

空間電荷効果領域における位相空間上での ビーム分布測定の研究

1998年6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下さい。

〒311-1393 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-chō, 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) 1997

空間電荷効果領域における位相空間上での ビーム分布測定の研究

実施責任者 谷 賢
野村昌弘

要旨

エミッタンス等で表される位相空間上でのビームの分布は、加速器からの電子ビームの利用を考える上で、また、加速器自身の性能を調べる上で最も重要な物理量の一つである。そこで、エネルギーが高く空間電荷効果を見逃せる領域では四重極電磁石を使用した方法で、また、空間電荷効果領域ではペーパーポッド法でエミッタンスの測定が行われている。

今回、四重極電磁石を用いた位相空間上でのビームの分布の測定を空間電荷効果領域まで拡張して、磁場レンズを用いてビームの分布を測定する方法の研究を行った。この方法では、Twiss パラメータで位相空間上でのビームの分布を近似する代わりに、角度方向の拡がり、ビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径でビームの分布を近似し、線形の輸送行列 M を用いて運動を記述する代わりに、シミュレーションを行うことにより運動を記述した。

このため、まず、計算速度を最優先した1次元のシミュレーションコードを開発した。シミュレーションコードではメッシュサイズを変化させることにより空間電荷効果を精度よく取り込めるようにした。また、このシミュレーションコードを用いて、ビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径の違いにより生じる、磁場レンズの強度とビーム径の関係の違いを計算した。この結果、位相空間上でのビームの分布をある程度決定できることを確認した。

Study of a measurement of beam distribution on the phase space in the space charge dominant region

MASAHIRO Nomura

Abstract

Beam distribution on the phase space which is figured by the emittance and Twiss parameters is one of the most important parameters when applications and performance of accelerator are studied. In the high energy region where the space charge effect is week, the emittance is measured by a quadrapole magnet and in the space charge dominant region, the pepper-pot technique is used.

I studied a method to measure the beam distribution on the phase space by magnetic lenses in the space charge dominant region. In this method, an initial beam distribution is figured by parameters such as a momentum spread, a waist position and a beam radius at the exit of gun instead of Twiss parameters. And the beam trajectory and radius are calculated by a new simulation code instead of transfer matrix because transfer matrix can not be used in the space charge dominant region.

I developed a new one dimensional simulation code. In this code, when the space charge force is calculated, a mesh size is changed automatically according to the beam radius in order to reduce the calculation error. The relations between the beam radius and strength of the magnetic lenses were calculated by this simulation code. The results show that the waist position and the beam radius at the exit of gun can be estimated from those relations.

Frontier technology section, Technology Development Division, Oarai Engineering center.

目次

第1章 序	1
第2章 位相空間上でのビーム分布の測定	2
2.1 空間電荷効果を見捨てる領域でのエミッタンス及びTwiss パラメータの測定	2
2.2 空間電荷効果領域での位相空間上でのビーム分布の測定	4
第3章 シミュレーションコード	6
第4章 計算結果及び議論	10
第5章 まとめ	12
謝辞	13
参考文献	13

図 リスト

図1 エミッタンス及びTwiss パラメータの定義	14
図2 引き出し直後の電子ビームの位相空間上での分布。	15
図3 電子銃出口での電子ビームの位相空間上での分布。	16
図4 計算体系	17
図5 電子銃出口の位相空間上での分布(初期値)	18
図6 ビーム軌道及び位相空間上での分布	19
図7 ビーム軌道及び位相空間上での分布	20
図8 ビーム軌道及び位相空間上での分布	21
図9 ビーム軌道及び位相空間上での分布	22
図10 ビーム軌道及び位相空間上での分布	23
図11 ビーム軌道及び位相空間上での分布	24
図12 ビーム径と磁場レンズの強度との関係(ビームウエストの位置)	25
図13 ビーム径と磁場レンズの強度との関係(電子銃出口でのビーム径)	26

第1章序

エミッタンス等で表される位相空間上でのビームの分布は、加速器からの電子ビームの利用を考える上で、また、加速器自身の性能を調べる上で最も重要な物理量の一つである。そこで、エネルギーが高く空間電荷効果を見捨てる領域では四重極電磁石を使用した方法[1]で、また、空間電荷効果領域ではペーパーポッド法[2]でエミッタンスの測定が行われている。

現在、事業団で開発中の大強度電子線形加速器は、平均電流が20 mAと非常に高い為漏れビームを0.01%以下に押さえなければならない。更に、後方からの散乱を押さえる為に電子銃と加速部の間に2.3mのしゃへい壁があり、低エネルギー領域でのビーム輸送が長いことなどから、通常の加速器以上にビームの輸送を正確に行わなければならない。そのためには、輸送するビームの初期状態、つまり電子銃出口での位相空間上でのビーム分布を知る必要がある。先に述べたように、空間電荷効果領域では通常ペーパーポッド法でエミッタンスの測定が行われているが、この方法では測定系をビームライン上に設置する為実際に使用しているビームを直接測定することはできない。そこで、空間電荷効果を見捨てる領域で四重極電磁石を用いた方法を空間電荷効果領域まで拡張し、磁場レンズを用いた測定の検討を行ったのでその結果についての報告を行う。

第2章 位相空間上でのビーム分布の測定

第1章でも述べた様に、磁場レンズを用いたビーム分布の測定は、空間電荷効果を見捨てる領域で行われてきた四重極電磁石を用いた方法を拡張したものである。そこで、先ずこの測定法について説明し、その後、空間電荷効果を取り込み、磁場レンズを用いた方法について述べる。

2.1 空間電荷効果を見捨てる領域でのエミッタンス及びTwissパラメータの測定

位相空間上で (x_i, x'_i) に位置する電子は式(1)に示される様に、輸送行列 M により新しい座標 (x_n, x'_n) に移される。

$$\begin{pmatrix} x_n \\ x'_n \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

$m_{11} \sim m_{22}$ は輸送行列 M の行列要素で、焦点距離 f の四重極電磁石を通過し自由空間 l を通過した場合の行列要素は、thin lens近似を用いると以下のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{l}{f} & l \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

この方法を用いて位相空間上の各電子の運動を記述することもできるが、電子ビーム全体の挙動は把握しにくい。そこで、一般には電子ビームの位相空間上での分布を楕円で近似し、Twissパラメータと呼ばれる α 、 β 、 γ を用いて電子ビームの位相空間上での分布を表わしている。Twissパラメータの定義[3]を図1に示す。Twissパラメータも当然先に示した輸送行列 M の行列要素を用いて変換することができ、 i の位置でのTwissパラメータ α_i 、 β_i 、 γ_i は n の位置でのTwissパラメータ α_n 、 β_n 、 γ_n へ以下のように変換することができる。

$$\begin{pmatrix} \beta_n \\ \alpha_n \\ \gamma_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (m_{11})^2 & -2m_{11}m_{12} & (m_{12})^2 \\ -m_{21}m_{11} & m_{11}m_{22} - m_{12}m_{21} & -m_{12}m_{22} \\ (m_{21})^2 & -2m_{22}m_{21} & (m_{22})^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_i \\ \alpha_i \\ \gamma_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

また、図1からも分かる様にビーム径を σ とすると、 σ はTwissパラメータを用いて、

$$\sigma^2 = \varepsilon \cdot \beta \quad (4)$$

と表すことができる。よって、例えばN回四重極電磁石の磁場強度を変えてビーム径 σ_N の測定を行ったとすると、式(3)と(4)より σ_N と*i*の位置でのTwissパラメータ α_i 、 β_i 、 γ_i との関係は、

$$\begin{pmatrix} \sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \\ \sigma_3^2 \\ \vdots \\ \sigma_N^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon\beta_1 \\ \varepsilon\beta_2 \\ \varepsilon\beta_3 \\ \vdots \\ \varepsilon\beta_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_N & b_N & c_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon\beta_i \\ \varepsilon\alpha_i \\ \varepsilon\gamma_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

となる。ここで a_N 、 b_N 、 c_N は行列要素を表し、

$$a_N = (m_{11})^2, b_N = -2m_{11}m_{12}, c_N = (m_{12})^2 \quad (6)$$

である。ここで四重極電磁石の磁場強度を変えることは、焦点距離を変えることであり、それは行列要素 a_N 、 b_N 、 c_N を変えることを意味する。つまり、この方法は行列要素 a_N 、 b_N 、 c_N を変えてビーム径 σ_N の測定をN回行い、式(5)よりTwissパラメータ α_i 、 β_i 、 γ_i を求める方法である。実際に、式(5)よりTwissパラメータを求める時には、最小二乗法を用いて行う。誤差の二乗を Q とすると、 Q は、

$$Q = \sum_{k=1}^N (\varepsilon\beta_k - (a_k\varepsilon\beta_i + b_k\varepsilon\alpha_i + c_k\varepsilon\gamma_i))^2 \quad (7)$$

で表され、この Q が最小となる様に以下の式を用いてTwissパラメータ α_i 、 β_i 、 γ_i を求めることができる。

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_i} = \frac{\partial Q}{\partial \alpha_i} = \frac{\partial Q}{\partial \gamma_i} = 0 \quad (8)$$

また、Twiss パラメータには以下の関係があるので、

$$\beta \cdot \gamma - \alpha^2 = 1 \quad (9)$$

この関係より、エミッタンス ϵ は

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon \beta_i \cdot \epsilon \gamma_i - (\epsilon \alpha_i)^2} \quad (10)$$

