

J-PARC 3-50 BT のビーム位置モニタの測定精度の改善

IMPROVEMENT OF MEASUREMENT ACCURACY OF THE BEAM POSITION MONITOR AT 3-50 BT J-PARC

手島 昌己^{#,A)}, 外山 毅^{A)}, 花村 幸篤^{B)}
Masaki Tejima^{#,A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Kotoku Hanamura^{B)}

^{A)} KEK/J-PARC

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd

Abstract

The 3-50 BT at J-PARC is a beam transport line to the main ring (MR) from a 3GeV rapid cycling synchrotron (RCS). Operation with higher-intensity proton beams is planned from next year at J-PARC. The beam optics in the 3-50 BT were precisely measured in order to minimize beam loss in the MR. Measurement of the optics parameters is performed by measuring the beam position at large displacement from the central orbit. In order to extend the measurement area of the BPMs from near the center of the head to within 40 mm in radius, we modified the formula for position measured by BPM from a linear expression into a 3rd degree polynomial. The measurement accuracy of a BPM is influenced by variations in the gain balance of the four outputs of the BPM. We were able to apply the same method as used at KEKB to analyze gains of the 3-50 BT BPMs at J-PARC. In this paper, we report on the measurement accuracy of the beam position as calculated using 3rd order polynomials, and the methods and results of beam based gain calibration (BBGC).

1. はじめに

J-PARC の 3-50 beam transport line (3-50 BT) は 3GeV rapid cycling synchrotron (RCS)から main ring (MR) へのビーム輸送路である[1]。J-PARC において、今後、MR の陽子ビームの強度を次第に上げて、750kW のビームを取り出すことを目指している。この MR の大強度化に備えて、MR のビーム損失を最小限にするために、3-50 BT のビーム光学系が、正確に診断された[2]。3-50BT のビーム位置モニタ (BPM) は、最近まで、モニタ・ヘッドの中心付近の測定精度が保証されていれば十分であると考えられていたため、一次係数でビーム位置を算出していた。しかしながら、ビーム光学系の診断において、ビーム軌道を大きく振って、ビーム位置を測定したために、モニタ・ヘッド中心から 10mm 以上離れたビーム位置の測定精度が重要になった。このような背景から、BPM の出力信号の非線形領域もカバーして、測定精度を上げるため、私たちはビーム位置の計算式として、新たに 3 次多項式を採用した。

また、BPM の測定精度は 4 電極信号の出力応答のゲイン・バランスの微妙な変化に影響される。私たちは KEKB でビーム位置モニタの精度の改善で、その有効性が確認されたビーム・ベースド・ゲイン校正法を J-PARC の 3-50 BT の BPM のゲイン校正に適用した。本稿では、ビーム位置の三次多項式による精度の評価とビーム・ベースド・ゲイン校正の解析結果についても報告する。

2. 3-50BT のビーム診断装置について

現在、3-50BT には 14 台の BPM が設置されており、BPM の他に、マルチ・ワイヤ・ビームプロファイルモニタ、遷移放射光 (Optical Transition Radiation, OTR) 2 次元プロファイルモニタ、早いビーム電流波形モニタ (Fast Current Transformer, FCT)、ビームロスモニタ (Beam Loss Monitor BLM) も設置されており、ビームの軌道、ビームロスの低減などの調整に使用されている。特に BPM はショット・バイ・ショットで、すべてのバンチのビーム位置を測定している[3]。最近、行われたビーム光学系 (分散関数、 β 関数) の精密測定によって、その光学系の調整方法が確立された。しかし、コリメータ領域のモニタ装置が空白になっていることが判明したため、今夏、3-50BT におけるモニタの追加 (3 台の BPM、1 台のプロファイルモニタ) などの増強を計画している。

3. 3-50BT の BPM について

3.1 BPM の断面形状

3-50BT には隣接する真空容器の大きさに合わせて 2 種類の断面形状 (Figure 1) の静電誘導型の BPM が設置されている。BPM_L は半径 115 mm、BPM_N は半径 110 mm のヘッドである。4 枚の電極は見込み角 60 度の幅で長さ 230 mm で厚さ 4 mm の板を、図のように湾曲に整形し、上下、左右に配置されている。

