

J-PARC 3-50BT のビーム位置モニタによるビームサイズ測定 (2)

BEAM SIZE MEASUREMENT WITH THE BPMS IN THE J-PARC 3-50BT (2)

外山毅^{#, A)}, 久保木浩功^{A)}, 佐藤健一郎^{A)}, 手島昌己^{B)}

Takeshi Toyama[#], Hironori Kuboki, Kenichirou Satou, Masaki Tejima

^{A)} KEK/J-PARC

Abstract

We have been measuring quadrupole moments, $\langle x^2-y^2 \rangle$ and $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$, using BPMS in the beam transport line from the RCS to the MR in J-PARC, then reducing horizontal and vertical emittances ϵ_x, ϵ_y and momentum spread $\sigma_{\Delta p/p}$ by fitting. The data in 2017 agreed very well with the expectation. But the data in Apr. 2018 showed large discrepancy. Mistake in data handling was found recently and consistent data were obtained after correction. Long term trend data indicates small variation of the machine parameters such as ϵ_y .

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。破壊的測定ではビームロスが発生し残留線量が増えるからである。J-PARCにおいて、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 3-50BT (Fig.1) [1, 2]において、大強度ビームの常時監視を目指して、17台の BPM を使って、各 BPM 位置での 2 極モーメント $\langle x \rangle, \langle y \rangle$ 、4 極モーメント $\langle x^2-y^2 \rangle$ を測定し、既知の Twiss パラメータを使って、フィットにより $\epsilon_x, \epsilon_y, \sigma_{\Delta p/p}$ を求める方法を試みている[3, 4]。

PASJ2017 の報告後、2018 年の一部のデータセットでフィットが困難なものが見つかり[3]、3-50BT 入口での $\beta_x, \alpha_x, \beta_y, \alpha_y, \eta_x, \eta_y$ をフィッティングの未知数 $\epsilon_x, \epsilon_y, \sigma_{\Delta p/p}$ に追加して再フィットを試みるなど、詳細をチェックしていたが、データファイルの取扱に誤りが見つかり修正したところ、正常な結果を得た。本稿では、システムの概要、PASJ2017 以降解析に新たに追加した 3 台の BPM[5]について、2018 年 3 月 - 5 月における大強度運転時における長期変動について、および誤差について報告する。

2. 3-50BT BPM によるビームサイズ測定

2.1 検出器

J-PARC 建設当初に 14 台の BPM (Beam Position Monitor)が設置された (Fig. 2) [1, 2]。BPM#1, #2 の内径は 230mm, BPM#3 以降の内径は 200mm である。その後ビームコミッションング・グループの要請により、コリメータ領域に 3 台の BPM#4, #5, #6 が追加された (Fig. 3) [5]。広い開口角の電極では、コリメーションによる散乱粒子が電極に入射して 2 次電子を多数発生すると予想されたため、断面積の小さいループ型の検出器とした[5]。

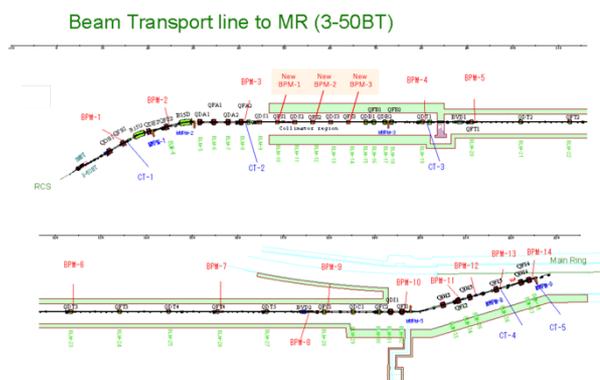


Figure 1: BPMS of the 3-50 BT from the RCS to the MR. The length of the 3-50BT is 230 m.

