

J-PARC Main Ring 大強度運転のためのビーム位置モニター (BPM) の高度化 UPGRADE OF THE BEAM POSITION MONITOR (BPM) AT THE J-PARC MAIN RING FOR HIGH INTENSITY OPERATION

小林愛音*, 外山毅, 佐藤健一郎, 久保木浩功

Aine Kobayashi*, Takeshi Toyama, Kenichirou Satou, Hironori Kuboki

KEK

Abstract

Upgrade of the J-PARC main ring for higher intensity is an important step for the T2K neutrino oscillation experiment. The present beam power is 470 kW and the goal of the upgrade is 1.3 MW, providing threefold intensity of the neutrino beam. Beam loss in the main ring limits the proton bunch intensity. Precise orbit correction and stable operation are necessary in order to reduce the beam loss. Beam position monitor (BPM) plays a key role in the measurement of the closed orbit distortion (COD). Currently an apparent dependence of COD RMS on the beam intensity is observed. In order to understand the nature of the phenomenon, an investigation is being made on the intensity dependence of the BPM response as well as the effects of wake field and beam bumps on the beam orbit itself. The status of these studies is reported.

1. はじめに

J-PARC Main Ring (MR) 加速器のビームを利用した実験はいくつかあり、その中でもニュートリノ振動を用いて CP 対称性の測定を行うこと等を目指す T2K 実験では大強度ビームが必要である。発見感度を達成するためにビーム強度増強が計画され、1.3 MW が目標である。これは現在可能な運転の約 470 kW の約 3 倍であり、MR ではそのためのアップグレード準備を行なっている。加速器のバンチに詰め込める陽子数は、ビームロスにより制限される。ロスを低減するためにビーム位置モニター (BPM) でビーム位置を精度良く測定し、軌道補正を行い、安定した長時間制御・運転をする必要がある。現状の位置分解能は閉軌道歪み (Closed orbit distortion, COD) モードで数 $10 \mu\text{m}$ 、ターン毎モードで数 $100 \mu\text{m}$ であり [1]、これを 10 分の 1 程度にすることを目指す。

ビーム強度が高いときに入射時の COD RMS が $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 変動するように見える現象があり、BPM 応答に強度依存性があるのか、実際に動いているのか原因を追求する必要がある。個々の BPM の信号に異常がないことの確認や、ウェイク場やバンプの影響を考慮しながら軌道解析し、調査した。

2. 大強度での COD の変動

MR では 9 個の RF バケットに最大 8 バンチを詰めることができる。入射キッカーで 2 バンチずつ K1、K2、K3、K4 と呼ばれるタイミングで 40 ms 間隔で入射し、その 10 ms 後に加速を開始する。通常、バンチ数が増える毎に COD RMS が変動することはない。しかし Figure 1 のようにビーム強度が約 10^{14} ppp を超えると、入射時の COD RMS が $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 変動するように見える現象がある。これは、2017 年 3 月中旬以降のデータで確認されている [2]。

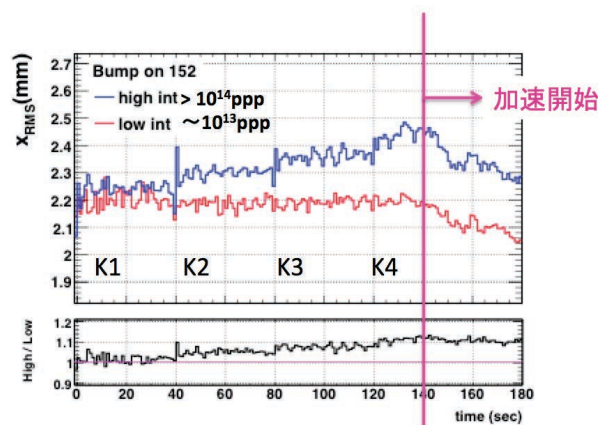


Figure 1: COD excursion of high intensity ($> 10^{14}$ ppp) compared to low intensity ($\sim 10^{13}$ ppp) with bump on BPM# 152.

