

## Experimental Study on Effect of Energy Distribution to Transverse Phase Space Tomography

Heishun Zen, Hideaki Ohgaki, Kai Masuda, Toshiteru Kii, Takumi Shiiyama, Satoshi Sasaki,  
 Norihito Okawachi, Masatsugu Nakano, Kiyoshi Yoshikawa, Tetsuo Yamazaki  
 Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
 Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

### Abstract

To study the effect of energy distribution to transverse phase space tomography, the experimental results of electron beams with and without low energy tail have been compared. The distribution of the beam with the tail had weak background-like signals, while that without the tail did not. The result was consistent with the results of previous simulations where the origin of the signals had been attributed to the low-energy tail. To extract the beam parameters of main component from distorted phase space image, an iterative elliptical analysis was introduced. It was shown in simulation that the method could extract the beam parameters of main component. And then, we applied the method to experimental results. As the results, the rotation angles of distributions of experimental results were consistent with results of PARMELA simulation, but the emittances are not. We need more experiments to ensure the reliance of the analysis.

## エネルギー分布が横方向位相平面トモグラフィに与える影響に関する 実験的検討

### 1. はじめに

横方向位相平面トモグラフィ法<sup>[1]</sup>(以下、トモグラフィ法と呼ぶ)は、四重極電磁石の強度を変化させながら得た数十枚のプロファイルデータから横方向の位相平面分布を再構成する手法である。本手法では、直接的に位相平面分布が得られるため、ガウス分布とは異なる分布をしている際の位相平面分布およびエミッタンスの計測に非常に有用である。

電子銃の性能を正しく評価するためには、トランスポート中のエミッタンス増大の影響を小さくするため、電子銃直後でエミッタンス計測を行う必要がある。我々が用いている4.5空胴熱陰極高周波電子銃から出力される電子ビームはエネルギー分布の半値幅が10~15%と広く、低エネルギーテイルを持つ。トモグラフィ法では、計測対象である電子ビームが単色のエネルギーを持っていると仮定して再構成するため、このようなエネルギー分布を持つ電子ビームをそのまま計測すると、エネルギー分布の影響により、再構成結果が乱され、計測誤差が生じる。

これまでのシミュレーション<sup>[2]</sup>により、電子ビームに含まれる低エネルギー成分は再構成された位相平面全体に低強度の信号として再構成され、これがエミッタンス、Twiss parametersを算出する際に大いに問題となることが判明している。そこで、本研究ではエネルギーフィルタ前後においてトモグラフィ法により位相平面分布を計測し、実験的にエネルギー分布の影響を確認すると共に、低エネルギー成分が広く低強度の信号として再構成されることを利用し、その影響を除き、ビームパラメータを抽出する手法を導入し、評価した。

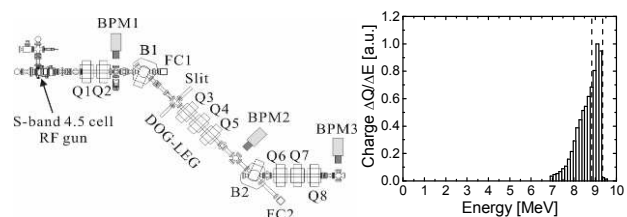


図1：実験装置概観

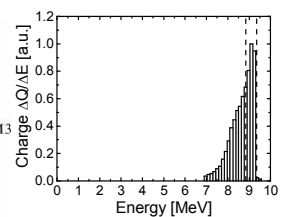


図2：エネルギー分布計測結果

### 2. 実験装置・条件および測定系

図1に実験装置の概観を示す。陰極には半径3mmの多孔質タングステンのバリウム含浸カソードを、また、back-bombardment現象<sup>[3]</sup>を低減するために、陰極表面に鉛直方向磁場を印加するsweep magnetを用いている<sup>[4]</sup>。

図1のdog-legセクションは、偏向電磁石とスリットによるエネルギーフィルタの機能を有し、そのエネルギーアクセプタンスは約5%である。トモグラフィ法による位相平面分布計測はdog-leg上流では四重極電磁石Q1、プロファイルモニターBPM1を用いて、下流ではQ6、BPM3を用いて行った。