[#]tejima@post.kek.jp

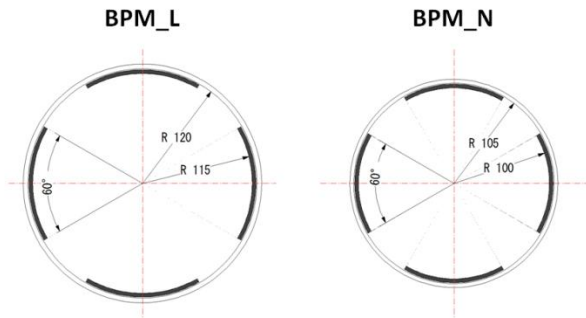


Figure 1: Cross section of BPM for 3-50BT.

3.2 Test bench による校正結果

3-50BT の 14 台の BPM は、すべてトンネル内に設置する前に、テストベンチで校正された[4]。

テストベンチではビーム信号の代わりに、直径が 0.26 mm のワイヤを張り、ワイヤにネットワークアナライザから出力された正弦波を印加して、各電極への透過係数を測定した。BPM を XY ステージ上に固定して 10mm 間隔で移動させて、Figure 2 のようなマッピングデータを測定した。左側の図のドットは、マッピングのためのワイヤ位置 (x, y) をプロットしたものである。右図は、マッピングで測定した電圧データで、4 電極の左右の信号電圧を L, R, 上下の信号電圧を U, D と定義した時、左右と上下の組で下式 (1) のような演算をして、H, V をプロットしたものである。

$$H = \frac{R - L}{R + L}, \quad V = \frac{U - D}{U + D} \quad (1)$$

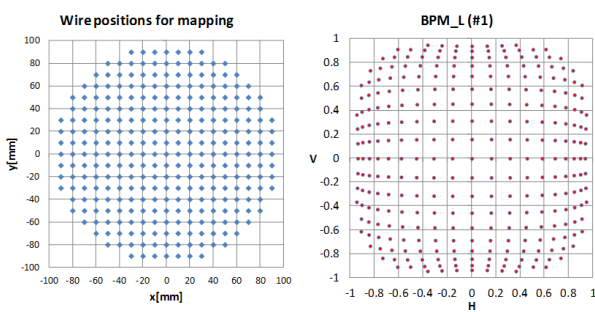


Figure 2: Mapping data by test bench

4. ビーム位置の計算式について

4.1 一次近似係数による計算

3-50BT のビーム位置は、(1) 式で求めた H, V に一次近似係数 (K) を(2) 式のように H, V に掛けて求めていた。この時 BPM_L は K=62、BPM_N は K=54 を与えた。

$$X = K \cdot H, \quad Y = K \cdot V \quad (2)$$

Figure 3 は、ワイヤ位置 (x, y) のプロットに一次近似係数で(2)式で求めた位置 (X, Y) のプロットを重ね書きした図である。図の中心付近以外は、ワイヤ位置に対して、一次式による計算位置が大きくずれている。

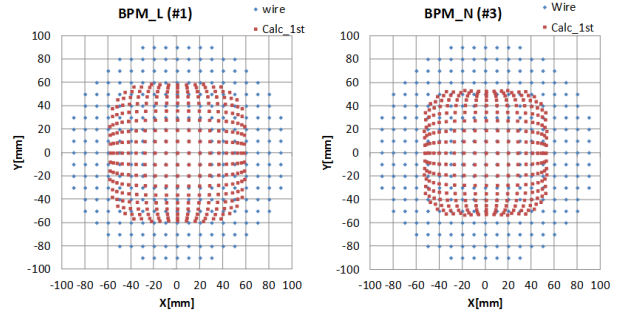


Figure 3: Plot of calculated position by 1st order coefficient

Figure 4 は、ワイヤが x 軸上にあるときのワイヤと計算の位置の差をプロットしたものである。一次近似係数でビーム位置を計算した場合は、ビームが ±10 mm 以下の領域にあるときは、Figure 4 に示すように、その誤差は 0.1 mm 以下で良く一致するが、その領域の外では、ビームが中心から離れると急激に測定誤差が増加する。