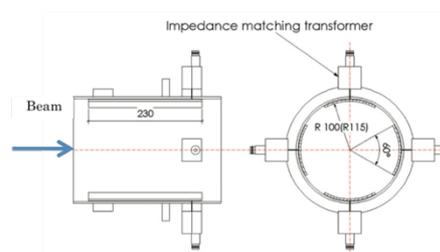


Figure 2: BPM head. There are two diameter sizes: $\phi 230$ (#1, 2) and $\phi 200$ mm (#3, #7 - #17).

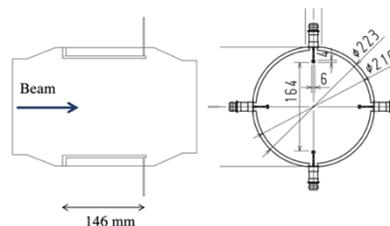


Figure 3: New BPM (#4, #5, #6) head with four loop-couplers.

2.2 信号処理

信号は 8D 高発泡ポリエチレン絶縁同軸ケーブルによりオシロスコープ (DSO6014: 従来型 BPM, DSO-X 4034A: 新型 BPM) まで伝送される。

BPM からの生信号はノイズやバンチの不均等分布による高周波成分を含んでいる (Fig. 4). それらを低減しバンチ全体のなめらかな位置情報を得るため下記のような帯域通過フィルター (BPF) を使用した:

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

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

生信号の周波数スペクトル (黒色) と BPF の周波数特性 (赤色) を Fig. 5 に示した。BPF のピークは加速 RF 周波数の 2 倍, ~3.4 MHz に合わせた。フィルター後の波形を Fig. 6 に示した。最終的な BPM 出力: V_1, V_2, V_3, V_4 としてフィルターされた信号のピーク-ピーク値をとった。

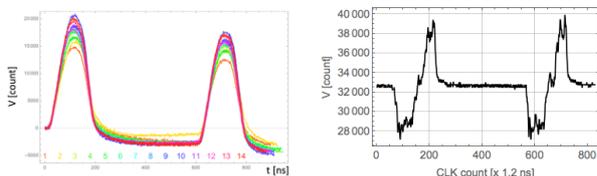


Figure 4: Signals of original and new BPMs.

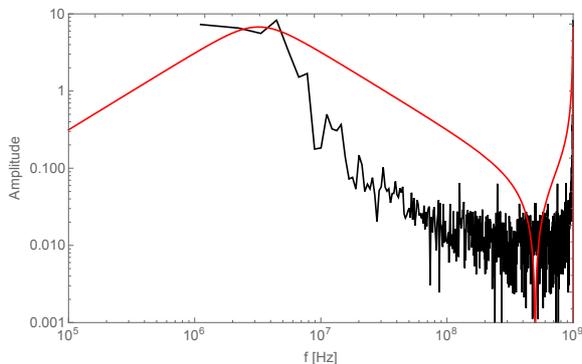


Figure 5: Frequency spectra of the BPM signal (black line) and the band pass filter (red line).

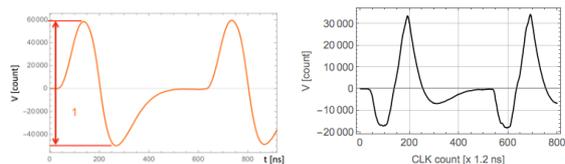


Figure 6: Filtered BPM signals. Left: original BPM, right: new BPM.

2.3 電極出力信号からモーメントへの変換

BPM 電極の出力信号 V_1, V_2, V_3, V_4 を和信号 $\Sigma = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$ で規格化した $\hat{V}_1, \hat{V}_2, \hat{V}_3, \hat{V}_4$ とビームの横方向モーメント $\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle x^2 - y^2 \rangle, \langle 2xy \rangle, \dots$ を行列で関係付けることができる[6]。しかし、モーメントは理論上無限次まで存在するので正方行列ではなく、4 つのデータに対して無限個の未知数となり解くことができない。そのため近似解を求めることにして $\langle x \rangle, \langle y \rangle, \langle x^2 - y^2 \rangle$ まで打ち切ることとする、

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

を得る。行列要素 c_{ij} は境界要素法による解を使用した。既設の BPM については

Inner diameter	0.23 m	0.20 m	単位
$c_{11} = c_{12} = c_{13} = c_{14}$	1	1	-
$c_{21} = -c_{22} = c_{23} = -c_{24}$	0.124	0.108	m
$c_{31} = -c_{32} = c_{33} = -c_{34}$	0.00873	0.00668	m ²

他の成分は 0.