本実験におけるビームパラメータは、BPM1の位置においてマクロパルス長1.6  $\mu$  sec、総電荷量300 nC、ピークエネルギーは9.2 MeVであり、BPM2の位置ではマクロパルス長1  $\mu$  sec、総電荷量100 nCであった。また、B1、FC2を用いて計測したエネルギー分布を図2に示す。

### 3. 実験結果

実験により得られた位相平面分布の計測結果を図3、図4に示す。dog-leg上流の結果には、広範囲に低強度の信号が見られるのに比べ、下流の結果では、そのような低強度の信号は見られない。また、図3、図4よりエネルギーが9MeV単色であるとして規格化エミッタンスを算出すると、dog-leg上流では水平(x)方向 $284\pi$  mm mrad、鉛直(y)方向 $147\pi$  mm mrad、dog-leg下流ではx方向 $12\pi$  mm mrad、y方向 $6.9\pi$  mm mradとなり、この結果では、dog-legを通過する事で1/20以下に減少している。

図3(a)、(b)に一点鎖線で示した線は、我々が用いている電子銃の出口の口径が半径4mm、出口からQ1入り口までの距離が28cmである事から、本来、電子が存在可能な範囲を示したものである。dog-leg上流では低エネルギーテイルが存在していると考えられ、再構成時に仮定したエネルギーから大きく離れたエネルギーの電子による信号が再構成結果上に現れている事が見て取れる。

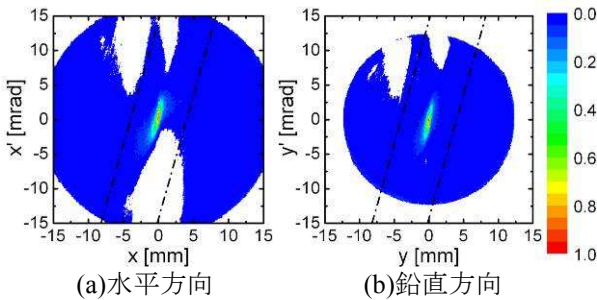


図3 : Dog-leg上流での計測結果

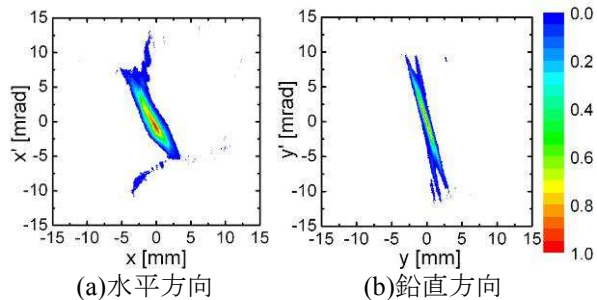


図4 : Dog-leg下流での計測結果

### 4. 低エネルギーテイルの影響の除去

熱陰極高周波電子銃により生成される電子ビームの低エネルギー成分はその量は少なく、再構成結果上で本来の分布よりも薄く広げられて再構成される。そのため、再構成位相平面上では、その強度は高エネルギー成分に比べて非常に小さいものとなる。このことから、再構成位相平面上で低強度の分布を低エネルギーテイルからの寄与として考え、それらを除外して強度の強い部分のみを抽出する事で、高エネルギー成分のみのエミッタンス及びTwiss parametersが得られると考えた。

#### 4.1 除去手法

低強度な低エネルギー成分を除去する手法として、楕円近似を利用した手法(Iterative Elliptical Analysis: IEA法)を導入した。その手順を以下に示す。

- ① 再構成分布から $\langle x^2 \rangle$ 、 $\langle x'^2 \rangle$ 、 $\langle xx' \rangle$ を計算する。
- ② 算出された結果から再構成分布上で、
$$\langle x'^2 \rangle x^2 + 2\langle xx' \rangle xx' + \langle x^2 \rangle x'^2 = 16\epsilon^2$$
で表される楕円を定義する。
- ③ ②で定義された楕円外の領域の平均値をバックグラウンド信号として分布から減算する。
- ④ 新しく定義された楕円中に限り、与えられた分布から $\langle x^2 \rangle$ 、 $\langle x'^2 \rangle$ 、 $\langle xx' \rangle$ を計算する。
- ⑤ ②同様、新しい $\langle x^2 \rangle$ 、 $\langle x'^2 \rangle$ 、 $\langle xx' \rangle$ から楕円を定義すると共に、前回の楕円内で、新しい楕円外の領域の平均値をバックグラウンド信号として減算する。
- ⑥ ④、⑤を繰り返し、十分に収束した時点での $\langle x^2 \rangle$ 、 $\langle x'^2 \rangle$ 、 $\langle xx' \rangle$ からエミッタンス、Twiss parametersを算出する。

