

理研 AVF サイクロトロンで加速されたイオンビームの 4D エミッタンス測定器開発の現状

CURRENT STATUS OF DEVELOPING 4D EMITTANCE MONITOR FOR ION BEAMS ACCELERATED BY RIKEN AVF CYCLOTRON

小高康熙^{*A)}、鎌倉恵太^{A)}、山口英斉^{A)}、今井伸明^{A)}、酒見泰寛^{A)}、下浦享^{A)}
加瀬昌之^{B)}、大西純一^{B)}、後藤彰^{B)}、畑中吉治^{C)}

Yasuteru Kotaka^{*A)}, Keita Kamakura^{A)}, Hidetoshi Yamaguchi^{A)}, Nobuaki Imai^{A)}, Yasuhiro Sakemi^{A)}
Susumu Shimoura^{A)}, Kase Masayuki^{B)}, Jyun-ichi Ohnishi^{B)}, Akira Goto^{B)}, Kichiji Hatanaka^{C)}

^{A)}CNS, University of Tokyo

^{B)}RIKEN Nishina center

^{C)}RCNP, Osaka University

Abstract

At the Center for Nuclear Study (CNS), a high-intensity Francium (Fr) generation experiment aiming at the highest measurement accuracy of the electric dipole moment 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 pμA or higher is required. This experimental device is in the E7 laboratory downstairs of the AVF Cyclotron, where there is also CNS RI beam separator (CRIB) for the Nuclear Astrophysics experiments, and recently, RI production experiments have been added. Thus, high intensity ion beams are requested, but the beam transport efficiency is as low as 60 % on average when the beam intensity exceeds 5 eμA. Then, we planned to improve the beam transport efficiency for high intensity ion beams and are developing a pepper-pot emittance monitor without cooling. Measuring four-dimensional emittance (x, y, x', y'). It is also useful for the beam trajectory calculation of the rotated quadrupole and dipole magnet on the beam line to E7 and the beam loss estimation. However, it is found the digital camera of the pepper-pot emittance monitor is necessary to take measures against radiation damage to use it in the AVF Cyclotron room. Then, we consider frequent replacement of low-end cameras and shielding it.

1. はじめに

原子核科学研究センター (CNS) により、世界最高精度のフランシウム (Fr) の電気双極子能率測定を目指した大強度 Fr 製造が進行中である [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) に照射し、核融合反応で生成する。このために 3 pμA 以上、最大 25 pμA のビーム強度が必要である。この実験装置は AVF サイクロトロン階下の E7 実験室にあり、ここには CNS の宇宙核物理実験の低エネルギー不安定核生成分離装置 (CRIB) [2] もあり、最近 RI 製造用標的も増設され大強度イオンビームの需要が増している。一方、各実験装置までのビーム輸送率はビーム強度が 5 eμA 超の場合は平均 6 割と低い。この問題解決のために、大強度イオンビームに対して冷却不要とされるペッパーポット型エミッタンス測定器 [3,4] を開発し、4次元エミッタンス (x, y, x', y') を測定し、ビーム軌道を最適化する計画である (x, y はそれぞれビーム横向き水平、鉛直方向を示す)。4次元エミッタンスにより、四極電磁石や偏向電磁石の回転によるビーム横向き成分の結合も理解でき、ビーム損失見積もりも可能となる。しかし、実用化のために測定器のデジタルカメラの放射線損傷対策が必要となり、遮蔽材と低性能カメラの高頻度交換を検討しており、この進捗状況を報告する。

2. E7 実験室へのビーム輸送問題

理研 AVF サイクロトロンと E7 実験室の 3 実験コースを Fig. 1 に示す。AVF サイクロトロン取出イオンビームは、AVF 出口から C01-C02 コースを 5.5 m 直進し、偏向電磁石 (DMC1) により鉛直下方に曲げられ、C11 コースを 2.745 m 直進し偏向電磁石 (DMC7) に達する。DMC7 を励磁せず、そのまま鉛直方向に進むコースが C12 で、Fr 生成用標的がある。一方、DMC7 で水平方向に曲げられたコースを E7A、E7B コースと呼び、両者は DMC7 を水平方向に回転して切り替える。CRIB 専用の E7A コースは、DMC7 が C01-C02 コースに対して上から見て時計回りに 10 度回転しており、さらに C11 コースの二連四極電磁石 (QDC11) も同じ方向に 10 度回転している。これは DMC7 の回転によるビーム横向き成分の結合を QDC11 の回転で解消するためらしい [5,6]。E7B コースは RI 製造や学生実験用で、DMC7 が C01-C02 コースに対して上から見て時計回りに 30 度回転しており、QDC11 も同じ方向に時計回りに 20 度回転している。

