

# J-PARC 3-50BT のビーム位置モニタによるビームサイズ測定

## BEAM SIZE MEASUREMENT WITH THE BPMS IN THE J-PARC 3-50BT

外山 毅#, 手島 昌己

Takeshi Toyama #, Masaki Tejima

KEK

### Abstract

To measure beam sizes in a nondestructive manner is highly required in high intensity beam accelerator facilities such as J-PARC. We have been investigating to measure  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$  in the 3-50BT, making full use of four parallel plate electrodes of present 14 BPMS. The four signals,  $V_U$ ,  $V_D$ ,  $V_L$  and  $V_R$ , from the four electrodes are reconstructed as  $\Sigma = V_U + V_D + V_R + V_L$ ,  $\Delta x = k_x (V_R - V_L) / \Sigma$ ,  $\Delta y = k_y (V_U - V_D) / \Sigma$ ,  $q = k_q (V_R - V_U + V_L - V_D) / \Sigma$ .

### 1. はじめに

大強度ビームで非破壊的にビームサイズを測定する必要性は非常に高い。現在 J-PARC 3-50BT の 14 台の BPM を使って、既によく知られた以下の方法[1,2,3]を使って、各 BPM 位置でのビームサイズ  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  を求める検討を行っている。3-50BT BPM は、建設当初に既に 4 極モーメントを測定することを想定して設計された[4]。すなわち、平行平板4電極(ストリップラインなど)を持つビーム位置モニタ(BPM)の信号( $V_U$ ,  $V_D$ ,  $V_L$ ,  $V_R$ : 上下左右の電圧)に関して、 $\Sigma = V_R + V_U + V_L + V_D$  によりビーム強度、 $(V_R - V_L) / (V_R + V_L)$ ,  $(V_U - V_D) / (V_U + V_D)$ , または、 $(V_R - V_L) / \Sigma$ ,  $(V_U - V_D) / \Sigma$  により2極モーメント(ノーマル成分 $\langle x \rangle$ , スキュー成分 $\langle y \rangle$ ),  $(V_R - V_U + V_L - V_D) / \Sigma$  により4極モーメント(ノーマル成分)が求められる。異なる  $\beta$  関数、ディスページョン関数の場所に設置された複数台の BPM を使うと、上記のモーメントの組み合わせにより、ビームサイズ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ )が得られる。オフラインでの信号処理方法の詳細および結果を報告する。

### 2. 3-50BT BPM の構成

3-50BT は、J-PARC の 3 GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron)から MR (Main Ring) synchrotron へ、3 GeV 陽子ビームを輸送するビームラインである。3N-BT から分岐したのちの総延長およそ 230m のビーム輸送を行う[5]。建設当初に 14 台の BPM (Beam Position Monitor) が設置された[6, 7]。各 BPM の設置箇所を Figure 1 に示す。その後さらに3台の BPM が追加された[8]。

初期に設置された BPM は「静電型モニター」で、上流2台が内径 230mm、それ以外の 12 台は内径 200mm である(Figure 2)。追加された3台の BPM はループ・ピックアップ型モニターで内径 164mm である。

今回データ解析に使った初期の 14 台の BPM では、各電極の信号は、BPM ヘッドにおいて巻数比 15:2 のトランスフォーマーを経由して 50  $\Omega$  同軸ケーブル(8D-HFB: 4同軸ケーブル一括シールド)に接続され、第1電源棟(D1)のローカル制御室(LCR)まで伝送される。上記トランスフォーマーは、電極から見たケーブル側のインピーダンスを大きくし(2.8k  $\Omega$ )、低域カットオフ周波数を小さくするためであった。

D1 の LCR では、低周波ノイズ除去のための RF トランスを通して後デジタイザ(DSO6014L: 8bit, 1GS/s [9])に接続されている。

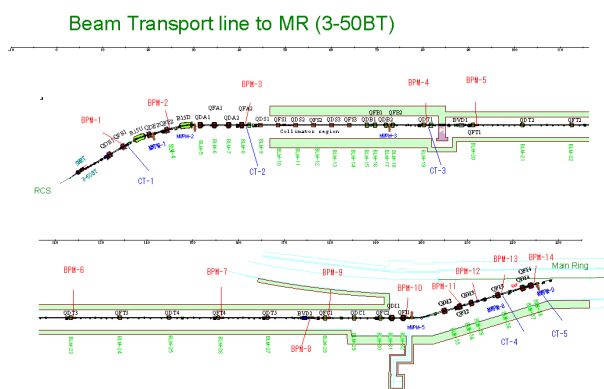


Figure 1: BPMs of the 3-50 BT.

