

大強度イオンビーム用ペッパーポット型エミッタンス測定器開発の現状 CURRENT STATUS OF DEVELOPING PEPPER-POT EMITTANCE MONITOR FOR HIGH-INTENSITY ION BEAM

小高康照^{*A)}, 鎌倉恵太^{A)}, 山口英斉^{A)}, 今井伸明^{A)}, 酒見泰寛^{A)}, 松崎浩之^{B)}, 大西純一^{C)}
Yasuteru Kotaka^{*A)}, Keita Kamakura^{A)}, Hidetoshi Yamaguchi^{A)}, Nobuaki Imai^{A)}, Yasuhiro Sakemi^{A)},
Hiroyuki Matsuzaki^{B)}, Jyun-ichi Ohnishi^{C)}

^{A)} CNS, University of Tokyo

^{B)} MALT, University of Tokyo

^{C)} RIKEN Nishina Center

Abstract

At the CNS, The University of Tokyo, the experiment to measure the electric dipole moment of Francium (Fr) at the highest measurement accuracy is underway. Fr is generated by a nuclear fusion reaction by irradiating a gold target with $^{18}\text{O}^{6+}$ beam accelerated to 7 MeV/u by the RIKEN AVF Cyclotron. To achieve the accuracy, a beam intensity of 3 μA or higher is required. However, the beam transport efficiency is 66 % on average when the beam intensity exceeds 10 μA . To improve the beam transport efficiency for high intensity ion beams, we are developing a pepper-pot emittance monitor (PEM). To evaluate the measurement error of the PEM, beam tests were performed at the Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator (MALT), The University of Tokyo. We estimated the beam trajectories from the beam distributions at three different positions on the straight beamline, and compare the trajectories calculated using the measured emittances by PEM. As the beam angle measurement error is affected by the distance between the fluorescent screen and the mask of PEM, we evaluated two types of the distances, 129.6 mm and 269.6 mm. It was found that the former and latter distances gave 1.3~1.7 and 0.6~0.8 mrad as beam angle measurement errors, respectively. To reduce the measurement error and lengthen the object distance between PEM and camera in parallel, we tried to use the camera having 2592×1944 pixels and a tele lens with a focal length 300 mm. The object distance of 4.1 m was achieved. The measurement error was not improved because the distortion caused by lens system was larger.

1. はじめに

原子核科学研究センター (CNS) において世界最高精度のフランシウム (Fr) の電気双極子能率 (EDM) 測定を目指した実験が進んでいる [1]。Fr は理研 AVF サイクロトロンで 7 MeV/u に加速した酸素イオン ($^{18}\text{O}^{6+}$) ビームを金 (Au) 標的に照射し、核融合反応で生成する。世界最高精度を得るために 3 μA (400 W) 以上の酸素イオンビームが必要である。実験装置のある実験室には 3 つのビーム輸送ラインがあり、それらの平均ビーム輸送率はビーム強度が 10 μA を越えると平均 66 % と低下する。この原因はビーム強度増加に伴うエミッタンス増大と考えているが既存のエミッタンス測定器は冷却能力不足で大強度ビームを測定できない [2]。そこで大強度イオンビームのエミッタンスが測定できるペッパーポット型エミッタンス測定器 (PEM) [3,4] を開発し、測定結果を用いてビーム輸送率低下の原因を調査しビーム輸送方法を最適化する計画である。

ECR イオン源のビーム用に開発した PEM [5,6] を基に運動エネルギーが 7 MeV/u 程度で 400 W 以上のビームに対応するように 3 項目を追加開発している。1 つ目はカメラの放射線損傷低減のため、ビームラインからカメラを離すカメラ光学系構築である。現状のカメラと蛍光板間距離 (撮影距離) は 2.5 m だが、今回焦点距離 300mm の望遠レンズにより撮影距離を 4.1 m に拡張できた。2 つ目は測定精度向上である。AVF サイクロトロンビームの 95 % エミッタンスは 20π mm-mrad 程度