2019 年から現在まで記録として存在する AVF サイクロトロン取出イオンビーム強度に対する C12, CRIB, E7B の実験装置までのビーム輸送率を Fig. 2 に示す。ビーム強度が 5 eμA 以下の平均輸送率が 0.78、5 eμA 超のビーム強度の平均ビーム輸送率は 0.65 となる。詳しく見ると、5~20 eμA は平均 0.69、20~40 eμA は平均 0.62 となり、ビーム強度が増えるとビーム輸送率は低下する。

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

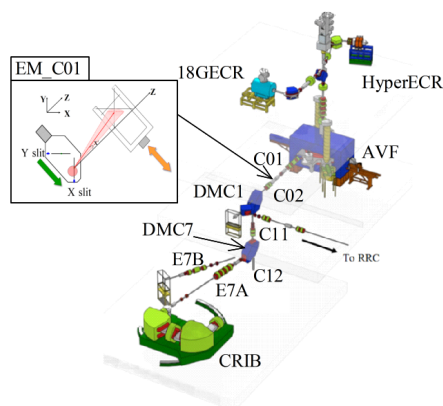


Figure 1: The beam line to C12, CRIB, E7B from AVF.

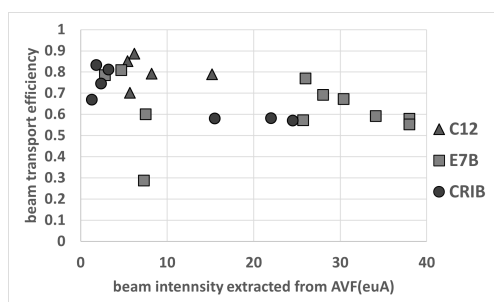


Figure 2: The relationship between beam intensity and transport efficiency to C12(Δ), E7B($\square$), and CRIB($\circ$).

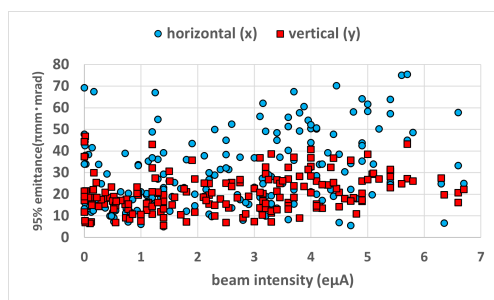


Figure 3: The relationship between beam intensity and 95 % horizontal ($\circ$) and vertical ($\square$) beam emittance.

我々は、AVFサイクロトロンから取り出された2次元ビームエミッタンスをFig. 1に示したスリットとプロファイルモニタ (PFM) からなる測定器 (EM.C01)で測定してきた。Figure 3にビーム強度とx, y方向の95 %エミッタンスの関係を示す。ビーム強度が増すとエミッタンスが増大する傾向にある。Figure 2とFig. 3から、ビーム輸送率低下はエミッタンス増大が影響していると推測する。しかし、このEM.C01は冷却能力により100W程度までのビームしか測定できないため、それ以上のビームパワーのエミッタンスは分かっていない。したがって、Fig. 3のビーム輸送率低下の原因は、実際に大強度ビームエミッタンスを測定しなければ分からない。

3. 2次元エミッタンスによるビーム軌道計算

ビーム強度 $5.9 \text{ e}\mu\text{A}$ の $^{18}\text{O}^{6+}$ (5.5 MeV/u) のビームエミッタンスをビームチョッパーの Pulse Width Modulation(PWM) 制御で $3.6 \text{ e}\mu\text{A}$ にビーム強度を落として測定した結果を Fig. 4 に示す。得られた 95 % エミッタンスは x, y 方向それぞれ $51.5, 16.2 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ であった。

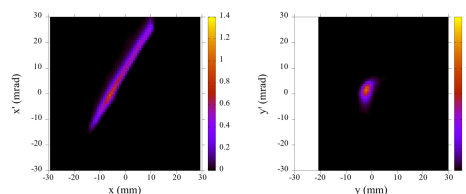


Figure 4: The measured beam emittance of $^{18}\text{O}^{6+}$ ion beam (5.5 MeV/u). The beam intensity is $3.6 \text{ e}\mu\text{A}$.