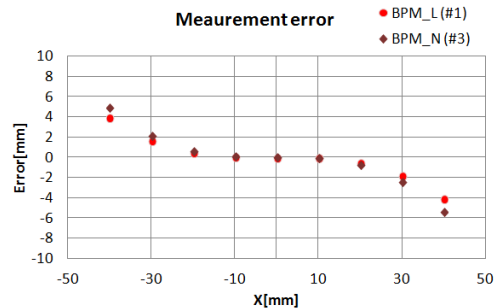


Figure 4: Measurement error of calculated positions by 1st order coefficient

4.2 三次多項式による計算

前節で述べた測定誤差が起きる理由は、ビーム位置に対する BPM 電極の出力電圧が、Figure 5 に示すように非線形応答であることによる。

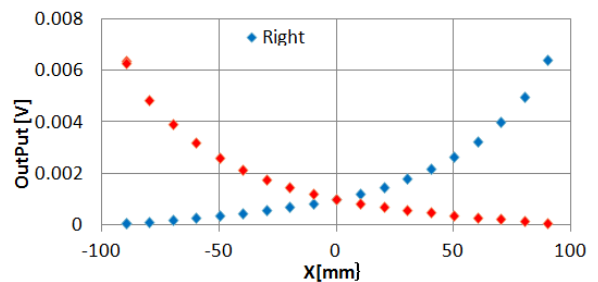


Figure 5: Non-linear response of output voltage to the beam position (x,y) on the x-axis..

この問題に対する解決方法として、ビーム位置計算式の次数を増やして、非線形応答に対応させることである。私たちは、式(3)のような3次の多項式 $f_x(H,V)$ と $f_y(H,V)$ を定義して採用することにした。

$$\begin{cases} f_x(H,V) = a_0 + a_1H + a_2HV^2 + a_3H^3 \\ f_y(H,V) = b_0 + b_1V + b_2H^2V + b_3V^3 \end{cases} \quad (3)$$

係数 a_n, b_n ($n = 0, 1, 2, 3$) は、テストベンチによるマッピングデータからワイヤ位置 (x,y) と(1)式 (H,V) の関係を最小二乗近似法で解析して得た。この多項式の係数 a_0, b_0 は、オフセット値としてBPM 毎に与えたが、係数 a_n, b_n ($n = 1, 2, 3$) の値は、EPICS のデータベースの管理上、同じ形状(サイズ)のBPM の係数を BPM_L と BPM_N にまとめた。

Table 1: Coefficients of 3rd order polynomials

	a_1	a_2	a_3
BPM_L	60.999	5.452	23.634
BPM_N	52.792	4.995	22.393

	b_1	b_2	b_3
BPM_L	61.021	5.434	23.613
BPM_N	52.785	4.991	22.398

3 次の多項式を使って計算された位置 (X,Y) とワイヤ位置 (x,y) の関係は、Figure 6 に2次元マップとして図示されたが、図 2 の線形近似式の場合と比較するとかなり広い領域でワイヤ位置と一致していることがわかる。

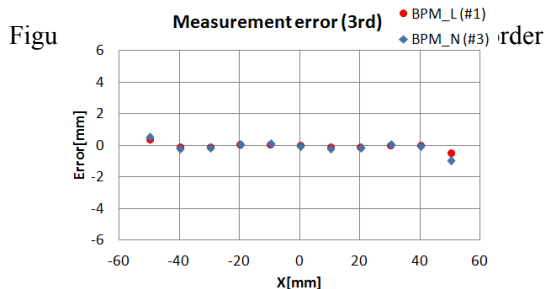
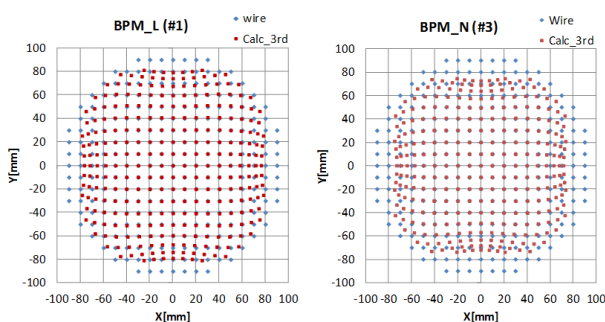