と求めることができる。以上まとめると、この方法では先ず位相空間上でのビームの分布を楕円で近似しTwiss パラメータで記述する。次に、このTwiss パラメータを四重極電磁石や自由空間での輸送行列 M を用いて変換し、四重極電磁石の磁場強度を変えてビーム径を測定し、その結果と最小二乗法を用いて対応させることによりTwiss パラメータ及びエミッタンス ϵ を求める方法である。

2.2 空間電荷効果領域での位相空間上でのビーム形状の測定

次に、空間電荷効果領域(~180 keV)、つまり電子銃出口での位相空間上でのビーム形状の測定について述べる。先に述べた空間電荷効果を見捨てる領域での測定との違いは2点ある。先ず第1点目は、空間電荷効果(非線形)が働く為、線形の輸送行列 M を用いて運動を記述することができないことである。また、第2点目は、位相空間上でのビームの分布を楕円で近似できないことである。ビームが磁場による輸送系やRFによるバンチング等により位相空間上で回転させられた後では、ビームは空間的にも角度的にもガウス分布に近くなり、位相空間上での分布は楕円で近似できるようになる。しかし、電子銃出口では陰極の表面状態や温度、グリッド電圧、加速電場等により決められた角度方向の分布となる。このことは、電子銃出口でのビームの像がはっきり

していることから明らかである。これら2点については以下の方法をとった。

まず、輸送行列 M を用いて運動を記述することができない点については、シミュレーションを行うことにより対処した。しかし、シミュレーションで実験値と対応させることにより位相空間上でのビーム分布を求める場合には、輸送行列 M を用いて実験値から最小二乗法により求めたようにパラメータは一義的には求まらず、条件を変えてシミュレーションを行い、その結果と実験結果を比較しそれらの結果が同じ場合にはその条件が正しいと言うやり方になる。そこでシミュレーションを使用する場合には、その回数が多くなる為1回のシミュレーション時間を短くしなければならない。シミュレーションの内容については第3章で述べる。

次に、位相空間上でのビームの分布を楕円で近似できない点については、以下の様に近似した。まず、陰極から引き出された直後の電子ビームの位相空間上での分布は、空間的には軸対称で一様分布(edge emissionの効果は無視する。)、角度方向には熱分布や表面状態からガウス分布で近似できると考えられる。この陰極から引き出された直後の電子ビームの分布を図2に示す。陰極の大きさは分かっているが、角度方向の拡がりパラメータの一つとなる。その後、電子ビームは電子銃内での電場により発散を押さえられ加速される。シミュレーションコードEGUNを用いて計算した結果、電子銃出口約10 cmにウエストが位置するように電子銃は設計されている。そこで、電子銃出口でのビームの分布は、図2に示した陰極直後の分布が何らかの収束力を受け、ある距離を走ったと考えて、式(2)で示した輸送行列 M を用いて計算した。実際に使用したパラメータは、現実の物理量との対応を良くする為に、収束力と距離から求めたビームウエストの位置と電子銃出口でのビーム径を用いた。つまり、先に述べたTwissパラメータで位相空間上でのビームの分布を表す代わりに、角度方向の拡がり、ビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径で位相空間上でのビームの分布を表した。電子銃出口での位相空間上でのビーム分布の例を図3に示す。

第3章 シミュレーションコード

第2章で述べた様にこのシミュレーションにおいて最も重要なことは計算速度である。そこで、計算時間短縮の為に今回は2つの方法を採用した。一つは、空間の対称性を利用して、計算する電子数を大幅に減らしたことである。つまりビームが軸対称であることを仮定し、円筒座標 (z, r, θ) を用いて、空間電荷効果による発散力を求める時には z 方向と θ 方向に関して積分を行った。このことは物理的には、電子ビームを無限に長い円環の集合体であると近似したことになる。具体的な計算方法を以下に示す。

まず初めに、空間電荷による発散力の計算法について述べる。無限に長い直線上に電子が分布している場合、 r だけ離れた位置での電場 E_r は、

$$E_r = \frac{N_e e}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (11)$$

で表される。 N_e は単位長さ当たりの電子の個数、 e は電子の電荷を表し、 ϵ_0 は真空での誘電率を表す。また、磁場による収束力も働くので動径方向の運動方程式は、

$$m_0 \gamma \ddot{r} = \frac{N_e e^2}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{\gamma^2} \quad (12)$$

で表される。ここで、 m_0 は電子の静止質量を表し、 γ は

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \beta = v/c \quad (13)$$

で定義され、 v は電子の速度を表す。次に式(12)を用いると、 r_k の位置の電子が半径 r_i の円環から受ける力による動径方向の運動方程式は、

$$m_0 \gamma \ddot{r}_{ki} = \frac{e}{2\pi\epsilon_0} \frac{Q_i}{2\pi r_i} \frac{1}{\gamma^2} \int_0^{2\pi} \frac{r_k - r_i \cos\theta}{r_k^2 + r_i^2 - 2r_k r_i \cos\theta} r_i d\theta \quad (14)$$

となる。ここで Q_i は円環 i の電荷を表し N_e とは以下の関係がある。

$$Q_i = \frac{2\pi r_i}{\sum_k^N 2\pi r_k} N_e e \quad (15)$$

ここで N は円環で電子ビームを近似した時の円環の総数である。

式(14)は解析的に積分することは難しく数値積分を行わなければならない。シミュレーションを行う時にはこの積分は各時間ステップ毎に行わなければならない、計算時間の大部分を占めてしまう。そこで、計算時間短縮の為のもう一つの方法として、空間を分割し各点での運動方程式、つまり式(14)を予め計算しておき、各計算ステップでは単にその計算結果を引き出すようにした。その為に先ず、式(14)を以下の様に変形する。

$$m_0 \ddot{r}_{ki} = \frac{e Q_i}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\gamma^2} \frac{1}{r_i} \sum_{m=1}^{Int[2\pi n_i]} \frac{n_k - n_i \cos\left(\frac{2\pi m}{Int[2\pi n_i]}\right)}{n_k^2 + n_i^2 - 2n_k n_i \cos\left(\frac{2\pi m}{Int[2\pi n_i]}\right)} \quad (16)$$

ここで n_k 、 n_i はそれぞれ r_k 、 r_i が位置する微小空間の番号である。式(16)で実際に予め計算しておきストックしておく部分は後半の和の部分 $F(k,i)$ 、

$$F(k,i) = \sum_{m=1}^{Int[2\pi n_i]} \frac{n_k - n_i \cos\left(\frac{2\pi m}{Int[2\pi n_i]}\right)}{n_k^2 + n_i^2 - 2n_k n_i \cos\left(\frac{2\pi m}{Int[2\pi n_i]}\right)} \quad (17)$$

だけである。式(17)で注目すべき点は、 $F(k,i)$ は微小空間の大きさ(メッシュサイズ)には依存せず、予め $F(k,i)$ を計算しておいてもメッシュサイズは条件に応じて変えることができる点である。これは初期の計算条件の違いだけでなく、計算途中で例えばビーム径が大きく変化した場合でも適用でき、飛躍的に計算精度を上げることができる。今回は、ビーム径の変化により、メッシュサイズが自動的に変化するようにした。これが一般に広く使用されている空間電荷効果を含む電子軌道シミュレーションコードPARMELAとは決定的に違う点である。

次に、磁場レンズによる収束について述べる。空間電荷効果を計算した時と同じ様に

円筒座標を用いると磁場中での電子の動径方向の運動方程式は、

$$m_0\gamma(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = -er\dot{\theta}B_z \quad (18)$$

となる。ここで B_z はz方向の磁場を表す。磁場 B_z と動径方向の磁場 B_r との関係は磁場 B_z がrに依存しない場合(ビーム径が小さい場合)は、

$$B_r = -\frac{r}{2} \frac{\partial}{\partial z} B_z \quad (19)$$

で近似することができる。この式(19)を周方向の運動方程式、

$$\frac{d}{dt}(m_0\gamma r^2\dot{\theta}) = er\dot{r}B_z - erB_r\dot{z} \quad (20)$$

へ代入することにより、

$$m_0\gamma r^2\dot{\theta} = \frac{e}{2} r^2 B_z \quad (21)$$

が得られる。この結果を式(18)に代入することにより、以下の関係が得られ、

$$\ddot{r} = \left(\frac{e}{2m_0\gamma}\right)^2 B_z r \quad (22)$$

動径方向の運動を磁場 B_z から求めることができる。実際に使用した磁場 B_z の式は一般によく使用されている[4]

$$B_z = \frac{B_0}{1 + (z/a)^2} \quad (23)$$

を使用した。ここで、 B_0 は最大磁場、 a はその B_0 の値が半分になるzの位置である。

最後にメッシュサイズについて述べる。電流値0.3Aの電子ビームの径が2mmの場合、ビームの体積を電子の総数で割ると電子は一辺約0.01mmの立方体到一个ずつ入っていることになる。このことより推測してメッシュサイズはこの程度が必要で、メッシュ数を数百に設定しておけば、先に述べた様に、ビーム径の変化に応じて自動的にメッシュサイズが変化するので計算精度を保ったまま計算が行われる。

