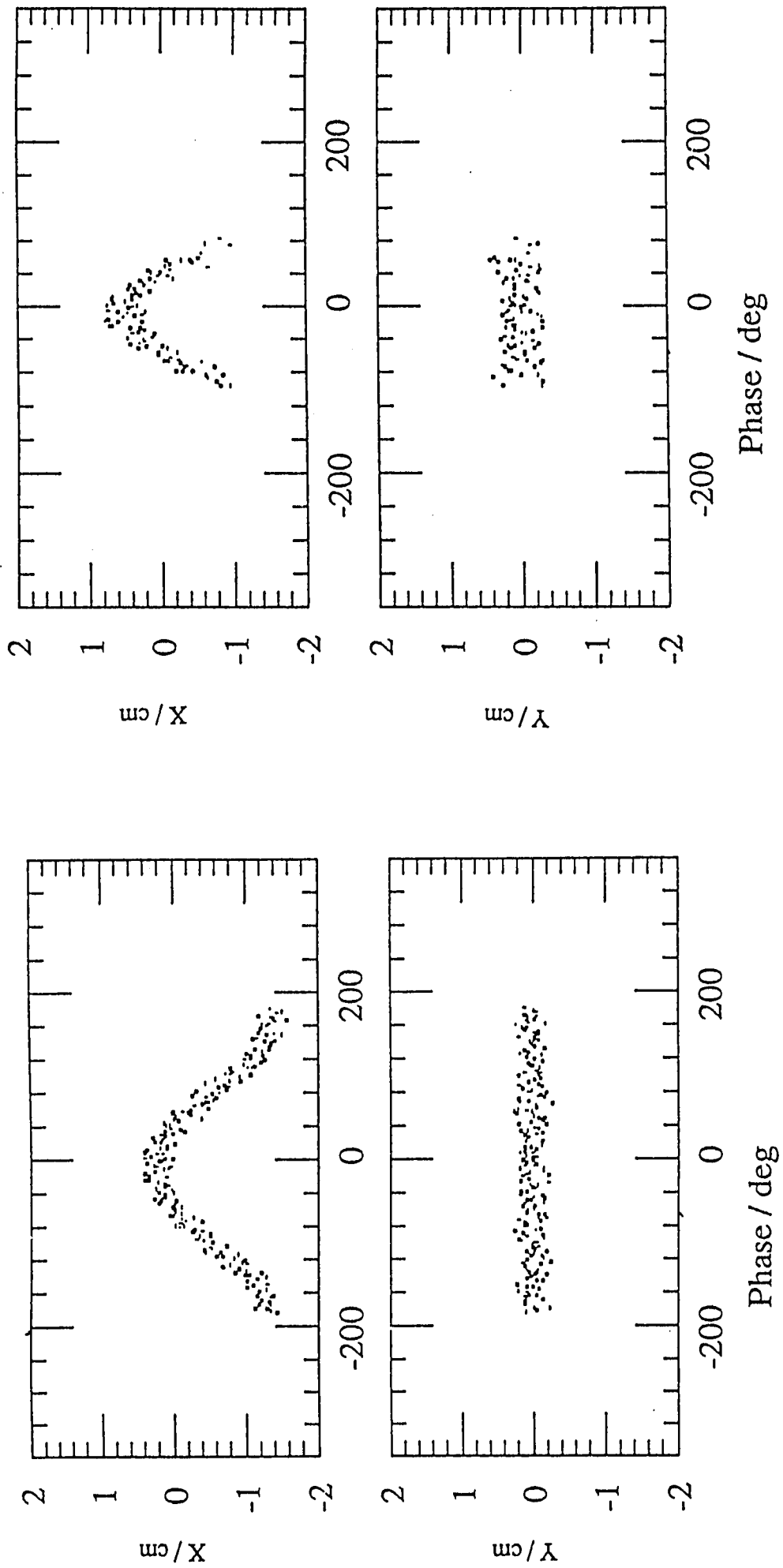
第11図 f_0 のみによるチョッピングの軌道解析結果。



第12図 チョッパーキャビティー前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。上の4図がチョッパーキャビティー前、下の4図がチョッパーキャビティー後の実空間（左側）及び位相空間（右側）でのビームの広がりを示す。