AVFサイクロトロン取出ビームは運動量の相対的変位 $\delta=\Delta p/p$ は0でなくxと相関があるが、本節では最小限のビーム幅を見るために $\delta=0$ とした最適ビーム軌道探索例を示す。エミッタンス測定で得られるx, y, x', y'方向の標準偏差 (SD) を初期値としたビーム軌道計算コード TRANSPORT [7] でC12標的までの最適ビーム軌道を探した。まずC01コース (Fig. 1) の三連四極電磁石後のPFMでx, y方向共に収束させ物点を作る。DMC1後のエミッタンス増大の抑制のため、DMC1途中でy方向を収束する。そして標的で分散関数 η を抑え、x, y方向共に収束する条件を探す。結果は、Fig. 5のように標的でy方向の η をほぼ0とし標的で収束したが、x方向収束はできなかった。

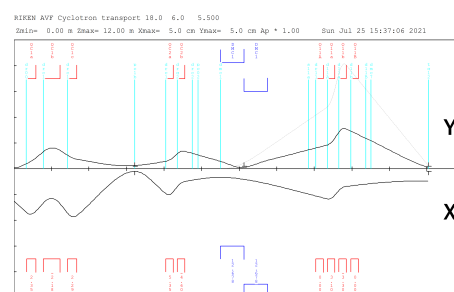


Figure 5: The optimized beam envelope for the existing beam transport system to C12 by TRANSPORT.

次にTRANSPORTの結果を元に全四極電磁石磁場を設定し、Fig. 4の分布を初期値とした自作ビーム軌道計算し、ビームエンベロープ (Fig. 6) とビーム損失を考慮してビーム輸送率を求めた。ここでEM.C01下流の四極電磁石に、3D磁場計算結果を使用しているので漏れ磁場が考慮されている。またビームラインの外壁との衝突による損失が計算できるのでビーム輸送率が得られる。ただし、2次元エミッタンスはxとy方向で独立なので、それぞれ独立に算出される。この場合の計算ビーム輸送率はx方向が92%, y方向も92%であった。標的ビームサイズは、位置分布のSDで示すと、x方向が4.5 mm、y方向が0.9 mmであった。現状のビーム輸送系では9

割程度のビーム輸送率は可能であるが、標的での収束はできないと見積もられた。

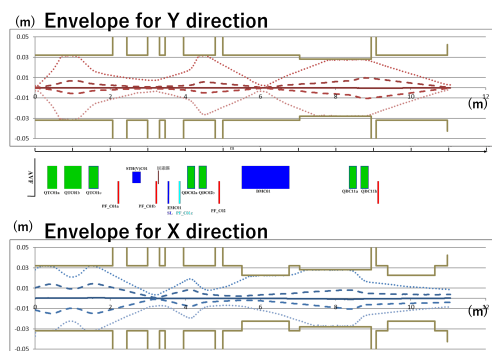


Figure 6: The beam envelope calculated by self-developed calculation method to estimate the beam transport efficiency for the existing beam transport system to C12.

既存のビーム輸送系では高ビーム輸送率でのビーム収束は難しいので、一案として Fig. 7 のように QDC11 の間に、仮想的に四極電磁石 (仁科加速器研究センターで使用されている有効磁極長 450 mm で 1 A あたりの磁場勾配 0.107 T/m) を増強してビーム軌道計算を行った。この場合の TRANSPORT 計算結果を Fig. 8 に示す。既存の電磁石系よりも標的に収束し、 η もほぼ 0 の解が得られた。これをもとにした自作ビーム軌道計算によるビームエンベロープを Fig. 9 に示す。ビーム輸送率は x 方向が 85 %, y 方向が 99 %, 標的での位置分布の SD は、x 方向が 2.7 mm, y 方向が 2.0 mm。四極電磁石の増強は有効であるが、まだ不十分と分かる。

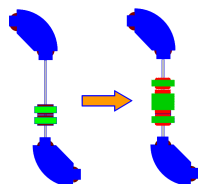


Figure 7: A quadrupole magnet is added between two existing magnets of QDC11.

