

## An Analysis of Calibration Data on J-PARC MR BPM

Yoshinori Hashimoto<sup>1,A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>, Dai Arakawa<sup>A)</sup>, Hitoshi Ishii<sup>A)</sup>, Takahiro Sawada<sup>B)</sup>, Masaki Tejima<sup>A)</sup>, Ryoji Toyokawa<sup>C)</sup>, Kotoku Hanamura<sup>D)</sup>, Shigenori Hiramatsu<sup>A)</sup>, Kenji Hosomi<sup>E)</sup>, Hiroshi Matsumoto<sup>A)</sup>, Takako Miura<sup>A)</sup>, Masahiro Mimori<sup>E)</sup>, Norihito Muramatsu<sup>B)</sup>, Kenji Mori<sup>A)</sup>, Yuichi Morita<sup>F)</sup>, Seisyu Lee<sup>A)</sup>, Yuichi Watanabe<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba Ibaraki, 305-0801, Japan

<sup>B)</sup> Research Center for Nuclear Physics, Osaka University (RCNP)

10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

<sup>C)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirakatashirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195, Japan

<sup>D)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045, Japan

<sup>E)</sup> Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University

6-3 Aramaki, Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan

<sup>F)</sup> International Center for Elementary Particle Physics (ICEPP)

Faculty of Science Bldg.1(10F), University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan

### Abstract

On BPM's (Beam Position Monitor) for J-PARC MR, sensitivity maps was measured using a 'wire method' in the last year, and the data accuracy was  $\pm 0.1$  mm. Then an analysis has been done for the data of standard type BPM's which have an aperture of 130 mm. The method is parameter fitting with minimization by the least-square approach. Parameters are six in total, position offsets, rotation angles, and sensitivity coefficients for both horizontal and vertical electrodes pairs. It was confirmed that in a region of about 60mm around BPM center, the wire position which is virtual beam in the 'wire method' was almost reproduced by the fitting results. This paper describes the analysis method, fitting results, and statistics of whole standard BPM's.

## J-PARC MR BPMの校正データの解析

### 1. はじめに

J-PARC のMR用BPM<sup>[1, 2]</sup>では、最大90mm (全幅)の陽子ビームの位置を計測する。このような大きなビームサイズにも関わらず、スペースチャージによるビームブローアップなどを原因とするビームロスを低減するため、ビームの重心位置を $\pm 0.1$  mmの精度で測定することを目標としている。電極形状には、横方向の広い領域で良好な線形応答を有するダイアゴナルカットの静電型電極を採用し、その内径は、MR周回用では、130 mm  $\phi$ を標準とし、他に入射などの特別な用途に134, 165, 200, 250, 320 mm  $\phi$ がある。RCSからの入射ラインである3-50 BT用BPMには、200と230 mm  $\phi$ がある。BPMの台数は、MRの周回ビーム用186台、3-50BT用14台、アポルト・ダンプに4台である。

電極内のビーム位置に対する信号応答は、電極内空間に置いたワイヤーに、擬似ビーム信号を通し、4電極からの出力を同時に計測した<sup>[3, 4]</sup>。ワイヤー位置を、10 mm ピッチでマップさせることにより、電極内空間の校正データを得た。これらのデータの解析について以下に述べる。

### 2. Fitting Model

#### 2.1 BPM 2Dモデル

BPMの幾何学的な形状から出発して、線状(電荷)ビームによって、金属円筒内面(BPM電極)に誘導される電荷分布を表す2次元モデルを示す。MR用ノーマルBPMの寸法図を図1に、その平面展開図を図2に示す。BPM空間内のビーム位置を $(x_b, y_b)$ 、その線電荷密度を $\lambda$ 、BPMの内直径を $a$ とする。左、右、上、下の電極に誘起される電荷量を、それぞれ、 $L$ ,  $R$ ,  $U$ ,  $D$  で表すことにすると、それらは次のように書くことができる<sup>[5]</sup>。

$$L = \frac{\lambda}{2} \left( 1 + 2\delta + \frac{x_b}{a_x} \right) \quad (1)$$

$$R = \frac{\lambda}{2} \left( 1 + 2\delta - \frac{x_b}{a_x} \right) \quad (2)$$

<sup>1</sup> E-mail: yoshinori.hashimoto@kek.jp

$$U = \frac{\lambda l}{2} \left( 1 + 2\delta + \frac{y_b}{a_y} \right) \quad (3)$$

$$D = \frac{\lambda l}{2} \left( 1 + 2\delta - \frac{y_b}{a_y} \right) \quad (4)$$