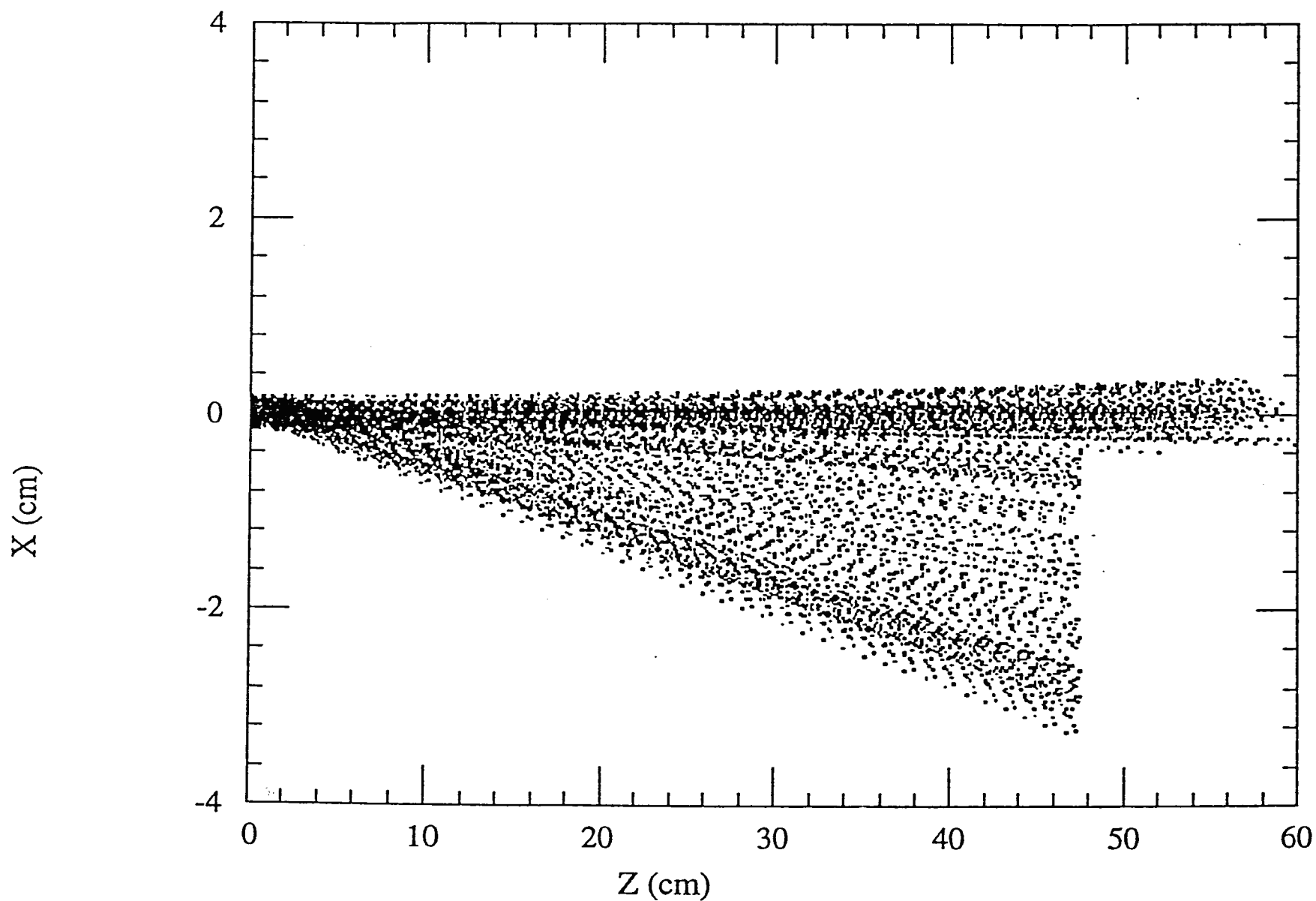


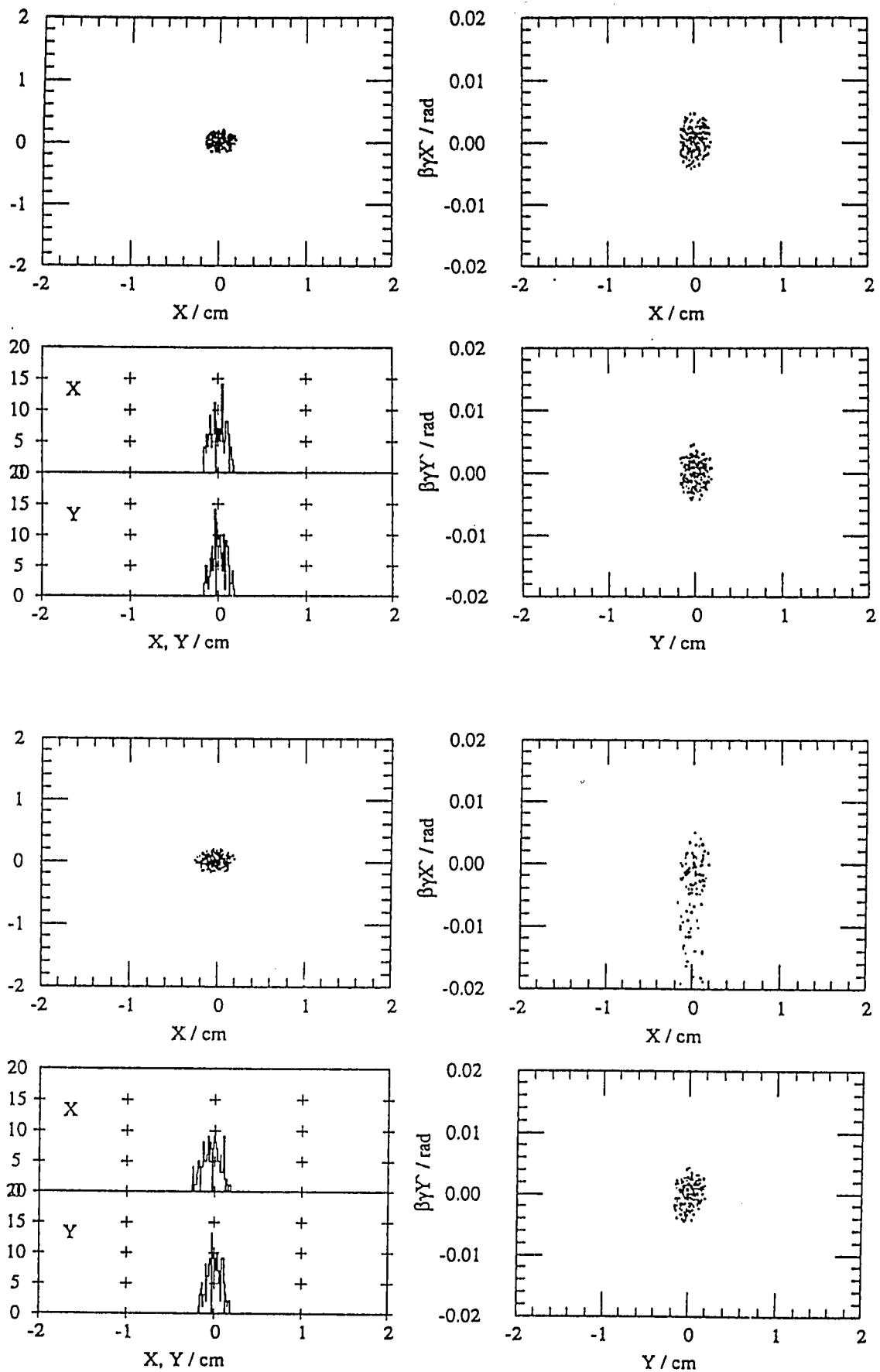
第13図 チョパースリット前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
 上の4図がチョパースリット前、下の4図がチョパースリット後の実空間（左側）及び位相空間（右側）でのビームの広がりを示す。