第4章 計算結果及び議論

この章では今まで述べてきた方法について計算結果を交えて具体的に説明し、その有効性を議論する。第2章で述べた様に電子銃出口の位相空間上でのビームの分布は、角度方向の拡がり、ビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径で近似的に記述する。カソード温度や表面状態から生ずる角度方向の拡がり、電子銃出口から約80cm離れたプロファイルモニター1上でメッシュグリッドのサポート(1mm以下の大きさ)の像が観測できることから非常に小さな値と考えられる。そこで今回はパラメータの数を減らす為に、角度方向の拡がりを表すガウス分布の分散 σ の値を1m rad ($\sim 1\text{mm}/800\text{mm}$) に固定し、ビーム径はエミッタンスによりほとんど影響を受けないと仮定した。よって今回の計算でのパラメータはビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径の2つである。

先ず初めに位相空間上でのビームの分布(初期値)が違う2つの場合について、磁場レンズの強度を変えた場合、初期の分布の違いによりビーム軌道及び位相空間上でのビームの分布がどの様に変化するかを計算した。図4に計算体系を示し、図5に位相空間上での初期の2種類のビームの分布を示す。図4に示した体系は、現在開発中の加速器の入射部の体系を基にしたものである。図5を見るとビームウエストの位置つまり収束力の違いで位相空間上でわずかに傾きが違っているのが理解できる。

次に、これら2つの初期値を用いて計算したビーム軌道及びプロファイルモニター1の位置での位相空間上でのビームの分布を図6から11に示す。図6から8と図9から11のビーム軌道を比較するとビームウエストの位置のわずかな違いがビーム軌道に大きく表れていることが理解できる。また、図6から8の位相空間上でのビーム分布を見ると、磁場レンズ2の値が600 gauss 近傍でプロファイルモニター1の位置にビームウエストを作るが、図9から11の位相空間上でのビーム分布を見ると、こちらの場合は650 gauss 近傍でビームウエストを作っている。このことからプロファイルモニター1の位置に最小のビーム径を作る磁場レンズの強度にも違いが生じることが理解できる。

以上より、磁場レンズの強度を変えることにより初期値の違い、この場合ビームウエストの位置の違いがビーム径の変化の違いとなって表れてくることが理解できる。このことを逆に言えば、磁場レンズの強度とビーム径の関係を求めればそれから位相空間上でのビームの分布を求められることを意味する。

そこで次に、ビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径をパラメータとした

時のプロファイル1上でのビーム径 r と磁場レンズ2の強度 B との関係を図12、13に示す。図13をみると、ビームウエストの位置の違いがビーム径の変化の違いとなって表れたのと同じ様に、電子銃出口でのビーム径の違いがプロファイル1上でのビーム径の変化の違いとなって表われている。図12と13を比較すると、磁場の変化に対するプロファイル1上でのビーム径の変化の仕方がビームウエストの位置が違う場合と電子銃出口でのビーム径が違う場合とでは変化の仕方に差があり、2つのパラメータ、ビームウエストの位置と電子銃出口でのビーム径をそれぞれ求めることができると考えられる。また、これらの図より、測定精度が1mm程度だとすると、ビームウエストの位置を1cm程度、電子銃出口でのビーム径を1mm程度の範囲で決定できると考えられる。

第5章 まとめ

空間電荷効果を見捨てる領域で四重極電磁石を用いて位相空間上でのビームの分布を測定した方法を空間電荷効果領域まで拡張して、磁場レンズを用いて位相空間上でのビームの分布を測定する方法の研究を行った。この方法では、Twiss パラメータで位相空間上でのビームの分布を近似する代わりに、角度方向の拡がり、ビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径で初期の位相空間上でのビームの分布を近似し、線形の輸送行列 M を用いて運動を記述する代わりに、シミュレーションを行うことにより運動を記述した。

これにともない、計算速度を最優先した1次元のシミュレーションコードを開発した。このシミュレーションコードではメッシュサイズを変化させることにより空間電荷効果を非常に精度よく取り込めるようにした。また、このシミュレーションコードを用いてビームウエストの位置及び電子銃出口でのビーム径の違いにより生じる、磁場レンズの強度とビーム径の関係の違いを計算し、この関係から初期の位相空間上でのビームの分布をある程度決定できることを確認した。

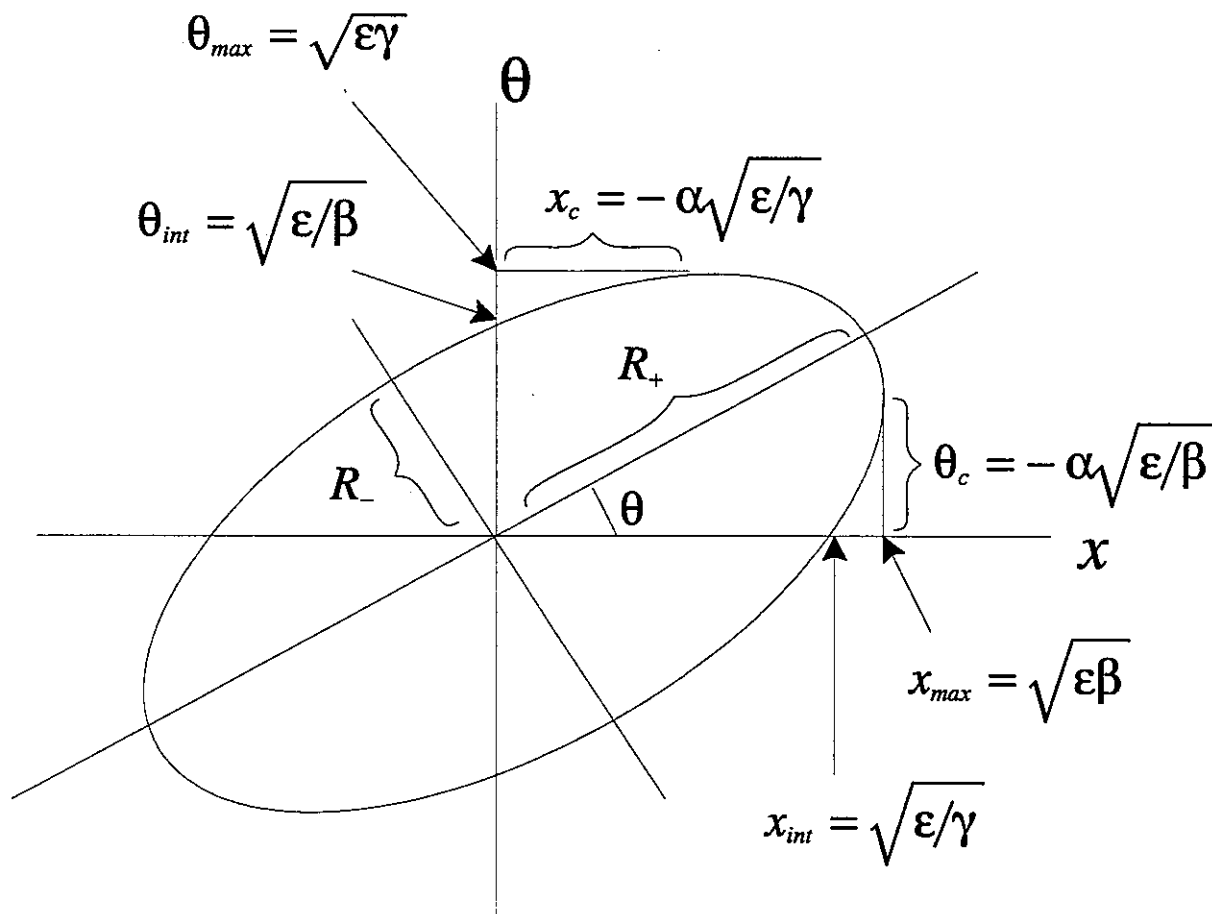
今後は実際に磁場レンズの強度を変えて、その時のプロファイル上でのビーム径を測定し計算と比較する必要がある。また、更にこの方法を拡張し、ソレノイドコイルを用いてチョッパー空洞前後でのエミッタンスの増加の測定も行っていく予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり加速器の運転に携わった基盤技術開発部部・先進技術開発室・加速器グループのメンバー全員に感謝致します。特に、有益な議論をしてくれた、山崎良雄副主任研究員に感謝いたします。

参考文献

- [1] X.J.Wang *et. al.*, Automatic Emittance Measurement: At The ATF: Proc. of 1993 PAC, pp.2486~2488, (1993)
- [2] Y.Yamazaki *et. al.* : Nucl. Instr. and Meth. A322, pp,139 ~145, (1992)
- [3] 菅原 真澄,粒子軌道解析: 講義ノート、, p115
- [4] A.B.EL-KAREH and J.C.J.EL-KAREH, ELECTRON BEAMS, LENSES, AND OPTICS: ACADEMIC PRESS, INC., New York (1970)



$$\tan 2\theta = \frac{2\alpha}{(\gamma r_0 - \beta r_0^{-1})}$$

$$R_+^2 = \varepsilon(\gamma r_0 \cos^2 \theta + 2\alpha \cos \theta \sin \theta + \beta r_0^{-1} \sin^2 \theta)$$

$$R_-^2 = \varepsilon(\gamma r_0 \sin^2 \theta - 2\alpha \cos \theta \sin \theta + \beta r_0^{-1} \cos^2 \theta)$$