と ECR イオン源ビームの約 1/10 なのでより高い測定精度が求められ、EDM 実験の標的へのビーム軌道計算には角度測定誤差が 0.3 mrad 以下が必要と昨年報告した。今回は製作した PEM の測定誤差を見積もるためのビーム照射テスト結果を述べる。3 つ目はビーム照射による PEM の加熱を回避するため短時間測定を目指したビームシャッター機構であり、昨年 0.27 秒に達したことを報告した [7,8]。

2. 測定誤差確認ビーム照射テスト

目的は製作した PEM の測定誤差を明確にすることである。我々はビームエミッタンス測定値を初期値としてビーム軌道計算を行いビーム輸送系を最適化する計画である。したがって測定誤差によって生じるビーム軌道計算結果と実際のビーム軌道の差を明確にしなければならない。また想定していない原因不明の誤差が含まれている可能性もあり、その有無も明確にしなければビーム軌道計算結果の信頼性は得られない。さらに製作した PEM の部品毎に測定誤差要因を明確にすれば、設置場所の空間的な制約などを考慮して改良すべき部品の選別ができる。

測定誤差は PEM の部品や構造から直接的に推測できる。しかし原因不明の誤差があるかもしれない、その有無はビーム照射テストを行い、PEM 測定結果を別のビーム診断器と比較することで発見できる。そこで別のビーム診断器で測定した真と見なせるエミッタンスと比較することにより誤差を明確にする手段を取った。比較の差が誤差によって生じると考え、PEM の構造から推定できる測定誤差候補を真と見なせるエミッタンス

* kotaka@cns.s.u-tokyo.ac.jp

スに擬似的に導入してエミッタンスを再計算した結果と PEM 測定結果が一致すれば、推定した誤差候補は正しいとする。差があれば他の誤差要因があるので別途調査する。この手順を差が無くなるまで繰り返す。

ビームライン上の異なる 3 つの位置のビーム分布を用いてエミッタンスが計算できる。ビーム方向に垂直な面の水平方向を x 、鉛直方向を y とし、それぞれの角度を x' 、 y' とする。位置・角度空間におけるビーム分布の分散・共分散を σ_{ij} で表す。添え字 i, j は (x, x', y, y') が任意に入る。ただしビームの x と y 成分に結合がない場合は独立に扱えるので、 x 方向は i が x 、 j が x' 、 y 方向は i が y 、 j が y' と限定する。また $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ なので σ_{ji} を代表して使う。ここではビーム輸送がドリフト転送なので 3 つのビーム分布の上流側の 2 つの距離を L_1 、下流側の 2 つの距離を L_2 とすると Eq. (1, 2) が成り立つ。3 つの位置における σ_{ii} 、 σ_{ji} 、 σ_{jj} には上流から (1)(2)(3) と番号をつけた。3 つの σ_{ii} が測定値なので未知数 6 個の連立方程式となり、全 σ マトリックス成分が解ける。我々はこの方法で算出したエミッタンスを真と見なして、PEM 測定結果と比較する。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{ii}(2) \\ \sigma_{ji}(2) \\ \sigma_{jj}(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2L_1 & L_1^2 \\ 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{ii}(1) \\ \sigma_{ji}(1) \\ \sigma_{jj}(1) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{ii}(3) \\ \sigma_{ji}(3) \\ \sigma_{jj}(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2L_2 & L_2^2 \\ 0 & 1 & L_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{ii}(2) \\ \sigma_{ji}(2) \\ \sigma_{jj}(2) \end{pmatrix} \quad (2)$$

テストは東京大学タンデム加速器研究施設 (MALT) [9] において進めている。タンデム加速器のビームは低エミッタンスなので測定誤差の影響が大きく現れる。照射するイオン種は $^{12}\text{C}^{4+}$ 、運動エネルギー 24 MeV、ビーム強度 $1 \text{ e}\mu\text{A}$ 程度である。PEM は Fig. 1 の赤破線で示した PIXE コースに設置した。本実験の

