PASJ2019 FRPI034

# 理研 AVF サイクロトロン入射系のビーム軌道計算方法の評価と 4 次元エミッタンス測定器の改良

## EVALUATION OF BEAM ORBIT CALCULATION METHOD AND IMPROVEMENT OF 4 DIMENSIONAL EMITTANCE MONITOR FOR THE INJECTION LINE OF RIKEN AVF CYCLOTRON

小高康照<sup>#, A)</sup>, 大城幸光<sup>A)</sup>, 山口英斉<sup>A)</sup>, 今井伸明<sup>A)</sup>, 酒見泰寬<sup>A)</sup>, 長友傑<sup>C)</sup>, 加瀬昌之<sup>C)</sup>, 後藤彰<sup>C)</sup>, 大西純一<sup>C)</sup>, 中川孝秀<sup>C)</sup>, 畑中吉治<sup>D)</sup>, 下浦享<sup>A)</sup>

Yasuteru Kotaka <sup>#, A)</sup>, Yukimitsu Ohshiro<sup>A)</sup>, Hidetoshi Yamaguchi<sup>A)</sup>, Nobuaki Imai<sup>A)</sup>, Yasuhiro Sakemi <sup>A)</sup>

, Takashi Nagatomo<sup>B)</sup>, Kase Masayuki<sup>B)</sup>, Akira Goto<sup>B)</sup>, Jyun-ichi Ohnishi<sup>B)</sup>

Takahide Nakagawa<sup>B)</sup>, Kichiji Hatanaka<sup>C)</sup>, Susumu Shimoura<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> CNS, University of Tokyo

<sup>B)</sup> RIKEN Nishina center

<sup>C)</sup> RCNP, Osaka University

#### Abstract

In order to understand the injection beam trajectory from the ion source to the RIKEN AVF cyclotron, we have developed a unique beam trajectory calculation method taking space charge effects into consideration using fourdimensional emittance, which is measured with a pepper-pot emittance monitor (PEM), as initial values. The feature of our PEM is that the image of beam passing through the pepper-pot mask and emitting light by the potassium bromide fluorescent plate tilted at 45 degrees is recorded by the digital camera. In order to evaluate our beam trajectory calculation method and PEM's performance, we compared it with the measurement results of other diagnostics and quantified the conformity by chi-square test. In search of the possibility of improvement of the conformity, the method of converting the beam image to the real space is firstly improved. As a result, the angle systematic error of 5.5 mrad is removed and the random error (RMS) about 3 mrad is reduced into 1.3 mrad. It has also been found that the conformity is improved by optimizing the thickness of the fluorescent agent and the exposure time and gain of the digital camera.

#### 1. はじめに

東京大学原子核科学研究センター(CNS)と理研仁科 加速器研究センターが進めている理研 AVF サイクロトロ ンの高度化[1]の一つがビーム強度の増強であり、その 手段の一つが入射ビーム量の増強である。そのために AVF サイクロトロンの入射ビーム軌道の最適化を進めて いる。まずビーム軌道の現状を把握するため、イオン源 生成ビームの4次元エミッタンスをペッパーポット型エミッ タンス測定器[2]で測定し、その測定値を初期値とした ビーム軌道計算手法の開発を進め、ほぼ終了した[3]。

今回は、ビーム軌道計算手法の評価のため、我々の 製作したペッパーポット型エミッタンス測定器 (PEM\_IH10)で測定したビームを他の診断器でも同時に 測定し、その結果との「合い」の程度を数値化した。その 後、PEM\_IH10の改良を試みた。蛍光板で光ったビーム 像をデジタルカメラで撮影する検出器なのでレンズ系の 最適化と撮影したビーム画像の実空間への変換方法の 改良を行った。また蛍光剤の厚さとカメラの露光時間とゲ インの最適化を行った。この結果を報告する。

## 2. 入射ビーム軌道計算手法の開発

Figure 1 に理研 AVF サイクロトロンの入射輸送系を示 す。我々は AVF サイクロトロンのイオン源のうち 14GHz 電子サイクロトロン共鳴イオン源(HyperECRIS)の生成 ビームを対象とする。その生成ビームは分析電磁石で90 度偏向され、その焦点面に三線式プロファイルモニタ (PF\_IH10)があり、そこから250mm下流にPEM\_IH10が あり、ここで4次元エミッタンスを測定する。その下流に第 1 ソレノイドコイル(SOIH11)、三線式プロファイルモニタ (PF\_IH11)、二極電磁石(DMI23)の入口にビーム断面強 度分布を見る蛍光板(I23viewer)がある。



Figure 1: The beam injection line of the RIKEN AVF Cyclotron. Diagnostics are shown in blue. Focusing elements are shown in green or yellow. Dipole magnet is shown in pink.

<sup>#</sup> kotaka@cns.s.u-tokyo.ac.jp

#### PASJ2019 FRPI034

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ァイルモニタ(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 ファイルモニタ(PF\_I36)がある。その下のAVFサイクロト ロンの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、124eµA の <sup>4</sup>He<sup>2+</sup> 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  $EM_{136}$  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。

### 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 $\chi$ <sup>2</sup>/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、プロファイルモニタは 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、χ<sup>2</sup>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、この評価方法で良い。しかし、真の $\chi^2$ ではないの で、 $\chi^2$ /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 bule line shows measurement and the red line shows the beam trajectry calculation..  $\chi^2$ /DOF of left image is 0.80 and  $\chi^2$ /DOF of right image is 3.86.

Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan

#### PASJ2019 FRPI034

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。

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

Table 1: Measured Beams Used for Chi-square Test



Figure 6: (left) Scatter plot shows  $\chi^2$ /DOFs of u and u'. (right) Scatter plot shows  $\chi^2$ /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 pepperpot 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ので、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。

## PASJ2019 FRPI034

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 えうると判断し、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と考える。 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、34.6µm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>He2+23.64keV 100eµA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±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 $\mu$ 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 $\mu$ m の各条件の適合度を示している。 Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan

#### PASJ2019 FRPI034

KBr厚さ 1.9 μ	厚さ 1.9 μ <u>−−−</u> 大 <del>&lt;−−−−−</del> ゲイン(dB) −−−−				→小		
		15	13	11	9	7	5
↑長	1/10	1.33	0.97	0.77	0.68	0.63	0.68
露光時間(秒)	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) —		>/]\
KBr厚さ 34.6	μm	大 ← 15	13	ゲイン 11	(dB) —	7	→小 5
KBr厚さ 34.6 ↑長	μm 1/10	大 ← 15 1.68	13 1.38	ゲイン 11 1.1	(dB) — 9 0.93	7 0.51	→/\ 5 0.51
KBr厚さ 34.6 ↑長 露光時間(秒)	μm 1/10 1/20	大 <	13 1.38 0.94	ゲイン 11 1.1 0.67	(dB) — 9 0.93 0.49	7 0.51 0.64	→ /ʃ\ 5 0.51 1.04

Figure 12: The conformity ( $\chi 2$ /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 34.6µm.

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・角度分布が広くなってい 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
$^{2}\mathrm{H}^{+}$	12.64	100	24.5
${}^{4}\text{He}^{2+}$	15.4	196	19.0
$^{4}\mathrm{He}^{2+}$	15.4	308	19.2
${}^{4}\text{He}^{2+}$	15.4	187	19.2
$^{2}\mathrm{H}^{+}$	12.8	214	24.6



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