図1 エミッタンス及びTwiss パラメータの定義

$\varepsilon, \alpha, \beta, \gamma$ はそれぞれエミッタンス、Twiss パラメータを表す。角度 θ は楕円の長軸と x 軸の角度を示し、 r_0 は横軸と縦軸との単位の換算を示すパラメータである。また、 R_+ と R_- はそれぞれ楕円の長軸と短軸の長さを表す。

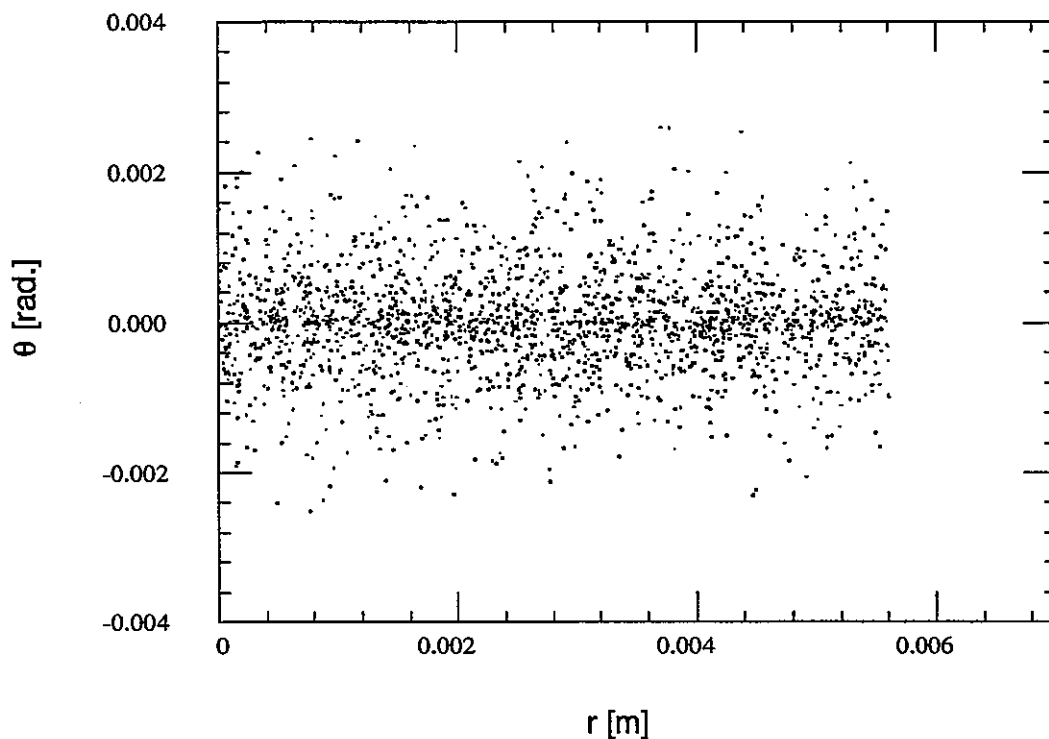


図2 引き出し直後の電子ビームの位相空間上での分布。

陰極から引き出された直後の電子ビームの位相空間上での拡がり、空間的には軸対称で一様分布(edge emission の効果は無視する。)、角度的には熱分布や表面状態からガウス分布で近似できると考えられる。計算に使用した電子数は2000個、ビーム径は5.6m(陰極径)、角度方向の拡がりを記述するガウス分布の分散 σ は1 m rad である。

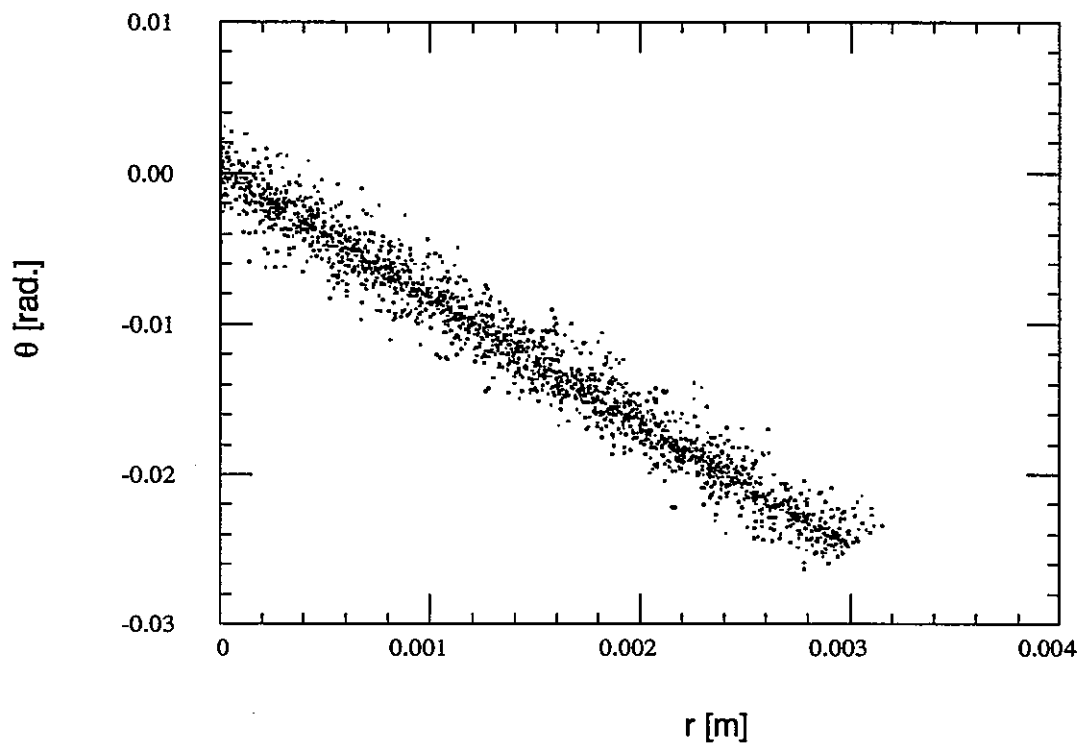


図3 電子銃出口での電子ビームの位相空間上での分布。

電子銃出口での位相空間上でのビームの分布は、Twiss パラメータで位相空間上でのビームの分布を記述する代わりに、角度方向の拡がり(分散 σ)、ビームウエストの位置 l 及び電子銃出口でのビーム径 r_0 で記述した。計算に使用した電子数は2000個、パラメータはそれぞれ、分散 σ は1 mrad、ビームウエストの位置 l は12cm、電子銃出口でのビーム径 r_0 は3 mm である。