Figure 7: Measurement error of calculated positions by 3rd order coefficients

ワイヤが ± 40 mm の範囲で、その誤差は、Figure 7 に示すように 0.1 mm 以下である。実際のビームの測定では、ビームサイズが $\sigma \approx 20 \sim 30$ mm であるため、ビーム位置が ± 40 mm を超えるようなことは考えられないので、実用的には ± 40 mm の範囲をカバーできれば問題ない。

5. 3 BPM 相関法による分解能の測定

実際のビームに対して BPM の分解能がどの程度か判断するのはむずかしいが、実際のビームを用いて、BPM の分解能を測定する方法、即ち「3-BPM 相関法」[5]で、現状の 3-50BT の BPM の分解能を解析した。Figure 8 は今年の5月1日に測定された50ショット分のビーム位置データを解析したもので、各 BPM の位置分解能の値である。3年前に解析した時は 0.1~0.25 mm の値であったが、今回の測定では、0.07~0.17 mm を得ており、改善している。この理由は、3-50BT を通過するビーム強度が増加したことによると考えられる。ちなみに、今回の測定はバンチが $2.4E12$ で3年前の約5倍の強度で測定した。なお、3次元多項式と1次近似係数の間で、位置分解能に多少違いが現れることを期待したが、顕著な違いはなかった。この方法で解析に用いた位置データが、数 mm 以内の BPM の中心付近にあるためである。

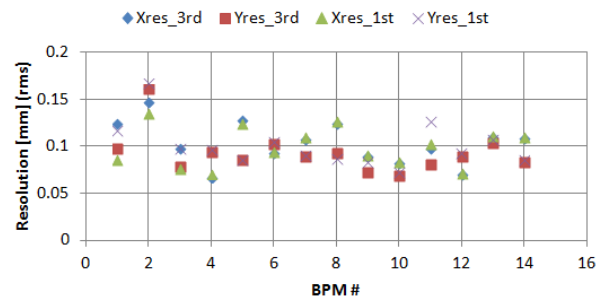


Figure 8: Distribution of all horizontal resolutions of the BPMs in the 3-50 BT .

6. ビーム・ベースド・ゲイン校正

BPM の測定誤差は、ノイズによるものだけでなく、信号伝送ラインの電気特性や、信号処理回路のゲイン特性は、環境の温度変化や、長期間の経年変化によって影響を受ける。KEKB の BPM で実績のあるビーム・ベースド・ゲイン・キャリブレーション法 [6] を 3-50BT の BPM にも適用してみた結果、ゲインの校正が出来ることを確認した。来春に向けて、その有効性を確認する予定である。

6.1 ゲイン校正法について

ゲイン校正法では BPM の形状と電極配置で決ま

るビーム信号の出力応答モデルを定義する。4 電極を持つ BPM の i 番目の出力電圧を V_i とすると出力電圧は次式のように表すことができる。

$$V_i = g_i \cdot q \cdot F_i(x, y) \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

q はビームの電荷で、 x, y は BPM の幾何学的な中心からの相対的な位置を意味する。また g_i は各電極のゲインを表す。 $F_i(x, y)$ はビーム位置に対する応答を意味し、 $F_i(0, 0) = 1$ で規格化された関数である。この応答関数は 4 次の調和関数を採用した。

$$F_i(x, y) = 1 + a_1 x + b_1 y + a_2 (x^2 - y^2) + b_2 (2xy) + a_3 (x^3 - 3x^2 y) + b_3 (3xy^2 - y^3) + a_4 (x^4 - 6x^2 y^2 + y^4) + b_4 (x^3 y - xy^3) \quad (5)$$