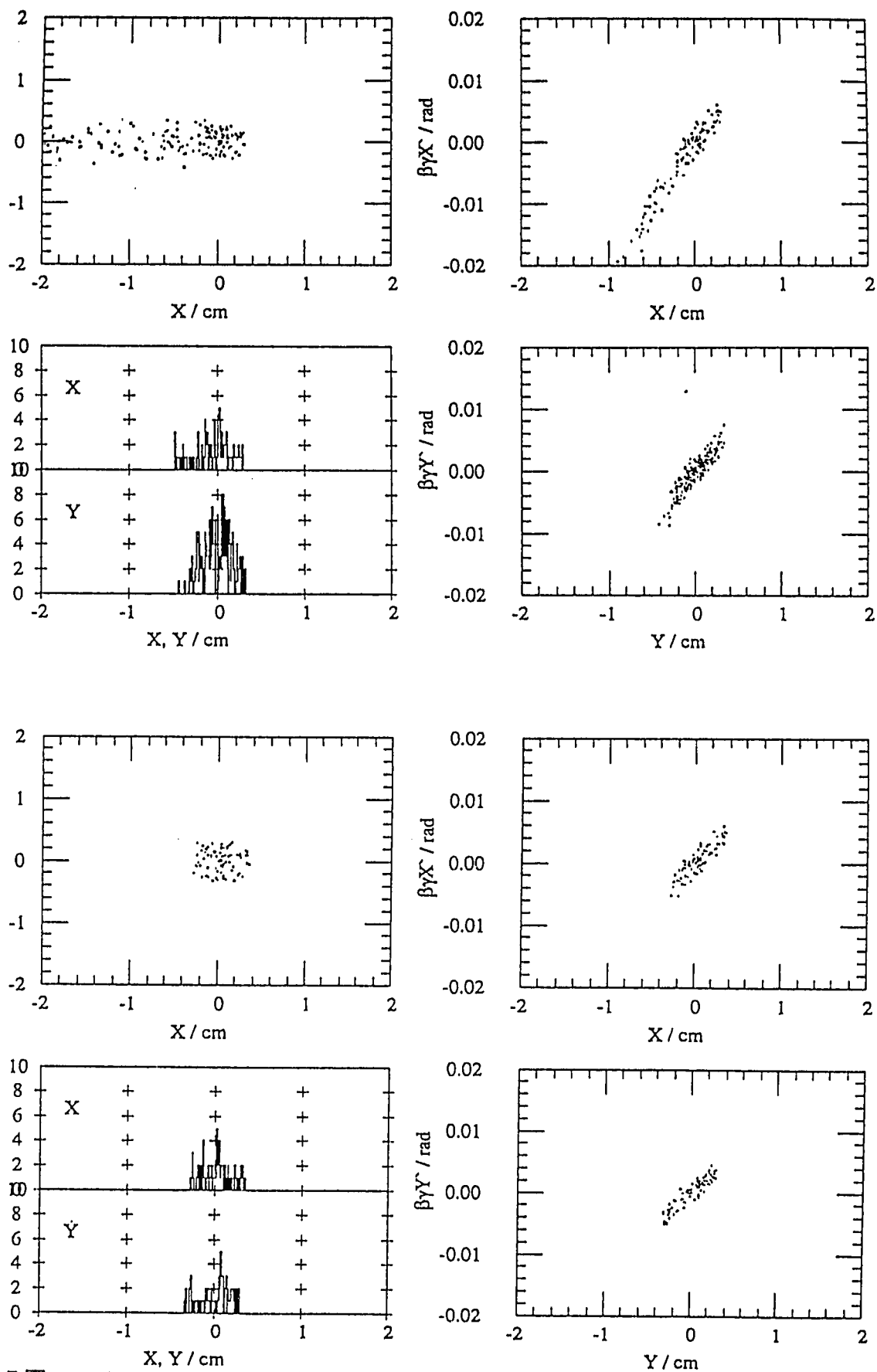
第14図 f_0 のみによるチョッピングのスリット前後での位相に対するビームの広がり。左の図がスリット前、右の図がスリット後のビームの広がりを示す。