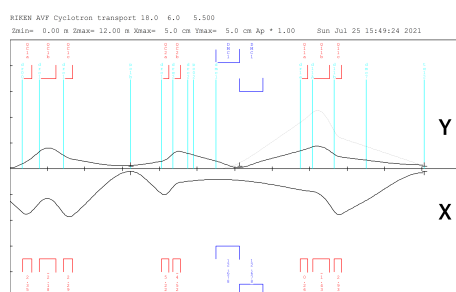


Figure 8: The optimized beam envelope for the intensified beam transport system to C12 by TRANSPORT. A quadrupole magnet is added to C11 course.

ところで、実際のビーム損失は x と y で異なるはずがないので、2次元エミッタンス測定でビーム輸送

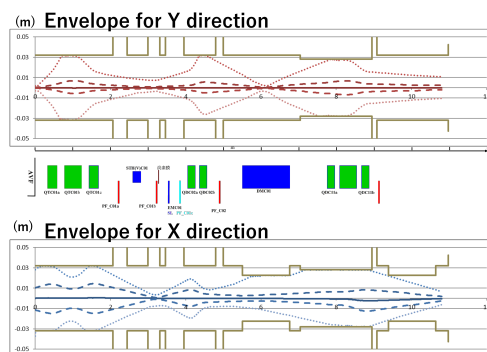


Figure 9: The beam envelope calculated by self-developed calculation method to estimate the beam transport efficiency for the intensified beam transport system to C12. A quadrupole magnet is added to C11 course.

率を議論するのは限界がある。また C12 は DMC7 と QDC11 の回転はないが、CRIB や E7B には回転がある。TRANSPORT は二極や四極電磁石の回転を考慮するが、おそらくビーム形状を正規分布とした統計的処理がされており、正規分布に合わないビーム軌道の最適化には参考にはなるが不十分と考える。我々の目的には 2 次元エミッタンスでは限界がある。

4. 大強度ビーム用エミッタンス測定器

今年 7 月に、7 MeV/u の $^{18}\text{O}^{6+}$ イオンビームを AVF サイクロトロンから 4 pμA 取り出し、75 % のビーム輸送率で標的に 3 pμA の供給を達成できた。ビームサイズは標的の金の溶融状態から径 10 mm 未満には収まっていた。すでに 4 pμA のビーム輸送が求められる現状である。それゆえに大強度のビームエミッタンス測定器の開発が求められる。100 W 以上、できれば kW 級の大強度ビームのエミッタンス測定器として、ペッパーポット型エミッタンス測定器 [3, 4] を候補とした。これは、ビームを照射して蛍光板で発光したビーム像をデジタルカメラで撮影するだけなので、ペッパーポットマスクが熱せられる前に撮影を終了すれば冷却の必要が無い。さらにペッパーポット型エミッタンス測定器は 4 次元エミッタンス (x, y, x', y') が測定できるので、2 節で述べた QDC11 や DMC7 の回転によるビーム横向き成分の結合も扱うことができ、3 節で述べたビーム損失の見積もりが可能となり、ビーム輸送率を考慮したビーム軌道計算が可能となる。我々の目的には最適な測定器である。

ペッパーポット型エミッタンス測定器は AVF 入射ビームで活用されており、技術的な問題はほぼ解決している [8, 9]。さらに必要なことはビーム照射時間の制御である。ビーム ON/OFF、測定器の挿入・退避は仁科加速器研究センター製インターフェイス NDIM を使用しイーサネット経由で遠隔操作する。デジタルカメラは GigE カメラ (イーサネット経由で制御するカメラ) で遠隔操作する。この場合は全行程は 1 秒以下と確認した。

