



DMI23 によりビームは鉛直下方に偏向される。DMI23 出口に三線式プロフィールモニタ(PF\_I30)、その下流に第 2 ソレノイドコイル、4 つの四極電磁石、第 3 ソレノイドコイル、2 次元エミッタンス測定器(EM\_I36)、三線式プロフィールモニタ(PF\_I36)がある。その下の AVF サイクロトロンヨーク内部にあるグレーザーコイル 2 つを通過して AVF サイクロトロン中心にあるインフレクターに達する。

4 次元エミッタンスが必要な理由は、分析電磁石から DMI23 までのビームラインが鉛直方向ビームラインに対し水平方向に 20 度回転しているので垂直偏向されたビームにとって四極電磁石が 20 度回転していることと、ソレノイドコイルがあることにより、ビームの水平成分(x)と鉛直成分(y)が結合するからである。

我々のビーム軌道計算の特徴は①4 次元エミッタンス測定値を初期値としたルンゲクッタ法による計算、②全電磁石の磁場に 3 次元計算磁場を使用、③空間電荷効果の導入である[3]。3 次元計算磁場は、ソレノイドコイルはフリーソフト FEMM、二極電磁石、四極電磁石、AVF サイクロトロン中心領域磁場は TOSCA 3D で計算した。空間電荷効果はビーム断面強度分布の重心からの距離に比例した力で近似して運動方程式に組み込んだ。入射バンチャーが EM\_I36 後にあるが、ビーム方向の運動は考慮していない。今後の課題である。

空間電荷効果が必要な例を、124 $\mu$ A の  $^4\text{He}^{2+}$  15.4 keV ビームを PEM\_IH10 で測定し、ビーム軌道計算した結果と EM\_I36 実測との比較を Fig. 2, 3, 4 に示す。

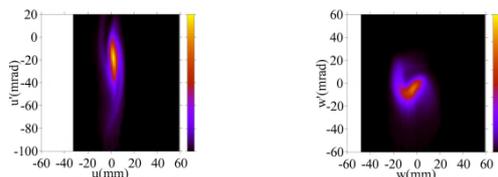


Figure 2: 2D emittances measured by EM\_I36. (left) Image of the (u, u') (right) Image of the (w, w').

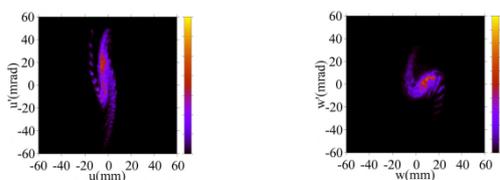


Figure 3: 2D emittance transported to the position of EM\_I36 by calculation with space charge effect. (left) Image of the (u, u') (right) Image of the (w, w').

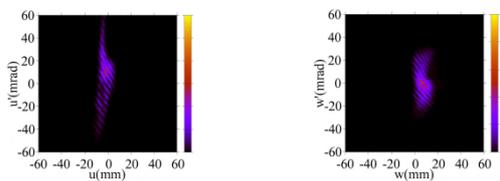


Figure 4: 2D emittance transported to the position of EM\_I36 by calculation without space charge effect. (left) Image of the (u, u') (right) Image of the (w, w').

EM\_I36 は鉛直方向ビームラインに設置されており、このラインの(x, y)系の定義は Fig. 1 の手前から奥向きを x、右方を y とする。EM\_I36 は、それに対し 45 度反時計回りに回転した座標(u, w)系の 2 次元エミッタンスを測定する。(u, w)方向の角度を(u', w')で示すとすると、2 次元エミッタンスは(u, u')系と(w, w')系のビーム強度分布で示される(これ以後、EM\_I36 の位置、角度のビーム強度分布を単に(u, u')と(w, w')と示す)。Figure 2 に EM\_I36 の実測、Fig. 3 に PEM\_IH10 測定値を EM\_I36 まで空間電荷効果を考慮してビーム軌道計算した場合、Fig. 4 に考慮しない場合を示す。Figure 2, 3, 4 は左図が(u, u')、右図が(w, w')である。目視で比較すると Fig. 2 と 3 は合っているが、Fig. 2 と 4 は合っていない。空間電荷効果が必要なことが分かる。

