

J-PARC MR における BPM のビームベースドアライメント BEAM-BASED ALIGNMENT OF THE BPMS AT J-PARC MR

外山 毅^{#,A)}, 畠山 衆一郎^{B,C)}, 岡田 雅之^{A)}, 高野 淳平^{A)},
五十嵐 進^{A)}, 花村 幸篤^{C)}, 橋本 義徳^{A)}, 河内 敏彦^{C)}, 久保木 浩功^{A)}, 仁木 和昭^{A)},
酒井 浩志^{C)}, 佐藤 洋一^{A)}, 佐藤 健一郎^{A)}, 白形 政司^{A)}, 手島 昌己^{A)}
Takeshi Toyama^{#,A)}, Shuichiro Hatakeyama^{B,C)}, Masashi Okada^{A)}, Junpei Takano^{A)},
Susumu Igarashi^{A)}, Kotoku Hanamura^{C)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Toshihiko Kawachi^{C)}, Hironori Kuboki^{A)},
Kazuaki Niki^{A)}, Hiroshi Sakai^{C)}, Yoichi Sato^{A)}, Kenichirou Satou^{A)}, Masashi Shirakata^{A)}, Masaki Tejima^{A)}

^{A)} KEK

^{B)} JAEA

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

Abstract

In high beam intensity accelerators such as J-PARC, precise measurements of beam orbits are indispensable to control the beam orbits and to reduce beam losses as well as modeling the accelerators with determining precise machine parameters as beta function, dispersion function and so on. For these aim the centers of the BPMS should be known in terms of the quadrupole magnet centers in the transverse plane. In spring 2014 we carried beam based alignment (BBA) and beam based gain calibration (BBGC) for 186 BPMS in the J-PARC MR. Using fully calibrated BPMS, the closed orbits (COD) were corrected better than using previous partially calibrated BPMS. The residual CODs were improved from 0.39 mm (RMS) to 0.15 mm (RMS) in the vertical direction. Beam losses were reduced accordingly. In the horizontal plane the position data are significantly deteriorated by the synchrotron oscillation and the field ripples of the bending magnets. This makes the correction improvement ineffective in this plane.

1. はじめに

J-PARC のような大強度加速器では、ビーム軌道の精密な測定は、軌道を精密に制御してビームロス を低減するために必須である。単純な軌道変位によるもの以外に、ビーム空間電荷と COD の両方に依存するビームロスも予想されている^[1]。さらに、 β 関数、ディスページョン関数などのマシン・パラメータを決定し、正確な加速器モデルを作るためにも重要である。そのためには、ビーム位置モニター (BPM) の transverse 座標を、加速器の transverse 座標の原点である隣接 Q 電磁石の中心を基準にして、知る必要がある。そのために、今回、MR の COD 観測用 BPM の 186 台全てについて、上記のオフセットを測定する beam-based alignment (BBA)^{[2][3]}、および各 BPM チャンネルのゲインの相対誤差を測定する beam-based gain calibration (BBGC)^[4]を行った。BBA により BPM の幾何学的オフセットと電気的オフセットの和、BBGC により BPM の電気的オフセットが求められ、誤差が完全に決定される^[5]。本稿では、J-PARC MR での BBA・BBGC による校正の方針、BBA 測定方法と結果、COD 補正結果、およびデータ誤差の吟味に関して述べる。

2. BBA・BBGC による校正

J-PARC MR では対角線カットの電極を使用して

いるので、ビームの水平・垂直座標 (x, y) に対する各電極の出力電圧 V_L, V_R, V_U, V_D は、 $g_L, g_R, g_U, g_D, \lambda, a$ をそれぞれ、各電極のゲイン、ビーム電荷、有効電極半径、 $x_{meas}, y_{meas}, x_{beam}, y_{beam}, x_0, y_0$ をそれぞれ、 x, y の測定値、 x, y のビーム位置、 x, y のオフセットとし、 $g_L=1$ とすると、

$$V_L = \lambda \{1 + (x_{beam} + x_0) / a\}, \quad (1.a)$$

$$V_R = g_R \lambda \{1 - (x_{beam} + x_0) / a\}, \quad (1.b)$$

$$V_U = g_U \lambda \{1 + (y_{beam} + y_0) / a\}, \quad (1.c)$$

$$V_D = g_D \lambda \{1 - (y_{beam} + y_0) / a\}, \quad (1.d)$$

と表すことができる。 a はワイヤー法で得られる位置感度係数を使用し、 $g_L (=1), g_R, g_U, g_D$ の誤差を

$$\Delta g_x = a \frac{g_L - g_R}{g_L + g_R}, \quad \Delta g_y = a \frac{g_U - g_D}{g_U + g_D} \quad (2)$$