これらを用いて、電極に誘起される信号比の $\Delta/\Sigma$ 演算は次のようになる。

$$\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} = \frac{L-R}{L+R} = \frac{x_b}{(1+2\delta)a_x} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} = \frac{U-D}{U+D} = \frac{y_b}{(1+2\delta)a_y} \quad (6)$$

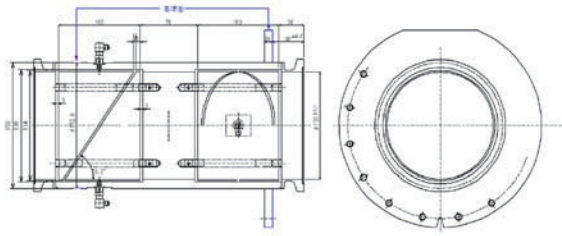


図1. MR-BPM 組立図(ノーマルサイズ)

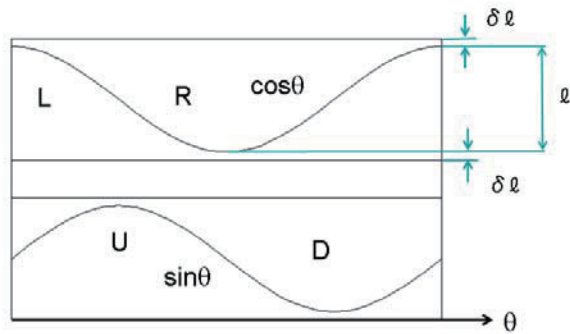


図2. MR-BPM電極の平面展開模式図

## 2.2 誤差モデル

ここで、製作時のBPM電極に対する誤差として、左右方向、及び上下方向の電極の正規の位置からの回転によるズレ： $\theta_x$ ,  $\theta_y$ と、並進方向の位置ズレ： $x_0$ ,  $y_0$ を考慮するとこれらを含んだモデル解は、次のようになる。

$$L = \frac{\lambda l}{2} \left( 1 + 2\delta_x + \frac{x_b \cos \theta_x + y_b \sin \theta_x - x_0}{a_x} \right) \quad (7)$$

$$R = \frac{\lambda l}{2} \left( 1 + 2\delta_x - \frac{x_b \cos \theta_x + y_b \sin \theta_x - x_0}{a_x} \right) \quad (8)$$

$$U = \frac{\lambda l}{2} \left( 1 + 2\delta_y + \frac{-x_b \sin \theta_y + y_b \cos \theta_y - y_0}{a_y} \right) \quad (9)$$

$$D = \frac{\lambda l}{2} \left( 1 + 2\delta_y - \frac{-x_b \sin \theta_y + y_b \cos \theta_y - y_0}{a_y} \right) \quad (10)$$

左右電極からの出力位置を、単位円内空間座標( $X_m$ ,  $Y_m$ )で表すと、次となる。

$$X_m = \frac{\Delta_x}{\Sigma_x} = \frac{x_b \cos \theta_x + y_b \sin \theta_x - x_0}{(1+2\delta_x)a_x} \quad (11)$$

$$Y_m = \frac{\Delta_y}{\Sigma_y} = \frac{-x_b \sin \theta_y + y_b \cos \theta_y - y_0}{(1+2\delta_y)a_y} \quad (12)$$

ここで、 $g_{LR} = \{a_x(1+2\delta_x)\}^{-1}$ 、及び $g_{UD} = \{a_y(1+2\delta_y)\}^{-1}$ をそれぞれ左右電極と上下電極の組みの感度係数とすると、(11)、(12)は、まとめて、次の行列で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{LR} & 0 \\ 0 & g_{UD} \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ -\sin \theta_y & \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_b \\ y_b \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \right\} \quad (13)$$