新設 BPM については

Inner diameter	0.21 m	単位
$c_{11} = c_{12} = c_{13} = c_{14}$	1	-
$c_{21} = -c_{22} = c_{23} = -c_{24}$	0.0983	m
$c_{31} = -c_{32} = c_{33} = -c_{34}$	0.00494	m ²

他の成分は 0.

である。

ビームサイズ情報 $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ は、4 極モーメント $\langle x^2 - y^2 \rangle$ から重心位置の変位 $\langle x \rangle, \langle y \rangle$ からの寄与 $\langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2$ を差し引いて下記のように求められる

$$\sigma_x^2 - \sigma_y^2 = \langle x^2 - y^2 \rangle - \{\langle x \rangle^2 - \langle y \rangle^2\}.$$

BEM で計算した線状ビームに対する 2 極モーメントの位置応答を Fig. 7 に示した。青線は BEM 計算の結果、赤線は $c_{21}, c_{22}, c_{33}, c_{34}$ に対応する原点近傍での係数で、新設 BPM に対応したものである。

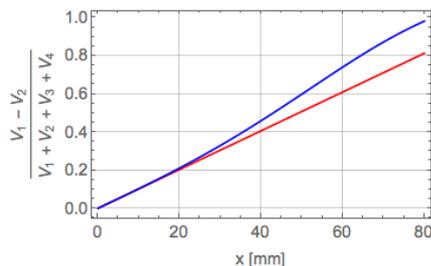


Figure 7: Dipole moment response of the BPM.

上記と同様に、線状ビームの $x^2 - y^2$ に対する 4 極モーメントに対する応答を Fig. 8 に示した。青線が BEM 計算の結果、赤線は $c_{41}, c_{42}, c_{43}, c_{44}$ に対応する原点近傍での係数で、新設 BPM に対応したものである。

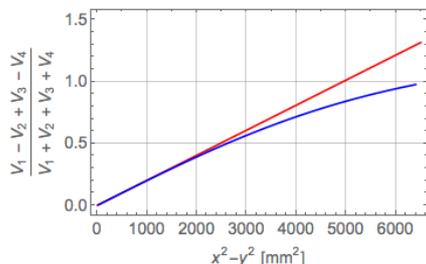


Figure 8: Quadrupole moment response of the BPM.

3. フィットによるエミッタンス導出

3-50BT に沿って水平・垂直方向のエミッタンス、運動量の広がり $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \sigma_{\Delta p/p}$ は一定であるとし、 i 番目の BPM 設置位置 $s = s_i$ での Twiss parameter を使って (Fig. 9, [7])、

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

と書くことができる。

ここでは、2018 年 3 月 11 日～5 月 11 日の運転中のデータを解析する（解析の都合で 4 月 1 日～10 日、5 月 1 日～10 日のデータが抜けている）。時間的な変化を見るために、 $\sigma_x^2[i] - \sigma_y^2[i]$ の大きくなる BPM#7, #9 ($i = 7, 9$; Fig. 10) における時系列データを Fig. 11 に示した。BPM#7 と #9 の $\sigma_x^2[i] - \sigma_y^2[i]$ が有意に変化していることがわかる。これら 2 者の相関を Fig. 12 に示す。左図が 2018 年 3 月 16 日～20 日、右図が 2018 年 4 月 23 日～30 日のデータを全区間データ（緑点）に青点で重ね書きしたものである。各期間のデータのばらつきは [3] で、信号電圧のばらつきから求めた $\langle x^2 - y^2 \rangle$ の誤差 $|\sigma_q| < \sim 10 \text{ mm}^2$ と同程度である。

