

JAERI-M
94-047

超高輝度マイクロビームのエミッタンス測定

1994年3月

石塚 浩^{*1} 中原百合子^{*1} 川崎 温^{*2}
Stephen MUSYOKI^{*3} ・清水 宏
渡辺 聡彦・志甫 諒

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

超高輝度マイクロビームのエミッタンス測定

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

石塚 浩^{*1}・中原百合子^{*1}・川崎 温^{*2}・Stephen MUSYOKI^{*3}

清水 宏・渡辺 聡彦・志甫 諒

(1994年2月7日受理)

電界放出型極微小電子銃を用いて超高輝度のマイクロビームを生成する計画がスタートした。そこでは当然ビームのエミッタンス測定が問題となるが、従来の方法を適用することは出来ない。その理由の第1は、測るべき量－ビーム断面、電子軌道が軸となす角度－が極めて小さいことである。第2には、電流密度が大きくなるので、真空中でも物質上にでもビームをスポットに収束出来ないことである（真空中のスポットではビームの質の劣化が起こり、物質に当てるとそれに損傷を与える）。必要なのは、絞りやスリットを一切使わずに、ビーム断面を拡大しながらエミッタンスを測る手段である。本論文で、極微小収束電子銃およびそのアレイからの電子ビームを4極子レンズを用いて診断する方法を考察する。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

*1 福岡工業大学

*2 埼玉大学 理学部

*3 リサーチフェロー

A New Method of Emittance Measurement for Electron
Beams from the Micro-emitter

Hiroshi ISHIZUKA^{*1}, Yuriko NAKAHARA^{*1}
Sunao KAWASAKI^{*2}, Stephen MUSYOKI^{*3}
Hiroshi SHIMIZU, Akihiko WATANABE
and Makoto SHIHO

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 7, 1994)

Recently a new type of cathode called Micro-emitter is in progress. This cathode is micro fabricated field emitter having the characteristics of very low emittance and high brightness. We can not measure the emittance of the cathode with conventional method like pepper-pot method. The reasons are ; 1. The angle between the electron orbit and the axis is very small. ; and 2. We can not focus the electron beam in the vacuum or on the surface of the material since the current density of the cathode is extremely high. For the emittance measurement for such low emittance and high brightness cathode, we need to expand the beam, and measure the beam cross section without any slits or apertures. We study and propose a new emittance measurement method for the Micro-emitter.

Keywords : Micro-emitter, Low-emittance, Cathode, High Brightness
Accelerator

*1 Fukuoka Institute of Technology

*2 Department of Physics, Saitama University

*3 Research Fellow

目 次

1. まえがき	1
2. 従来の測定法が適用出来ない理由	1
3. 新しい方法 - 発散レンズ法 - の提案	2
3.1 測定法の構成	3
3.2 ビームの振る舞い	3
3.3 単一ビームの拡大 - X_{int} の決定	3
3.4 角度 X'_{mas} の決定 - その1	5
3.5 角度 X'_{mas} の決定 - その2	5
3.6 Q磁石による拡大の数値例	6
3.7 静電4極子レンズを用いる拡大	6
4. エミッタ・アレイからのビームの計測	6
4.1 ビームの拡大	6
5. 検討と結び	7
5.1 ビームの自己場の影響	7
5.2 レンズの収差や高次成分の影響	7
5.3 4極子レンズの設置誤差の影響	7
5.4 結び	7
参考文献	8

Contents

1. Introduction	1
2. Why Conventional Emittance Measurement Methods are Inapplicable	1
3. A Proposal of New Emittance Measurement -Dispersive Lense Method	2
3.1 Apparatus of the New Emittance Measurement	3
3.2 Beam Behavior in the Apparatus	3
3.3 Single Beam Expansion- X_{int} Evaluation	3
3.4 Evaluation of the Angle X'_{max-1}	5
3.5 Evaluation of the Angle X'_{max-2}	5
3.6 Example of the Beam Expansion by Q magnet	6
3.7 Example of the Beam Expansion by Electrostatic Quadrupole Lense	6
4. Emittance Measurement of the Beam Emitted by an Emitter Array	6
4.1 Beam Expansion	6
5. Discussions and Summary	7
5.1 Influence of the Beam Self Field	7
5.2 Influence of the Aberation of the Lenze	7
5.3 Influence of the Allignment of the Lenze	7
5.4 Conclusion	7
References	8

1. まえがき

我々は超高輝度の電子ビームを生成するための理論的検討を行い、^{1, 2)} 微小集積化冷陰極を用いる予備実験に着手した。ビームは1つまたは多数のマイクロビーム（ビームレット）からなり、最終目標は各ビームレットについて

規格化エミッタンス $10^{-10} \pi \text{ m rad}$ 程度、
規格化輝度 $10^{18} \text{ A/(m rad)}^2$ 台

を実現することである。加速エネルギーおよびビーム電流は

エネルギー $5 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$
電流値/ビームレット $1 - 10 \mu\text{A}$ 、

を想定する。規格化しないエミッタンス ε は 5 keV で $0.7 \times 10^{-9} \pi \text{ m rad}$ 程度、 10 MeV で $0.5 \times 10^{-11} \pi \text{ m rad}$ 程度の値を取る。

実験では当然、これらの量の測定が問題となる。エミッタンスや輝度の測定は、対象となるビームのパラメタに応じていくつかの手段で行われて来た。³⁾ それら従来の方法は、我々が考えるビームには適用出来ない。その理由を第2章に述べ、第3章において絞りを一切用いない新しい方式を提案する。そこでは1つのビームレットの場合について、4極子レンズによってビーム断面を拡大してその像からエミッタンスを求める方法が述べられる。第4章では、エミッタ・アレイからの複数のビームレットがある場合の状況を示す。空間電荷や収差の影響、等を第5章で検討する。

本論に入る前に、エミッタンスの表し方を述べておく。第1図はビームの横方向エミッタンス（位相図）を示す。簡単のために位相図は楕円であるとしている。エミッタンスは第1図(a)では $x_{m.x} x'_{i.n}$ 、あるいは $x'_{m.x} x_{i.n}$ である。エミッタンスを測定するということは $x_{m.x}$ と $x'_{i.n}$ 、あるいは $x'_{m.x}$ と $x_{i.n}$ とを測ることである。第1図(b)には(a)と同じ楕円がシグママトリックス用いて示されている。高エネルギー加速器の分野では、位相振幅変数⁴⁾あるいは Twiss parameters が好んで使われることを付言しておく。

2. 従来の測定法が適用出来ない理由

従来の測定法の一つは、ペーパーポット法またはシャドウマスク法と呼ばれるものである。そこではビームを細いスリットまたは小孔を持つ板に当て、通過するビーム粒子の位置をまず指定する。その後の発散を測れば、 (x, x') 、 (y, y') の位相面内での分布が知られる。この方法を適用しようとする、仮にスリット幅を $10 \mu\text{m}$ 程度に狭くしても、ビーム径はこれ以上でなければならず、従ってわれわれのビームでは測るべき角度 $x_{i.n} = \varepsilon/x_{m.x}$ は 10^{-5}

1. まえがき

我々は超高輝度の電子ビームを生成するための理論的検討を行い、^{1, 2)} 微小集積化冷陰極を用いる予備実験に着手した。ビームは1つまたは多数のマイクロビーム（ビームレット）からなり、最終目標は各ビームレットについて

規格化エミッタンス $10^{-10} \pi \text{ m rad}$ 程度、
規格化輝度 $10^{13} \text{ A/(m rad)}^2$ 台

を実現することである。加速エネルギーおよびビーム電流は

エネルギー $5 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$
電流値/ビームレット $1 - 10 \mu\text{A}$ 、

を想定する。規格化しないエミッタンス ε は 5 keV で $0.7 \times 10^{-9} \pi \text{ m rad}$ 程度、 10 MeV で $0.5 \times 10^{-11} \pi \text{ m rad}$ 程度の値を取る。

実験では当然、これらの量の測定が問題となる。エミッタンスや輝度の測定は、対象となるビームのパラメタに応じていくつかの手段で行われて来た。³⁾ それら従来の方法は、我々が考えるビームには適用出来ない。その理由を第2章に述べ、第3章において絞りを一切用いない新しい方式を提案する。そこでは1つのビームレットの場合について、4極子レンズによってビーム断面を拡大してその像からエミッタンスを求める方法が述べられる。第4章では、エミッタ・アレイからの複数のビームレットがある場合の状況を示す。空間電荷や収差の影響、等を第5章で検討する。

本論に入る前に、エミッタンスの表し方を述べておく。第1図はビームの横方向エミッタンス（位相図）を示す。簡単のために位相図は楕円であるとしている。エミッタンスは第1図(a)では $x_{m.x} x'_{i.n}$ 、あるいは $x'_{m.x} x_{i.n}$ である。エミッタンスを測定するということは $x_{m.x}$ と $x'_{i.n}$ 、あるいは $x'_{m.x}$ と $x_{i.n}$ とを測ることである。第1図(b)には(a)と同じ楕円がシグママトリックス用いて示されている。高エネルギー加速器の分野では、位相振幅変数⁴⁾あるいは Twiss parameters が好んで使われることを付言しておく。