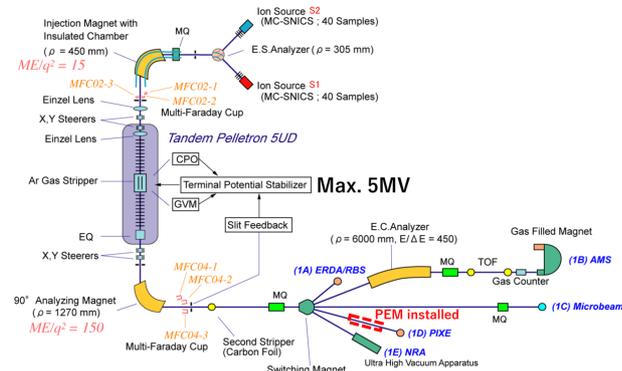


Figure 1: Tandem accelerator and beam lines of Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator (MALT), The University of Tokyo.

ビームラインには 2 台の National Electrostatics Corp. 製のワイヤ回転式 BPM BPM80 [10] が設置してあり、上流側を BPM1、下流側を BPM2 と呼ぶ。PEM はその間に設置されており (Fig. 2)、PEM 自身を 3 つめの BPM とできる。PEM のビーム分布に影響する誤差要因はマスク穴径と穴の位置誤差なので 0.1 mm 程度である。

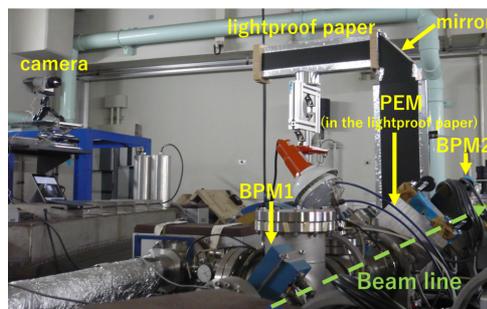


Figure 2: The location of the camera, PEM, BPM1, and BPM2 around the beam line.

BPM80 はビーム入口開口径が 25 mm であり、螺旋状の直径 0.5 mm のモリブデンワイヤが回転し、ビームがワイヤに当たって生成される二次電子の量をビーム強度とし、基準時間からの経過時間に対応してビーム強度を出力する。BPM80 の説明書 [10] によると回転速度 F は電源周波数 60 Hz 時に 19 rps とある。MALT は 50 Hz なので換算すると F は 15.8 Hz となる。モリブデンワイヤのビーム軸に垂直な面への射影は正弦曲線となり、回転軸に垂直な面への射影は直径 R が 27 mm の円の方角 45 度分となる。回転軸を x 軸に対して 45 度回転した方向から設置するとワイヤ回転の半周毎に x 方向と y 方向のスキャンが交互に行われる。BPM80 にはワイヤの 1 回転に同期したトリガが備わっており、さらにワイヤが x 軸、 y 軸を通過する時に基準信号が発生されるので、トリガから x 軸、 y 軸を通過するまでの時間 (t_x, t_y) が分かる。トリガからの任意の時刻 T のワイヤ位置 (x_w, y_w) は Eq. (3) で示される [11]。

$$\begin{cases} x_w = \sqrt{2\pi} \cdot R \cdot F \cdot (T - t_x) \\ y_w = \sqrt{2\pi} \cdot R \cdot F \cdot (T - t_y) \end{cases} \quad (3)$$

我々が製作した PEM を Fig. 3 に示す。マスクには 2 mm 間隔に径 0.3 mm の穴が格子状に開けられている。測定では穴の中心位置をビーム位置とみなすので、穴径に応じた位置誤差が生じる。穴を通過するビームは一様分布すると見なすと分布の標準偏差は穴径 0.3 mm を $\sqrt{12}$ で割った値になるので、マスクにおけるビームの位置誤差は 0.1 mm とする。

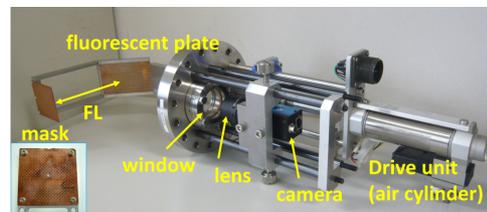


Figure 3: The names of pieces constituting PEM.