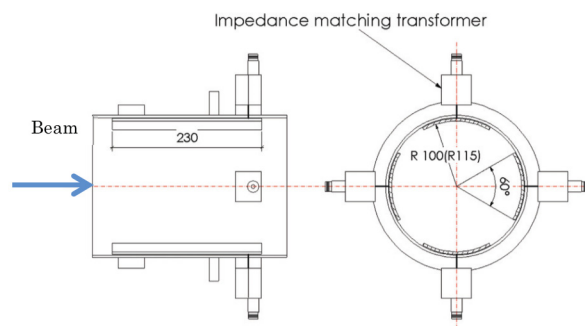


Figure 2: BPM head. There are two diameter sizes:  $\phi 230$  (#1, 2) and  $\phi 200$  (#3 - #14).

### 3. Quadrupole moment の導出方法

#### 3.1 信号処理

デジタイズ後の典型的な2バンチの信号波形を Figure 3 に示す。数 100 m の伝送ケーブルを通過しているため

# takeshi.toyama@kek.jp

波形が鈍りテールを引いている。またサグのために、1つ目のバンチ波形のテールが、2つ目のバンチ波形にかかっている。2つのバンチ波形を分離し、同時に SN 比も向上させるために、下記のようなデジタルフィルターを通した。

$$y_n = b_0 x_n + b_2 x_{n-2} - a_1 y_{n-1} - a_2 y_{n-2} \quad (1)$$

$$b_0 = 0.1, b_2 = -0.1, a_1 = -1.970, a_2 = 0.9704$$

このデジタルフィルターの周波数特性と、信号の周波数スペクトルを Figure 4 に、フィルター後の信号波形を Figure 5 に示す。以下の解析には、このフィルター後の各信号波形の peak-to-peak 値を使用した。この操作によりノイズは約 1/10 になった。

これらの右、上、左、下電極の信号電圧を、電圧の総和  $\Sigma = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$  で割ったものを、それぞれ

$$\hat{V}_1, \hat{V}_2, \hat{V}_3, \hat{V}_4$$

とおく。

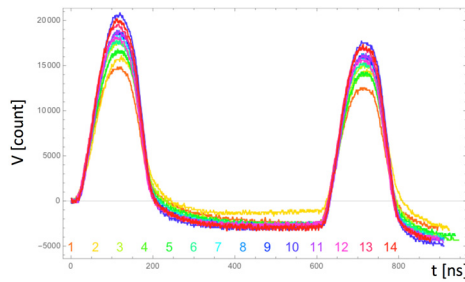


Figure 3: Signals of 14 BPMs. Colors shown in the bottom indicate the BPM#.

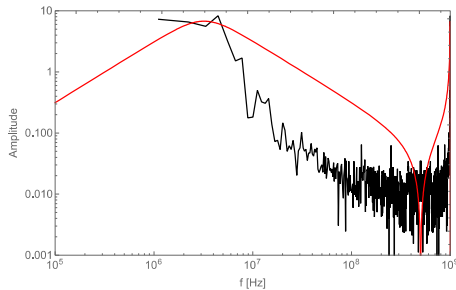


Figure 4: Frequency spectra of the BPM signal (black line) and the band pass filter (red line).

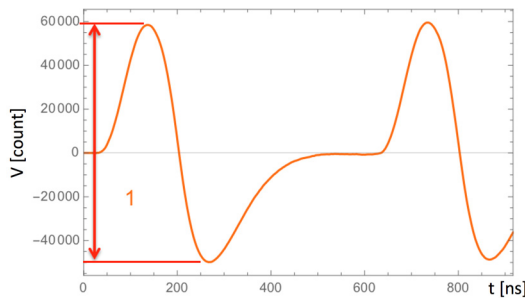


Figure 5: Filtered BPM signal.