#### 4.2 効果の確認

初期分布として低エネルギーテイルを持つガウス分布を与え(図5)、トモグラフィ法による計測を計算機でシミュレートして得られた再構成結果(図6)にIEA法を適用して高エネルギー成分が抽出可能かどうか確認を行った。

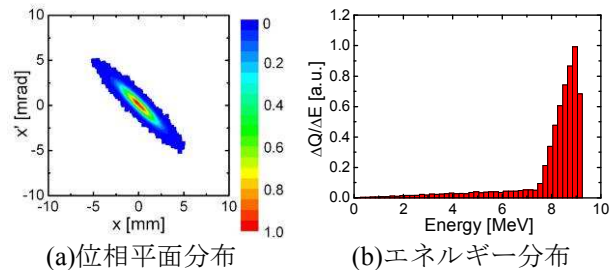


図5 : テスト分布

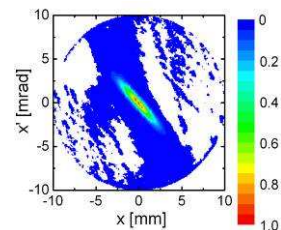
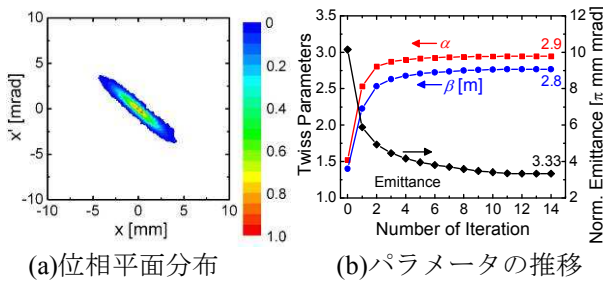


図6 : テスト分布シミュレート結果

IEA法をテスト分布に対するシミュレーションの結果に適用した結果を図7に示す。IEA法により中心部の強度の強い部分のみが切り出されているのが見て取れる。また、繰り返しを重ねる毎に、Twiss parameters ( $\alpha$ 、 $\beta$ )および規格化エミッタンスがそれぞれ2.9、2.8 m、 $3.3\pi$  mm mradに収束している事が分かる。初期分布の高エネルギー成分(>8MeV)の $\alpha$ 、

$\beta$ 、規格化エミッタンスはそれぞれ2.9、3.1 m、3.3 $\pi$  mm mradであり、処理後の相対誤差はそれぞれ10%以内であり、本手法で低エネルギーテイルの影響を除去する手法として使用可能であることを確認することができた。



(a)位相平面分布 (b)パラメータの推移  
図7：楕円フィット結果

### 4.3 実験結果への適用

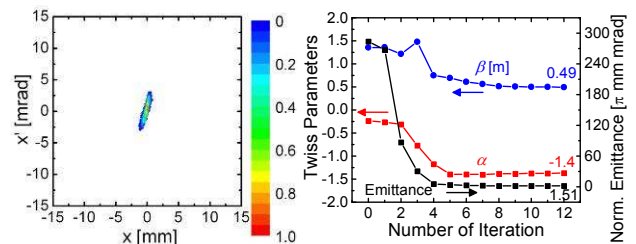
図3(a)、(b)にIEA法を適用した結果を図8、9に示す。4.2の結果同様、中心部の強度の強い部分のみを抽出する事に成功し、パラメータも一定値に収束している。IEA法の結果、得られた規格化エミッタンスはx方向1.5 $\pi$  mm mrad、y方向1.3 $\pi$  mm mradであった。この結果はdog-leg下流での実験結果にIEA法を適用した結果(x方向4.7 $\pi$  mm mrad、y方向3.0 $\pi$  mm mrad)と一致しなかった。原因としては、dog-leg下流でx方向のディスパージョンを0にできていないため計測に誤差が生じていること、トランスポート中でのエミッタンス増大等が挙げられるが、原因は不明である。