と表すと、 $x, y, \Delta g_x, \Delta g_y$ の第 1 近似では、

$$x_{meas} = a \frac{V_L - V_R}{V_L + V_R} \approx x_{beam} + x_0 + \Delta g_x \quad (3.a)$$

$$y_{meas} = a' \frac{V_U - V_D}{V_U + V_D} \approx y_{beam} + y_0 + \Delta g_y \quad (3.b)$$

[#] takeshi.toyama@kek.jp

となり、ビーム座標に幾何学的オフセット x_0, y_0 とゲイン・オフセット $\Delta g_x, \Delta g_y$ が加わった形になる。そこで、BBA により $x_0 + \Delta g_x, y_0 + \Delta g_y$ 、BBGC により $\Delta g_x, \Delta g_y$ (実際には g_R, g_U, g_D ($g_L=1$)) を求める事により、誤差を全て求めることが可能である。

校正頻度については、BBA は設置・アライメント毎に一回、BBGC は各ゲイン毎に1回行えば良いことになる。

3. BBA 測定

3.1 測定方法

BPM、ステアリング電磁石(STM)、4極電磁石(QM)の配置は、基本的に Fig. 1 の通りである(QM下流に BPM が配置されている箇所が 9 箇所ある)。各 QM には補助コイルが巻いてある。各 BPM について水平、垂直の各平面で、Bump 軌道：約-4, 0, +4 mm それぞれについて、QM 補助コイル：-4, -2, 0, +2, +4 A を通電した (Fig. 2)。

MR の運転を 3GeV DC, 8 bunch 入射とし、K3+1.5 s でアポートした。Bump 軌道、RF 電圧とビームの時間関係を Fig. 3 に示す。ビーム入射から取り出すまでの 1 ms 毎の全周の軌道を記録した。測定時のビーム・パラメータを Table 1 にまとめる。

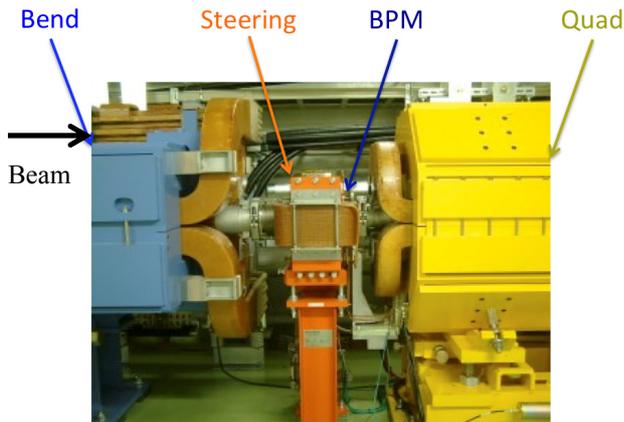


Figure 1: Layout of the BPM and magnets.

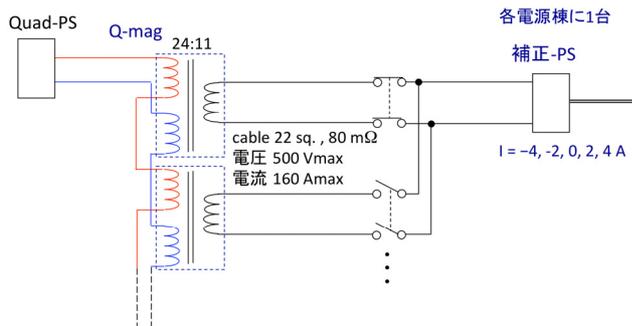


Figure 2: Schematic of the quadrupole magnet system.