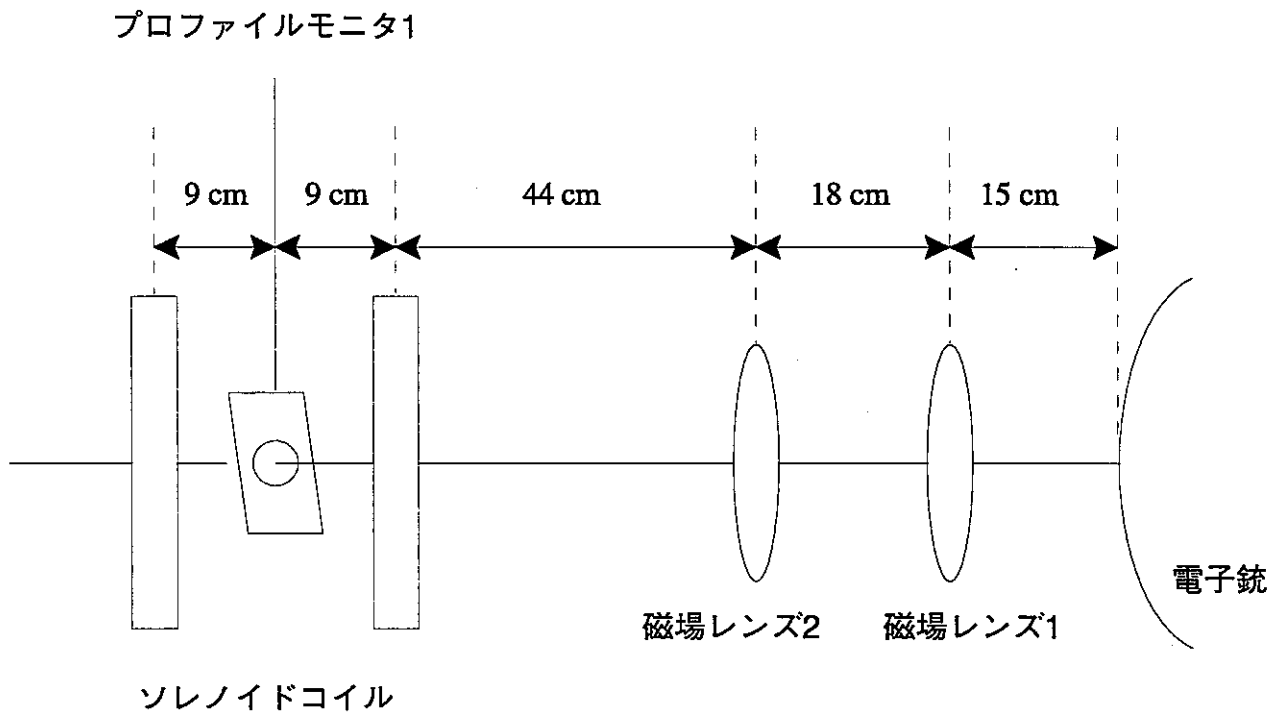


図4 計算体系

計算体系は現在開発中の加速器の入射部の体系を基にしたもので、電子銃、二台の磁場レンズ、ソレノイドコイル及びプロフィールモニターからなる。

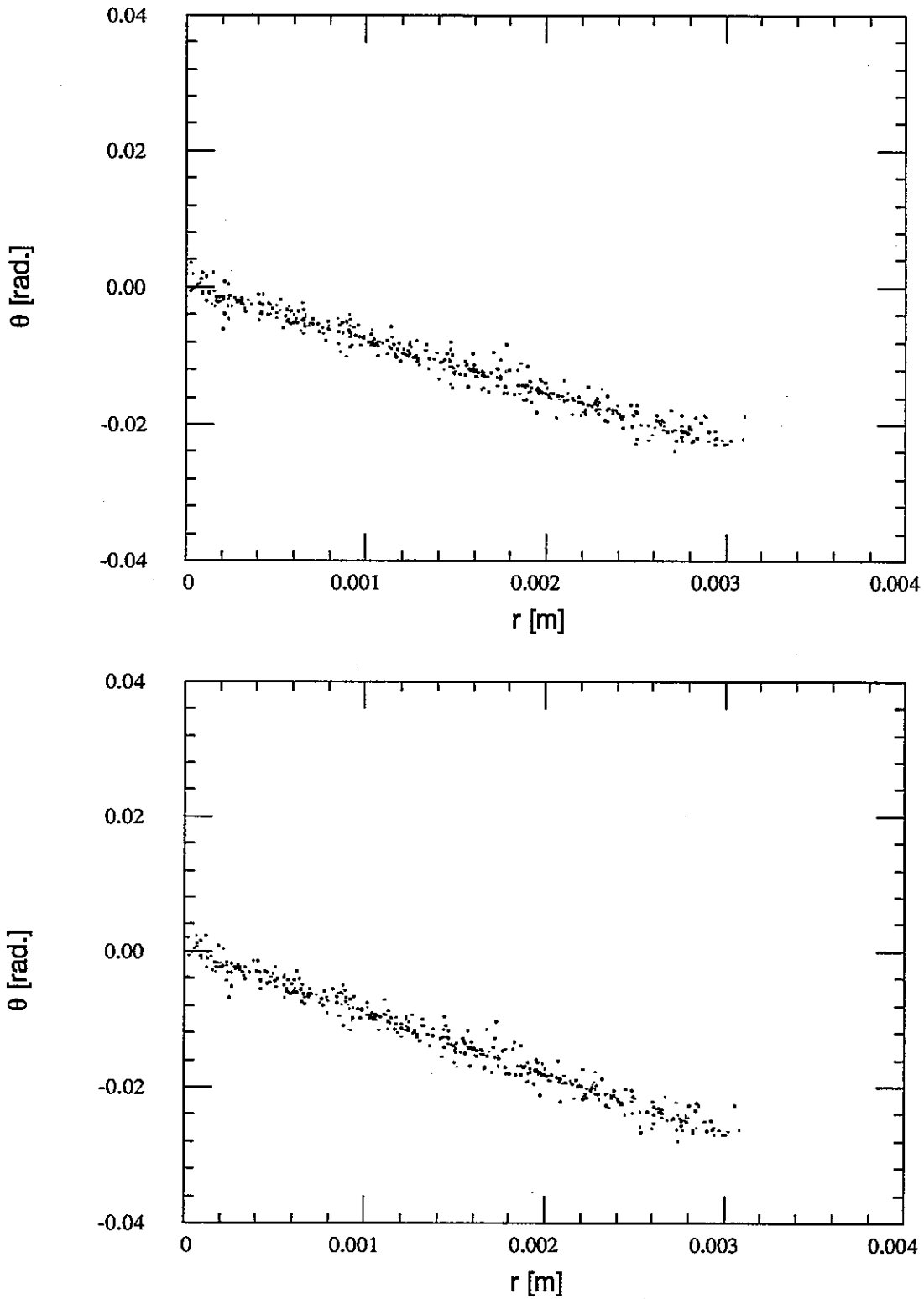


図5 電子銃出口の位相空間上でのビームの分布(初期値)

上の図は、分散 σ は1 mrad、ビームウエストの位置 l は11cm、電子銃出口でのビーム径 r_0 は3 mmの時の位相空間上でのビームの分布を示し、下の図は、分散 σ は1 mrad、ビームウエストの位置 l は13cm、電子銃出口でのビーム径 r_0 は3 mmの場合を示す。ウエストの位置の違いで傾きが違っているのが分かる。

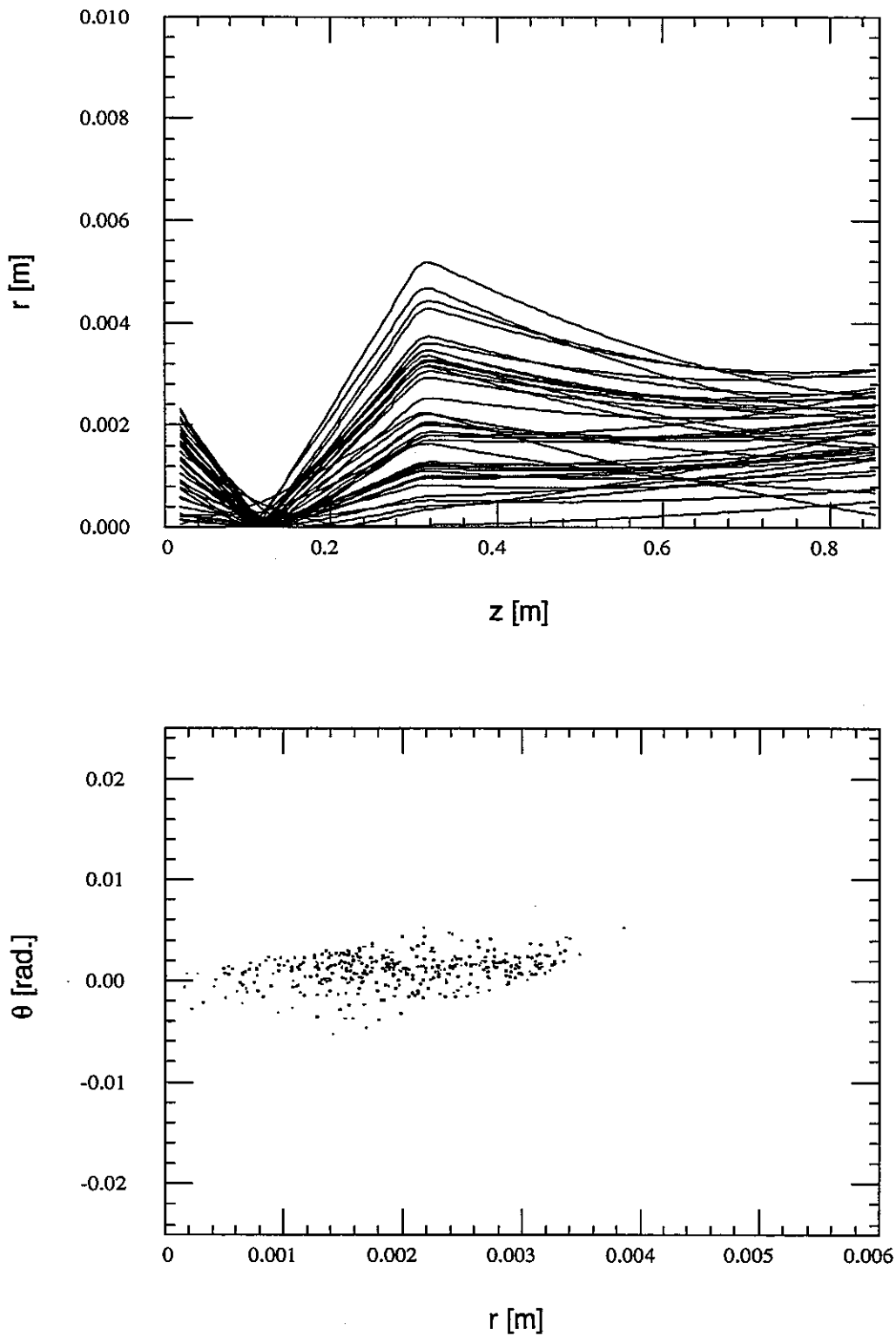


図6 ビーム軌道及び位相空間上での分布

初期の位相空間上での分布が、分散 σ が1 mrad、ビームウエストの位置 l が11cm、電子銃出口でのビーム径 r_0 が3 mmで記述される電子ビームが、輸送系の磁場レンズ1と2の強度が300と600 gaussで輸送される時のビーム軌道及びプロファイルモニター1の位置での位相空間上での分布。計算に使用した電子数は400個である。ビームウエストがこの磁場強度でほぼプロファイルモニター1の位置にあるのが位相空間上の分布より理解できる。