2. 従来の測定法が適用出来ない理由

従来の測定法の一つは、ペーパーポット法またはシャドウマスク法と呼ばれるものである。そこではビームを細いスリットまたは小孔を持つ板に当て、通過するビーム粒子の位置をまず指定する。その後の発散を測れば、 (x, x') 、 (y, y') の位相面内での分布が知られる。この方法を適用しようとする、仮にスリット幅を $10 \mu\text{m}$ 程度に狭くしても、ビーム径はこれ以上でなければならず、従ってわれわれのビームでは測るべき角度 $x_{i.n} = \varepsilon/x_{m.x}$ は 10^{-5}

rad 程度に小さくなってしまふ。

軸対称な収束レンズを用いる従来の測定法では、収束点でのビーム径を測ってエミッタンスを求める。第1図(c)の如く直立した楕円の長径・短径を測ればそれらの積がエミッタンスであることを用いる。これは簡便な方法であるが、収束角を 1 mrad 程度またはそれ以上とすると、われわれの場合、測定すべきビーム径は $0.1 \mu\text{m}$ 程度になってしまう。

$1 \mu\text{m}$ 以下のビーム径を測ることは、ナイフエッジを用いても難かしい。また輝度が極めて高い時、焦点に置かれたナイフエッジやファラデイカップは損傷を受けるであろう。マイクロビームの輝度を測る従来の方法は、透過型電子顕微鏡を用いてビームのウエストを拡大するものである(第2図⁶⁾)。しかしこの方法は、絞りをを用いることとクロスオーバーが何箇所かで生じることの2点によって、高輝度マイクロビームの測定には問題がある。クロスオーバーが起きると、Boersch 効果による異常速度分散、および径の増大を生じる。

ビームを絞って径の最小値を測るこれらの方法は、スポットサイズが極めて小さく、従ってビームの空間電荷やレンズの収差によって影響される場合には適わしくない。低エネルギーの超高輝度ビームはまさにそうである。

通常のエミッタンスの測定では、ビームの収束角を測るために最低1つの絞りが必要と考えられている。ビームの進行の沿ってその径を精密に測る手段があれば、絞りをを用いない測定が可能である。衝突型加速器の分野では、小さなビーム径を測るのにレーザー光の散乱を利用することが試みられているが、⁶⁾これをわれわれのビームに転用するには多くの開発研究が必要である。

3. 新しい方法 - 発散レンズ法 - の提案

前章で述べたように、従来の方法が適用出来ない主な理由は、

- * 測るべき角度、寸法の双方または一方が極度に小さい、
- * 真空中でも物質上でも、焦点を結ばせるには電流密度が大き過ぎる

ということである。従って、ビームをスポットにせずに、断面を拡大して測ることが必要になる。

測定に際して必要な条件は、

- (i) 測定に容易な大きさの像が得られること、
- (ii) 絞りやスリットを使用しないこと、
- (iii) クロスオーバーが生じないこと、
- (iv) x_{int} と x'_{max} が独立に求められること、
- (v) 収差の小さい系であること、

rad 程度に小さくなってしまふ。

軸対称な収束レンズを用いる従来の測定法では、収束点でのビーム径を測ってエミッタンスを求める。第1図(c)の如く直立した楕円の長径・短径を測ればそれらの積がエミッタンスであることを用いる。これは簡便な方法であるが、収束角を 1 mrad 程度またはそれ以上とすると、われわれの場合、測定すべきビーム径は $0.1 \mu\text{m}$ 程度になってしまう。

$1 \mu\text{m}$ 以下のビーム径を測ることは、ナイフエッジを用いても難かしい。また輝度が極めて高い時、焦点に置かれたナイフエッジやファラデイカップは損傷を受けるであろう。マイクロビームの輝度を測る従来の方法は、透過型電子顕微鏡を用いてビームのウエストを拡大するものである(第2図⁵⁾)。しかしこの方法は、絞りをを用いることとクロスオーバーが何箇所かで生じることの2点によって、高輝度マイクロビームの測定には問題がある。クロスオーバーが起きると、Boersch 効果による異常速度分散、および径の増大を生じる。

ビームを絞って径の最小値を測るこれらの方法は、スポットサイズが極めて小さく、従ってビームの空間電荷やレンズの収差によって影響される場合には適わしくない。低エネルギーの超高輝度ビームはまさにそうである。

通常のエミッタンスの測定では、ビームの収束角を測るために最低1つの絞りが必要と考えられている。ビームの進行の沿ってその径を精密に測る手段があれば、絞りをを用いない測定が可能である。衝突型加速器の分野では、小さなビーム径を測るのにレーザー光の散乱を利用することが試みられているが、⁶⁾これをわれわれのビームに転用するには多くの開発研究が必要である。

3. 新しい方法 - 発散レンズ法 - の提案

前章で述べたように、従来の方法が適用出来ない主な理由は、

- * 測るべき角度、寸法の双方または一方が極度に小さい、
- * 真空中でも物質上でも、焦点を結ばせるには電流密度が大き過ぎる

ということである。従って、ビームをスポットにせずに、断面を拡大して測ることが必要になる。

測定に際して必要な条件は、

- (i) 測定に容易な大きさの像が得られること、
- (ii) 絞りやスリットを使用しないこと、
- (iii) クロスオーバーが生じないこと、
- (iv) x_{int} と x'_{max} が独立に求められること、
- (v) 収差の小さい系であること、

等である。さしあたりビームの検出器は蛍光板とする。蛍光物質上の像を肉眼でよく見る為には、蛍光板上でのビーム電流密度が 1 nA/cm^2 程度以上あればよい。⁷⁾ $1 \mu\text{A}$ のビームを 1000 cm^2 の断面に広げても観測可能と云うことである。従って、 $1 \mu\text{A}$ よりかなり弱いビームであっても、 x または y 方向の一方に収束、他方に発散させても目視観測が可能である。

3.1. 測定系の構成

ビーム発生部は偏向系とともに収束レンズを持つ。これからのビームを第3図のように一個の4極子レンズ(磁場または電場)に入射する。4極子レンズ内でビームは断面の1方向(x 方向とする)に発散力を受け、もう一方(y 方向)については収束力を受ける。レンズを出たビームを下流に置いた蛍光板に当てて、ビームの断面を知る。4極子レンズの位置を軸方向に変えるか、あるいはレンズの強さを変えて蛍光板上の像の変化を調べることにより、ビームのエミッタンスが求められる。

3.2. ビームの振る舞い

ここで対象とするビームの振る舞いを説明しておこう。ビーム源は収束電極付きの微小電子銃(micro-tirode)を想定する。^{8, 9, 10)} シミュレーションによれば、 1 keV におけるビームレット半径 $3 \mu\text{m}$ 、発散角 5 mrad 、規格化エミッタンス $2 \times 10^{-10} \pi \text{ m rad}$ が達成される。これを更に前述のエネルギーに加速した時の半径、発散、および(規格化されない)エミッタンスを代表的に $100 \mu\text{m}$ 、 0.1 mrad 、 $10^{-10} \pi \text{ m rad}$ としよう。

このビームを収束レンズによって角度 1 mrad で収束に向かわせると、レンズから約 10 cm 下流の位置にスポットを結ぶ。スポット半径がエミッタンスのみで決まる場合には、それは 10^{-7} m となる。位相図の軸方向(z)変化は第4図のようである。ここに左端の楕円は収束レンズ出口、右端のものはスポット位置、中央のものはそれらの中間点における様子を模式的に示している。楕円は x_{int} と x'_{max} を一定に保ちながら変形して行き、勾配 $x'_{\text{max}} / (x_{\text{max}} - x_{\text{int}})$ は -10 m^{-1} から $-\infty$ まで変る。

しかしわれわれの測定系では、4極子レンズはその入り口がスポット位置よりもビーム源側にあるように配置される。従ってビームはスポットを結ぶことなく拡大される(後に示す数値例の場合、4極子レンズ内でのビームの x_{max} の最小値はスポット半径の10倍以上ある)。4極子レンズを出たビームは蛍光板に向けて発散を続ける。

3.3. 単一ビームの拡大 - x_{int} の決定

まず理想的な4極子レンズがビームと同軸に置かれているとする。 x 方向に

発散、 y 方向に収束が起きるとすると、レンズ出口での電子位置は

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh kL & \frac{1}{k} \sinh kL \\ k \sinh kL & \cosh kL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kL & \frac{1}{k} \sin kL \\ -k \sin kL & \cos kL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