そこで、電子銃直後での計測結果の妥当性を示すため、粒子軌道計算コードPARMELAを用いて、我々が用いている4.5空洞熱陰極高周波電子銃のシミュレーションを行った結果との比較を行った。シミュレーションにより得られた四重極電磁石Q1入り口での位相平面分布を図10に示す。水平方向の位相平面分布上で、x'が正の方向に低エネルギー成分が伸びているのはsweep magnetおよび、補正用のステアリングマグネットによる効果である。

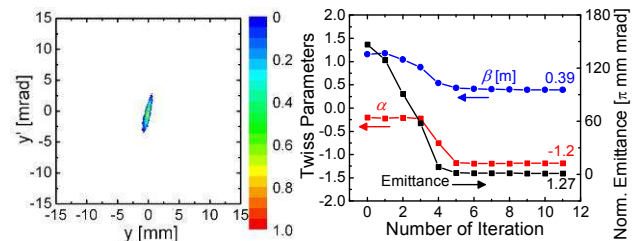
シミュレーション結果中の8MeV以上の粒子と再構成結果にIEA法を適用した結果のエミッタンス、Twiss parameters及び位相平面上での回転角 $\phi(=\tan^{-1}(\sqrt{(1+\alpha^2)}/\beta))$ 、を表1に示す。位相平面上での回転角は良く一致し(それぞれ約75度)、IEA法の結果を支持した。しかし、エミッタンスは実験結果がシミュレーション結果の約2倍も大きく、Twiss parametersも大きく異なっている。これらの原因としては、蛍光板の滲み、back-bombardment現象の影響によるエミッタンス増大等が挙げられる。

## 4. 結論

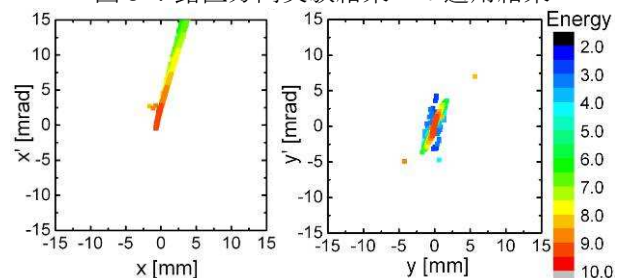
エネルギーフィルタ上流、下流での比較実験により、低強度の分布が広範囲に現れるという低エネルギーテイルの影響が実験的に示された。



(a)位相平面分布 (b)パラメータの推移  
図8：水平方向実験結果への適用結果



(a)位相平面分布 (b)パラメータの推移  
図9：鉛直方向実験結果への適用結果



(a)水平方向 (b)鉛直方向  
図10：PARMELAによるシミュレーション結果

表1：実験値とPARMELA結果(>8MeV)との比較

	Exp. x	Exp. y	Sim. x	Sim. y
規格化エミッタンス [ $\pi$ mm mrad]	1.5	1.3	0.73	0.79
$\alpha$	-1.4	-1.2	-4.9	-1.9
$\beta$ [m]	0.49	0.39	1.4	0.71
$\phi$ (回転角[度])	74	76	75	74

この低エネルギーテイルの影響を除去する手法として、楕円近似を利用したIEA法を導入し、実験結果に適用したところ、PARMELAによるシミュレート結果と位相平面上での回転角がそれぞれ約75度と良く一致したが、エミッタンスは2倍ほど大きく算出された。

今後はエネルギー分布の影響が無いスリット法との比較実験により、IEA法の信頼性を向上させると共に、電子銃を様々な運転条件で動作させ、その性能評価を行う予定である。

## 参考文献

[1] C.B.McKee, et al., NIM A358, p.264 (1995).  
[2] H.Zen, et al., Proc. of FEL2005, p.592 (2005)  
[3] T.Kii, et al., Proc. of FEL2005, p.584 (2005).  
[4] T.Kii, et al., NIM A507, p.340 (2003)