このように線形応答のBPMモデルでは、ビームサイズや形状に依存しない形で、(13)式のようにビーム重心位置を表すことができる。これがダイアゴナルカットを採用している大きな理由である。一方、ストリップラインを用いたBPMのような、非線形応答の場合は、ビームサイズや形状に依存した誤差が発生してしまう。

## 3. Fitting計算

### 3.1 Fitting 計算概略

Fitting は、式(13)の $g_{LR}$ ,  $g_{UD}$ ,  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $x_0$ ,  $y_0$ の6つのパラメータを用いて、 $(X_m - x_b)^2 + (Y_m - y_b)^2$ が最小となるように計算した。計算には、CERN-ROOTの最小2乗法計算パッケージであるMINUITを用いた<sup>[6, 7]</sup>。また校正時に計測した全計測点を用いてfittingを行った。ノーマルサイズのBPMでは、電極内半径は、65 mmであり、計測は、x方向、y方向ともに10 mm ステップのワイヤー位置に対する電極出力を計測したものであり、空間内の全計測点数は、121点となる。ノーマルサイズのBPM158台(H用77台、V用81台)は、リングに設置されるBPM全186台のうち一番多いものであり、予備も含めて、全部の個体についてのFitting 計算を行った。尚、用いたデータは、測定周波数が1.70 MHzのものである(MRではRF周波数が3%しか変化しないため十分である)。

### 3.1 ノーマルBPMの Fitting 計算と解析結果例

個体番号H08についての計算と解析の例を示す。まず、Fitting計算の結果、6つのパラメータは、表1となった。Fitting 誤差は十分に小さいことがわかる。Fitting したパラメータを用いて、式(13)の逆演算を行い、 $(X_m, Y_m)$ から、 $(x_b, y_b)$ の位置がどの程度正確に表すことができるかを調べてみた。図3に、この逆演算の結果を赤印で、また、比較のために、 $(X_m, Y_m)$ を単に $g_{RL}$ と $g_{UD}$ の平均で割り算したものを、青印でプロットした。それぞれは、グリッド（測定時のワイヤー位置）との距離を10倍し、視認性をよくしてある。中心付近の半径30 mm程度の領域では、100  $\mu\text{m}$ 以下の確度でワイヤー位置に一致している。それより大きい領域では、ズレはもう少し大きく、ゆがみなども見える。溶接などによる変形がその一因と考えられる。

表1. MRH08のFitting 結果

Parameter	記号	単位	Fit Value	Error
Rotation X	$\theta_x$	[mrad]	1.59487	2.25e-04
Rotation Y	$\theta_y$	[mrad]	-3.57521	2.24e-04
Offset X	$X_0$	[mm]	-0.18391	6.97e-03
Offset Y	$Y_0$	[mm]	-0.00962	6.94e-03
Sens R-L	$g_{RL}$	[mm <sup>-1</sup> ]	0.01303	2.93e-06
Sens U-D	$g_{UD}$	[mm <sup>-1</sup> ]	0.01309	2.92e-06