と書かれる。ここに添え字 0 はレンズ入り口での値を表す。 $x = a$ において電子が x 方向に受ける力を f_a とすると、

$$k^2 = \frac{1}{m_0 \gamma v_z^2} \frac{f_a}{a} \quad (3)$$

であり、レンズが Q 磁石であれば $x = a$ におけるラーモア半径 ρ_a を用いて

$$k^2 = \frac{1}{a \rho_a} \quad (4)$$

と書かれる。非相対論的な電子を 4 極子電場に入れる時は、ビームの加速電圧を ϕ_b 、 $x = a$ での電位を ϕ_a とし、

$$k^2 = \frac{\phi_a}{a^2 \phi_b} \quad (5)$$

である。

4 極子レンズの k を一定に保ち、式(1)において $kL \gg 1$ とすると、レンズ出口での $x_{m,x}$ が最小になるのは、

$$x_0 + x'_0/k = x_{int} \quad (6)$$

の場合 (第 5 図の状態 b) であって、 $x = 0.5 x_{int} \exp(kL)$ となる。この時、

$$x' = 0.5 (kx_0 + x'_0) \exp(kL) = 0.5 k x_{int} \exp(kL) \quad (7)$$

もまた最小となる。先に述べたように、第 5 図の状態 (b) はビームが最も絞られる以前の状態に対応する。焦点までの距離はほぼ $1/k$ 、そこでのビームの寸法は $x'_{m,x}/k$ であって x_{int} より充分に大きく取れる。

4 極子レンズから L_1 だけ後方にある蛍光板上での像の大きさ X の最小値は、

$$X_{min} = 0.5 (kL_f + 1) \exp(kL) \cdot X_{int} \quad (8)$$

となる。従って、 k , L , L_f が判っていれば X_{min} から X_{int} が求まる。

3.4. 角度 x'_{max} の決定 - その1

上記のように第5図(b)が x_{int} を与える。同図(a)は4極子レンズの位置を少しビーム源側に移動した状況、(c)は下流側に移動した状況である。

4極子レンズを軸方向に ζ だけ動かすことは式(1)の x_0 を $x_0 + \zeta x'_0$ に変えることである。第5図(b)で x_0 , x'_0 を取る電子は、(a), (c)では $x_0 + \zeta x'_0$, x'_0 を持ち、 $\xi = \max(x_0 + \zeta x'_{max} + x'_0/k)$ が4極子レンズで拡大されて測られる。図に見られるように、 $|\zeta| \gg x_{int}$ では $\xi = |\zeta| x'_{max}$ となる。従って、 ζ を変えて得られる拡大像の大きさ $0.5 (kL_f + 1) x'_{max} |\zeta| \exp(kL)$ から x'_{max} が求められる。

3.5. 角度 x'_{max} の決定 - その2

4極子レンズを空間的に固定したままで x'_{max} を求めるには、収束レンズの焦点距離を変えてもよい。或いは、ここに述べるように4極子レンズの強さ k を変える。第6図(b)において勾配 k の直線は最小の $\xi (= x_{int})$ を与えている。エミッタンス楕円は大きく傾いているので

$$x'_{max} \simeq k \sqrt{\sigma_{11}} \quad (9)$$

である。これに対し、(a)での勾配 k_- の直線は

$$x'_{max} \simeq k_- (\sqrt{\sigma_{11}} - \xi_-) \quad (10)$$

また(c)の勾配 k_+ の直線は

$$x'_{max} \simeq k_+ (\sqrt{\sigma_{11}} - \xi_+) \quad (11)$$

を与えるから、

$$x'_{max} \simeq \frac{k k_-}{k - k_-} \xi_- \simeq \frac{k k_+}{k_+ - k} \xi_+ \quad (12)$$

となる。 ξ は 4 極子レンズで拡大して測られる量であり、その k 依存性から x'_{max} が求められる。

3.6. Q 磁石による拡大の数値例

エネルギーが 100 keV および 1 MeV でエミッタンスが $2 \times 10^{-10} \pi \text{ m rad}$ のビームを Q 磁石で拡大する場合について計算結果を示す。数値計算に当たっては $kL \gg 1$ の近似は使わず、式 (1), (2) の行列をそのまま用いる。磁石の長さは 8 cm, 磁石と蛍光板の間隔 L_f は 50 cm に採った。エミッタンス楕円上に 720 本の電子を配置し、Q 磁石の強さ ∇B_0 を与えて各電子の x, x' を得、次いで蛍光板まで自由走行させて蛍光板上の位置を求めて、プロットする。

Q 磁石の軸方向位置を変えた時の、像の大きさの Q 磁石位置依存性を第 7 図に示す。像は数 mm に拡大されており、充分以上に測定可能な大きさとなっている。 k の値は 1 cm^{-1} , $\exp(kL) = 10^3$, $kL_f = 10^2$ で倍率が $10^4 - 10^5$ となっている。これにより $x_{int} = 10^{-7} - 10^{-8} \text{ m}$ が 1 mm の像に拡大される。

第 8 図は Q 磁石の強さ k を変えた場合の結果である。拡大率が k の増加関数であるので、左右が非対称になる。

3.7. 静電 4 極子レンズを用いる拡大

次にエネルギーの低いビームを考える。その際には取扱いに便利な静電レンズが使える。今、エネルギー 5 keV でエミッタンスが $1.4 \times 10^{-9} \pi \text{ m rad}$ (規格化エミッタンス $2 \times 10^{-10} \pi \text{ m rad}$) のビームを 4 極子電場レンズに入射した場合を計算する。この場合にも充分な拡大が得られる (第 9、10 図)。

4 エミッタ・アレイからのビームの計測

ここまでは 1 つのビームレットのエミッタンス測定を扱ってきたが、エミッタが数マイクロン置きにアレイ状に並んでいる状況を考えよう。4 極子レンズに入るビームの位相図は第 11 図のようになる。間隔 d は電界放出タイプの間隔 Δ と、ビーム加速・収束系の倍率で決まる (加速により $d < \Delta$)。

4.1. ビームの拡大

まず 4 極子レンズを動かす場合を考える。各ビームレットの像は 4 極子レンズの位置とともに第 7 図のように変化するので、それらはビームレットの像が最小になるような位置以外では重なり合う。第 11 図は $d = 10 \mu\text{m}$ のビームについての計算である。拡大像が最小になるような位置から $\pm 2 \text{ mm}$ の範囲の 4 極子レンズ位置でだけ、ビームレットは分離して観測される (第 12 図)。

となる。 ξ は 4 極子レンズで拡大して測られる量であり、その k 依存性から x'_{max} が求められる。

3.6. Q 磁石による拡大の数値例

エネルギーが 100 keV および 1 MeV でエミッタンスが $2 \times 10^{-10} \pi \text{ m rad}$ のビームを Q 磁石で拡大する場合について計算結果を示す。数値計算に当たっては $kL \gg 1$ の近似は使わず、式 (1), (2) の行列をそのまま用いる。磁石の長さは 8 cm, 磁石と蛍光板の間隔 L_f は 50 cm に採った。エミッタンス楕円上に 720 本の電子を配置し、Q 磁石の強さ ∇B_0 を与えて各電子の x, x' を得、次いで蛍光板まで自由走行させて蛍光板上の位置を求めて、プロットする。

Q 磁石の軸方向位置を変えた時の、像の大きさの Q 磁石位置依存性を第 7 図に示す。像は数 mm に拡大されており、充分以上に測定可能な大きさとなっている。 k の値は 1 cm^{-1} , $\exp(kL) = 10^3$, $kL_f = 10^2$ で倍率が $10^4 - 10^5$ となっている。これにより $x_{int} = 10^{-7} - 10^{-8} \text{ m}$ が 1 mm の像に拡大される。

第 8 図は Q 磁石の強さ k を変えた場合の結果である。拡大率が k の増加関数であるので、左右が非対称になる。

3.7. 静電 4 極子レンズを用いる拡大

次にエネルギーの低いビームを考える。その際には取扱いに便利な静電レンズが使える。今、エネルギー 5 keV でエミッタンスが $1.4 \times 10^{-9} \pi \text{ m rad}$ (規格化エミッタンス $2 \times 10^{-10} \pi \text{ m rad}$) のビームを 4 極子電場レンズに入射した場合を計算する。この場合にも充分な拡大が得られる (第 9、10 図)。

4 エミッタ・アレイからのビームの計測

ここまでは 1 つのビームレットのエミッタンス測定を扱ってきたが、エミッタが数ミクロン置きにアレイ状に並んでいる状況を考えよう。4 極子レンズに入るビームの位相図は第 11 図のようになる。間隔 d は電界放出タイプの間隔 Δ と、ビーム加速・収束系の倍率で決まる (加速により $d < \Delta$)。