想定した誤差は PEM マスク穴径によるビーム位置誤差の他に蛍光板で測定されるビーム位置誤差がある。今回のテストのカメラ光学系は Fig. 3 と異なり Fig. 2 のように鉛直上方からビームラインに設置した PEM の窓の上方 640 mm にある光路を 90 度曲げる鏡とそこから

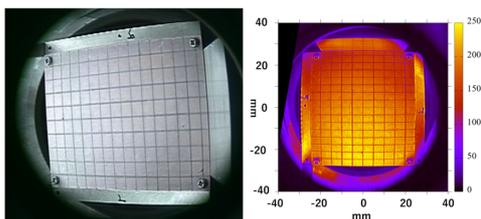


Figure 4: The left view is the fluorescent screen image taken by camera with tele lens from 2.5 m away. The right view is the transformed image by projective transform.

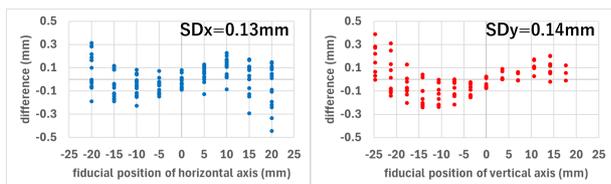


Figure 5: The relationship between the displacement of transformed positions with respect to designed positions.

1900 mm 離れたカメラから成る。鏡と PEM の窓の間には中間レンズがある [2]。この条件で得られた蛍光板画像を Fig. 4 左側に示し、蛍光板の格子状座標系を用いて射影変換した画像を Fig. 4 右側に示す。射影変換後の格子点位置の格子点設計位置からの差と格子点設計位置の関係が Fig. 5 である。差の標準偏差は x 方向 0.13 mm、y 方向 0.14 mm となり、この値を蛍光板で測定されるビーム位置誤差と考える。

3. ビーム照射テストの結果

今回は Fig. 3 に示すマスクと蛍光板中心間距離 (FL) を Fig. 6 に示す様に 129.6 mm と 269.6 mm (共に設計値) の 2 種類をテストした。FL が角度誤差に影響するので、テストの信頼性のために少なくとも 2 種類は必要と考えた。FL の誤差は 0.1 mm 程度なので無視する。FL を変えるとマスクと BPM1、BPM2 への距離が変わるので、それらの距離も Fig. 6 に示した。

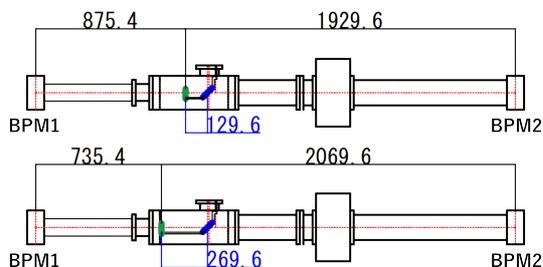


Figure 6: The position of mask (green) and fluorescent screen (blue) of PEM. PEM is set between BPM1 and BPM2. The FL of top views and bottom views are 129.6 mm and 269.6 mm, respectively.

FL=129.6 mm の場合の PEM で測定した蛍光板のビーム像と測定結果から得られたビームベクトルを Fig. 7、

マスク位置におけるビーム分布を Fig. 8 に示す。2 mm 間隔に格子状に穴を開けたマスクをビーム軸に対し 45 度回転して使用したのでマスクの穴列同士の間隔は x, y 方向共に $\sqrt{2}$ mm となり、蛍光板では Fig. 7 左図のような配置のビーム像となる。また同時にオシロスコープで測定して時間軸を x, y 軸に換算した BPM1 と BPM2 のビーム分布を Fig. 9 に示す。

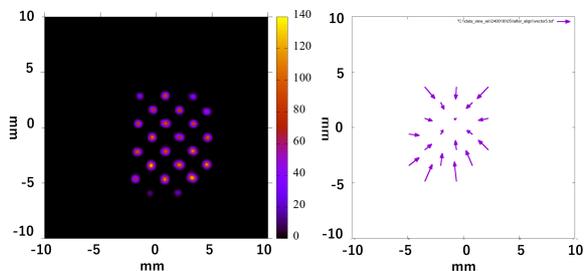


Figure 7: The left view is the beam image on the fluorescent screen and the right view is beam vector as FL is 129.6 mm.