### 3.2 4つの出力電圧と多極モーメント

上記の各電極電圧と多極モーメントの関係は、線電荷に対する微小開き角  $\Delta\theta$  電極の応答

$$\sigma(r, \phi, R, \theta_n) = \frac{\lambda(r, \phi)\Delta\theta}{2\pi} \left[ \begin{aligned} &1 + 2\frac{x}{R}\cos\theta_n + 2\frac{y}{R}\sin\theta_n \\ &+ 2\frac{x^2 - y^2}{R^2}\cos 2\theta_n + \frac{4xy}{R^2}\cos 2\theta_n \\ &+ 2\frac{x^3 - 3xy^2}{R^3}\cos 3\theta_n \dots \end{aligned} \right]$$

からの類推で、次式のようにかける[10]。ここで、 $r, \phi, R, \theta_n$ は、それぞれ、ビームの極座標、BPM 電極表面の極座標である。 $\lambda(r, \phi)$ はビーム線電荷密度である。

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \\ \hat{V}_3 \\ \hat{V}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} & C_{1x} & C_{1y} & C_{1q} & C_{1Q} & C_{1s} \dots \\ C_{20} & C_{2x} & C_{2y} & C_{2q} & C_{2Q} & C_{2s} \dots \\ C_{30} & C_{3x} & C_{3y} & C_{3q} & C_{3Q} & C_{3s} \dots \\ C_{40} & C_{4x} & C_{4y} & C_{4q} & C_{4Q} & C_{4s} \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \langle x \rangle \\ \langle y \rangle \\ \langle x^2 - y^2 \rangle \\ \langle 2xy \rangle \\ \langle x^3 - 3xy^2 \rangle \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$C_{i0}$  ( $i = 1, \dots, 4$ )は  $i$  番目の電極電圧におけるビーム全電荷による寄与、 $C_{ix}, C_{iy}$  ( $i = 1, \dots, 4$ )は、それぞれ、 $i$  番目の電極電圧における水平・垂直位置変化の寄与、 $C_{iq}, C_{iQ}$  ( $i = 1, \dots, 4$ )は、それぞれ、 $i$  番目の電極電圧における4極モーメントのノーマル・スキュー成分の寄与、 $C_{is}$  ( $i = 1, \dots, 4$ )は、6極モーメント(ノーマル成分)の寄与、等である。多極モーメントから各電圧への変換行列は、線電流に対する各電極の応答の計算値あるいはワイヤー・マッピングで求められる。

ここでは、4つの電極電圧から各モーメントを求めたい。これが解けるために、0 から4極モーメント(ノーマル成分)までの4つの項までで打ち切ることとする。

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \langle x \rangle \\ \langle y \rangle \\ \langle x^2 - y^2 \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \\ \hat{V}_3 \\ \hat{V}_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここでは、線状ビームを仮定して境界要素法(BEM)で求めた行列要素を使用した。ビーム位置  $\mathbf{r} = (x, y)$ として、 $|\mathbf{r}| < 40$  mm の場合、ビームの  $x$  または  $y$  座標に対する2極モーメントの応答を Figure 6 に示した。Figure 7 には、4極モーメントの応答をプロットした。それぞれ、青点が BEM による計算値、赤線が原点近傍での線形近似である。式(2)の変換行列の要素は、直径 230 mm、200 mm の場合に、それぞれ

直径 230 mm 200 mm  
 $c_{11} = c_{12} = c_{13} = c_{14}$  1 1  
 $c_{21} = -c_{22} = c_{33} = -c_{34}$  0.124 0.108  
 $c_{41} = -c_{42} = c_{43} = -c_{44}$  0.00873 0.00668  
 である。上記以外の要素は 0 である。

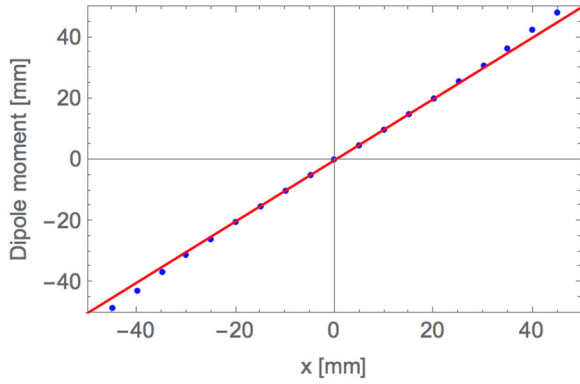


Figure 6: Dipole moment response of the BPM.