4.1. ビームの拡大

まず 4 極子レンズを動かす場合を考える。各ビームレットの像は 4 極子レンズの位置とともに第 7 図のように変化するので、それらはビームレットの像が最小になるような位置以外では重なり合う。第 11 図は $d = 10 \mu\text{m}$ のビームについての計算である。拡大像が最小になるような位置から $\pm 2 \text{ mm}$ の範囲の 4 極子レンズ位置でだけ、ビームレットは分離して観測される (第 12 図)。

4極子レンズを固定してその強さを変化させた場合の例を第13図に示す。ここでは $d = 3 \mu\text{m}$ と取っている。4極子磁場を $\pm 10\%$ 変える範囲でビームレットが分離して見えている。

5. 検討と結び

5.1. ビームの自己場の影響

われわれの測定法では、 x_{int} と x'_{max} とを拡大して測る。今ビームが K-V 分布を持つとすると、これら両者の積は自己場によって影響されない。自己場の影響は x_{int} を減少させ、 x'_{max} を増加させるのみである。K-V 分布でなくともわれわれのビームは電流値が低く、しかもビームはスポットを結ぶ以前に拡大に転じるので、自己場の影響は小さい。

5.2. レンズの収差や高次成分の影響

軸対象なレンズの球面収差に対応して4極子レンズは開口収差を持つ。その影響を小さく抑えるには、電子の運動が軸となす角度を数 mrad 以下に抑える。4極子レンズから蛍光板までの距離を長く取るのは、小さな角度で大きな像を得るためである（例： $500 \text{ mm} \times 2 \text{ mrad} = 1 \text{ mm}$ ）。高次成分を小さくする4極子レンズの設計はすでに電子光学分野でなされている。電界放出テイップからの電子ビームをレンズで縮小した後に4極子レンズで線状収束することは、レジストにメッシュパターンを露光する手段として用いられているから、レンズに関する技術はすでに確立済みと思われる。

5.3. 4極子レンズの設置誤差の影響

4極子レンズの軸とビームの軸の位置がずれても、像の大きさは変わらない。ただし拡大像の位置は中心軸から大幅にずれ得るので、芯をだすことは必要である。ビームが4極子レンズの軸に対して角度を持つと、像の位置はぐととも第14図のように変わるが、各々における像の大きさは変わらない。云うまでもなくこれらは、4極子レンズの作用が線形であることによる。

5.4. 結び

マイクロビームを拡大することによってそのエミッタンスを測る方法を検討した。 x_{int} と x'_{max} とが4極子レンズを動かすか、あるいはその強さを変えて、像の変化を見ることによって得られる。エミッタンス測定における絞りの必要性はこうして除去された。エミッタ・アレイからのビームについては、分

4極子レンズを固定してその強さを変化させた場合の例を第13図に示す。ここでは $d = 3 \mu\text{m}$ と取っている。4極子磁場を $\pm 10\%$ 変える範囲でビームレットが分離して見えている。

5. 検討と結び

5.1. ビームの自己場の影響

われわれの測定法では、 $x_{i.n.t.}$ と $x'_{m.a.x}$ とを拡大して測る。今ビームが K-V 分布を持つとすると、これら両者の積は自己場によって影響されない。自己場の影響は $x_{i.n.t.}$ を減少させ、 $x'_{m.a.x}$ を増加させるのみである。K-V 分布でなくともわれわれのビームは電流値が低く、しかもビームはスポットを結ぶ以前に拡大に転じるので、自己場の影響は小さい。

5.2. レンズの収差や高次成分の影響

軸対象なレンズの球面収差に対応して4極子レンズは開口収差を持つ。その影響を小さく抑えるには、電子の運動が軸となす角度を数 mrad 以下に抑える。4極子レンズから蛍光板までの距離を長く取るのは、小さな角度で大きな像を得るためである（例： $500 \text{ mm} \times 2 \text{ mrad} = 1 \text{ mm}$ ）。高次成分を小さくする4極子レンズの設計はすでに電子光学分野でなされている。電界放出テイップからの電子ビームをレンズで縮小した後に4極子レンズで線状収束することは、レジストにメッシュパターンを露光する手段として用いられているから、レンズに関する技術はすでに確立済みと思われる。

5.3. 4極子レンズの設置誤差の影響

4極子レンズの軸とビームの軸の位置がずれても、像の大きさは変わらない。ただし拡大像の位置は中心軸から大幅にずれ得るので、芯をだすことは必要である。ビームが4極子レンズの軸に対して角度を持つと、像の位置はぐととも第14図のように変わるが、各々における像の大きさは変わらない。云うまでもなくこれらは、4極子レンズの作用が線形であることによる。

5.4. 結び

マイクロビームを拡大することによってそのエミッタンスを測る方法を検討した。 $x_{i.n.t.}$ と $x'_{m.a.x}$ とが4極子レンズを動かすか、あるいはその強さを変えて、像の変化を見ることによって得られる。エミッタンス測定における絞りの必要性はこうして除去された。エミッタ・アレイからのビームについては、分

離したビームレットの像を観測出来るが、これはエミッタンス増加が起こった際にそれを検出する敏感な方法となるであろう。微小な電流については4極子レンズによる線状ビームの形成が既に行われており、技術的問題は特にないと考えられる。

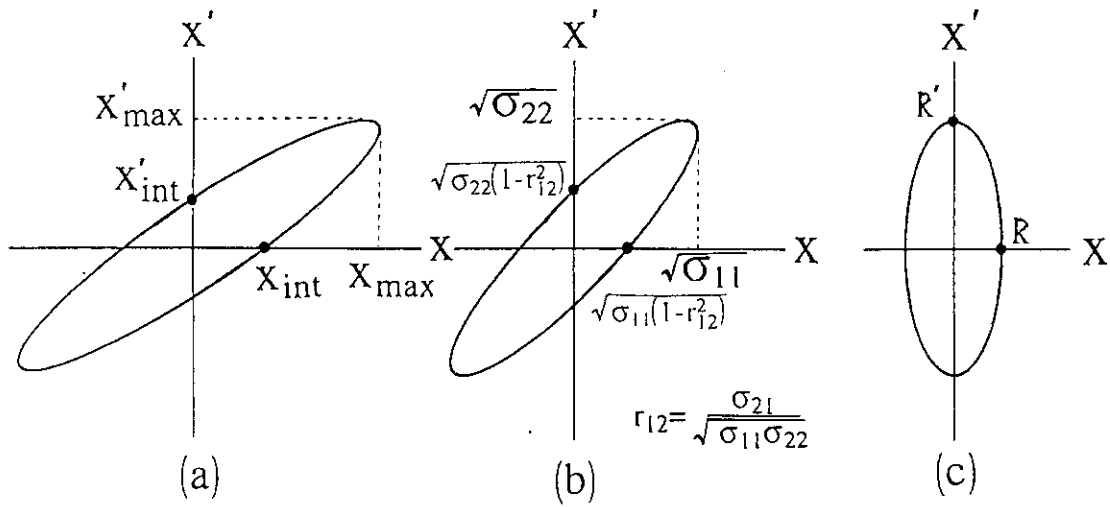
参考文献

- 1) H. Ishizuka et al, Nucl. Instr. Meth. A 331, 551 (1993).
- 2) H. Ishizuka et al, Proc. 1993 Particle Accelerator Conference (to be published).
- 3) S. Humphries, Jr., Charged Particle Beams (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990).
- 4) J.D. Lawson, The Physics of Charged Particle Beams (Oxford Science Publications, Oxford, 1988).
- 5) 丸勢 進、電子顕微鏡 11, 29 (1979).
- 6) T. Shintake, Nucl. Instr. Meth. A 311, 453 (1992).
- 7) 日本学術振興会第132委員会 編、電子・イオンビームハンドブック (日刊工業新聞社、昭和 61 年)。
- 8) W.B. Herrmannsfeldt et al, SLAC-PUB-5217 (1990).
- 9) R.M. Mobley and J.E. Boers, IEEE Trans. Electron Devices 38, 2383 (1991).
- 10) 伊藤 順司、第30回通研シンポジウム論文集 p. 79 (1993).