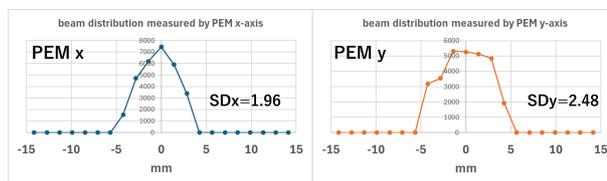


Figure 8: The beam distribution on the PEM mask measured by PEM as FL is 129.6 mm.

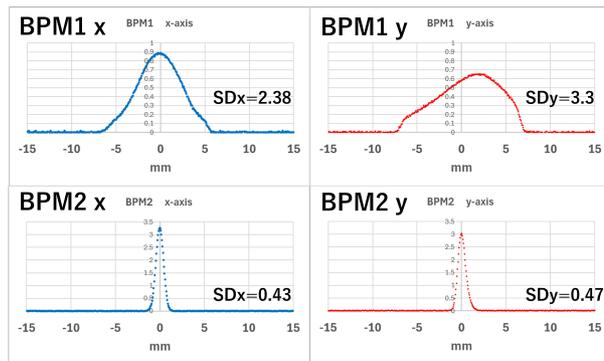


Figure 9: The beam distribution of BPM1 and BPM2 as FL is 129.6 mm.

ビーム分布の x, y 方向の標準偏差をそれぞれ SDx, SDy とすると、BPM1、PEM、BPM2 の (SDx, SDy) は順に (2.4, 3.3)、(2.0, 2.5)、(0.4, 0.5) となる。これらを使った場合、Eq. (1, 2) の連立方程式の解は得られなかった。ビーム分布が左右対称ではなく、正規分布でもないためと思われる。そこで PEM の (SDx, SDy) をそれぞれ 0.2, 0.1 を減らして (1.8, 2.4) とすると解は得られ、Eq. (4) となった。σ の添え字は (1, 2, 3, 4) が (x, x', y, y') を示している。また σ_{ii} , σ_{ji} , σ_{jj} ($i=1, 3, j=2, 4$) の単位はそれぞれ mm^2 , $\text{mm}\cdot\text{mrad}$, mrad^2 とした。ビーム幅と比較し

て 0.2 mm を減らす影響は小さいのでこの結果を採用する。PEM の測定結果から x と y の結合は見られないので σ_{31} 、 σ_{32} 、 σ_{41} 、 σ_{42} 及びその対角成分は 0 とした。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.1 & -1.2 & 0 & 0 \\ -1.2 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5.8 & -2.5 \\ 0 & 0 & -2.5 & 1.1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

一方、FL=269.6 mm の場合の PEM で測定した蛍光板のビーム像とビームベクトルを Fig. 10 に、マスク位置におけるビーム分布を Fig. 11 に示す。また同時にオシロスコープで測定した BPM1 と BPM2 のビーム分布を Fig. 12 に示す。

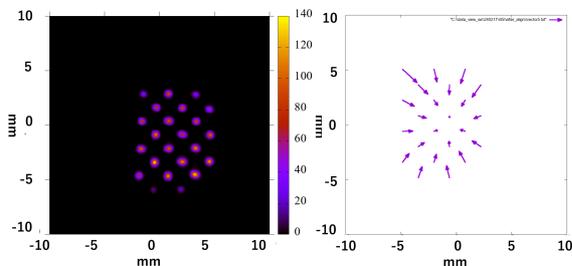


Figure 10: The left view is the beam image on the fluorescent screen and the right view is beam vector as FL is 269.6 mm.