Table 1: Machine Parameters

Beam intensity	~ 6.3 x 10 ¹² ppp
Number of bunches	8
Thinning/macro-pulse/Chopping	10/32 / 100 μs / 456 ns
Energy	3 GeV
Betatron tune (ν _x /ν _y)	22.41 / 20.75
Chromaticity (ξ _x /ξ _y)	-4 ~ -2 (85-90 %)
RF voltage	160 kV (fundamental) 0 kV (2nd harmonic)
BPMC Ext. filter	Off
BPMC Att.	0 dB
BPMC Gain	5

3.2 測定データ



Figure 3: Time chart for the BBA.

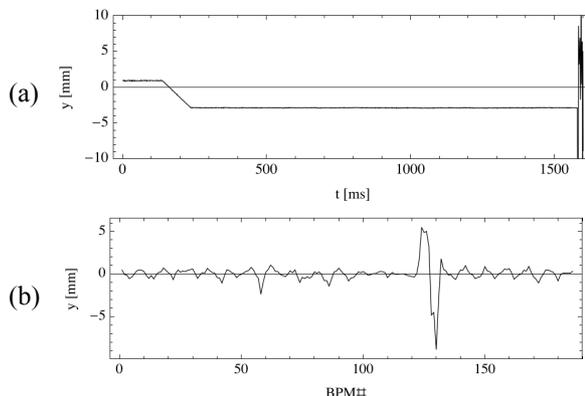


Figure 4: Bump orbit example at the BPM #131. (a) y_{COD} at #131, (b) $\langle y_{COD} \rangle$ along the MR.

各 BPM の各平面の BBA で、それぞれ $3 \times 5 = 15$ 個、合計 30 個のデータセットが得られる。例として、152 番地(BPM#131)で y 方向に Bump 軌道をつくった時の y 軌道の時間変化、K1+401ms から 1 s 間の MR 全周の平均軌道を Fig. 4 (a), (b)に示す。この時の x, y 軌道の標準偏差値 (σ) を Fig. 5 に示す。青線が x 軌道 σ 、赤線が y 軌道 σ に対応する。1 s 間のデータの Fourier 変換を Fig. 6 に同じ色で示す。 x_{COD} のスペクトルで 330Hz 近傍のピークはシンクロトロン振動に、200Hz 以下に広がったスペクトルは、後に述べるように主に偏向電磁石 (BM) のリップルによるものと考えられる。

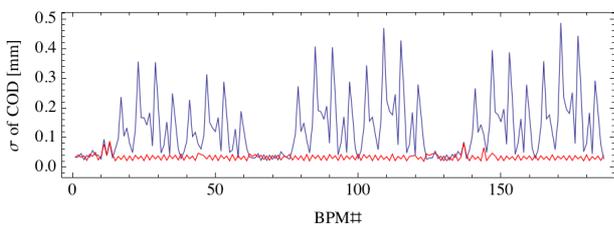


Figure 5: Standard deviations of 1-second x_{COD} (blue) and y_{COD} (red) at 186 BPMs along the MR.

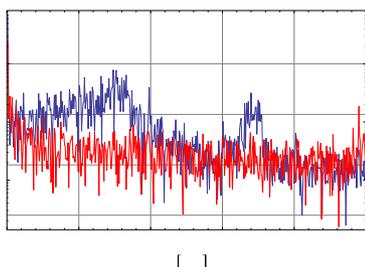


Figure 6: Frequency spectra of x_{COD} (blue) and y_{COD} (red) measured at BPM#26 (QM#30).