### 3. ビーム軌道計算の評価方法

PEM\_IH10 の性能も含めて開発したビーム軌道計算手法を他の診断器との比較で評価する。比較対象の診断器は 2 章で述べた PF\_IH10、PF\_IH11、I23viewer、PF\_I30、EM\_I36、PF\_I36 があり、各診断器のビーム強度分布とビーム軌道計算によるビーム強度分布の  $\chi^2/\text{DOF}$ (自由度)を求め、「合い」の程度を数値化した。

I23viewer や EM\_I36 は、原理的には 2 次元分布のまま  $\chi^2$  を計算できる。しかし PEM\_IH10 はビーム位置を 3mm 間隔で測定するので、ビーム軌道計算結果で得られる分布がまだら模様となることがあり、 $\chi^2$  が大きくなる。まだら模様にならない場合もあるので公平な評価ができない。そこで 2 次元分布の各座標軸への射影(1 次元分布)を作り、対応する座標軸の 1 次元分布同士で  $\chi^2$  を計算することにした。1 次元分布は滑らかな分布になりやすいからである。一方、プロフィールモニタは 1 次元分布の測定器なので、そのまま 1 次元分布で比較する。ところで  $\chi^2$  の分散は比較対象の診断器のビーム強度分布の最高値の 10%の 2 乗とする。ビーム軌道計算の精度が粗いため、比較対象の診断器の誤差を分散にすると  $\chi^2$  が大きくなり、見通しが良くないからである。

1 次元分布の比較例を Fig. 5 に示す。青線と赤線はそれぞれ比較対象の診断器の測定値とビーム軌道計算結果の分布である。両分布の面積が 1 になるように正規化し、横軸方向のずれを補正し、 $\chi^2$  を計算する。

現状は、ビーム毎の相対的な「合い」の程度を見たいので、この評価方法が良い。しかし、真の  $\chi^2$  ではないので、 $\chi^2/\text{DOF}$  を「適合度」と呼ぶことにする。Figure 5 の左図の適合度は 0.80、右図は 3.86 となる。目視で合ってい

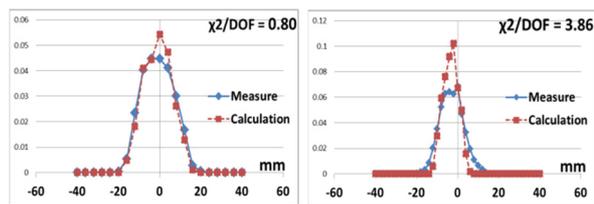


Figure 5: Examples of the comparison. The blue line shows measurement and the red line shows the beam trajectory calculation.  $\chi^2/\text{DOF}$  of left image is 0.80 and  $\chi^2/\text{DOF}$  of right image is 3.86.

ると判断できる適合度がほぼ 1 となっている。

この評価方法で Table 1 に示す 9 種類のビームの EM\_I36 の  $(u, u')$  と  $(w, w')$  の実測値と比較した適合度を調べた。その結果を Fig. 6 に示す。

Table 1: Measured Beams Used for Chi-square Test

Ion	Energy(keV)	Intensity( $\mu$ A)	DMI23(A)
H <sup>+</sup>	12.6	220	12
<sup>4</sup> He <sup>2+</sup>	13.8	18, 32	18
<sup>4</sup> He <sup>2+</sup>	15.4	250, 250, 270	19
<sup>4</sup> He <sup>2+</sup>	25.4	5, 10	25
<sup>18</sup> O <sup>6+</sup>	17.6	57	25

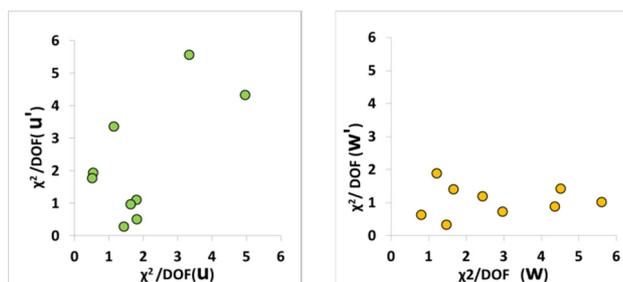


Figure 6: (left) Scatter plot shows  $\chi^2/\text{DOFs}$  of  $u$  and  $u'$ . (right) Scatter plot shows  $\chi^2/\text{DOFs}$  of  $w$  and  $w'$ .