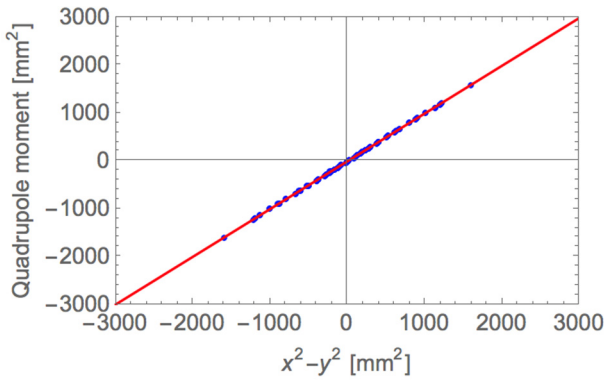


Figure 7: Quadrupole moment response of the BPM.

### 3.3 誤差

Figure 6, 7 より、理想的なシステムでの系統エラーは、 $|\mathbf{r}| < 10 \text{ mm}$  の場合で、 $|\Delta x|, |\Delta y| < 40 \mu\text{m}$ 、 $|x^2 - y^2| < 500 \text{ mm}^2$  の場合で、 $|\Delta q| < 5 \text{ mm}^2$  であった。また、ノイズによる寄与は、

$$\sigma_q = \sqrt{\sum_{k=1}^4 \left(\frac{\partial q}{\partial V_k}\right)^2 \sigma_k^2} \sim c_{41} \frac{\sigma_V}{2V} \quad (3)$$

(4 電極の信号電圧および誤差が等しいとした)と考えられる。ビーム強度  $\sim 3 \times 10^{13} \text{ p/bunch}$  のときの誤差電圧は、フィルター後の信号波形の誤差  $|\Delta V/V| < \sim 0.2\%$  ( $\sigma$ ) を使うと、 $|\sigma_q| < \sim 10 \text{ mm}^2$  と見積もられる。

上記以外に、BPM 本体、信号伝送、デジタイザでの系統エラーの寄与が考えられるが、今後調査を行う。

## 4. ビーム・データの解析

### 4.1 モーメントの算出

上記で得られた  $\langle x \rangle$ ,  $\langle y \rangle$ ,  $\langle x^2 - y^2 \rangle$  から、

$$\sigma_x^2 - \sigma_y^2 = \langle x^2 - y^2 \rangle - \langle x \rangle^2 + \langle y \rangle^2 \quad (4)$$

によって、14 台の BPM で 14 個の  $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$  が得られる。

### 4.2 $\epsilon_x, \epsilon_y, \sigma_{\Delta p/p}$ の算出

既知のラティス・パラメータ (Figure 8 [11]) を仮定してエミッタンス (水平、垂直)、運動量広がり:  $\epsilon_x, \epsilon_y, \sigma_{\Delta p/p}$  を未知数として下記の式にフィットする解を求めた。

$$\sigma_x^2[i] - \sigma_y^2[i] = \beta_x[i] \cdot \epsilon_x + \beta_y[i] \cdot \epsilon_y + (\eta_x[i]^2 - \eta_y[i]^2) \sigma_{\Delta p/p}^2 \quad (5)$$

ここで、 $i = 1, \dots, 14$  である。

2017 年 2 月 23 日に取得したデータの解析結果を Figure 9 に示す。青線で結んだデータが測定点、緑線がフィットの結果である。BPM#3, #14 でデータとフィット結果の一致が良くない。BPM#3, #14 の式をフィットから外しても結果はほとんど変わらなかった。解は、 $\epsilon_x \sim 2.9 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  ( $\sigma$ )、 $\epsilon_y \sim 3.9 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  ( $\sigma$ )、 $\sigma_{\Delta p/p} \sim 0.14\%$  であった。

その後、BPM#3 の ch.3 ("up"電極) でコネクタの接続不良が見つかり修正された。その後の 2017 年 7 月 4 日に取得したデータの解析結果を Figure 10 に示す。BPM#3 でのズレは減ったがまだ残っている。解は、 $\epsilon_x \sim 2.5 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  ( $\sigma$ )、 $\epsilon_y \sim 3.6 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  ( $\sigma$ )、 $\sigma_{\Delta p/p} \sim 0.15\%$  であった。これらの解は、別のプロファイルモニターを使用した測定と同程度であった。

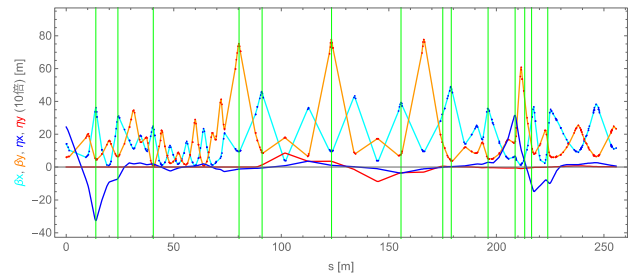


Figure 8: Lattice parameters of the 3-50BT.