3.3 BBAによるBPMオフセット測定結果

各 Bump 軌道 (約 -4, 0, +4 mm) に対して、QM 補正コイル電流値とビーム位置 (K1+401ms~1400ms の間のデータの平均値) をプロットすると Fig. 7 を得る。Bump 軌道が QM の中心を通過する場合は、QM 補正コイル電流値変化による軌道変化が無い。このような点を求めるために、Bump 軌道に対する $\partial x/\partial I_Q$, $\partial y/\partial I_Q$ の変化をプロットすると Fig. 8 を得る。ここで $\partial y/\partial I_Q=0$ となる y を求めると、 $y_0=-0.52$ mm である。

一方、QM 補正コイル電流値変化による軌道変化はリング全周に及ぶので、それぞれの BPM の位置で Fig. 8 と同様のプロットを作り、オフセット値を求めることが出来て、平均値 $y_0=-0.51\pm 0.03$ mm を得る (Fig. 9)。ただし、軌道の節の付近にある BPM は軌道変化が鈍くなり精度が悪化する。

上記の様にして、全 BPM の x, y 方向についてオフセット値を求めた (Fig. 9, Fig. 10)。それぞれの統計分布を Fig. 11 にプロットする。

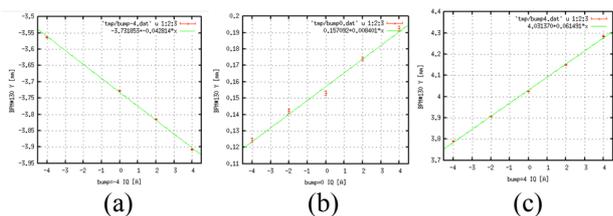


Figure 7: y_{COD} vs. QM current I_Q . (a) bump ~ -4 mm, (b) bump ~ 0 mm, (c) bump $\sim +4$ mm.

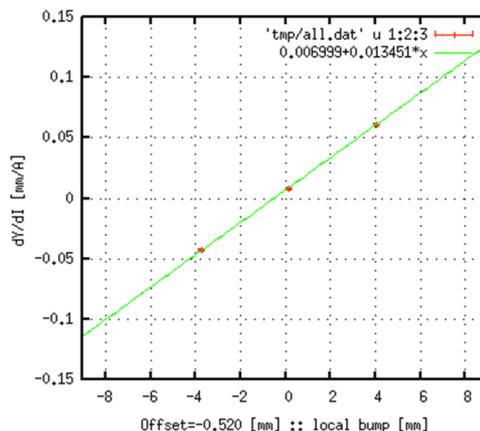


Figure 8: y vs. $\partial y/\partial I_Q$ at BPM#130.

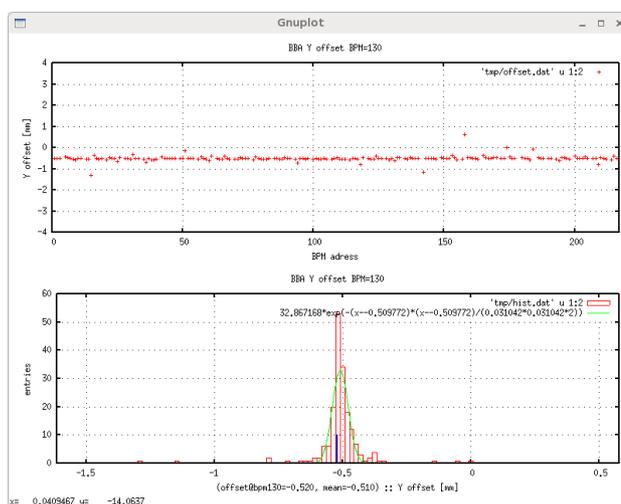


Figure 9: Offset values calculated with the all BPM response. y_0 at BPM#130.

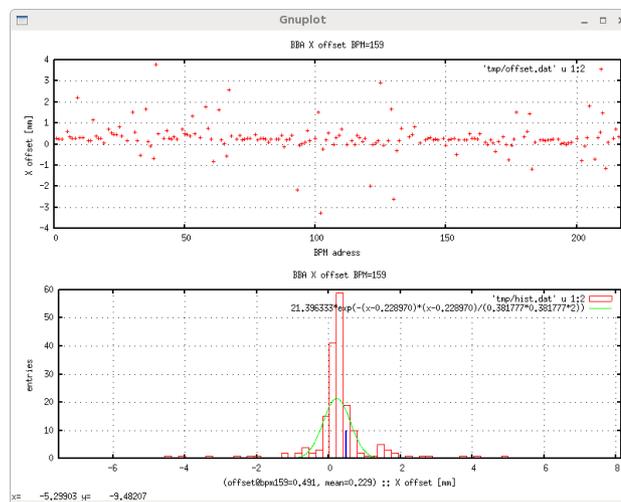


Figure 10: Offset values calculated with the all BPM response. (a) x_0 @BPM#159.