Figure 6 は左図の横軸に  $u$  方向、縦軸に  $u'$  方向の適合度を取り、右図は横軸に  $w$  方向、縦軸に  $w'$  方向の適合度を取った。全体的に適合度は 6 以下である。適合度が 1 程度のサンプルがあるのでビーム軌道計算はある程度できていると考えている。ただし、実情は適合度を小さくするために PEM\_IH10 で測定したビーム角度を 0.9 倍する必要があった。この原因はビーム軌道計算ではなく、測定器に問題があると考えた。この原因の解明及び適合度をさらに小さくする解を追求するため、測定器の改良を試みた。

#### 4. ビーム像撮影用カメラのレンズの最適化

知る限りではペッパーポット型エミッタンス測定器は 1960 年代から存在し[4]、様々な加速器施設で活用されている。これは等間隔に穴が空けられた薄板(ペッパーポットマスク)にビームを当て、通り抜けたビームの位置、強度を検出器で測定し、ビームの 4 次元(位置・角度)空間のビーム強度分布を得る診断器である。Figure 7 に示すように PEM\_IH10 は、0.5mm 厚の銅板に直径 0.3mm の穴を 3mm 間隔で配置したペッパーポットマスクを使用し、ビーム位置・強度検出器としてビームに対して 45 度傾けた臭化カリウム(KBr)蛍光板(80×80mm<sup>2</sup>)を使用している。ペッパーポットマスクと蛍光板の中心間距離は 55mm である。ビームの衝突点が発光した KBr 蛍光板の像はビームに垂直方向に設置したデジタルカメラで記録する。この形状は ICF 規格 152mm フランジに設置できるように考案した。デジタル画像はピクセル座標と 256 階調の光強度を持つので、ピクセル座標を実空間座標に変換する。光強度は相対的なビーム強度としてそのまま使用する。

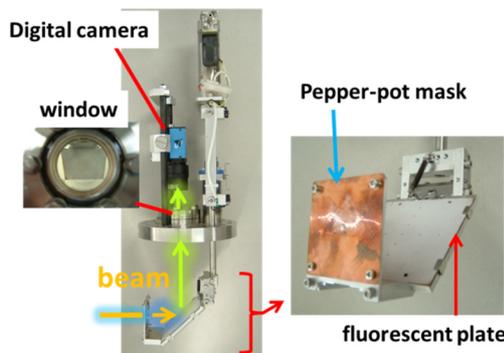


Figure 7: The schematic view of our PEM\_IH10. It is composed of pepper-pot mask and fluorescent plate. Pepper-pot mask has 0.3 mm diameter holes opened at 3mm interval. Fluorescent plate tilted 45 degrees functions as position detector of beam passing through the pepper-pot mask. The light emitted by fluorescent plate in the region where beam hits is recorded by a digital camera set perpendicular to the beam axis.

3 章のテストで使用したデジタルカメラはハンディカム (Sony HDR-CX720V) であり、歪みがほとんど無く、解像度も 0.03mm/pixel が得られるが、遠隔撮影ができない。そこで 2017 年 11 月にイーサネット経由で撮影できるデジタルカメラ Gigabit Ethernet Camera (GigE カメラ) (IMAGE SOURCE DFP23GP031) に変更した。

まずカメラによる歪みを調べることにした。そのため蛍光板に 1mm 方眼紙を張り、原点を中心とする ±35mm の正方形に 5mm 間隔で 225 点の基準点を設定する。

PEM\_IH10 は、蛍光板がビーム方向に対し 45 度傾いている。ビームラインには下流側から見て水平から右回りに 45 度回転した方向に設置しているため、これに応じて方眼紙の基準点に実空間の座標を与える。そして蛍光板に貼り付けた方眼紙のデジタル画像から 225 基準点のピクセル座標を目視(誤差 0.1mm 程度)で測定し、基準座標とピクセル座標の対応から変換係数を得る。

基準点のピクセル座標測定に誤差が無く、歪みが無ければ、その変換された位置と基準点の位置の差は 0 となるが、歪みがあればその差が生じる。まずハンディカムによる歪みを見るため、基準座標を横軸、デジタル画像で測定した基準点のピクセル座標の変換後の位置と基準座標の差を縦軸にした Fig. 8 に  $x, y$  を分けて示す。

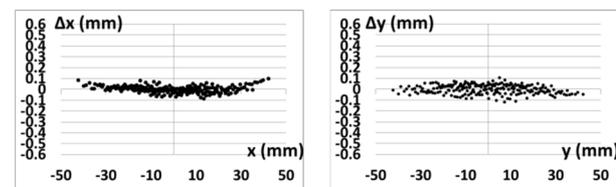


Figure 8: Differences in distribution between fiducial points and measured position on digital image recorded by HDR-CX720V: x-axis (left) and y-axis (right).