Z -X profile

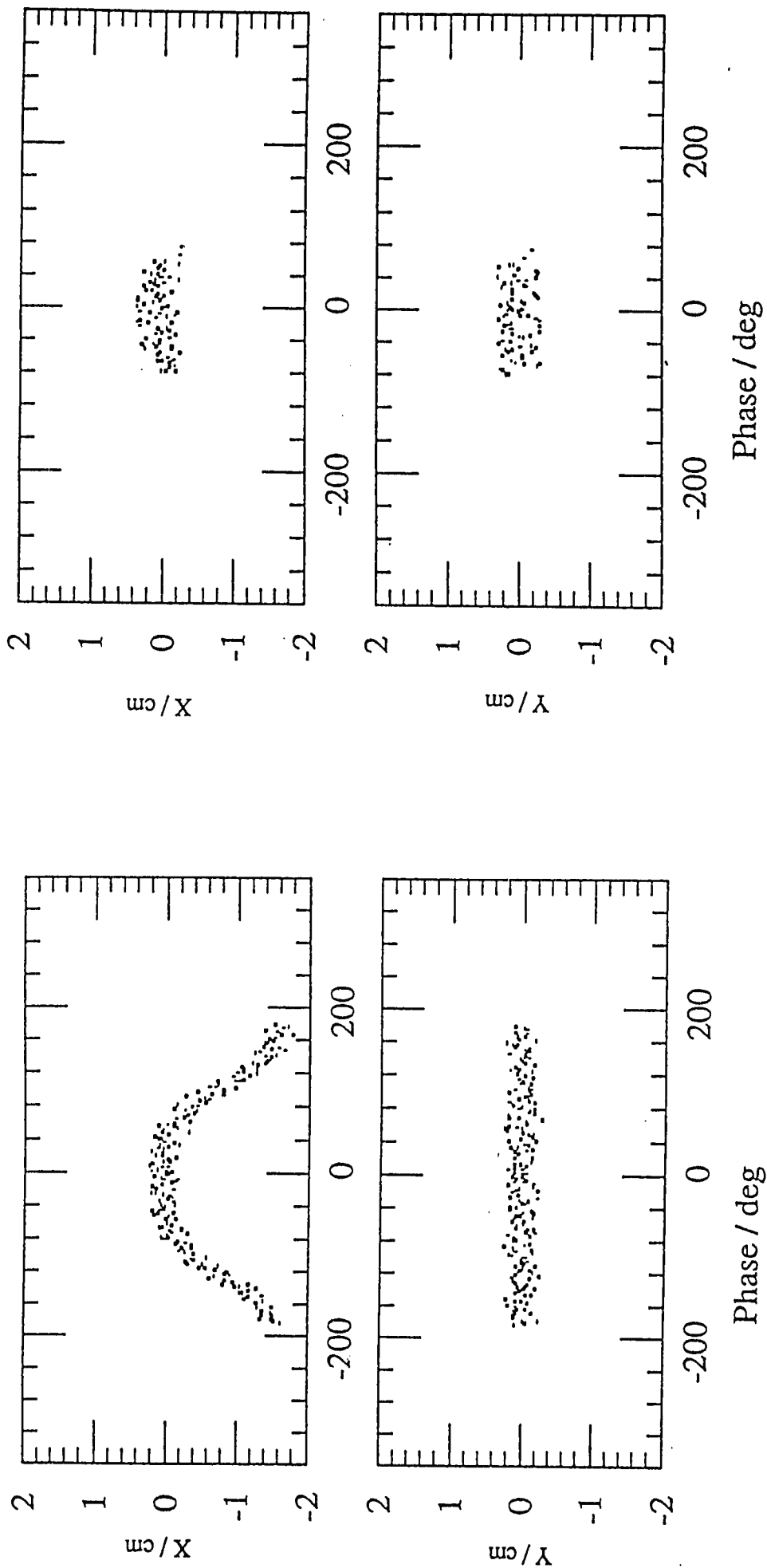
第15図 f_0+2f_0 によるチョッピングの軌道解析結果。



第16図 チョッパーキャビティー前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。上の4図がチョッパーキャビティー前、下の4図がチョッパーキャビティー後の実空間（左側）及び位相空間（右側）でのビームの広がりを示す。