試作品の写真を Fig. 10 に示す。マスクはビームを止める必要があり、厚さ 1 mm の銅板を用いた。理科年表のイオンの飛程・運動量曲線から見積もると [10]、 H^+ は 18 MeV, $^2\text{H}^+$ は 11 MeV/u, $^4\text{He}^{2+}$ は 16 MeV/u 以下

は止まる。現在の理研 AVF サイクロトロンは H^+ は 30 MeV, $^2H^+$ は 15 MeV/u まで加速できるので、そこまでは対応できない。Fr を生成するための 7 MeV/u の $^{18}O^{6+}$ は、 $^4He^{2+}$ の飛程と運動量の関係から換算でき、銅板ならば 0.11 mm で止まる。Table 1 に試作品の主な諸元を示す。角度精度は、後述する蛍光板の位置精度による。

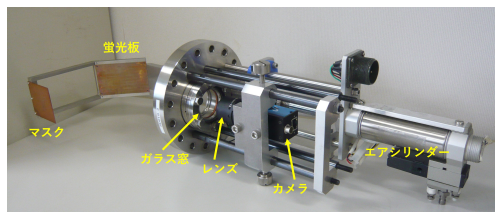


Figure 10: The picture of the prototype.

Table 1: The Specification of the Prototype

Radius of hall in mask	0.3 mm
Interval of hall (horizontal: x)	2 mm
Interval of hall (vertical: y)	1 mm
Effective area of fluorescent plate	$55 \times 50 \text{ mm}^2$
Distance from mask to fluorescent plate	130 mm
Promising position accuracy	0.1 mm

また蛍光板の座標校正法も更新した。AVF サイクロトロン室に設置を想定すると、入室が難しいためである。従来は真空チェンバーを大気にして、蛍光板を方眼紙と交換し、これを校正用としてデジタルカメラで撮影し、元に戻していた。カメラと蛍光板の位置関係が変化しなければこれで良いが、実際は変化する。測定器の駆動による衝撃や振動等が考えられる。したがって定期的な遠隔位置校正が必要である。そこで Fig. 11 左図のように蛍光板の銅基板に 5 mm 間隔の格子状線をけがきノギスでけがいた。蛍光剤塗布後も Fig. 11 右図のようにけがき線は目視できる。

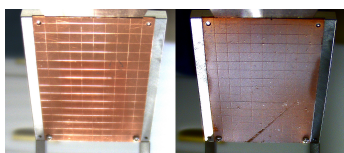


Figure 11: (left) The coordinate system of scratched lines on the copper plate (right) after pouring fluorescence agent.

けがき線の精度を調べるために方眼紙と比較した。まず Fig. 12 左上の銅板のけがき線画像から格子点のビットマップ座標を取得し、右上の方眼紙画像から対応する格子点のビットマップ座標を取得する。方眼紙の測定位置を橙十字マーク、けがき線の測定位置を青丸でプロットした図を Fig. 12 下に示す。各対応点の位置差の平均値と SD は水平方向が 1.8 ± 1.0 (pixel), 鉛直方向が 1.1 ± 1.4 (pixel) である。だいたい 1 pixel あたり 0.1 mm なので、目分量の測定誤差程度でけがけている。

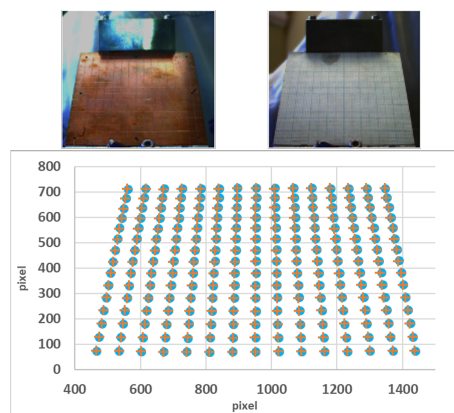


Figure 12: (Top) The left and right pictures are scratched lines and graph paper, respectively. (Bottom) The position of grid points of graph paper (+) and scratched lines (o).