一方、GigE カメラのレンズ(タムロン 13VM308AS)の焦点距離は 8mm、絞りはほぼ全開で使用した。解像度を上げるには長焦点距離レンズで倍率を上げれば良い。

この場合レンズと被写体の距離も長く取れるので歪みは抑えられる。しかし、焦点距離が長いと被写界深度が短いので、45 度傾けた蛍光板に適するかは要注意である。このタムロン 13VM308AS で実用的なレンズと蛍光板間距離を探した結果、約 250mm にすると Fig. 9 のようなデジタル画像で測定した基準点のピクセル座標の変換後の位置と基準座標の差が得られた。

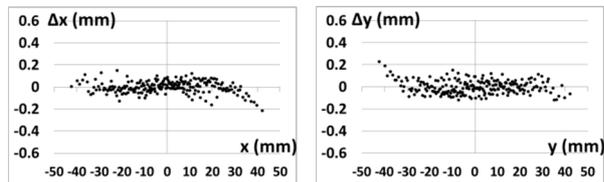


Figure 9: Differences in distribution between fiducial points and measured position recorded by GigE camera and CCTV lens (13VM308AS) with 250mm object distance: x-axis (left) and y-axis (right).

この結果から歪みはハンディカムには及ばないが、解像度は 0.08mm/pixel、ずれの標準偏差は x も y も 0.07mm、角度に換算すると 1.3mrad となった。実用に耐えようと判断し、このレンズ採用した。

## 5. ビーム画像の実空間への変換の改良

3 章のテスト時のデジタル画像から実空間への変換係数は Fig. 10 に示す蛍光板に空けられた直径 1mm の穴 11 点と直径 2mm の穴 4 点を基準点として得ていた。穴の加工精度は 0.1mm である。



Figure 10: The front view of fluorescent plate which was used for the test related in the chapter 3. This plate has 11 holes of 1mm diameter and 4 holes of 2mm diameter as fiducial points.

この蛍光板を 45 度傾けた状態で撮影したデジタル画像で基準点のピクセル座標を目視で測定した場合の基準点からのずれを調べた。Figure 10 の蛍光板を方眼紙と全く同じ位置になるように設置し、4 章で採用した GigE カメラレンズ系で撮影し、15 点の穴のピクセル座標を測定し変換係数を求める。この変換係数を用いて方眼紙のデジタル画像を実空間に変換し、測定した 225 基準点のピクセル座標の変換後の位置と基準座標の差を Fig. 11 に示す。すると x 方向に 0.3mm、y 方向に -0.3mm の系統的なずれがあり、角度換算すると 5.5mrad となる。ずれの標準偏差は x が 0.12mm、y が 0.19mm、角度換算するとそれぞれ 2.2mrad、3.5mrad に相当する。また x も y も、ずれが基準座標に対し逆相関している。これらは目視測定時に穴の中心位置がずれて見えていたためかもしれない。この作業を 2 回やったが結果はほぼ同じだった。測定者の個人的なバイアスが原因と思うが、3 章の結果には、この症状が含まれている。

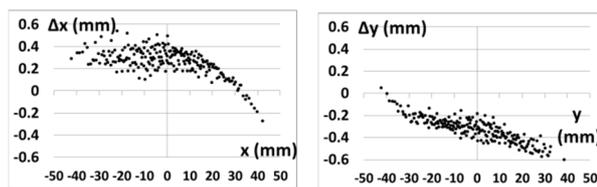


Figure 11: Differences in distribution between fiducial points and measured position on digital image, translated with fiducial points composed of 15 holes in the fluorescent plate, recorded by GigE camera and CCTV lens (13VM308AS) with 250mm object distance: x-axis (left) and y-axis (right).

