

# トモグラフィを用いた相対論的電子ビームの横方向位相平面分布解析

高松 輝久<sup>1</sup>、堀井 知弘、紀井 俊輝、増田 開  
督 寿之、大垣 英明、長崎 百伸、山崎 鉄夫、吉川 潔  
京都大学エネルギー理工学研究所  
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

## 概要

近年、高周波電子銃などによって相対論的電子ビームの輝度は飛躍的に向上しており、それに伴いその診断方法にも進歩が求められている。従来、高エネルギーの電子ビームについては位置・速度位相平面上の電子密度分布を直接測定する適当な方法がなく、その代わりに分布の広がりをあらわすエミッタンスの測定・評価がされていた。そこでトモグラフィを用いて横方向位相平面分布を測定する方法が提案されている。本研究ではこの方法を用いて電子ビームを診断し、またその測定誤差を計算機シミュレーションによって評価した。

## 1. はじめに

電子ビームの輝度は電子の位置  $(x, y, z)$  と速度  $(v_x, v_y, v_z)$  の 6 次元位相空間の密度で定義される。6 次元位相空間からビームの進行方向  $(z)$  に垂直な方向の位置・速度位相平面  $(x-v_x)$  平面または  $(y-v_y)$  平面への投影を考えると、電子ビームの径や発散角が小さいほど位相平面上で占める面積、すなわちエミッタンスが小さくなる。従来から、ペーパーポットや四重極電磁石によるスキニングによってエミッタンスが測定されているが、前者は高エネルギーのビームに適さず、後者は位相平面の分布そのものを知ることは出来ない。高輝度電子ビーム源として期待されている高周波電子銃の出力ビームは位相平面上でガウス分布などの単純な分布をしていない[1,2]。そのため、高周波電子銃の性能の正しい評価と更なる高性能化のためにはこれらの診断法は十分とはいえない。

最近、医療分野で広く用いられているトモグラフィを応用して横方向の位相平面上の電子密度分布を測定する方法が米国 Brookhaven 国立研究所(BNL)のグループによって提案された[3]。トモグラフィは 2 次元的な分布を、あらゆる角度の投影から求める計算法で断層撮影法とも呼ばれる。例えば、人体に X 線を照射して得られる投影像を全周にわたって撮影することで人体の断面図を得ることができる。電子密度分布の場合には四重極電磁石による磁界を作用させることで位相平面上の電子密度分布が任意の角度だけ回転する。これを用いて位置軸への投影を観測し、トモグラフィによって位相平面上での分布を求める。

BNL のグループによって位相平面上の電子密度分布を調べる方法が示されたが、これによって求めた

分布に含まれる誤差については十分な検討がされていない。トモグラフィには全周にわたる連続的な投影を調べなくてはならず、原理的には四重極電磁石で任意の角度の投影を観測できるが、実際は有限の磁束密度による回転可能角度幅には制限がある。また、投影角の変化は離散的であり有限の投影から再構成することになる。さらに、電子のエネルギーによって四重極電磁石で回転される角度が異なるため、電子ビームが持つエネルギー幅もトモグラフィの精度に影響する。

本研究では熱陰極高周波電子銃[4]の出力ビームについてトモグラフィを用いて求めた位相平面上の電子密度分布およびそれに含まれる誤差を評価した。投影角の幅、投影方向の数、電子ビームのエネルギー分布の影響をシミュレーションによって評価し、必要精度の分布を求めるための条件を調べた。