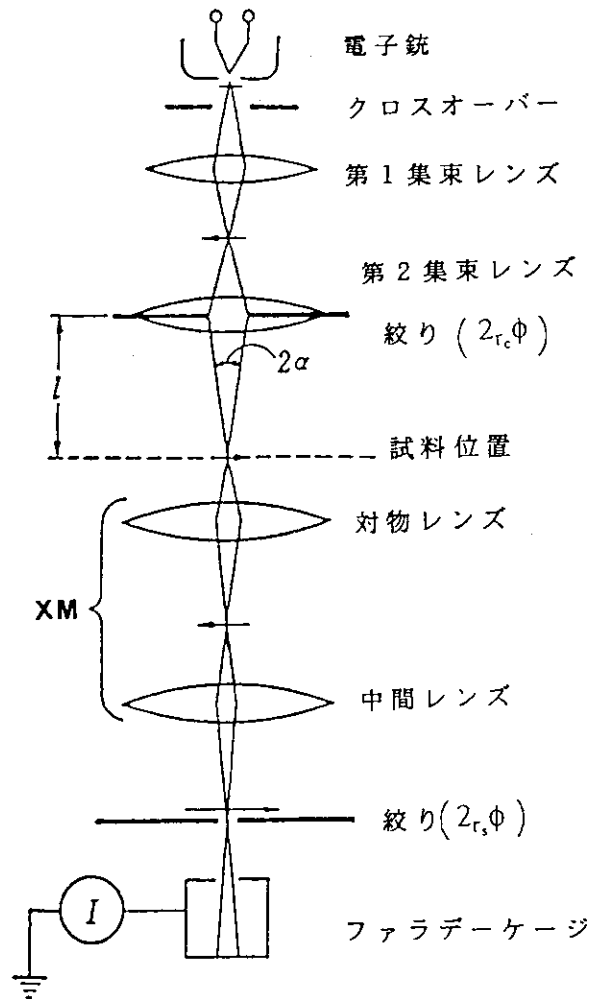
離したビームレットの像を観測出来るが、これはエミッタンス増加が起こった際にそれを検出する敏感な方法となるであろう。微小な電流については4極子レンズによる線状ビームの形成が既に行われており、技術的問題は特にないと考えられる。

参考文献

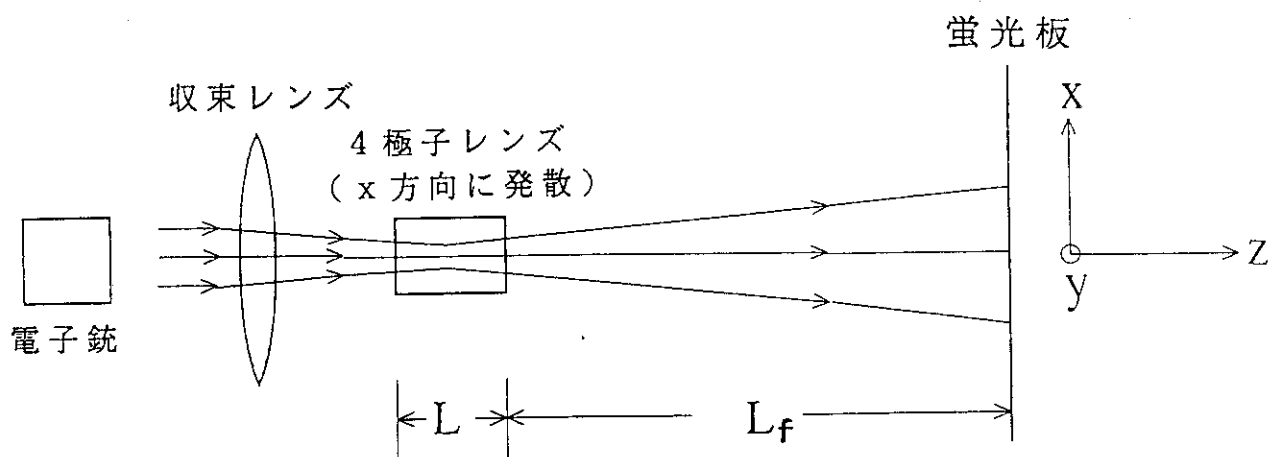
- 1) H. Ishizuka et al, Nucl. Instr. Meth. A 331, 551 (1993).
- 2) H. Ishizuka et al, Proc. 1993 Particle Accelerator Conference (to be published).
- 3) S. Humphries, Jr., Charged Particle Beams (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990).
- 4) J.D. Lawson, The Physics of Charged Particle Beams (Oxford Science Publications, Oxford, 1988).
- 5) 丸勢 進、電子顕微鏡 11, 29 (1979).
- 6) T. Shintake, Nucl. Instr. Meth. A 311, 453 (1992).
- 7) 日本学術振興会第132委員会 編、電子・イオンビームハンドブック (日刊工業新聞社、昭和 61 年)。
- 8) W.B. Herrmannsfeldt et al, SLAC-PUB-5217 (1990).
- 9) R.M. Mobley and J.E. Boers, IEEE Trans. Electron Devices 38, 2383 (1991).
- 10) 伊藤 順司、第30回通研シンポジウム論文集 p. 79 (1993).



第1図 位相図 (Emittance ellipse)