4. COD 補正

4.1 補正結果

上記で得られた全 BPM の BBA オフセット値を、BPM 処理プログラムに設定し、COD 測定を行った。x 方向については $\Delta p/p$ (momentum dispersion) による変位を差引いた値を使用した。その結果を最小二乗法により解析し、3 GeV~30GeV までの補正磁場値求め STM に設定した。BBA オフセットを使用しない場合の COD 補正結果を Fig. 12 に赤色で、今回の BBA オフセット値を使用した補正結果を青色で示す。各条件で、3ショット分の軌道 (それぞれ、K1+91ms と K1+95ms (3 GeV) の 2 フレーム) を重ね書きしたものである。x 方向では軌道のバラツキのため違いが良くわからない。y 方向では、BBA オフセットを使用することにより COD 補正が大幅に改善していることが判る。

BBA オフセット値の有/無で、COD の RMS 値は 3 GeV では以下のように改善した：

Plane	RMS (mm)		RMS (mm, η -subtracted)	
	w/o BBA	w BBA	w/o BBA	w BBA
x	0.41	0.30	0.33	0.18
y	0.39	0.15	-	-

x 平面では、dispersion function η を通して入るシンクロトロン振動 ($\Delta p/p$)、BM リップル ($\Delta B/B$) の影響 (後述) を差引いた結果を、右列に記した。

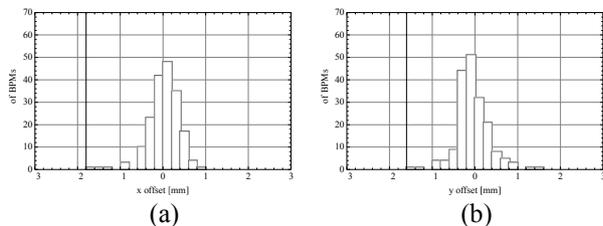


Figure 11: Statistics of BPM offsets obtained with BBA. Offsets of (a) x plane, (b) y plane.

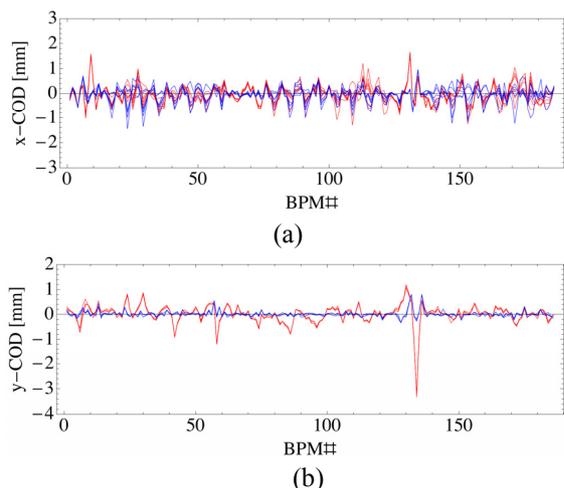


Figure 12: CODs along the MR, corrected without / with the BBA offset data (red / blue lines, respectively). (a) x_{COD} , (b) y_{COD} .

COD (RMS) の減少率は、 $\Delta p/p$, $\Delta B/B$ の影響を差引くと 45 %だが、全体では 27 %しかない。y 平面では 62 %の減少率であり、ビームロスの低減という好結果を得た。