全 BPM を使って Eq. (2) の左辺と右辺の差の 2 乗和を最小にする $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \sigma_{\Delta p/p}$ を求めると、Fig. 12 に示したような結果を得る。2018 年 3 月 16 日～20 日の 1 番目のバッチ（1 回目の MR への入射ビーム）の 2 バンチの平均値は、 $\varepsilon_x \sim 2.35 \pm 0.10 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (σ), $\varepsilon_y \sim 3.52 \pm 0.08 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (σ), $\sigma_{\Delta p/p} \sim 0.191 \pm 0.026 \%$ となった。同様の計算を 2018 年 4 月 23 日～30 日のデータについて行ったところ、 $\varepsilon_x \sim 2.11 \pm 0.15 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (σ), $\varepsilon_y \sim 3.06 \pm 0.10 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (σ), $\sigma_{\Delta p/p} \sim 0.166 \pm 0.047 \%$ となった。ここで、誤差はショット毎のばらつきの標準偏差である。

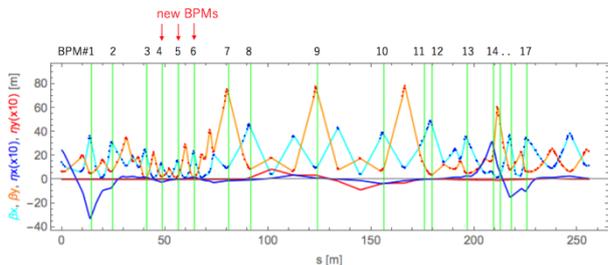


Figure 9: Lattice parameters of the 3-50BT.

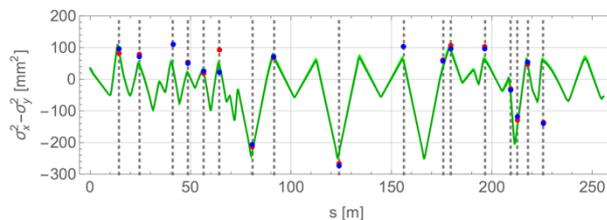


Figure 10: Fitted and calculated $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$. Red dots: front bunch, blue dots: rear bunch, green line: calculation with sad.

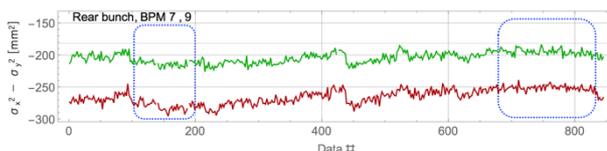


Figure 11: The measured $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ at the BPMs #7, #9 in Mar. 11 - May 11, 2018 (data in Apr. 1 - 10, May 1 - 10 are missing). Green curve: #7, brown curve: #9. Area enclosed by a blue dotted square in the left side corresponds to Mar. 16 - 20, the right side square corresponds to Apr. 23 - 30.

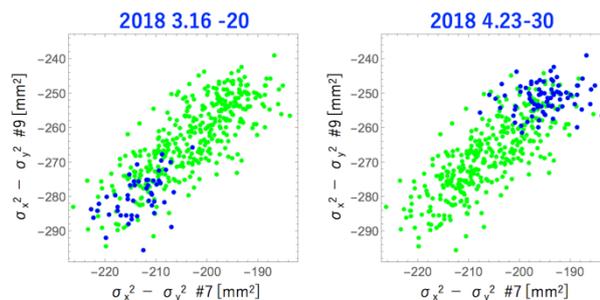


Figure 12: Correlation of the measured $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ at the BPMs #7 and #9 in Mar. 11 - May 11, 2018. Green dots: whole period, blue dots: Mar. 16 - 20 (left plot), Apr. 23 - 30 (right plot).