試作品、遠隔制御系がほぼ完成したが、AVF サイクロトロン室のような放射線環境ではデジタルカメラの著しい損傷が推測された。そこで厚さ 100 mm のポリエチレンブロックでデジタルカメラを遮蔽して Fig 1 の C01 コースから 50 cm 程度離れたところに放置してその劣化を見たが、すぐにデジタルカメラの画素が劣化することがわかった。放射線によるカメラの劣化は避けがたいので、遮蔽を充実させ、安価な低性能カメラを使い、その劣化による交換頻度を増やす方針にした。画素数が減少し、解像度 (mm/pixel) の低下が予想されるので、低性能カメラに適切なレンズを組み合わせる解像度を調べた。

デジタルカメラの撮像素子は CCD と CMOS がある。同画素数では CMOS が安い。そこで CMOS センサー (SONY IMX323, 2.2 Mpixel) のカメラを試した。ただし NTSC 出力なので USB コンバーター (出力画素数 0.35 Mpixel) で PC に取り込む。結果的に画素数は使用予定の GigE カメラの 93 % 減となった。これは USB コンバーター性能によるので将来的に改良余地はあると考える。

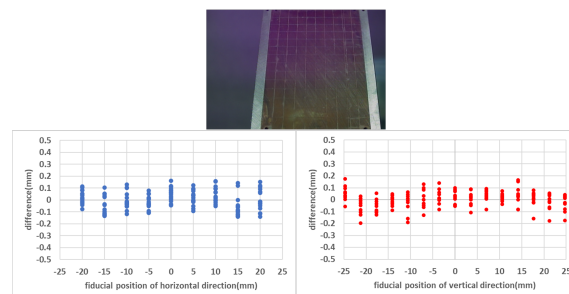


Figure 13: (Top) The picture recorded with contact-lens (Bottom) The relationship between position and the difference made by the distortion of the contact-lens method.

まず焦点距離 12 mm のレンズを取り付け、センサー全領域に蛍光板が入るようにレンズをガラス窓に近づける。ガラス窓と蛍光板の距離は決まってお 171 mm である。撮影した蛍光板画像を Fig. 13 上に示す。けがき線の格子点のビットマップ座標と各格子点の基準座標の

射影変換係数を求め、射影変換された位置の基準座標に対する変位と基準座標の関係を Fig. 13 下に示す。左下図が水平方向、右下図が鉛直方向である。変位の SD を位置精度とすると水平方向が 0.07 mm、鉛直方向が 0.08 mm となった。エミッタンス測定 of 角度精度を見積もると、マスクの穴径 0.3 mm を一様分布とするとその SD が 0.09 mm、マスクと蛍光板間距離が 130 mm なので、角度精度は 0.9 mrad となる。粗い計算だが悪くは無く、この方針を追求する可能性が見えた。

しかし、これはカメラをビームラインに近づけることになるので、ビーム起因の放射線の影響は大きいと思われる。一方、カメラをビームラインから遠ざけることにより放射線被曝量が減ると予想され、カメラをガラス窓から 1~2 m 離す条件で蛍光板の位置精度を調べた。

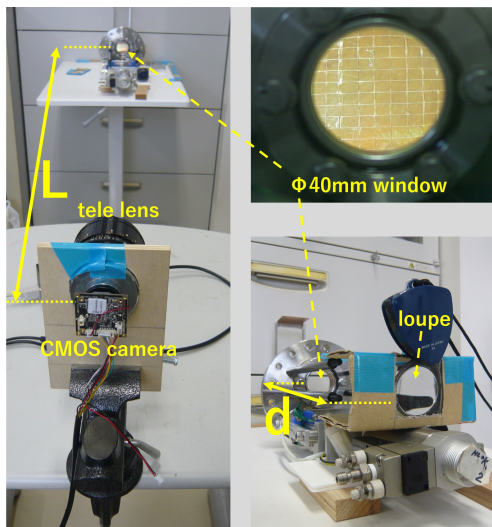


Figure 14: The setup of tele-lens camera optics system.