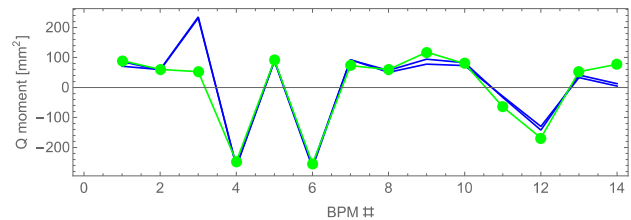


Figure 9: The measured (in Feb. 13, 2017) and fitted  $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ . Bad connector connection was found in BPM#3.

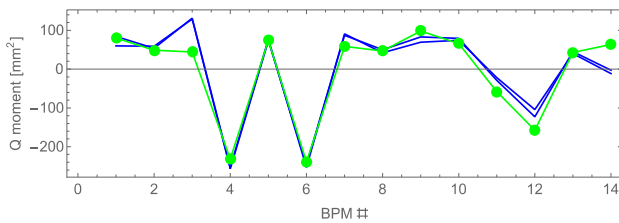


Figure 10: The measured (in Jul. 4, 2017) and fitted  $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ . Bad connector connection was corrected.

## 5. まとめ

J-PARC 3-50BT の 14 台の BPM で大強度陽子ビーム ( $\sim 3 \times 10^{13}$  ppb) の 4 極モーメント (ノーマル成分)  $\langle x^2 - y^2 \rangle$  および  $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$  を求めた。これらの測定データをラティスデータにフィットして  $\epsilon_x, \epsilon_y, \sigma_{\Delta p/p}$  を求めた。

しかし、測定データとの一致が良くない BPM が数箇所ある。今後、新設された 3 台の BPM も解析を含めて、 $\beta, \alpha, \eta, \eta'$  の初期値も未知数として解く方法を試みる予定である。

また、BPM システムの系統エラーについてもさらに検討する必要がある。最終的には制御システム (EPICS) に実装して、運転中の非破壊ビーム・モニターとして活用したい。

## 参考文献

- [1] R. H. Miller *et al.*, “Nonintercepting Emittance Monitor”, *12th Int. Conf. on High Energy Accelerators, Batavia* (1983) 602-605.
- [2] T. Suwada *et al.*, “Nondestructive beam energy-spread monitor using multi-strip-line electrodes”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* vol.6, 032801 (2003).
- [3] A. Jansson, “Noninvasive single-bunch matching and emittance monitor”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* vol.5, 072803 (2002).
- [4] T. Miura *et al.*, “KEK-PS 主リングにおける横方向四極モードの測定”, *Proc. of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, November 2003*.
- [5] M. Tejima *et al.*, “Shot-by-shot beam position monitor system for beam transport line from RCS to MR in J-PARC”, *Proc. of IPAC'10, 2010*, p.978.
- [6] M. Tejima *et al.*, “J-PARC 3-50 BT のビーム位置モニタの測定精度の改善”, *Proc. of the 10th Symposium on Accelerator Science and Technology, Nagoya, Japan, August 3-5, 2013*, p.1053.
- [7] H. Harada *et al.*, “J-PARC 3-50BT ラインにおける光学系の調整”, *Proc. of the 10th Symposium on Accelerator Science and Technology, Nagoya, Japan, August 3-5, 2013*, p.39.
- [8] K. Satou *et al.*, “J-PARC350BT 光学パラメータ詳細測定のための高放射場用 BPM の開発”, *Proc. of the 11th Symposium on Accelerator Science and Technology, Aomori, Japan, August 9-11, 2014*, p.713.
- [9] <http://www.keysight.com>
- [10] T. Toyama *et al.*, “MEASUREMENT OF TRANSVERSE MULTIPOLE MOMENTS OF THE PROTON BEAM IN THE J-PARC MR”, *proc. of IPAC2017, 2017*, p.274.
- [11] S. Igarashi, “3-50bt sad file”, Mar. 2017.