ただし、各電極の $F_i(x, y)$ 間には、次のような関係が成り立つ。 F_1, F_2 は右、左の電極の応答、 F_3, F_4 は右、左の電極の応答モデルを表す。

$$\begin{cases} F_1(x, y) = F_2(-x, y) \\ F_3(x, y) = F_4(x, -y) \end{cases}$$

(5)式の係数 $a_1, \dots, a_4, b_1, \dots, b_4$ は、テストベンチで測定したマッピングデータから、最小二乗近似法で与えた。

6.2 ゲイン校正法について

4 月 20 日のオプティクス診断のために測定された 3-50BT BPM の軌道データを用いてゲイン解析をおこなった。M 回の測定データ $v_{i,j}$ と (4) 式の応答モデル電圧 $V_{i,j}$ の関係からゲインを含む未知数 c を求めるために次式のような最小二乗法で解析できる。

$$\chi^2(c) = \sum_j \sum_i^4 [v_{i,j} - g_i q_i F_i(x_j, y_j)]^2 \quad (6)$$

$$c = (g_2, g_3, g_4, q_1 x_1, y_1, \dots, q_m x_m, y_m)$$

ここで、 $g_1 = 1$ と定義したので未知数から除いた。(6) 式の最小二乗近似が成立するためには、4 回以上の測定 ($j \geq 4$) で未知数の数が測定値の数を上回ることである。幸い、数 10 回以上の測定点が確保されたので解析した結果を Table 2 に示す。

解析されたゲインの値は 0.93~1.02 の範囲に入っており、解析プログラムの非線形最小二乗法のエラーステータスからも判断して、解析が正しく行われたと推察される。この表では、 g_1 と g_2 ゲインの差と g_3 と g_4 のゲインの差は、0.01 以下であるこ

とから、ほとんど変化しておらず、テストベンチによる校正結果が、現時点でも保存されていると考えられる。しかし、左右電極の組と上下電極の組のゲインには、大きな差がある。今回のゲイン校正のための応答関数のモデルがテストベンチのマッピングデータを使用しているため、その影響を受けているかもしれないので、境界要素法などによるモデルマッピングを用いて、この差について追試する必要がある。

Table 2: Result of Gain Calibration

Name	g_1	g_2	g_3	g_4	Sumsqr
BPM01	1	0.9986	1.0012	1.0021	3.07E-04
BPM02	1	0.9972	0.9805	0.9802	3.20E-04
BPM03	1	0.9946	0.9701	0.9718	1.74E-04
BPM04	1	1.0008	1.0206	1.0204	1.67E-04
BPM05	1	0.9998	0.9494	0.9496	2.63E-04
BPM06	1	0.9989	1.0162	1.0192	1.16E-04
BPM07	1	1.0053	0.9851	0.983	5.60E-05
BPM08	1	1.0032	0.9597	0.9615	1.41E-04
BPM09	1	1.0014	0.9386	0.9403	1.96E-04
BPM10	1	1.0023	0.9703	0.9705	6.40E-05
BPM11	1	0.9992	1.015	1.0164	1.43E-04
BPM12	1	0.9995	1.0128	1.0123	1.21E-04
BPM13	1	1.0006	0.979	0.9793	7.19E-05
BPM14	1	0.9998	0.9701	0.9718	2.96E-03

参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", KEK-Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-044.
- [2] 原田寛之, "J-PARC 3-50BT ラインにおける光学系の調整", 本加速器学会
- [3] M. Tejima, et al., "SHOT-BY-SHOT BEAM POSITION MONITOR SYSTEM FOR BEAM TRANSPORT LINE FROM RCS TO MR IN J-PARC", IPAC'10 Proceedings
- [4] 花村幸篤 他, "J-PARC 50GEV 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, 2006
- [5] 平松成範, 加速器のビームモニタ, 平成 15 年度技術部職員専門研修, KEK レポート
- [6] K. SATOH and M. TEJIMA, Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference, Vancouver, 2007.