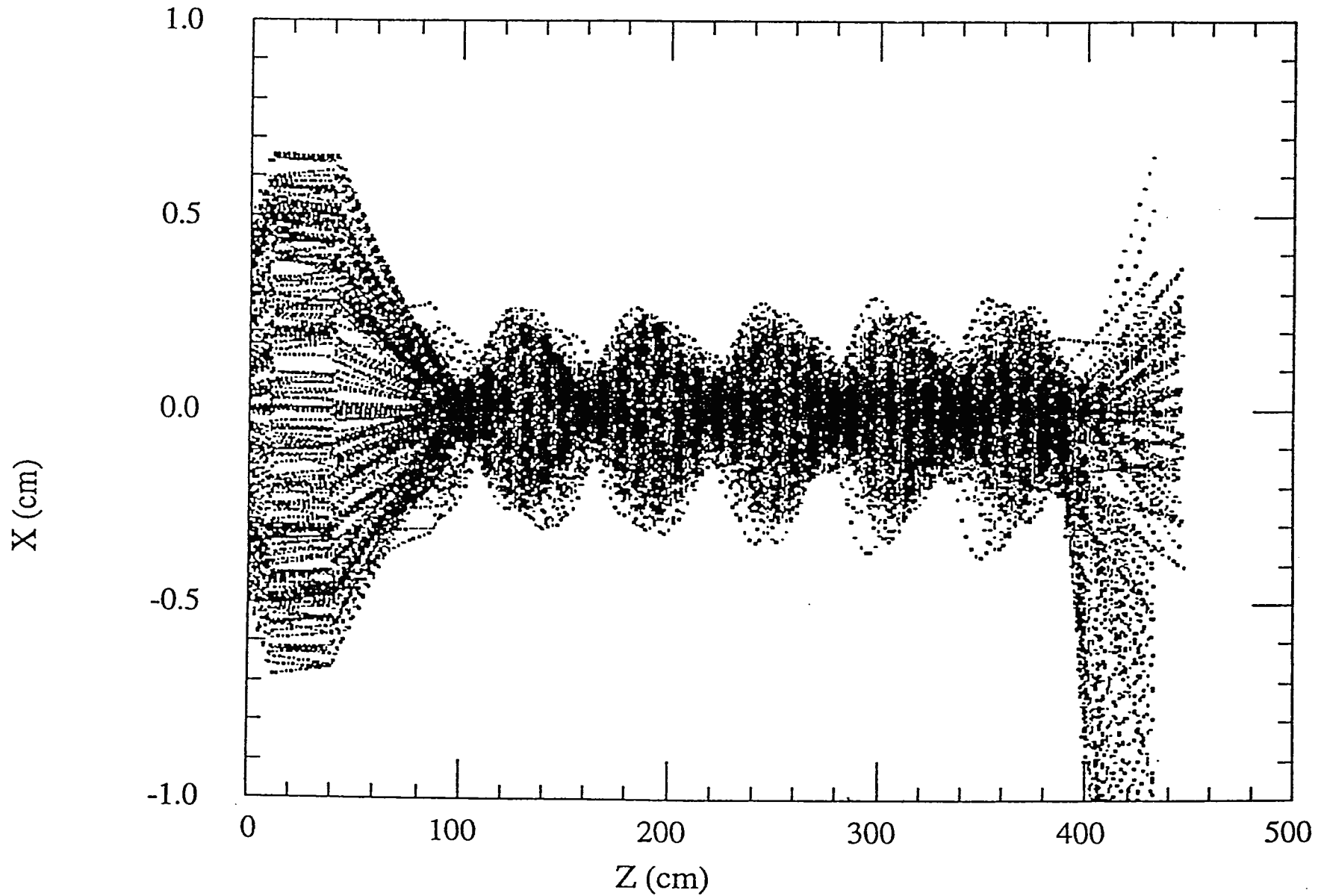


第17図 チョパースリット前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。左の図がスリット前、右の図がスリット後のビームの広がりを示す。上の4図がチョパースリット前、下の4図がチョパースリット後の実空間（左側）及び位相空間（右側）でのビームの広がりを示す。