その他の誤差について議論する。Fig. 10 において、赤点は前バンチ、青点は後ろバンチの期間中データの平均値である。前後バンチのデータの相違が BPM#6 で特に顕著である。また、BPM#17 に於いては、データと軌道計算 (sad) 結果との乖離が大きい。これらは、BPM 自体の系統誤差、軌道計算の誤差の可能性もある。

また、 $s \approx 50 - 70 \text{ m}$ 付近にコリメータがありビームハローが削られるので、厳密にはビームエミッタンスが変化する。ビームハローの全粒子数にたいする割合は 1% 程度かそれ以下と考えられるが横方向の広がりが大きいので 4 極モーメントへの寄与は問題になる。ビームハローが無い場合とある場合で、例えば $\sigma_x = 15.9 \text{ mm}$, $\sigma_y = 6 \text{ mm}$ のガウス分布として $\langle x^2 - y^2 \rangle$ を試算すると、それぞれ 216 mm^2 , 226 mm^2

となり、上記のばらつきと同程度の寄与があることがわかる。

他の誤差の可能性として、3-50BT 入口の Twiss parameter の変化が考えられる。そこで、 $\beta_x, \alpha_x, \beta_y, \alpha_y, \eta_x, \eta'_x, \eta_y, \eta'_y$ (ベータ関数、ディスパーション関数とその微分に関する量) の初期値もフィットの未知数に組入れて計算したが、BPM#3, #6, #10, #13, #17 において、測定データと軌道計算から求めた $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ の不一致を解消することはできていない。

4. 結論

J-PARC 3-50BT の新旧合わせて 17 台の BPM を使って、2 極モーメント (x)、(y)、4 極モーメント ($x^2 - y^2$) を測定し、 $\sigma_x^2 - \sigma_y^2$ を求めた。これらの結果と既知の Twiss parameter を使って水平、垂直方向エミッタンス $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ および運動量広がり $\sigma_{\Delta p/p}$ をフィットによって求めた。

2018 年 3 月 11 日～5 月 11 日の運転中の時系列データの解析の結果、 ε_y の有意な変化 ($\sim 5\sigma$) が観測された。ビーム強度との相関、および変化の原因を今後確認する。

フィッティングはほぼうまくいっているが、一部系統的に合わない箇所 (BPM#3, #6, #10, #13, #17 が顕著) があり、BPM 自体の系統誤差、軌道計算の誤差の検討が必要である。

運転用制御システム (EPICS) への組み込み、Multi-ribbon profile monitor との同時測定・解析も今後の課題である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] M. Tejima *et al.*, “Improvement of Measurement Accuracy of the Beam Position Monitor at 3-50 BT J-PARC”, Proc. of the 10th Symposium on Accelerator Science and Technology, Nagoya, Japan, August 3-5, 2013, p.1053 (Japanese).
- [3] T. Toyama *et al.*, “Beam Size Measurement with the BPMs in the J-PARC 3-50BT”, Proc. of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Sapporo, Japan, August 1-3, 2017, p.1094 (Japanese).
- [4] T. Toyama *et al.*, “Measurement of Transverse Dipole and Quadrupole Moments with the BPMs in the J-PARC 3-50 BT”, proc. of IPAC2018, 2018, p.2197.
- [5] K. Satou *et al.*, “The new BPMs for the J-PARC 350BT Optics Measurements at High Radiation Fields”, Proc. of the 11th Symposium on Accelerator Science and Technology, Aomori, Japan, August 9-11, 2014, p.713 (Japanese).
- [6] T. Toyama *et al.*, “Measurement of Transverse Multipole Moments of the Proton Beam in the J-PARC MR”, proc. of IPAC2017, 2017, p.274.
- [7] S. Igarashi, “3-50BT SAD (Strategic Accelerator Design) file”, Mar. 2017 and Jul. 2018.