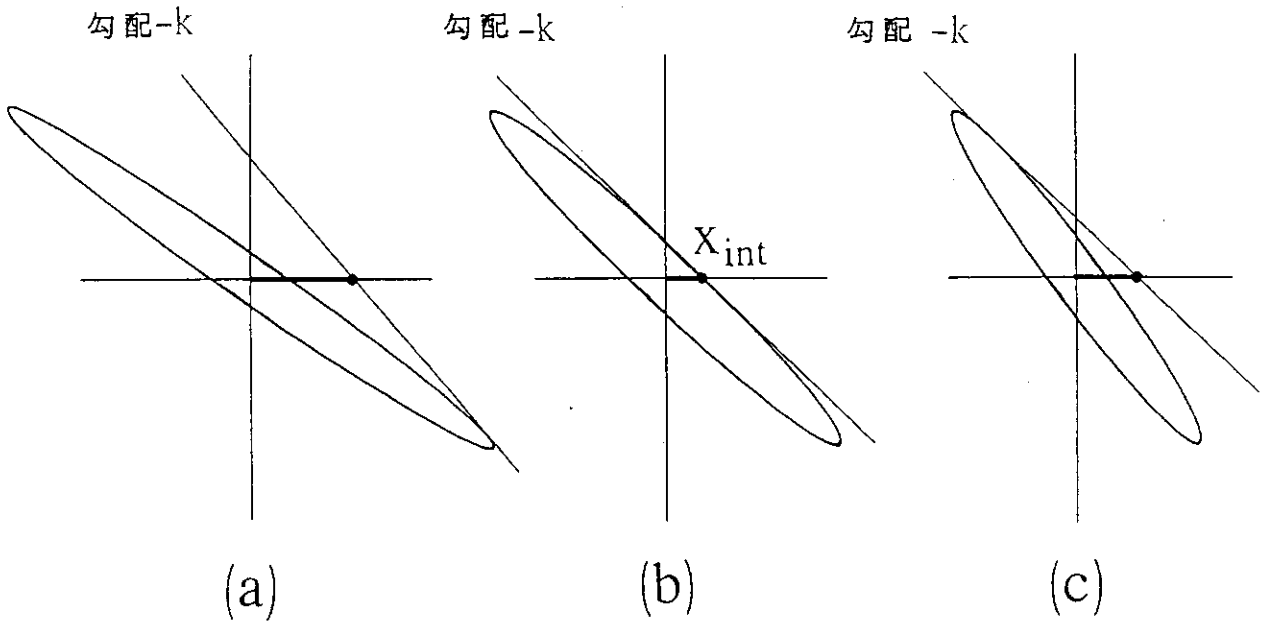
第2図 電子顕微鏡による輝度の測定法⁵⁾



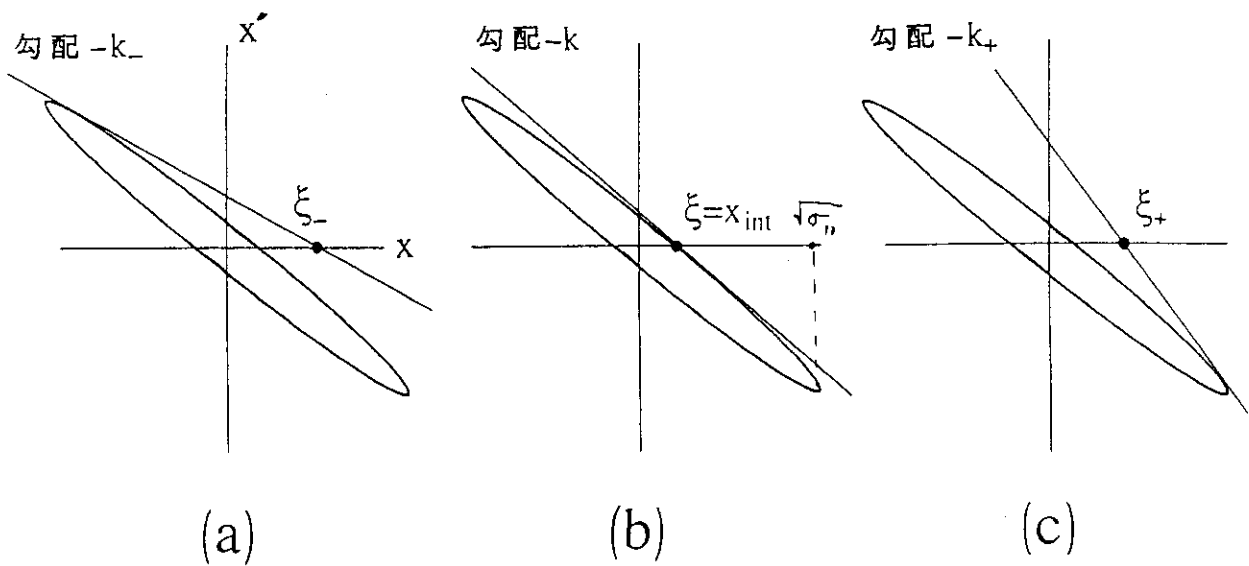
第3図 測定系の構成



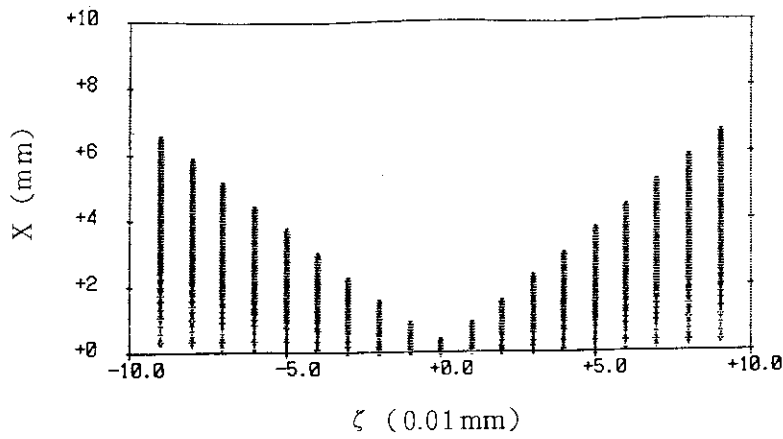
第4図 収束ビームのエミッタンス図



第5図 エミッタンス楕円の傾きと $(x_0 + x'_0/k)$ の最大値との関係

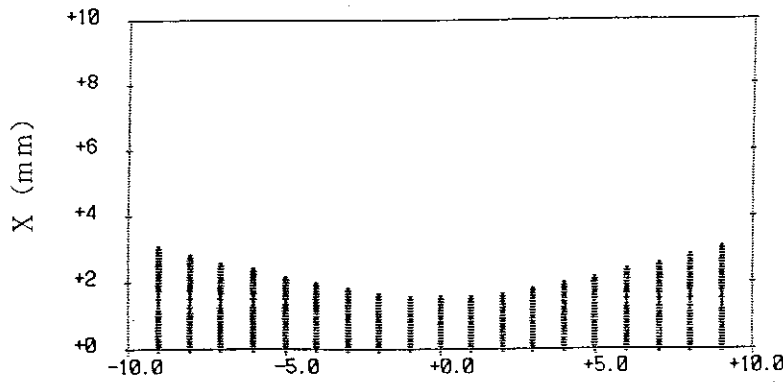


第6図 $\xi \equiv (x_0 + x'_0/k)_{\max}$ の k 依存性



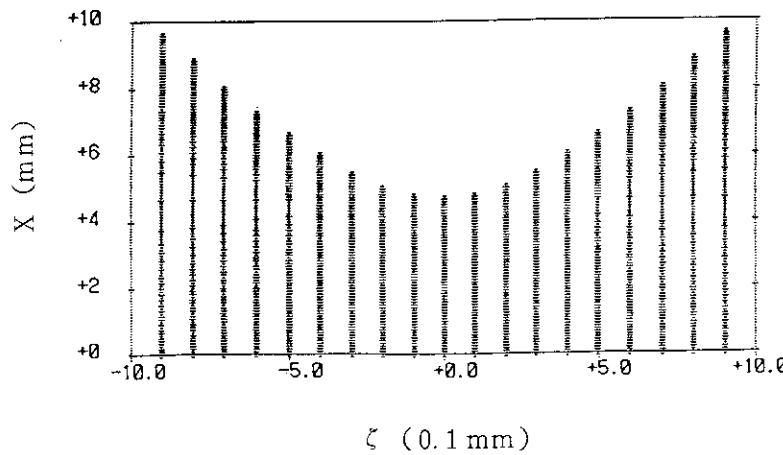
100 keV,
 $\zeta = 2 \times 10^{-10} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
 $x'_{0, \text{max}} = 2 \text{ mrad}$
 $\nabla B_Q = 0.5 \text{ kG/cm}$

(a)



$\nabla B_Q = 0.75 \text{ kG/cm}$

(b)



$\nabla B_Q = 1 \text{ kG/cm}$

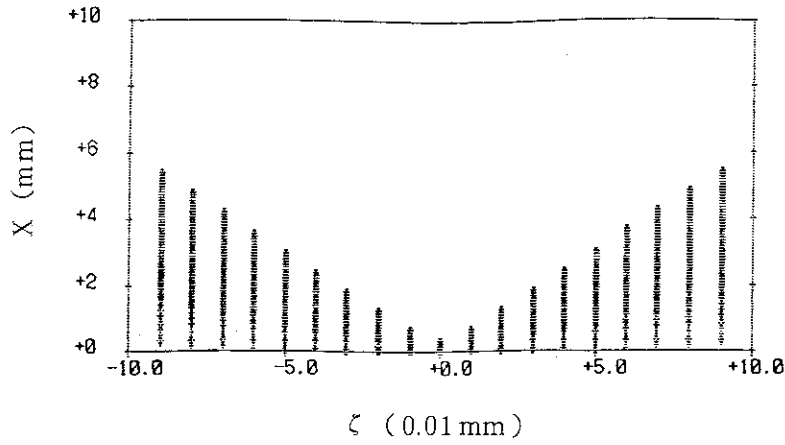
(c)

第 7 - 1 図

4 極子磁石を動かす時の拡大像の変化

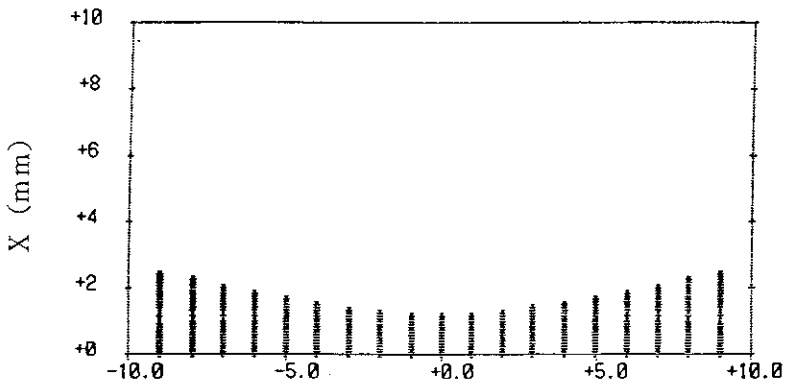
ζ は 4 極子磁石の軸方向位置であり, $\zeta = 0$ は拡大像を最小にする如き位置 (第 5 図 (b) に対応)

- ビームエネルギー 100 keV, 1 MeV
- エミッタンス $2 \times 10^{-10} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
- 収束角 2 mrad
- 4 極子磁石の長さ 8 cm
- 4 極子磁石の出口から蛍光板までの距離 50 cm



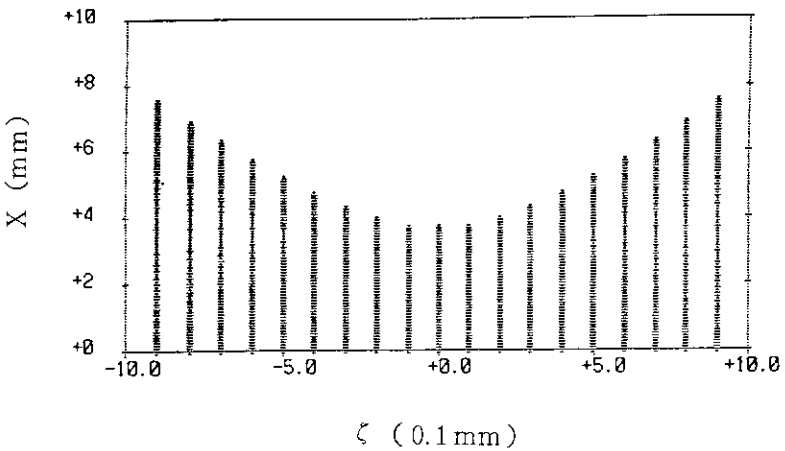
1 MeV
 $\zeta = 2 \times 10^{-10} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
 $x'_{0, \text{max}} = 2 \text{ mrad}$
 $\nabla B_Q = 3 \text{ kG/cm}$

(a)



$\nabla B_Q = 3 \text{ kG/cm}$

(e)