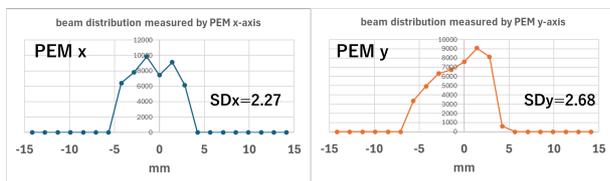


Figure 11: The beam distribution on the PEM mask measured by PEM as FL is 269.6 mm.

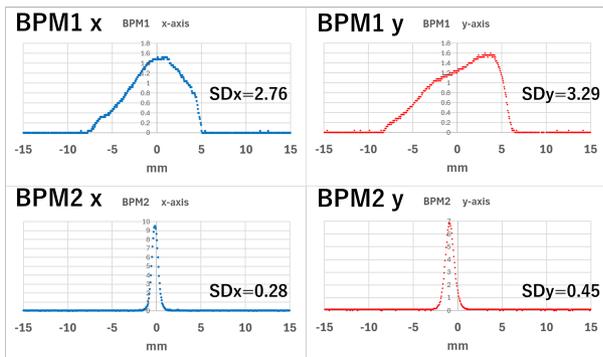


Figure 12: The beam distribution of BPM1 and BPM2 as FL is 269.6 mm.

BPM1、PEM、BPM2 の (SDx, SDy) は順に (2.8, 3.3)、(2.3, 2.7)、(0.3, 0.5) であるが、Eq. (1, 2) の連立方程式は FL=129.6 mm と同様に解はなかった。PEM の (SDx, SDy) をそれぞれ 0.2、0.2 減らして (2.1, 2.5) とすると

解は Eq. (5) (添え字、単位は Eq. (4) と同じ) となった。FL=129.6 mm と同じ理由でこの結果を採用する。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.4 & -1.9 & 0 & 0 \\ -1.9 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6.5 & -2.6 \\ 0 & 0 & -2.6 & 1.0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

4. 測定誤差の評価について

Equation (4, 5) の成分を用いて 4 変数正規乱数を生成する。4 変数は (x, x', y, y') を成分にもつビーム粒子に相当し、1000000 粒子を生成した。これを BPM2 位置までドリフト転送して作ったビーム分布が FL=129.6 mm の場合は Fig. 9、FL=269.6 mm の場合は Fig. 12 の BPM2 の各ビーム分布に一致することは確認した。次にこれらの粒子群を計算によって径 0.3 mm の穴を 1 mm 間隔に開けたマスクを通して蛍光板までドリフト転送する。各粒子の蛍光板に転送された位置 (x_f, y_f) に蛍光板の位置誤差を 1σ とする正規分布に従って生成した乱数 (x_e, y_e) を誤差として加える。誤差を加えられた各粒子の蛍光板における位置 (x_f+x_e, y_f+y_e) とマスクの各穴の中心位置 (x_c, y_c) を使って角度 (x'=(x_f+x_e-x_c)/FL、y'=(y_f+y_e-y_c)/FL) を再計算する。これにより想定した誤差を含む (x, x', y, y') 成分を持つ粒子群が生成され、これらの粒子群を計算により BPM2 位置までドリフト転送し、ビーム分布を作る。これを PEM 測定結果を用いて BPM2 位置までドリフト転送して作ったビーム分布と比較する。この方法を「誤差シミュレーション」と名付ける。その比較の結果を FL=129.6 mm の場合を Fig. 13 上側、FL=269.6 mm の場合を Fig. 13 下側に示す。