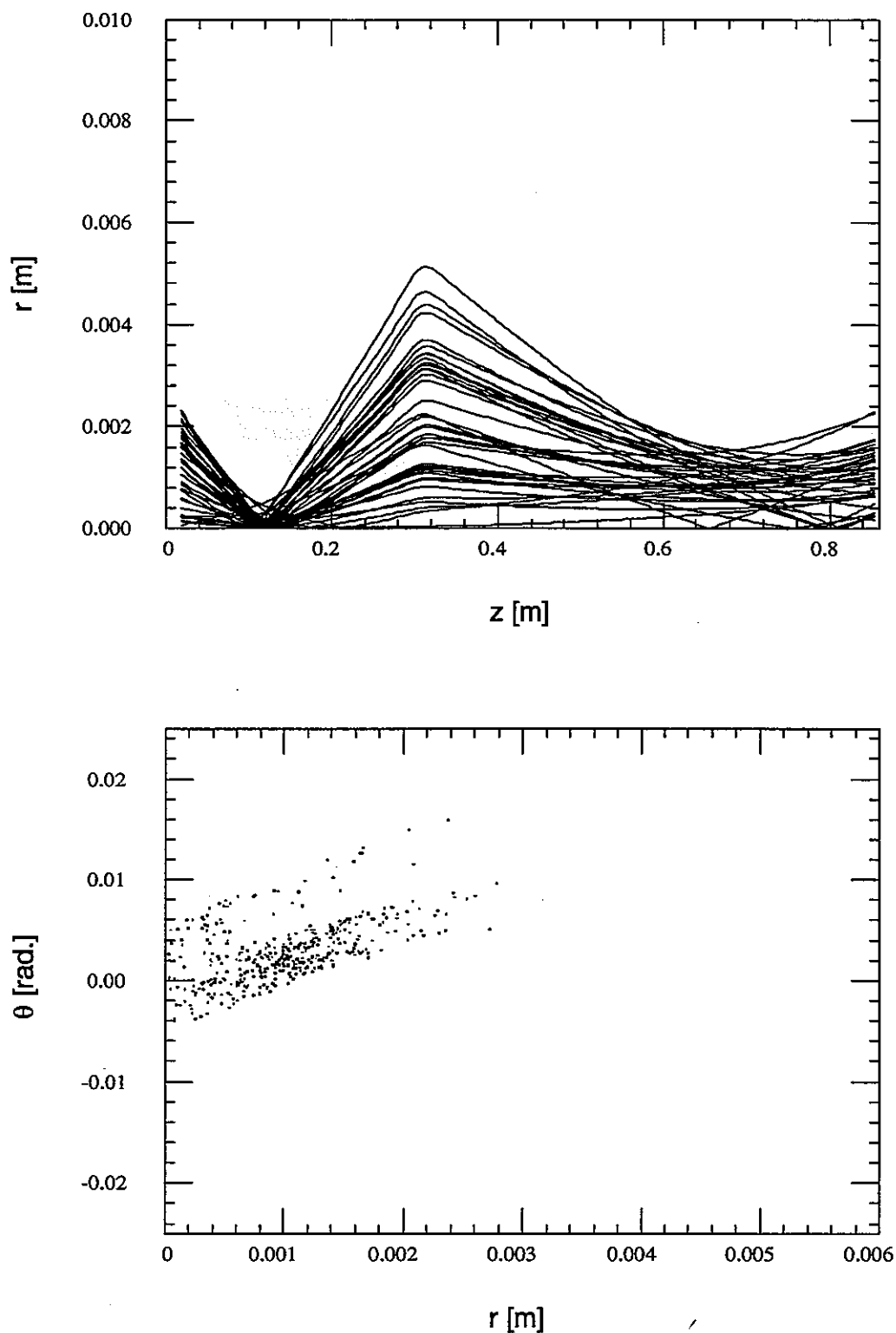


図7 ビーム軌道及び位相空間上での分布

図6と同じ初期条件で、輸送系の磁場レンズ1と2の強度が300と650 gauss の場合のビーム軌道及びプロファイルモニター1の位置での位相空間上での分布。計算に使用した電子数は400個である。

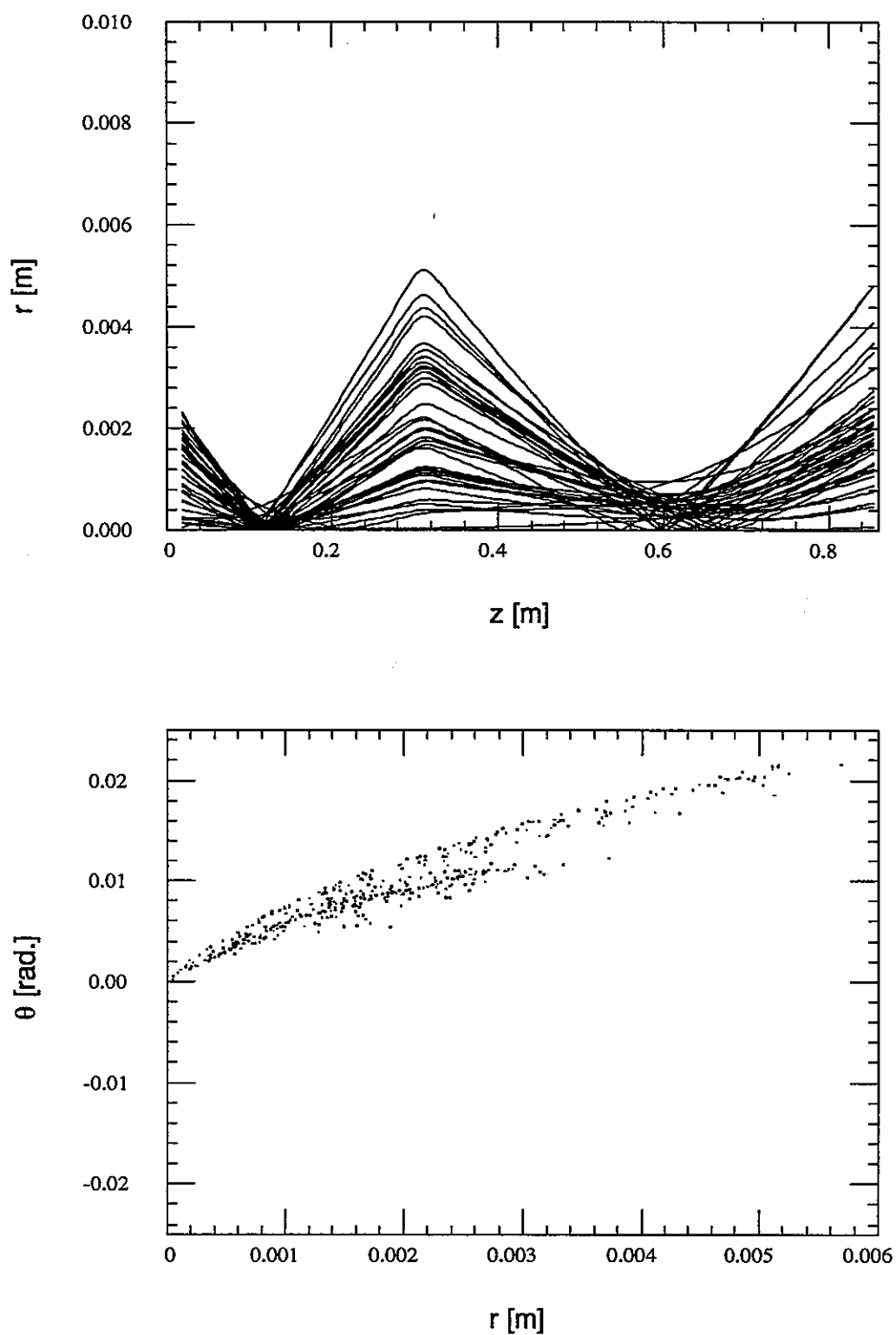


図8 ビーム軌道及び位相空間上での分布

図6と同じ初期条件で、輸送系の磁場レンズ1と2の強度が300と700 gauss の場合のビーム軌道及びプロファイルモニター1の位置での位相空間上での分布。計算に使用した電子数は400個である。