$\nabla B_Q = 4 \text{ kG/cm}$

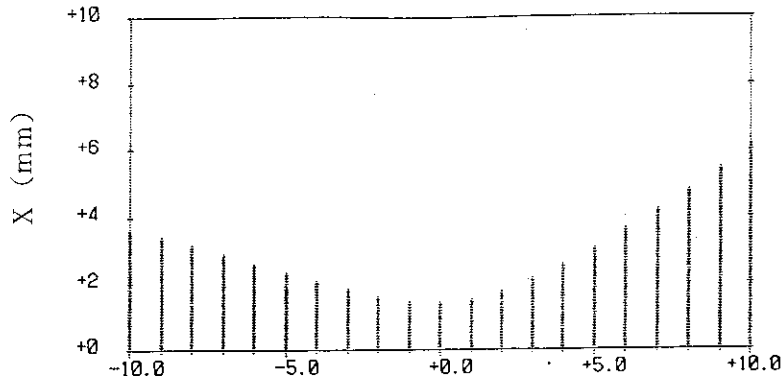
(f)

第 7 - 2 図

4 極子磁石を動かす時の拡大像の変化

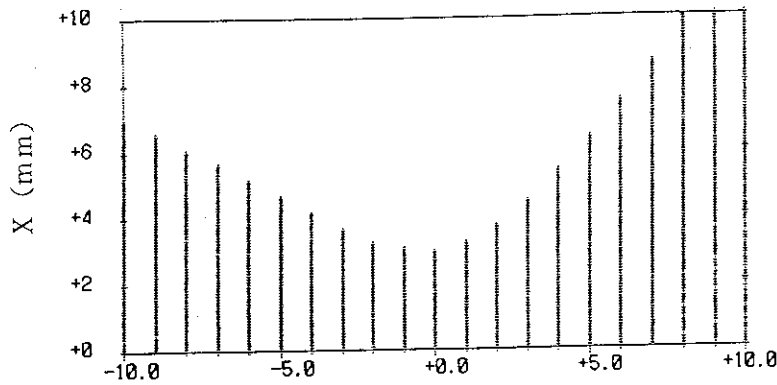
ζ は 4 極子磁石の軸方向位置であり、 $\zeta = 0$ は拡大像を最小にする如き位置 (第 5 図 (b) に対応)

ビームエネルギー 100 keV, 1 MeV
 エミッタンス $2 \times 10^{-10} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
 収束角 2 mrad
 4 極子磁石の長さ 8 cm
 4 極子磁石の出口から蛍光板までの距離 50 cm



$B_{q_0} = 0.6 \text{ kG/cm}$

(a)



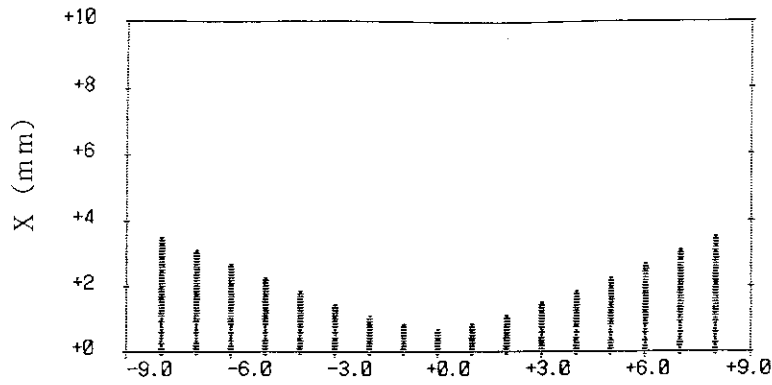
$B_{q_0} = 0.75 \text{ kG/cm}$

(b)

$$\frac{B_q - B_{q_0}}{B_{q_0}} (\%)$$

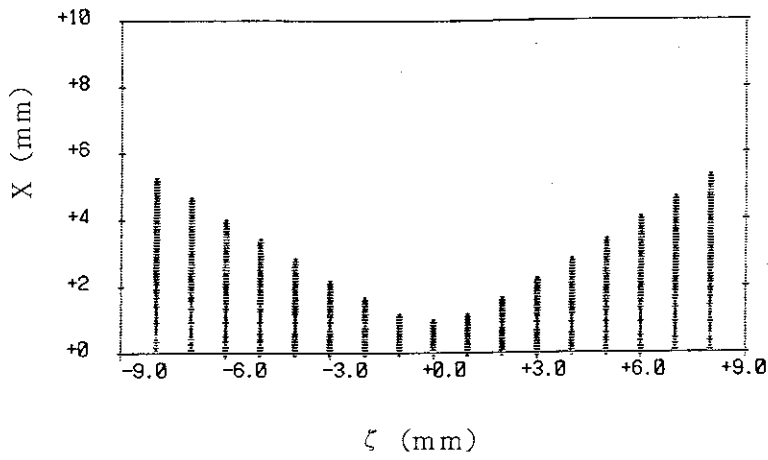
第8図 4極子磁石を空間的に固定し、強さを変えた時の拡大像の変化

ビームエネルギー 100 keV
 エミッタンス $2 \times 10^{-10} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
 収束角 1 mrad



$\nabla E_Q = 1 \text{ kV/cm}^2$

(a)

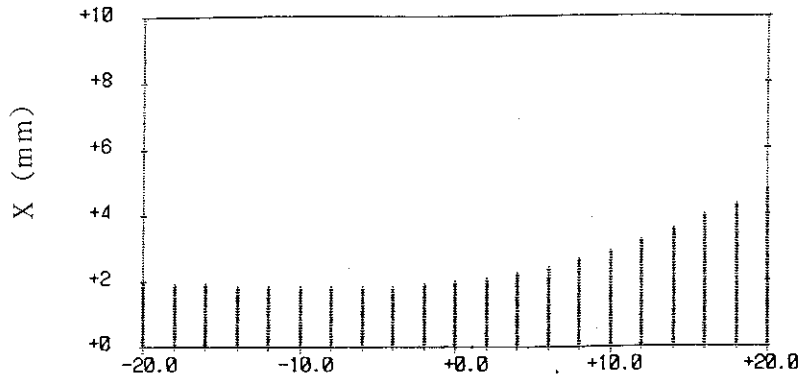


$\nabla E_Q = 1.2 \text{ kV/cm}^2$

(b)

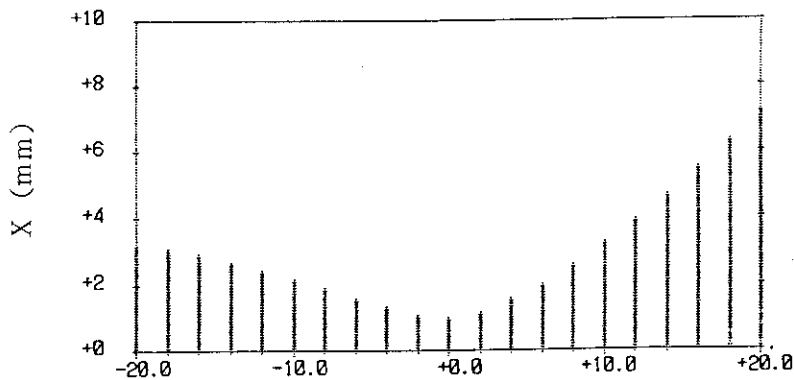
第9図 静電4極子レンズによる低エネルギービームの拡大像。
 レンズを軸方向に動かす場合

ビームエネルギー	5 keV
エミッタンス	$1.4 \times 10^{-9} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
収束角	1 mrad
4極子レンズ長	8 cm
蛍光板までの距離	50 cm



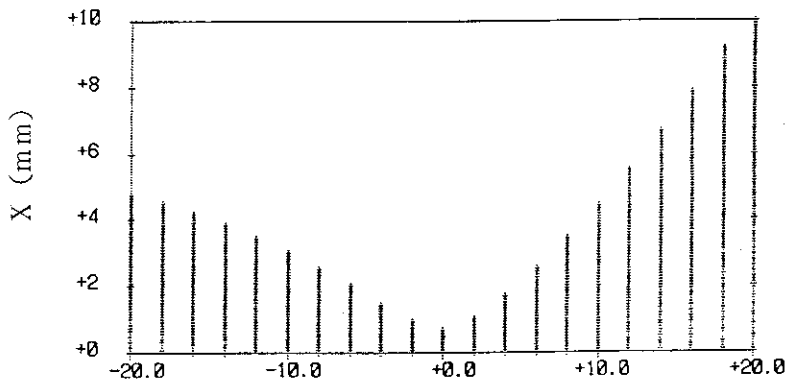
収束角 1 mrad

(a)



収束角 2 mrad

(b)