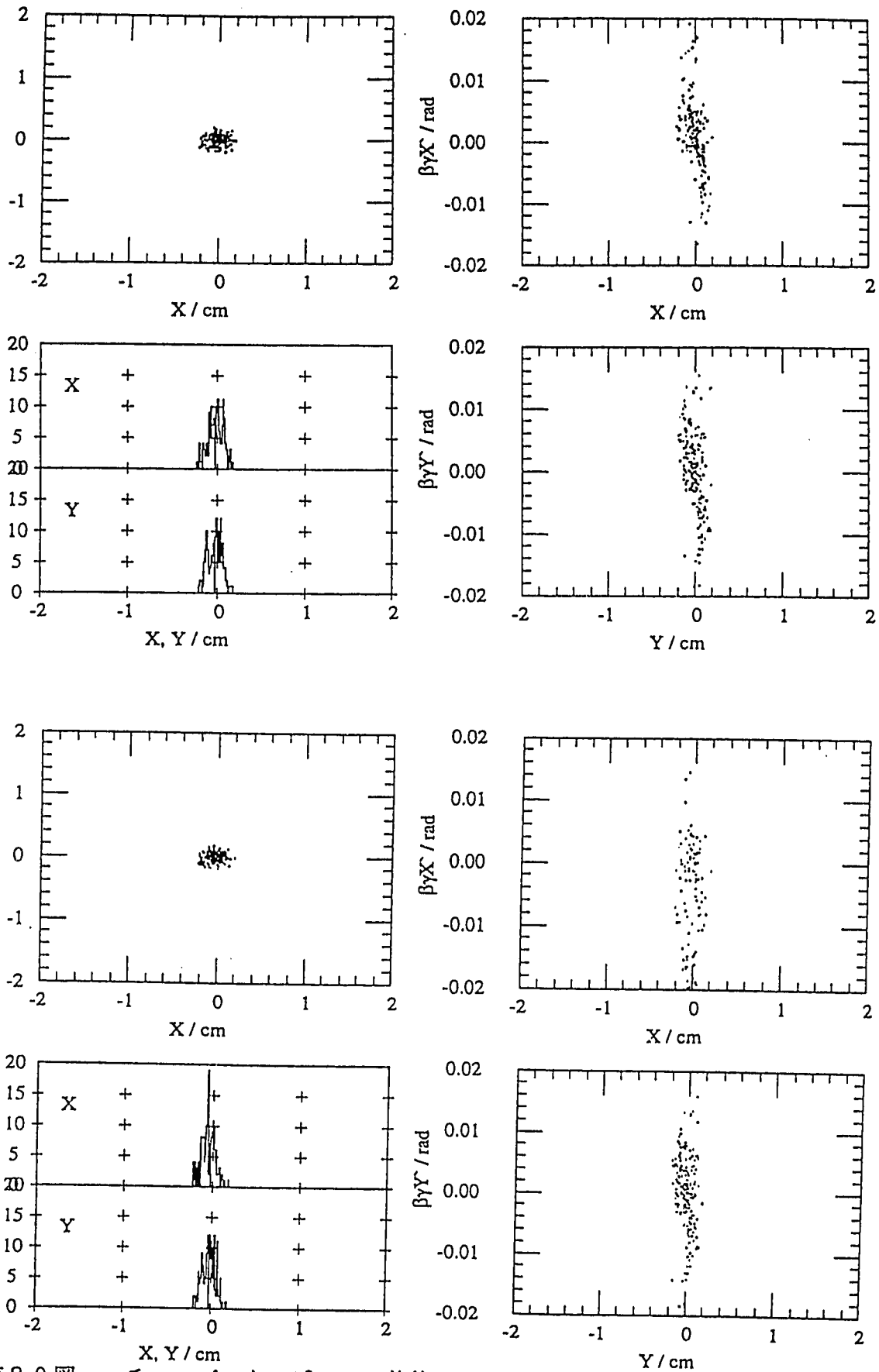


第18図 $f_0 + 2f_0$ によるチョッピングのチョパースリット前後での位相に対するビームの広がり。左の図がスリット前、右の図がスリット後のビームの広がりを示す。