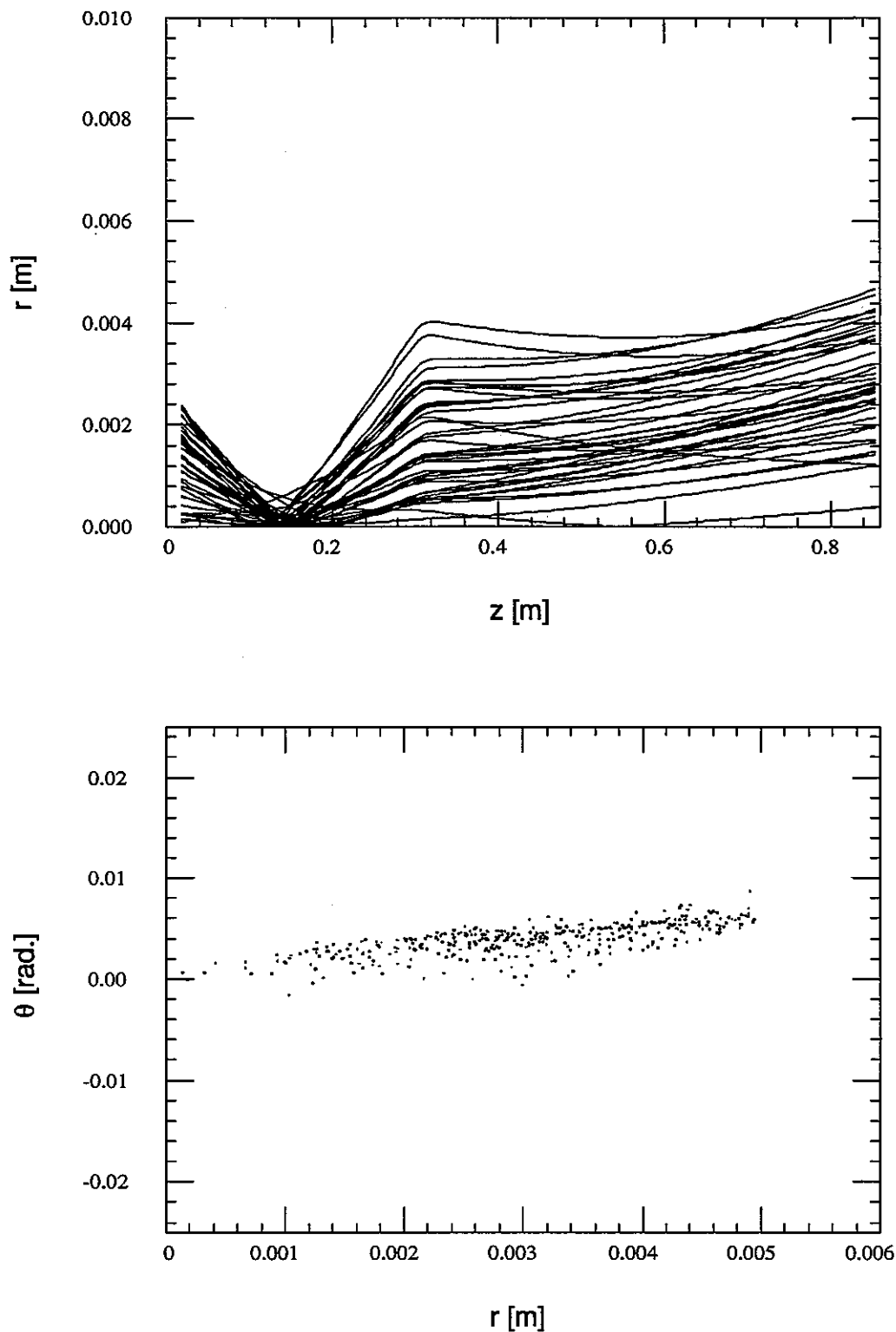


図9 ビーム軌道及び位相空間上での分布

初期の位相空間上での分布が、分散 σ が1 mrad、ビームウエストの位置 l が11cm、電子銃出口でのビーム径 r_0 が3 mmで記述される電子ビームが、輸送系の磁場レンズ1と2の強度が300と600 gaussで輸送される時のビーム軌道及びプロファイルモニター1の位置での位相空間上での分布。計算に使用した電子数は400個である。

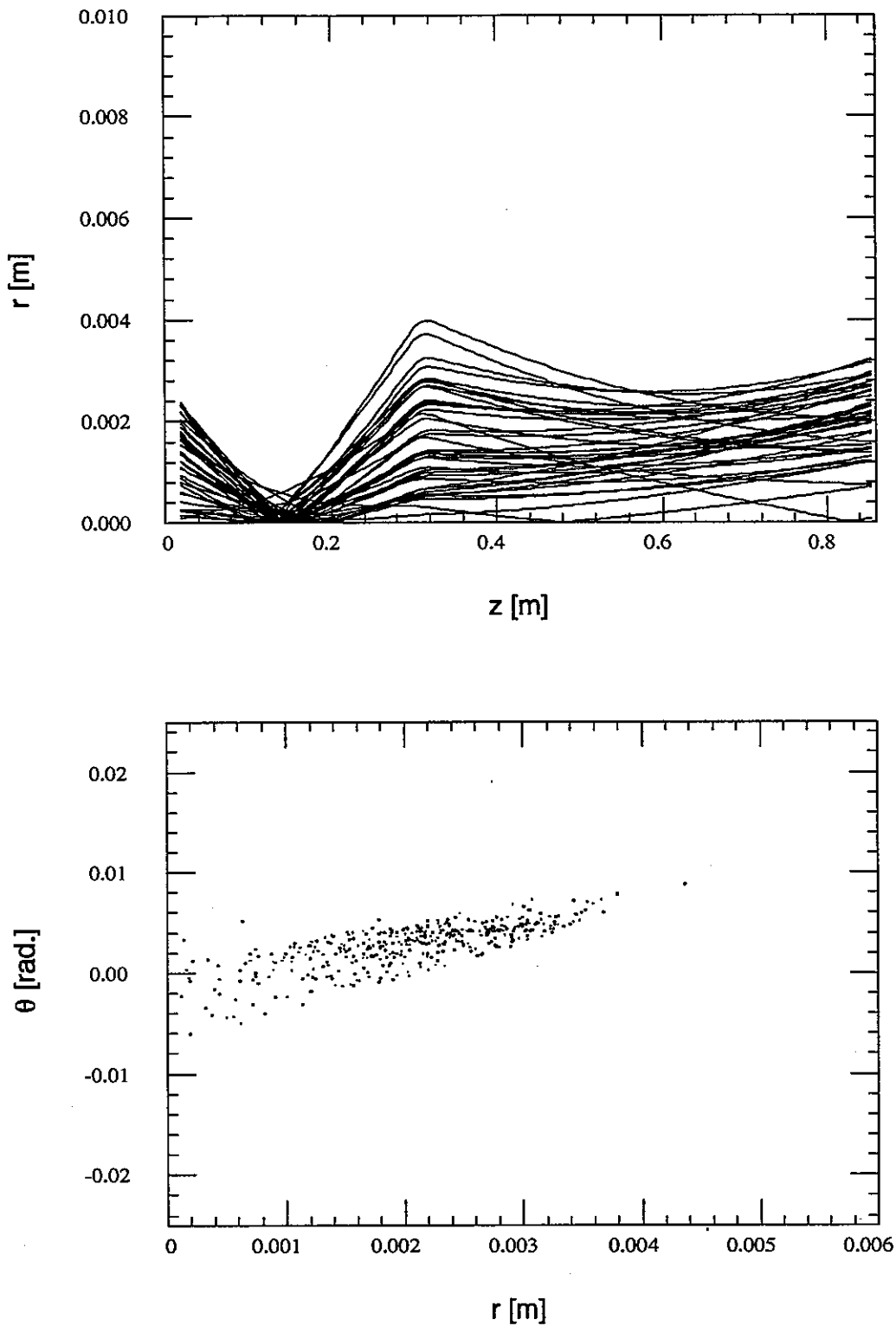


図10 ビーム軌道及び位相空間上での分布

図9と同じ初期条件で、輸送系の磁場レンズ1と2の強度が300と650ガウスの場合のビーム軌道及びプロファイルモニター1の位置での位相空間上での分布。計算に使用した電子数は400個である。ビームウエストがこの磁場強度でほぼプロファイルモニター1の位置にあるのが位相空間上の分布より理解できる。