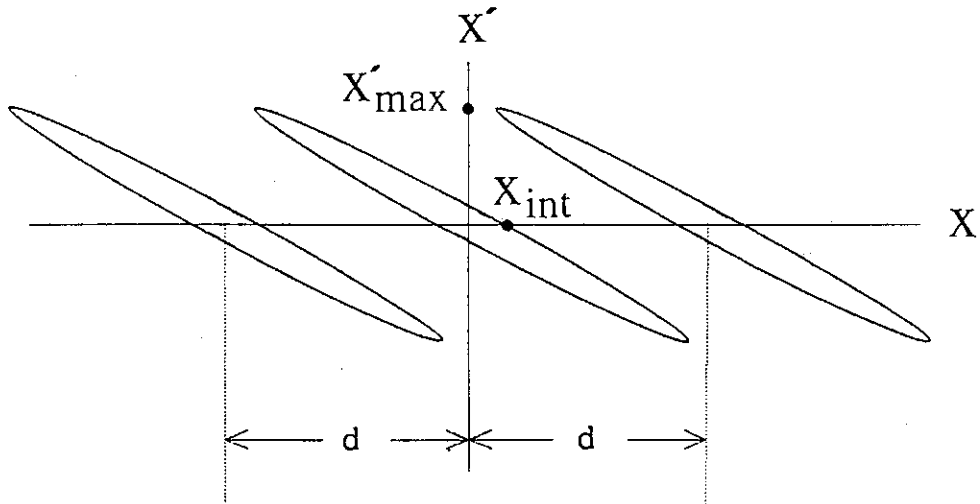
収束角 3 mrad

(c)

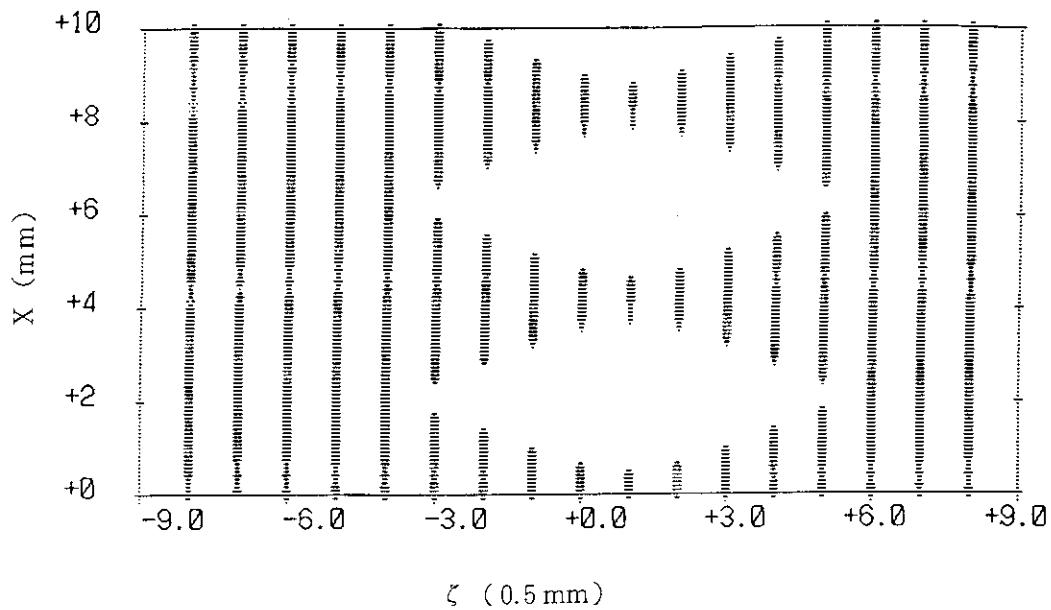
$$\frac{\nabla E_q - \nabla E_{q_0}}{\nabla E_{q_0}} (\%)$$

第10図 静電4極子レンズによる低エネルギービームの拡大像
 レンズ強度を変える場合。 $\nabla E_{q_0} = 1.6 \text{ kV/cm}^2$

ビームエネルギー 5 keV
 エミッタンス $1.4 \times 10^{-9} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
 4極子レンズ長 8 cm
 蛍光板までの距離 50 cm



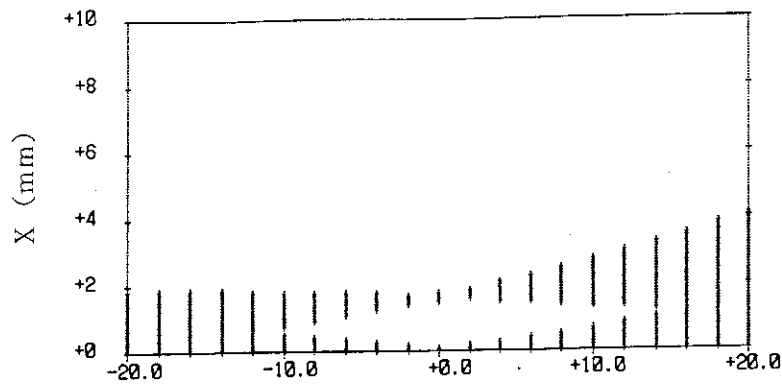
第11図 複数のビームレットの位相図



第12図

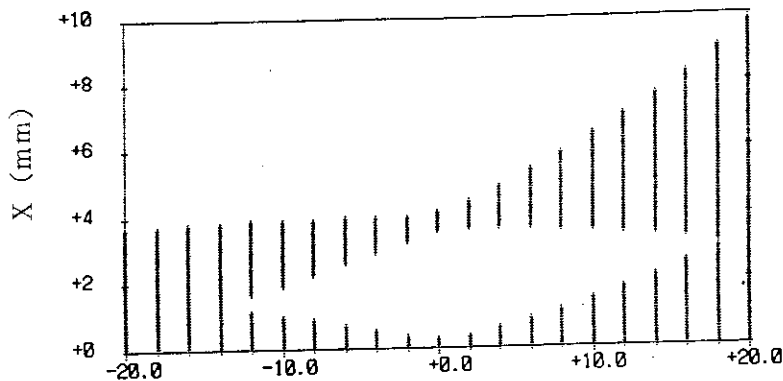
複数のビームレットの拡大像。 $z = 0$ は各ビームレットの拡大像を最小にするような静電4極子レンズの位置。ここから4極子レンズを軸方向に ± 2 mm 動かす範囲ではビームレットは分離して見える。

ビームエネルギー	5 keV
エミッタンス	$2 \times 10^{-9} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
収束角	2 mrad
ビームレット間隔	10 μm
4極電場	$dE / dx = 1 \text{ kV} / \text{cm}^2$



$\nabla B_{Q_0} = 0.25 \text{ kG/cm}$

(a)



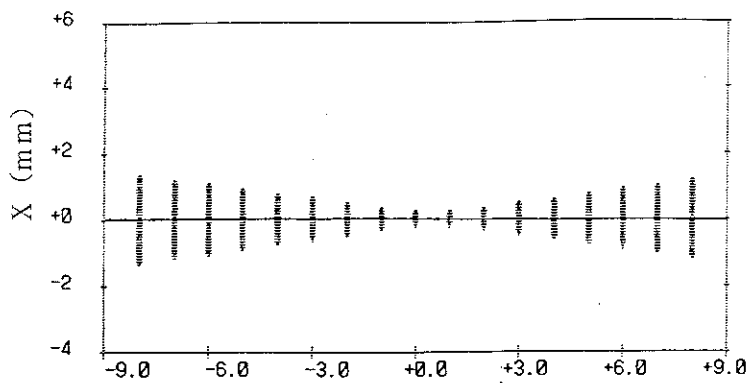
$\nabla B_{Q_0} = 0.35 \text{ kG/cm}$

(b)

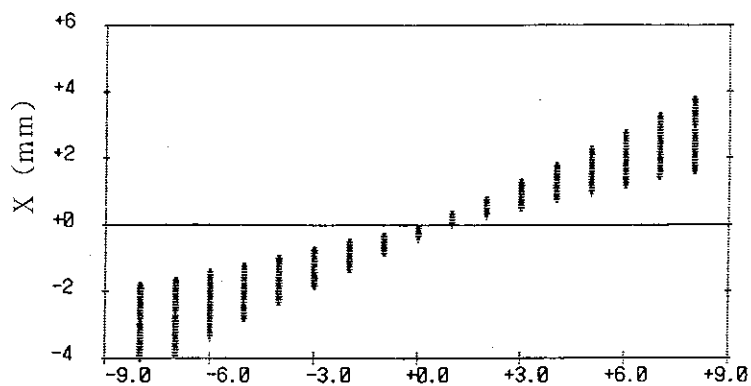
$$\frac{\nabla B_Q - \nabla B_{Q_0}}{\nabla B_{Q_0}} (\%)$$

第13図 2つのビームレットの拡大像

ビームエネルギー	100 keV
エミッタンス	$2 \times 10^{-10} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
収束角	1 mrad
4極子レンズ長	8 cm
蛍光板までの距離	50 cm



(a)



(b)

z (0.5 mm)

第14図 4極子レンズのミスアラインメントの影響
 (a) ビームの軸とレンズの軸が一致している場合
 (b) ビームの軸がレンズの軸と5 mradをなす場合

ビームエネルギー 5 keV
 エミッタンス $2 \times 10^{-9} \pi \text{ m} \cdot \text{rad}$
 収束角 2 mrad
 4極子レンズ長 8 cm
 蛍光板までの距離 50 cm