## 2. 測定原理

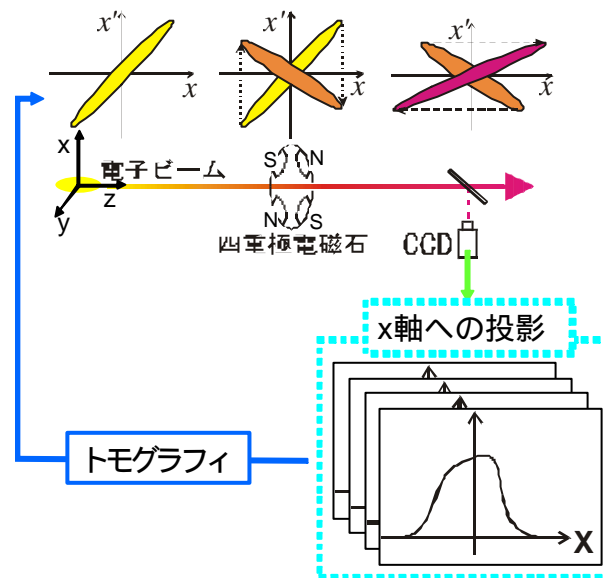


図 1 測定概念図

図 1 に位相平面分布測定概念図を示す。ビームの進行方向を  $z$  軸としてそれに垂直な方向の位相平面を考える。電子ビームに四重極電磁石の磁界を作用させたあと、下流のスクリーンモニタに当ててビームの位置プロファイルを観測する。このとき、図 1 の上段に示すように位相平面上の分布が「回転」する。四重極電磁石の励磁電流を変化させることで、

<sup>1</sup> E-mail: teruhisa@iae.kyoto-u.ac.jp

この回転角を変えることができる。このようにして得た様々な角度の投影像からトモグラフィによって位相平面分布を再構成する。

四重極電磁石の直前で位相平面上の $(x_0, x'_0)$ にある電子はスクリーンモニタの地点で次のような位置にうつる。

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $f$ は四重極電磁石の焦点距離、 $L$ は電磁石とスクリーンの距離。よって  $x$  軸への投影は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x &= (1-L/f)x_0 + Lx'_0 \\ &= A \left( x_0 \cos q + x'_0 \sin q \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$A = \sqrt{(1-L/f)^2 + L^2} \quad (3)$$

$$q = \tan^{-1} \left( \frac{1}{L} - \frac{1}{f} \right)^{-1} \quad (4)$$

ここで  $A$  は横方向伸縮係数、 $q$  は回転角である。

観測した投影を伸縮係数で補正し、フィルタ補正逆投影法を用いて横方向位相平面上の電子密度分布を再構成した。フィルタ補正逆投影法はトモグラフィの計算法のひとつで  $p(\mathbf{r}, \mathbf{q})$  を投影、 $f(x, x')$  位相平面分布として次式のような変換である [5]。

$$G(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\mathbf{r}, \mathbf{q}) \exp(-j2\mathbf{p}\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (5)$$

$$Q(\mathbf{r}, \mathbf{q}) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\mathbf{r}) \mathbf{r} \exp(j2\mathbf{p}\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (6)$$

$$f(x, x') = \int_0^p Q(x \cos q + x' \sin q, \mathbf{q}) d\mathbf{q} \quad (7)$$

### 3 . 測定結果

図 2 に実験装置の模式図を示す。熱陰極型高周波電子銃で生成した電子ビームをベンドマグネット (B1) で 45 度偏向し、スリットでエネルギー幅を制限したあと、四重極電磁石 Q4 または、Q5 によって収束、発散させてスクリーンモニタ (BPM2) で観測した。スクリーンには厚さ 1mm のアルミナ板 (デマルケスト) を使用した。

図 3 に測定結果を示す。ビームエネルギーは 3.6MeV、ビーム電流は 500mA で、パンチ長 3 $\mu$ s。x 方向、y 方向それぞれの測定条件は表 1 のとおり。また、従来の四重極電磁石のスキニングによるエミッタンス (非規格化) 測定を同時に行い、位相平面分布から計算した rms エミッタンス  $\epsilon'$  と比較した。