基準座標に対しずれが逆相関しているので、変換されたビーム位置は実際よりも中心方向に収縮している。PEM\_IH10 の設置位置ではビームは発散するので、測定したビームの発散角度は実際よりも小さくなるを考える。これは 3 章で述べた角度補正 0.9 の原因では無い。

いずれにせよ蛍光板に空けられた穴を基準点とするのは問題があるので、4 章で行った考察から、方眼紙から得られる変換係数をそのまま採用することにした。この方法は方眼紙と蛍光板を取り替える必要があり、その際にカメラと蛍光板の距離が変わると使えない。実際にやってみると距離は変わっていないようだが、レンズに対して平行移動はする。平行移動は補正が効くので、今後は方眼紙による変換係数を採用する。将来的には蛍光板に方眼紙のような格子線が描けないか検討したい。

## 6. 蛍光剤厚とカメラ露光時間、ゲインの調整

蛍光板はビームの当たった部分が黒に変色する。この影響は定量的に調べていないが、3 章のテストで使用した蛍光板も 2 年ほど使ったので、2018 年 1 月に新しく製作した蛍光板に替えた。そしてビームテストをした結果、他の診断器との適合度が悪化した。

交換した蛍光板の KBr 層は比較的厚く、これが原因と考え、厚さの測定結果への影響を調べた。同時に GigE カメラは露光時間、増幅度(ゲイン)が任意に調節可能なので最適化が必要になった。そこで厚さ 1.9、34.6 $\mu\text{m}$  の 2 種類の KBr 蛍光板を用意した。厚さの定義は、KBr 塗布前後の板の重さの差を面積と KBr 密度(2.75g/cm<sup>3</sup>)で割った値とする。さらにカメラの露光時間を 1/10、1/20、1/38 秒の 3 種類、カメラのゲインを 15、13、11、9、7、5dB の 6 種類を組み合わせた条件で、<sup>4</sup>He<sup>2+</sup> 23.64keV 100 $\mu\text{A}$  のビームを PEM\_IH10 で測定し、55A で励磁した SOIH11 を通し 867mm 下流にある PF\_IH11 でビームプロファイルを測定し、その結果とビーム軌道計算結果とで適合度を調べた。ここで強調すべきは、3 章で述べた角度補正は無いことである。

PF\_IH11 は鉛直方向 y とそれに対して  $\pm 45$  度回転した方向 u、w のビームプロファイルが得られるので、その 3 方向で適合度を計算する。ここでは 3 方向の  $\chi^2$  の和を、3 方向の自由度の和で割った値を Fig. 12 に示す。Figure 12 の上図が KBr 厚さ 1.9 $\mu\text{m}$  の各条件の適合度である。表は左から右にゲインが小さくなり、上から下へ露光時間が短くなるように示している。下図が同様な書式で KBr 厚さ 34.6 $\mu\text{m}$  の各条件の適合度を示している。

KBr厚さ 1.9 μm		大 ← ゲイン(dB) → 小						
		15	13	11	9	7	5	
露光時間(秒)	長	1/10	1.33	0.97	0.77	0.68	0.63	0.68
	1/20	0.91	0.8	0.69	0.65	0.79	1.1	
	短	1/38	0.81	0.63	0.64	0.81	1.43	1.73

KBr厚さ 34.6 μm		大 ← ゲイン(dB) → 小						
		15	13	11	9	7	5	
露光時間(秒)	長	1/10	1.68	1.38	1.1	0.93	0.51	0.51
	1/20	1.19	0.94	0.67	0.49	0.64	1.04	
	短	1/38	0.72	0.56	0.5	0.79	1.52	1.86

Figure 12: The conformity ( $\chi^2/\text{DOF}$ ) compared with PF\_IH11 as the thickness of KBr fluorescence agent and the exposure time and gain of digital camera are varied. (upper) thickness is 1.9 μm (lower) thickness is 34.6 μm.

適合度は相対的な値だが、目安として 1 未満の場合にマスに色を付けた。露光時間が長くゲインが大きい領域で適合度が大きいのは、信号強度が上限で飽和しており、結果的にビームの位置・角度分布が広がっている。逆に露光時間が短くゲインが小さい領域はビーム周辺部の信号強度が弱く、検出できないためと考えられ、ビームの位置・角度分布は狭くなっている。厚さの観点から見ると、厚い方は薄い方よりゲインは低め、露光時間は短めが良い傾向にある。当初の適合度の悪化はゲイン 15、露光時間 1/10 で測定していたためと分かった。

3 章で角度補正 0.9 が必要と述べたが、当時のカメラのハンディカムは露光時間やゲインが自動調整され、それに無関心であった。改めて信号強度分布を見ると信号強度上限で飽和しているものが Table 1 の 9 つのうち 3 つあった。頻度としては少ないが、これにより 3 章のテストの角度補正の判断にバイアスがかかったと思う。