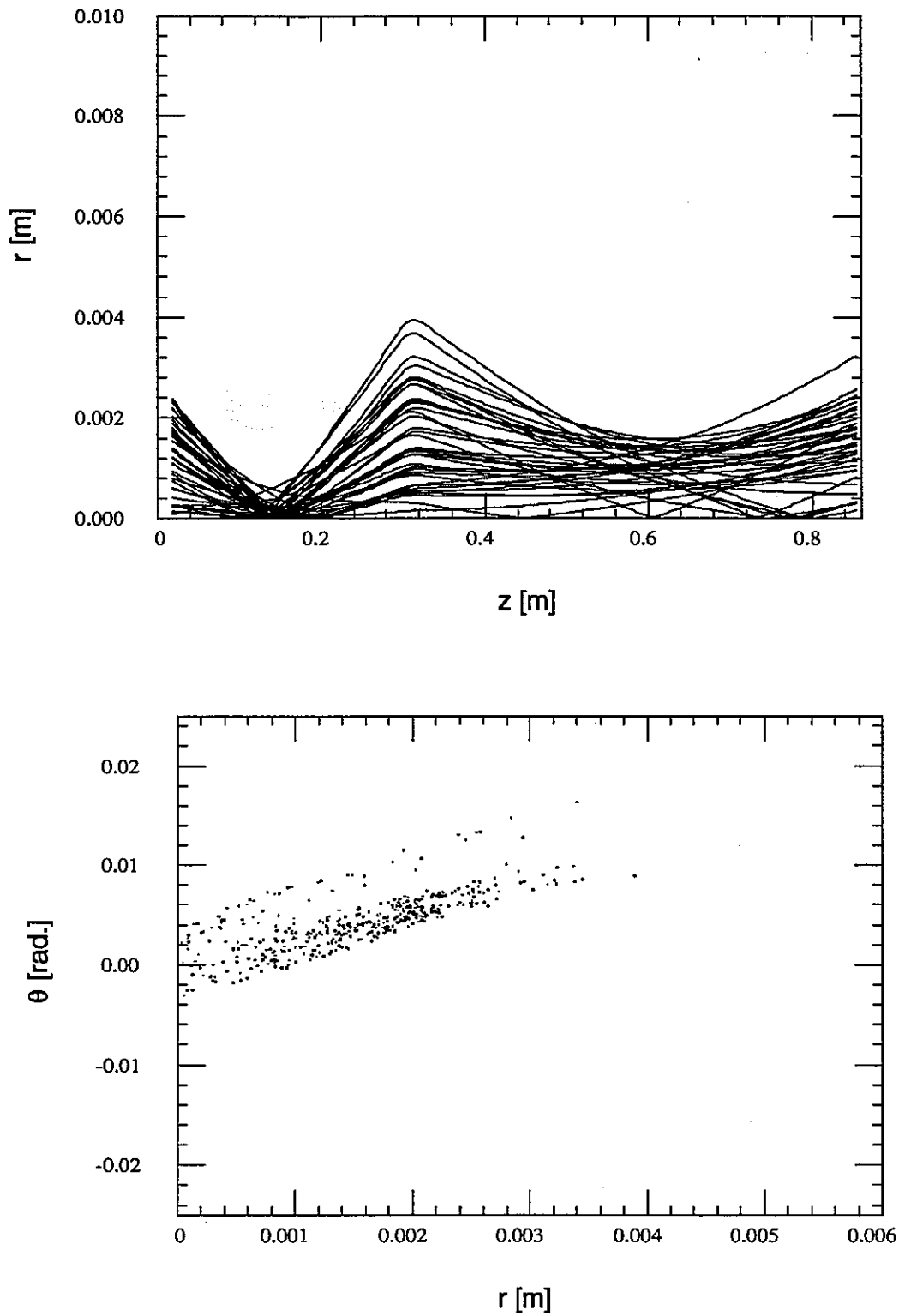


図11 ビーム軌道及び位相空間上での分布

図9と同じ初期条件で、輸送系の磁場レンズ1と2の強度が300と700 gauss の場合のビーム軌道及びプロファイルモニター1の位置での位相空間上での分布。計算に使用した電子数は400個である。

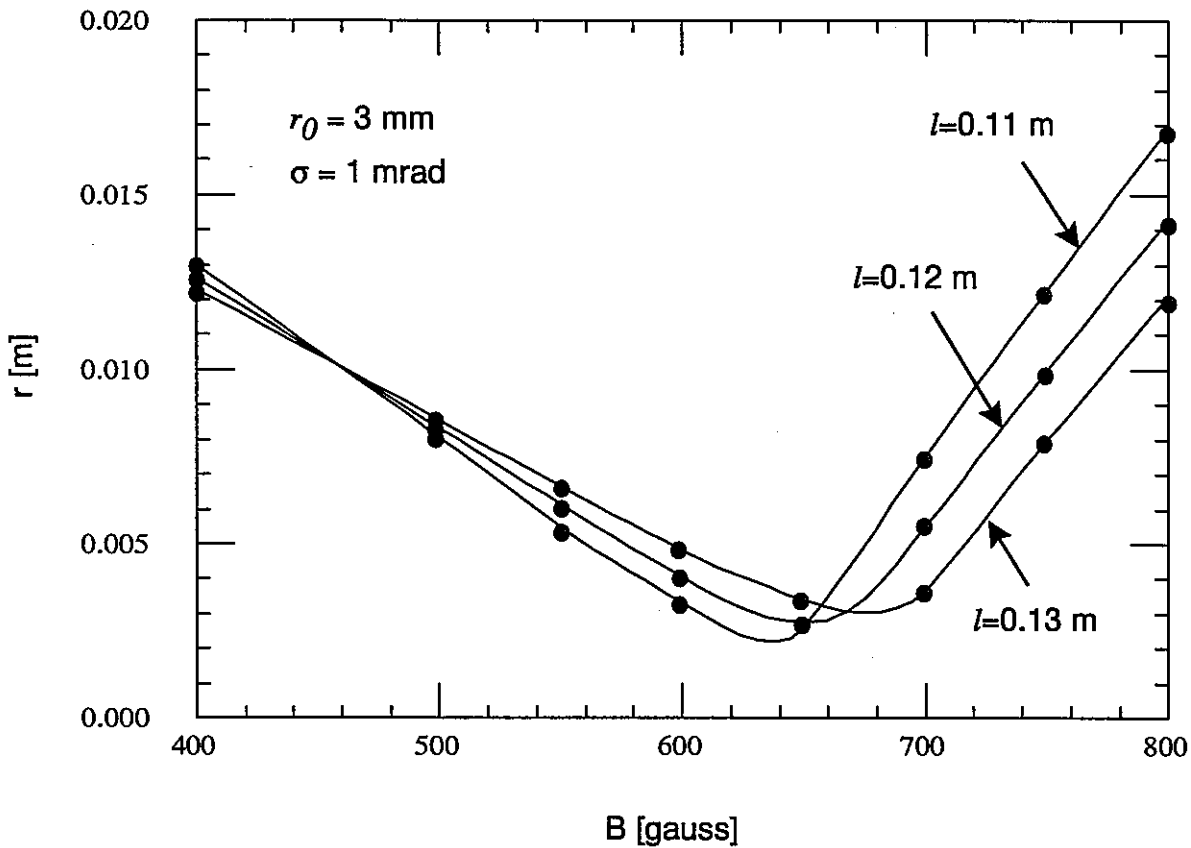


図12 ビーム径と磁場レンズの強度との関係(ビームウエストの位置 l)

計算条件は、分散 σ が1 mrad、電子銃出口でのビーム径 r_0 が3 mm、また、計算に使用した電子数は400個である。縦軸はプロファイルモニター1の位置でのビーム径を表し、横軸は磁場レンズ2の強度を示す。磁場レンズの強度を変えることにより、ビームウエストの位置の違いがプロファイルモニター1の位置でのビーム径の変化の違いとなって表れている。

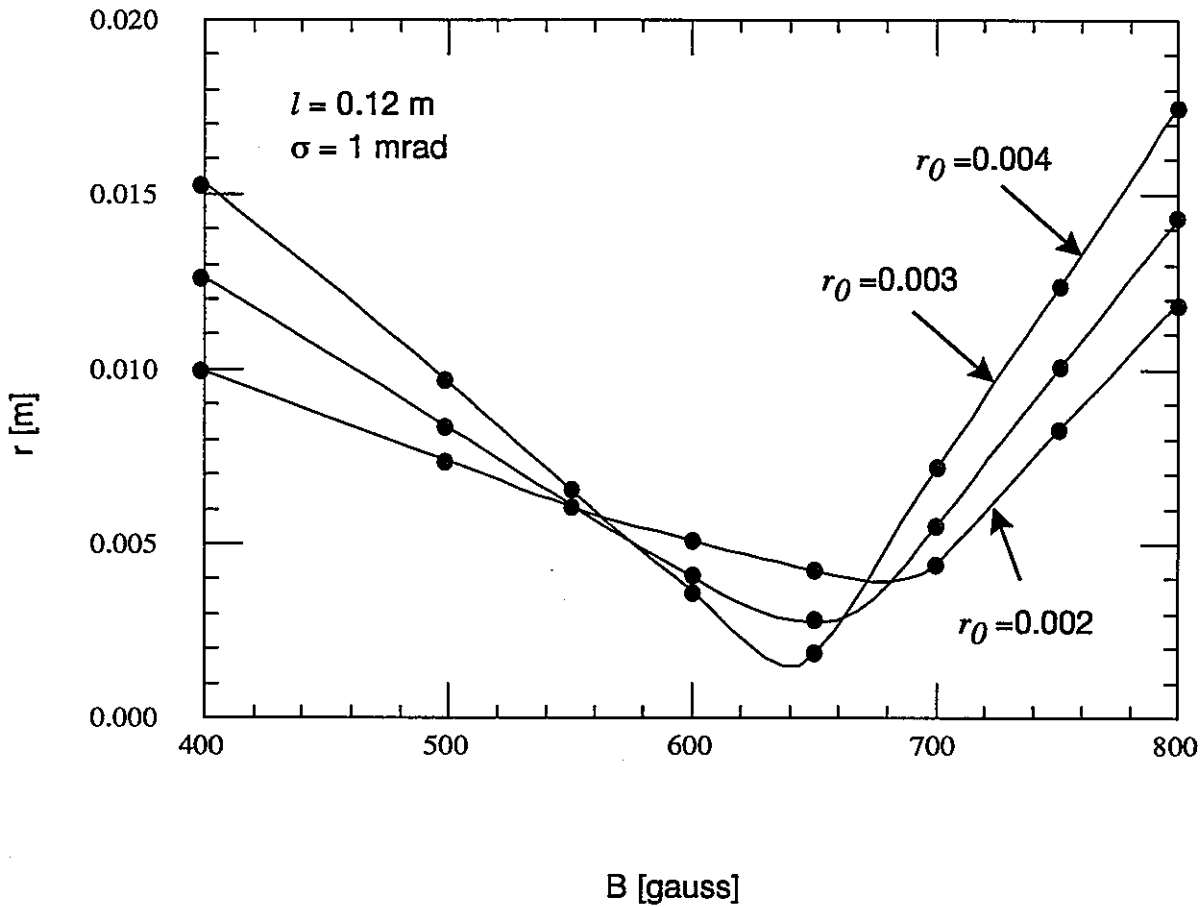


図13 ビーム径と磁場レンズの強度との関係(電子銃出口でのビーム径 r_0)

計算条件は、分散 σ が1 mrad、ビームウエストの位置 l が12cm、また、計算に使用した電子数は400個である。縦軸はプロファイルモニター1の位置でのビーム径を表し、横軸は磁場レンズ2の強度を示す。磁場レンズの強度を変えることにより、電子銃出口でのビーム径の違いがプロファイルモニター1の位置でのビーム径の変化の違いとなって表れている。