Figure 13 から、FL=129.6 mm、269.6 mm の両方において、PEM 測定結果を用いて BPM2 位置までドリフト転送して作ったビーム分布は、蛍光板における位置誤差を 0.2 mm とした場合の誤差シミュレーションで得られたビーム分布とほぼ一致する。計算で使った蛍光板の位置誤差 0.2 mm は Fig. 5 に示した x 方向 0.13 mm、y 方向 0.14 mm よりも大きい。測定したビーム分布が正規分布ではなく左右対称でもないのではこの差が生じるのかもしれない。PEM の位置測定誤差は FL に関係なくマスク穴径だけで決まるので 0.1 mm となり、蛍光板の位置誤差を 0.2 mm とすると角度測定誤差は FL=129.6 mm の時は 1.7 mrad、FL=269.6 mm の時は 0.8 mrad と見積もられる。一方、Fig. 5 に示した蛍光板の位置誤差を用いると角度測定誤差は FL=129.6 mm の時は 1.3 mrad、FL=269.6 mm の時は 0.6 mrad と見積もられる。FL=129.6 mm の時は 1.3~1.7 mrad、FL=269.6 mm の時は 0.6~0.8 mrad の角度誤差範囲に限定できたと考えている。

この差は未知の誤差の可能性を示しているので原因を追求したいと考えている。例えば推定した σ マトリックスが過小である可能性もある。今回は Eq. (4, 5) を算出するために PEM のビーム分布の標準偏差を 0.2 mm 程度減らしたが BPM1、BPM2 のビーム分布を増やす方法もあった。ワイヤ回転式 BPM については、ビーム位置やビーム強度によりビーム強度測定能率が異なる可能性もあるので調査する。

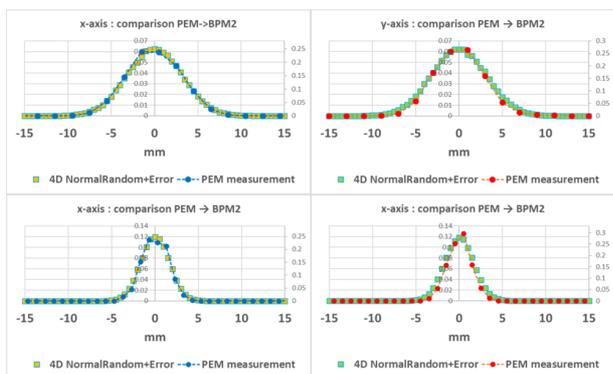


Figure 13: The comparison of beam distributions made after transporting the 4-variable normal random numbers generated using estimated σ matrix with error and the PEM measurement to the location of BPM2. The left view is the x-axis distribution, blue circles are PEM measurement and orange squares are 4-variable normal random numbers with error. The right view is the y-axis distribution, red circles are PEM measurement and green squares are 4-variable normal random numbers with error. The FL of top views and bottom views are 129.6 mm and 269.6 mm, respectively.

5. カメラ撮影距離の拡張

ビームに起因する放射線によるカメラセンサの損傷をなるべく低減するため、カメラをビームラインからさらに遠ざけ撮影距離を拡張する手段として焦点距離 300 mm の望遠レンズを試みた。これと並行して蛍光板における位置誤差を改善するために画素数が 2592×1944 のカメラを試みた。この画素数は Fig. 4 のカメラの画素数 720×480 の約 15 倍となる。その結果、撮影距離は 4.1 m に拡張できた。その時得られた蛍光板画像を Fig. 14 左に、射影変換された画像を右に示す。撮影距離を 4.1 m に拡張しても、蛍光板全体像を撮影できている。次に Fig. 5 と同様の処理をして得られた蛍光板座標の格子点の設計位置と射影変換された位置の差の関係を Fig. 15 に示す。差の標準偏差は Fig. 4 とほとんど変わっていない。差の分布の傾向も Fig. 15 は Fig. 4 と類似している。これは蛍光板に描いたカメラ光学系の中にあるレンズのひずみの影響が大きいためと考えられ、蛍光板の位置誤差を小さくするためには、これらの要因を改善していく必要がある。

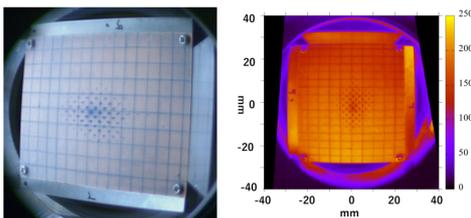


Figure 14: The left view is the fluorescent screen image taken by camera with tele lens from 4.1 m away. The right view is the transformed image by projective transform.