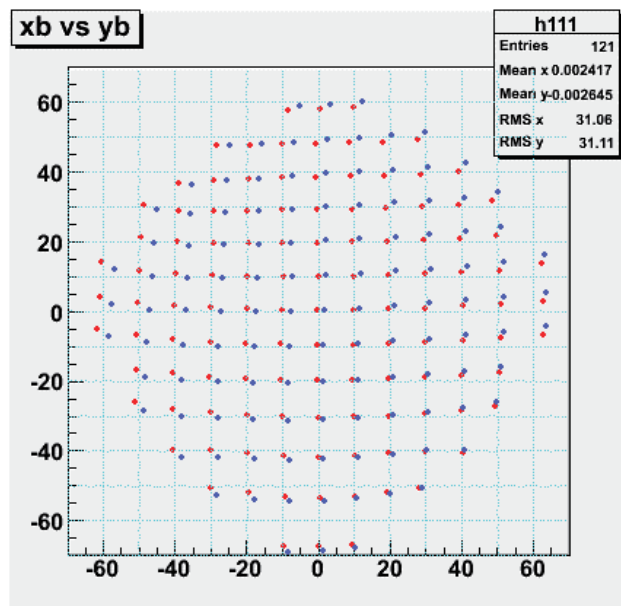


図3. 測定データ $(x_m, y_m)$ をFitting データを用いてBPM空間にプロット。

### 3.2 ノーマルBPMのFitting parameterの統計

6つのfitting parameter の統計を調べた。ノーマルBPMは、QF電磁石へ取り付けるH-typeとQD電磁石用のV-typeの2種類があり、別々に統計を取った(表2, 3)。両者で顕著な差異は認められなかった。Rotation ( $\theta_x, \theta_y$ )は標準偏差が3.5 mrad程度と多少大

きく見える。Offset ( $X_0, Y_0$ )は、標準偏差が100  $\mu\text{m}$ 程度で、内径 130 mmの電極として、かなりよく揃っているといえる。Sensitivity coefficient は、平均値が1/1000のオーダーで良く揃い、標準偏差も4/1000程度であり、個体差のばらつきがほとんどないことがわかった。

表2. H-type BPM (77台)のparameterの統計

Parameter	単位	平均値	標準偏差	最大	最小
$\theta_x$	[mrad]	2.171	3.569	7.120	8.478
$\theta_y$	[mrad]	-2.193	3.598	6.804	-13.35
$X_0$	[mm]	-0.182	0.089	0.010	-0.393
$Y_0$	[mm]	0.012	0.117	0.257	-0.292
$g_{RL}$	[mm <sup>-1</sup> ]	1.303e-2	3.545e-5	1.310e-2	1.290e-2
$g_{UD}$	[mm <sup>-1</sup> ]	1.308e-2	3.989e-5	1.317e-2	1.299e-2

表3. V-type BPM(82台)のparameterの統計

Parameter	単位	平均値	標準偏差	最大	最小
$\theta_x$	[mrad]	-5.012e-2	3.554	7.459	-10.26
$\theta_y$	[mrad]	-1.576	2.877	5.435	-7.391
$X_0$	[mm]	-0.047	0.091	0.222	-0.339
$Y_0$	[mm]	0.223	0.101	0.522	-0.021
$g_{RL}$	[mm <sup>-1</sup> ]	1.302e-2	4.958e-5	1.314e-2	1.291e-2
$g_{UD}$	[mm <sup>-1</sup> ]	1.301e-2	3.825e-5	1.310e-2	1.294e-2

## 4. まとめ

幾何学的モデルから出発して、6つのパラメータにより、J-PARC MR用ノーマルBPMの校正データのFittingを行った。測定データから、仮想ビームであるワイヤー位置を、中心部の60 mm  $\phi$ 程度の領域ではほぼ再現できることがわかった。次のステップではビームは有限の広がりと分布をもつことから、それらの値を入れた計算を行い、ビーム位置が目標の $\pm 100$  mmで計測できることを確認する予定である。また、他のさらに大きな(165mm  $\phi$ , 200mm  $\phi$ 等の)BPMのFitting計算、また、3-50 BT用に製作した、平行電極型のBPMの計算を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 外山 毅 他, “J-PARC 50GeV RingのBPM検出器”, 第14回加速器科学研究発表会(2003).
- [2] 外山 毅 他, “J-PARC MRのビーム診断”, FO24, 本 Proceedings.
- [3] 三浦孝子 他, “J-PARC 主リング用ビーム位置モニターのキャリブレーション”, 第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会.
- [4] 花村幸篤 他 “J-PARC 50 GeVシンクロトロンBPM校正装置開発”, 第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会.
- [5] G. Nassibian, CERN SI/NOTE, EL/70-13.
- [6] ROOT: An Object-Oriented Data Analysis Framework, <http://root.cern.ch/root/>.
- [7] MINUIT: Function Minimization, <http://seal.web.cern.ch/seal/snapshot/work-packages/mathlibs/minuit>.