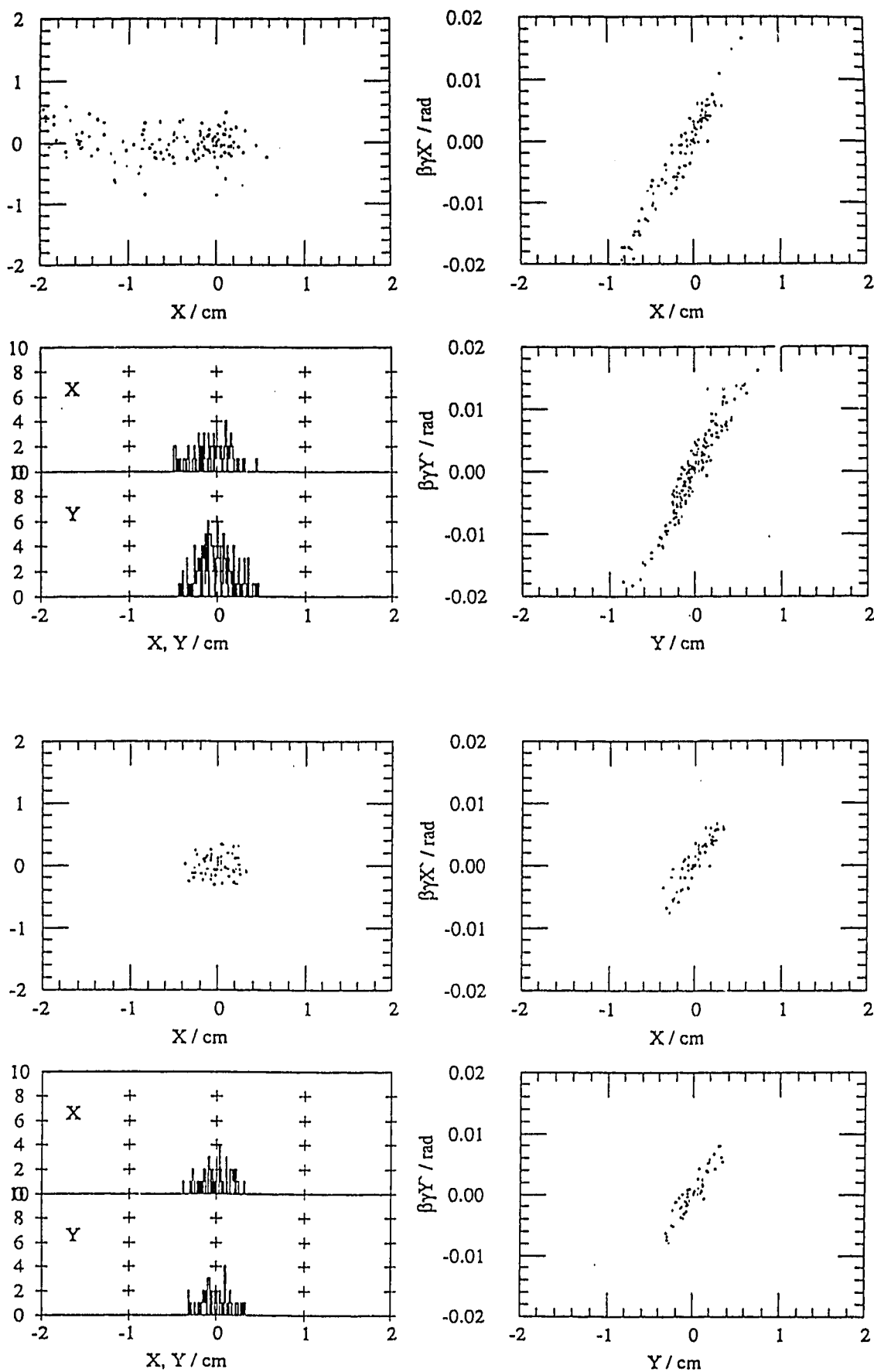
Z -X profile



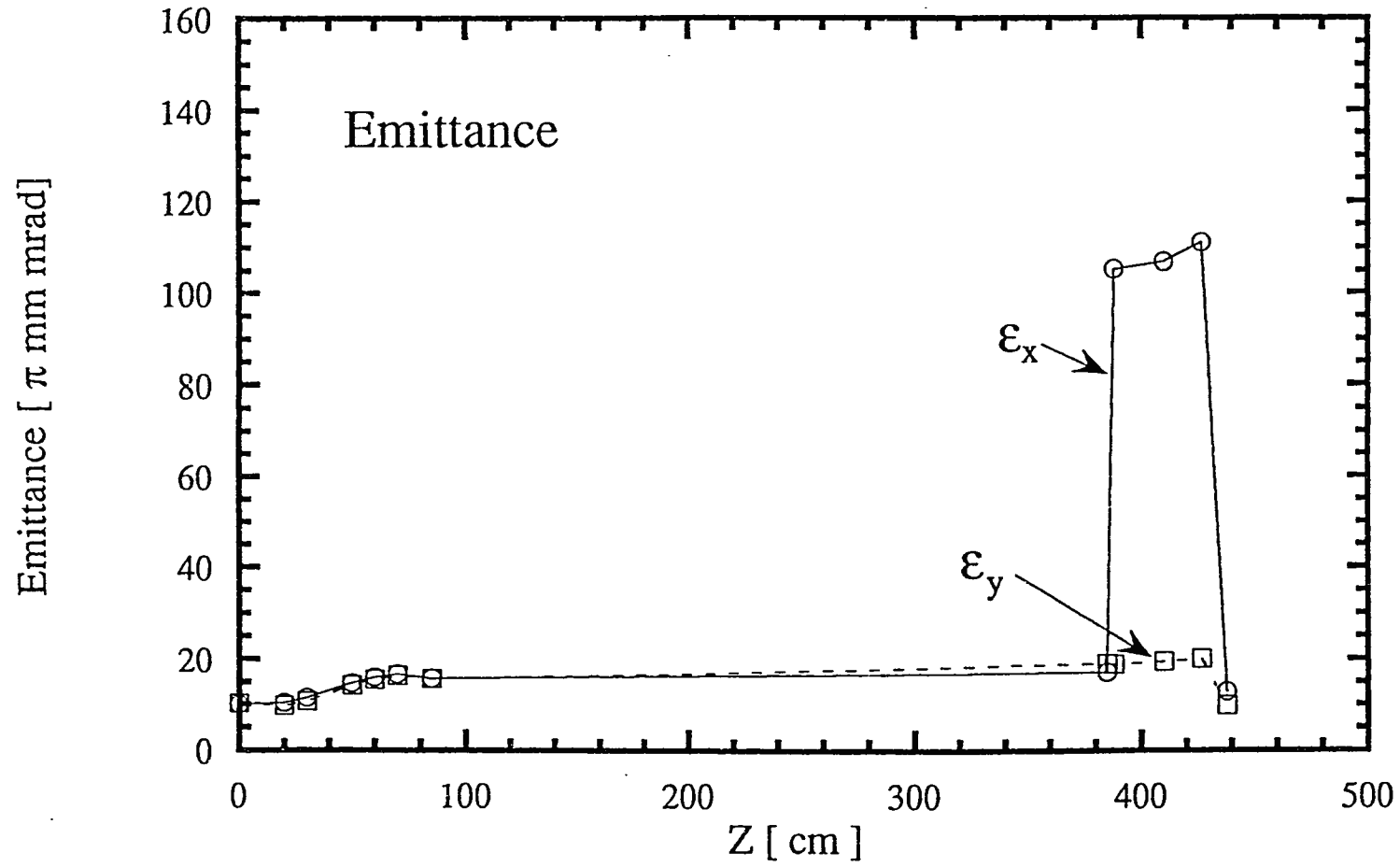
第19図 電子銃出口からチョッパースリットまでの軌道解析結果。



第20図 チョッパーキャビティー前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。上の4図がチョッパーキャビティー前、下の4図がチョッパーキャビティー後の実空間（左側）及び位相空間（右側）でのビームの広がりを示す。



第 2 1 図 チョパースリット前後での実空間及び位相空間でのビームの広がり。
 上の 4 図がチョパースリット前、下の 4 図がチョパースリット後の実空間（左側）及び位相空間（右側）でのビームの広がりを示す。



第 2 2 図 電子銃出口からチョッパースリットまでのエミッタンスの変化。