セットアップは Fig. 14 左図のように望遠レンズに CMOS センサーを固定し、ペッパーポット型エミッタンス測定器のガラス窓、蛍光板との光軸を合わせる。蛍光板をガラス窓を通して望遠レンズ (焦点距離 100 mm) で見た画像が Fig. 14 右上である。ガラス窓は径 40 mm なので、蛍光板全領域 ($50 \times 55 \text{ mm}^2$) は見えない。この解決法として Fig. 14 右下のようにガラス窓と望遠レンズ間に中間レンズを入れる。まず蛍光板全領域が視野に入る中間レンズとガラス窓の距離 d (mm) を決める。次に解像度を最大限に引き出すため CMOS センサー全領域に蛍光板が入るガラス窓と CMOS センサー間距離 L (m) を決める。中間レンズが焦点距離 83 mm の凸レンズの場合は、先に述べた L と d の決め方により $L=1350 \text{ mm}$ 、 $d=100 \text{ mm}$ となった。位置精度は近接レンズの場合よりも 3 倍大きく、蛍光板の周辺部の歪みが著しい。

次に焦点距離 125 mm の凸レンズを中間レンズとした場合の蛍光板画像を Fig. 15 上に示す。この時 $L=1530 \text{ mm}$ 、 $d=240 \text{ mm}$ となった。格子点のビットマップ座標を基準座標に射影変換した位置の基準座標に対する変位と基準座標の関係を Fig. 15 下に示す。左下が水平、右下が鉛直方向で、それぞれ SD は 0.15 mm と 0.14 mm となり近接レンズの場合よりも 2 倍程度になることが分かった。この結果からエミッタンス測定 of 角度精度は

1.3 mrad と見積もられる。周辺部に歪みはあるが、望遠レンズ方式もさらに追求する価値があると分かった。

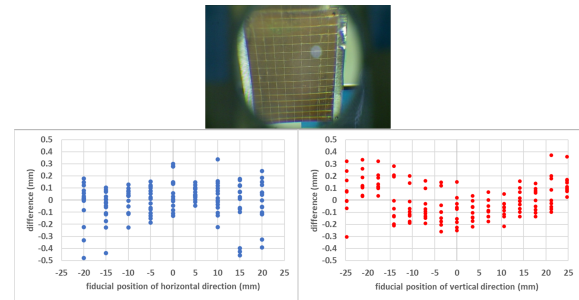


Figure 15: (Top) The picture recorded with tele-lens and intermediate lens (Bottom) The relationship between position and the difference made by distortion of the tele-lens method.

5. まとめ

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の試作品ができ、デジタルカメラの選定もレンズの工夫で展望が見えてきた。中間レンズの焦点距離を大きくすると、 L が大きく、蛍光板の位置精度が小さくなると分かり、良い組み合わせを追求する。角度精度はマスクと蛍光板間距離を大きくすることでも向上できる。さらに中間レンズに平凹レンズ、アクロマティックレンズ、非球面レンズのような歪抑制型も試すことで、エミッタンス測定 of 角度精度は向上すると考える。その後は、遮蔽材の検討を行い、実際にビーム照射テストを行い、実用性を確認する。ビーム軌道計算については δ を考慮した方法を構築する。

謝辞

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

参考文献

- [1] Y. Sakemi *et al.*, AIP Conference Proceedings 2319, 080020 (2021).
- [2] Y. Yanagisawa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 539, 74 (2005).
- [3] T. Hoffmann *et al.*, AIP Conf. Proc. 546, 432 (2000).
- [4] L. E. Collins and P. T. Stroud, Nucl. Instr. and Meth. 26 (1964), p. 157-166.
- [5] S. Watanabe *et al.*, CNS Ann. Rep. 1999, 44 (1999).
- [6] S. Watanabe *et al.*, CNS Ann. Rep. 2000, 9 (2001).
- [7] D.C. Carey, K.L. Brown and F. Rothacker, FERMILAB-Pub-98/310.
- [8] Y. Kotaka *et al.*, Proc. 8th IBIC2019, Malmö, Sweden, (2020) p. 351-354; <http://accelconf.web.cern.ch/ibic2019/papers/tupp022.pdf>
- [9] Y. Kotaka *et al.*, Proc. 16th Annual Meeting of PASJ, (2019), p. 1109-1113.
- [10] National Astronomical Observatory of Japan, Chronological Scientific Tables, Maruzen, (1990).