3 - 30 GeV では、Fig. 13 のように改善した。

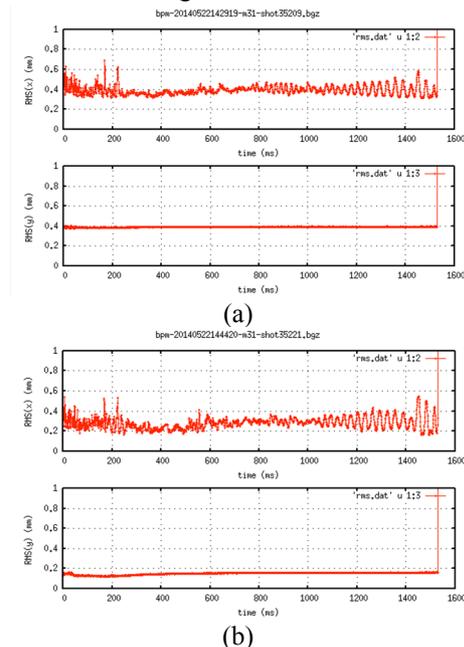


Figure 13: RMSs of the orbit from 3 to 30 GeV. Corrected w/o (a), with (b) BBA offset. Upper : x plane, lower: y plane. Acceleration starts at 130 ms.

4.2 残留 COD

BBA によるオフセット値を使用した COD 補正結果で、一部 COD が残っている箇所が見受けられた。垂直方向では、Insertion-C の#155 付近である。この原因としては、#155 における STM の欠落が考えられる。この箇所は Fast Extraction 部にあたり、分岐するビームが大きく内側に曲げられるために、アパーチャが 257mm と、非常に大きく設定されている^[3]。STM は、空きスペースの制約のため、BPM を内包する設計となっている。このため特大 STM が必要となり、製作を保留して現在に至っている。

5. 位置データの吟味

5.1 x-COD のバラツキの原因

3.2 節で述べたように、 x_{COD} のバラツキは ARC 部で大きく、その σ は momentum dispersion function の絶対値 (Fig. 14) に比例しているように見える。ただし、大きさは均一ではない。

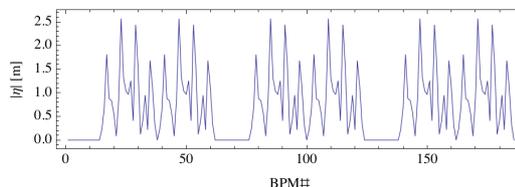


Figure 14: Absolute value of the dispersion function.

各 ARC 部は BM 32 台から構成されている。それを前後 2 分割し、連続する 16 台を 1 台の電源に直列接続している (Family) [6]。MR 全周で 6 family から成っている。1 family は achromat を構成しているので [7]、或る family の誤差磁場 $\Delta B/B$ は、その family の外側には影響しない。すなわち、運動量誤差と BM 誤差磁場による軌道変位は、1 次近似で

$$x(s) = \left(\frac{\Delta p}{p}\right) \eta(s) + \sum_{k=1}^6 \left(-\frac{\Delta B}{B}\right)_k \eta_k(s) \quad (4)$$

$$= \sum_{k=1}^6 \lambda_k \eta_k(s)$$

と書くことができる。ここで、 η は momentum dispersion function, η_k ($k=1, \dots, 6$) は 1 family 分の momentum dispersion function で、他の場所では 0 となる s の関数である。7 個のパラメータ: $\Delta p/p$, $(-\Delta B/B)_k$ は未知数で、独立には求められないので、6 個の未知数 λ_k ($k=1, \dots, 6$) を導入し、データにフィットすることにより求める。1 例を Fig. 15 に示す。赤線がデータ、青線がフィットの結果である。

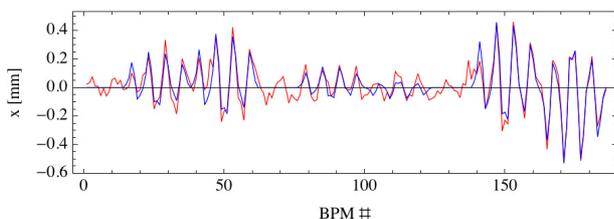


Figure 15: Example of x_{COD} at K1+402ms. Red line: $x_{\text{COD}}(402\text{ms}) - \langle x_{\text{COD}} \rangle$, blue: fitted curve.