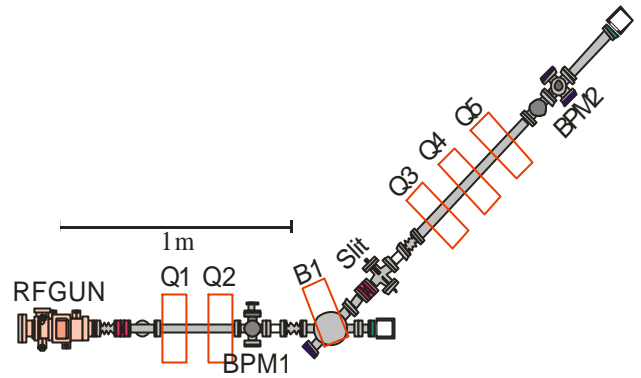


図 2 ビームライン模式図

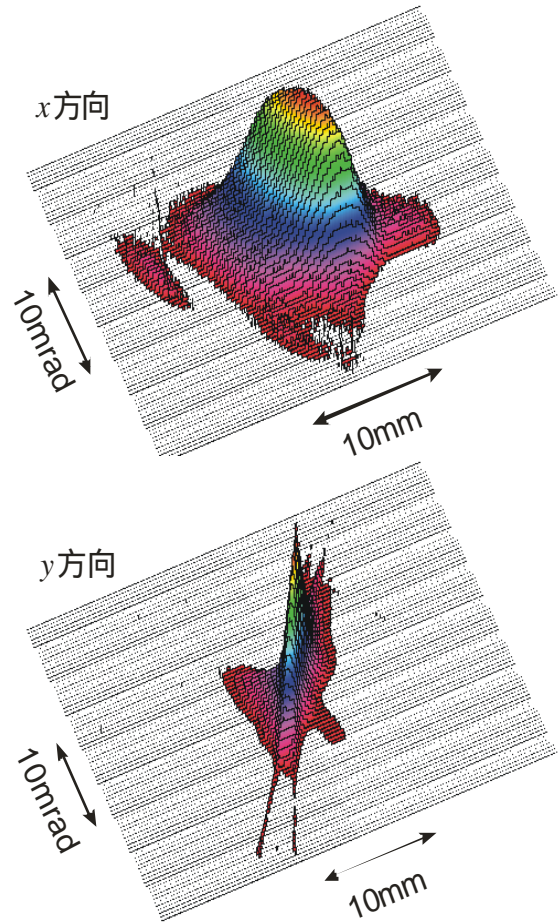


図 3 横方向位相平面分布の測定結果

表 1 x,y 方向のパラメータ

測定条件	x 方向	y 方向
投影数	40	32
回転幅 (rad)	0.82 $\pi$	0.74 $\pi$
エネルギー幅 (%)	9.5	9.5
エミッタンス測定結果		
$\epsilon$ (mm rad)	11.6 $\pi$	2.33 $\pi$
$\epsilon'$ (mm rad)	12.7 $\pi$	5.94 $\pi$

## 4. 誤差の解析

表 1 に示すとおり、従来の四重極電磁石によるスキニングで測定したエミッタンスと、トモグラフィによって測定した位相平面分布から計算したエミッタンスとを比較すると、 $x$  方向のエミッタンスは両者がほぼ等しくなっているが、 $y$  方向では差がある。このような結果になったのは、トモグラフィの測定条件の違いや分布形状自体の差が原因であると考えられる。

そこで、これらの条件が測定結果に与える影響を計算機シミュレーションによって調べた。位相平面上の電子密度分布を与え、これがスクリーンモニターでどのように観測されるかを(2)式により計算する。四重極電磁石の焦点距離を何通りか変化させて、異なる角度の投影像を得る。これからトモグラフィによって、もとの位相平面分布を再構成する。与えた分布と再構成した分布で rms エミッタンスを計算、比較した。

結果を図 4 に示す。横軸の投影数は再構成に使う投影の数（観測するサンプル数）、回転幅は投影角の変化幅（四重極電磁石の励磁電流の変化幅）、エネルギー幅は電子ビームのエネルギー分布幅である。投影数、回転幅はトモグラフィを用いる場合の一般的な誤差の原因であるが、エネルギー分布幅は回転の際に生じるもので、この測定法特有のものである。それぞれのパラメータに対して、与えた分布のエミッタンス $\varepsilon_0$ と再構成した分布のエミッタンス $\varepsilon$ との比を縦軸にとった。グラフから正確な再構成には投影数で 40 程度、回転幅で  $0.8\pi$  度が必要といえる。また、エネルギー幅による影響は他の 2 つに比べて小さく無視できるといえる。ただし、分布形状が縦長の場合には誤差が大きくなるという結果であった。実験でも  $y$  方向の結果は縦長に近い分布形状であり、これが誤差の原因になったと考えられる。