カメラの露光時間、ゲインの最適化は、KBr 厚さ以外にもビーム強度、ビーム面積密度、エネルギーなどが影響すると考えられるので、今後、その影響を確かめる。

## 7. ビームテスト結果

デジタル画像の実空間への変換方法改良と蛍光板の蛍光剤厚さに応じたカメラの露光時間、ゲインの最適化により EM\_I36 との適合度の改善を確認した。テストに使用したビームを Table 2 に示す。イオン種とエネルギーの組合せが 2 種類と少ないが、測定日は全て異なる。これらのビームを使い PEM\_IH10 の測定値によるビーム軌道計算を EM\_I36 の測定結果と比較した適合度を Fig. 13 に示す。書式は Fig. 6 と同じである。

Table 2: Measured Beams for Test after Improvement

Ion	Energy(keV)	Intensity(eμA)	DMI23(A)
$^4\text{He}^{2+}$	15.4	124	19.1
$^2\text{H}^+$	12.64	100	24.5
$^4\text{He}^{2+}$	15.4	196	19.0
$^4\text{He}^{2+}$	15.4	308	19.2
$^4\text{He}^{2+}$	15.4	187	19.2
$^2\text{H}^+$	12.8	214	24.6

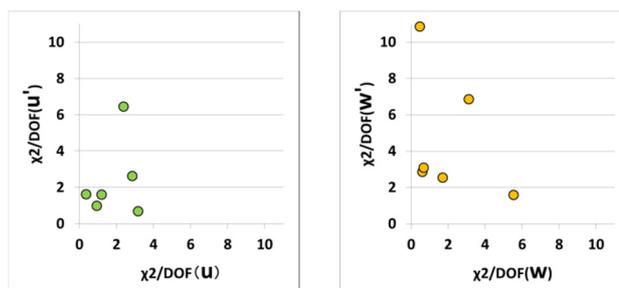


Figure 13: (left) Scatter plot shows  $\chi^2/\text{DOFs}$  of  $u$  and  $u'$ . (right) Scatter plot shows  $\chi^2/\text{DOFs}$  of  $w$  and  $w'$ .

先に述べた PEM\_IH10 の改良の結果、ビーム軌道計算において角度補正をすること無く 3 章のテスト結果と同程度の結果が得られた。詳細に見ると  $u'$  や  $w'$  に適合度が大きい傾向があり、その対象となるサンプル全てが角度分布の幅が実測より小さめに計算されていたことが原因であった。念のため EM\_I36 後方 107.5mm にある PF\_I36 でも適合度を調べた。結果を Fig. 14 に示す。PF\_I36 は  $x$ ,  $u$ ,  $w$  方向のビームプロファイルを測定する診断器であるが、 $u$ (横軸)と  $w$ (縦軸)の適合度を示した。この結果から極端に適合度が大きいものは無い。特に Fig. 13 で EM\_I36 の  $w'$  の適合度が 10.9 のサンプルは、Fig. 14 の PF\_I36 の  $w$  の適合度は 0.5 と小さい。この理由については調査中である。

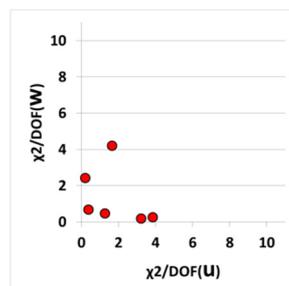


Figure 14: Scatter plot shows  $\chi^2/\text{DOFs}$  of  $u$  and  $w$  compared with PF\_I36.

このことより EM\_I36 に限らず、多角的に適合度を調べ、評価方法を検討すべきと考える。また様々なイオン種、エネルギー、ビーム強度を変えて測定データを増やし、適合度を評価することにより、測定可能範囲(限界)も明確にしていく。

実際のビーム軌道を PEM\_IH10 の測定値でビーム軌道計算し、実際のビーム軌道を再現できるようになったので、ビーム軌道の分析や AVF サイクロトロンの入射アセプタンスに適合したビーム軌道設計を開始したい。

## 参考文献

- [1] Y. Kotaka *et al.*, Proc. 13th HIAT2015, Yokohama, Japan, (2016) p. 58-61.
- [2] T. Hoffmann *et al.*, Proc. 9th BIW 2000, Cambridge, USA, p. 432-439.
- [3] Y. Kotaka *et al.*, Proc. 14th Annual Meeting of PASJ, (2017), p. 1118-1122.
- [4] L. E. Collins and P. T. Stroud, Nucl. Instr. and Meth. 26 (1964), p. 157-166.