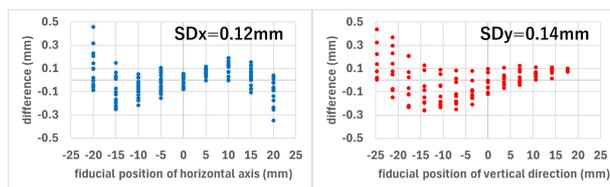


Figure 15: The relationship between the displacement of transformed positions with respect to designed positions.

6. まとめ

2 台の BPM と PEM による 3 つのビーム分布を用いて計算したビームの σ マトリックスを用いて 4 変数正規乱数を生成し、これを真と推定されるビーム粒子群とし、これに想定している誤差を加えた結果と PEM の測定結果を比較したところある程度一致し、想定した誤差の範囲は限定できた。しかしながら比較では完全に一致しておらず、不明な部分があるので原因は追及する。カメラの放射線損傷低減のための撮影距離の拡張と高解像度カメラの導入については蛍光板のビーム測定位置誤差は改善されなかったが、撮影距離を 2.5 m から 4.1 m まで拡張することができた。

謝辞

この研究を進めるにあたり、下浦享氏、加瀬昌之氏、後藤彰氏、畑中吉次氏におかれましては多大なご指導ご支援を頂きました。MALT における実験においては徳山裕憲氏、山形武靖氏におかれましては多大なご支援を頂きました。ここに感謝の意を申し上げます。

本研究は、JSPS 科学研究費助成事業（科研費）20K12481 の助成を受けています。

参考文献

- [1] Y. Sakemi *et al.*, “Fundamental physics with cold radioactive atoms”, *AIP Conf. Proc.*, vol. 2319, no. 1, pp. 080020, 2021. doi:10.1063/5.0037134
- [2] Y. Kotaka *et al.*, “Current status of developing 4D emittance monitor for ion beams accelerated by RIKEN AVF Cyclotron”, *Proc. PASJ2021*, Takasaki (Online meeting), Japan, Aug. 2021, pp. 873-877.
- [3] T. Hoffmann *et al.*, “Emittance measurements of high current heavy ion beams using a single shot pepperpot system”, *AIP Conf. Proc.* 546, 432 (2000).
- [4] L. E. Collins and P. T. Stroud, “Extraction of high current ion beams with low divergence”, *Nucl. Instr. and Meth.* 26 (1964), pp. 157-166.
- [5] Y. Kotaka *et al.*, “Development of the calculation method of injection beam trajectory of RIKEN AVF Cyclotron with 4D emittance measured by the developed pepper-pot emittance monitor”, *Proc. IBIC2019*, Malmö, Sweden, Sep. 2019, pp. 351-354. <http://accelconf.web.cern.ch/ibic2019/papers/tupp022.pdf>
- [6] Y. Kotaka *et al.*, “Evaluation of beam orbit calculation method and improvement of 4 dimensional emittance monitor for the injection line of RIKEN AVF cyclotron”, *Proc. PASJ2019*, Kyoto, Japan, Jul.-Aug. 2019, pp. 1109-1113.

- [7] Y. Kotaka *et al.*, “Development of pepper-pot emittance monitor for high-intensity ion beam accelerated by RIKEN AVF Cyclotron”, Proc. IBIC2023, Saskatoon, Canada, Sep. 2019, pp. 339-342. <https://ibic2023.vrws.de/papers/wep006.pdf>
- [8] Y. Kotaka *et al.*, “Current status of developing pepper-pot emittance monitor for high-intensity ion beams accelerated by RIKEN AVF Cyclotron”, Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug-Sep. 2023, pp. 484-488.
- [9] Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator website, The University of Tokyo, <https://malt.um.u-tokyo.ac.jp/>
- [10] National Electrostatics Corp., Instruction Manual for Operation and Service of Beam Profile Monitor Model BPM80.
- [11] 鎌倉恵太 (2013), 高速エミッタンス測定システムの開発, 大阪大学大学院理学研究科修士論文.