## 5. 結論と今後の予定

高周波電子銃で加速した相対論的電子ビームの横方向位相平面の密度分布をトモグラフィの応用によって測定した。また、計算機シミュレーションでこの測定法の誤差を調べた。誤差要因として投影数、回転幅、エネルギー分布幅について調べた。結果、これらの影響が小さい条件で測定することで十分な精度の測定が可能であることが分かった。

今後、他の測定誤差要因として次の点を評価する必要がある。すなわち、今回の測定ではスクリーンモニターに厚さ 1mm のアルミナ板を使用した。これはにじみや残光が大きいため正確なビームプロファイルが得られているとは限らない[6]。この問題について調べるために厚さ 50 $\mu\text{m}$  のアルミナ板による測定、また電子ビームの遷移放射光の観測を予定している。

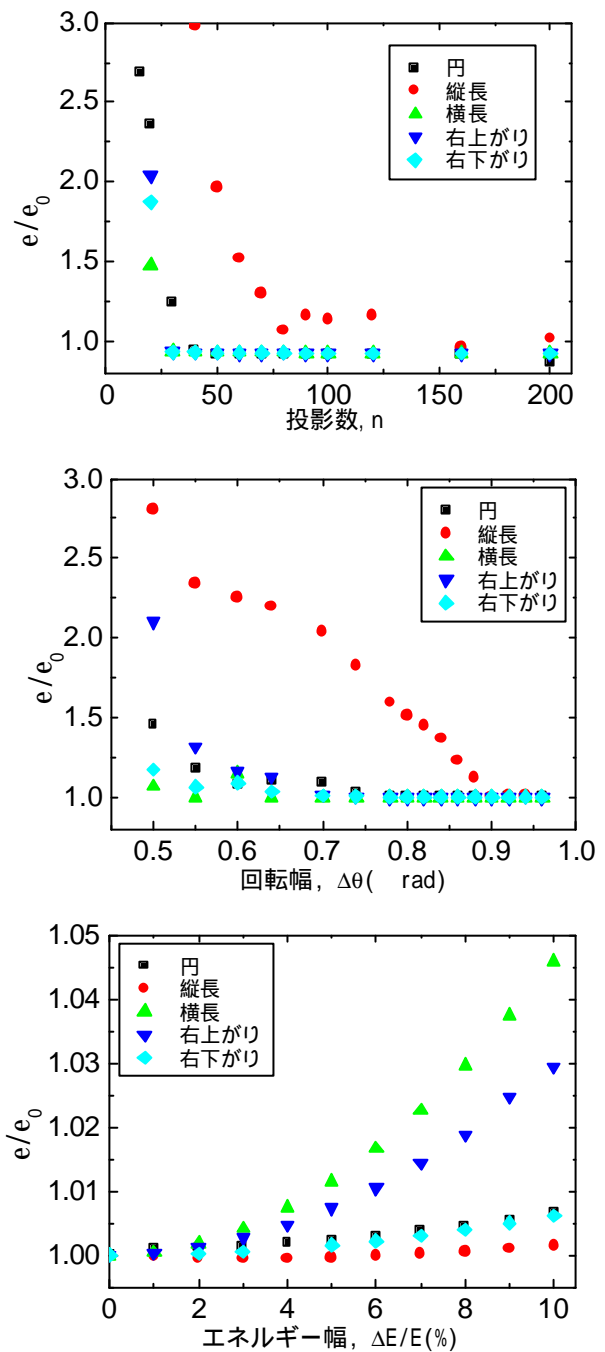


図 4 誤差の解析結果

## 参考文献

- [1] K. Masuda, et al., Nucl. Inst. Meth. A429(1999)347-351.
- [2] 稲増崇, 「光陰極型高周波電子銃における電子ビーム特性に関する研究」, 修士論文, 京都大学(1998).
- [3] C. B. McKee, et al., Nucl. Inst. Meth. A358 (1995) 264-267.
- [4] T. Kii, et al., Nucl. Inst. Meth. A475 (2001) 588-592.
- [5] 斎藤恒雄, 画像処理アルゴリズム (近代科学社, 1993) 6章, 7章.
- [6] K. Yokoyama, et al., Proc of 12<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Tech., Wako, Japan (1999) 473-478.