5.2 バラツキの除去

5.1 節の方法で決定したフィット関数 Eq. (4) を用いて、元の COD ($\langle x_{\text{COD}} \rangle$ を差引いたもの) から dispersion function に依存する軌道のバラツキを差引くと、残るバラツキは Fig. 16 の様に小さくなる。この方法を、4.1 節での COD の改善についての評価で使用した。

リップル成分 $\lambda_k(t)$ の周波数スペクトルは、Fig. 17 に示したようなものである。基本的に Fig. 6 で議論したように、シンクロトロン振動と BM リップルから成ると考えられる。6 family が同相で振動する成分を見るために、

$$\lambda_{\text{com}}(t) = \sum_{k=1}^6 \lambda_k(t) / 6 \quad (5)$$

を計算したものが Fig. 17 中の黒線で示したものである。330 Hz 付近の振動は同相成分のみであり、シンクロトロン振動によるという予想と矛盾しない。200 Hz 以下の同相成分もある。これは、リップルにも、6 family 全てが同相で発生している成分があることを示している。Eq. (4) では $\Delta p/p$, $(-\Delta B/B)_k$ の同相成分は区別しなかったが、上記のように周波数領域で分離できると考えられる。

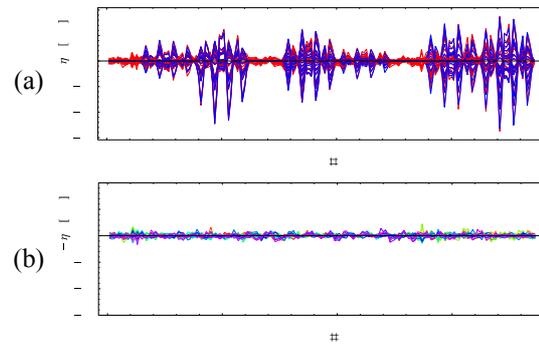


Figure 16: $x_{\text{COD}} - \langle x_{\text{COD}} \rangle$, succeeding 18 frames starting from K1+402ms, every 1 ms. Before (a) and after (b) subtracting the horizontal orbit motion due to η .

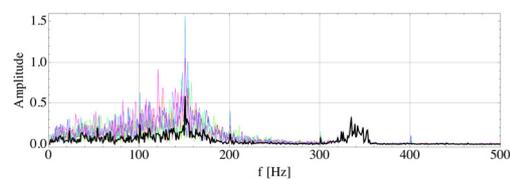


Figure 17: Frequency spectrum of the x_{COD} ripple, $\lambda_k(t)$. Colored: $k=1, \dots, 6$. Black line: common mode.

6. まとめ

J-PARC MR 全周の BPM186 台の BBA を完了し、各 BPM のオフセットを 30 – 400 μm の精度で決定した。この結果を使って COD 補正をおこなった結果、y 方向では RMS 値で 6 割減少した。x 方向はシンクロトロン振動と BM リップルのため 3 割程度の改善であった。ビームロスの減少も観測された。

BBA でのオフセット算出では、位置データの平均値を使っている。y 方向では位置精度 $\sim 20\text{--}90 \mu\text{m}$ (統計誤差 σ) だが、x 方向では、位置精度 $\sim 20\text{--}450 \mu\text{m}$ (統計誤差 σ) と大きいので、最終的に得られるオフセットの誤差が大きい。この誤差は、BM family 毎に dispersion function を使ってバラツキをフィット・差し引くことで改善する可能性がある。

参考文献

- [1] S. Machida, “Beam Loss in Rings”, ATAC2005, Feb. 24, 2005.
- [2] M. Masuzawa et al., “Beam-based Calibration of Beam Position Monitors and Measurements of the Sextupole Magnet offsets at KEKB”, Proc. of EPAC2000, (2000) 1780.
- [3] T. Toyama, et al., “Operating experiences of the J-PARC MR BPMs”, Proc. of PASJ6, p. 250.
- [4] H. Kuboki, et al., “Results of Beam Based Gain Calibration for Beam Position Monitor at J-PARC Main Ring”, In these Proceedings.
- [5] M. Tejima, Ph. D. thesis, Soken-dai, 2007, in Japanese.
- [6] S. Nakamura et al., “Improvement of the magnet-power supplies on J-PARC MR”, 「加速器」 vol.6, No.4, 2009 (292-301).
- [7] S. Igarashi et al., “Nonlinear Dispersion and Chromaticity Measurement in J-PARC MR”, Proc. of PASJ9, p.385.