3. 測定

ローカルバンプを作ったときにストレージリングで発生するトランスバースインピーダンスによる COD はロシアの VEPP-4M 加速器で調査されている [3]。今回の測定時の条件は Table 1 に示した。強度やローカルバンプの有無、バンプの場所などによる違いを見る測定を行なった。セプタムと、FX 取り出し用キッカーにバンプを、それぞれ QFR82 に +4 mm、QFR152 に +10 mm の大きさで作った。これはアパチャーの許容範囲内であり、かつビームロスが 2×10^{12} ppp を超えないようにした。各パターンで 10 ~ 20 ショットの統計をためた。

*aine.kobayashi@kek.jp

Table 1: Machine Condition and Measured Parameters

MR Power	470 kW
Energy	3 GeV
Number of bunches	8
beam intensity	high : $> 2.4 \times 10^{14}$ ppp low : $\sim 6.0 \times 10^{13}$ ppp
Thin ratio	high : 26/32 low : 16/32
Macro pulse	high : 500 μ s low : 100 μ s
Tune	ν_x/ν_y : 21.35/21.45
Bump	without QFR152 +10 mm (kicker) QFR82 +4 mm (septum) QFR152 +10 mm and QFR82 +4 mm low intensity with QFR152 +10 mm

4. 解析

4.1 BPM の調査

COD を測定しているのは BPM であるため、まず BPM 応答に強度依存性があるのかを調べた。Figure 2 は大強度時の BPM の典型的な信号であり、上下の図はそれぞれ水平方向、垂直方向から読み出した信号のカウント数である。この測定は 2 バンチで行なっており、カウント数の最大値は $2^{13} \sim 8000$ であるが、どの BPM も最大でも 3000 より少なくリニアリティーが保証される範囲内であった。Figure 3 は信号の peak-to-peak を横軸全ての BPM (MR 全周) にしたものである (モニターシステムの詳細については文献 [4] を参照)。また、調子が悪い BPM が影響を与えていない

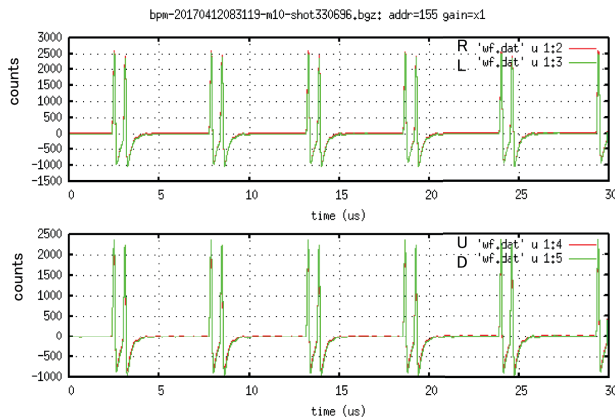


Figure 2: A typical BPM response.

かどうかは、次章で説明するデータの補正を行なった後に波形を Fourier 変換し、出てくる信号より判断した。

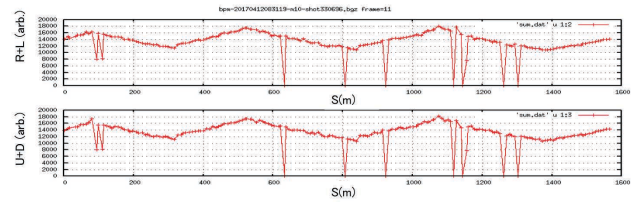


Figure 3: All the BPM counts. The discontinuity of the counts, corresponding to BPM # 13 and 15 has a special amp for some test, and the other with count zero are masked BPM. The detail of the monitor system is described in the reference [4].

4.2 データの補正

測定した COD ($x(s)$) には、運動量による効果 ($\eta_s \Delta p/p$) とリップルの効果 ($\Delta B/B$) が含まれる。解析をするためには、それらの dispersion 効果を取り除く必要があり、文献 [5] の 5 章と同じ方法を用いた。J-PARC MR 全周は 6 つに分割して電源につないでおり (family)、6 family に分けてフィットを行うことでリップルの影響を取り除ける。測定した COD ($x_{\text{measured}}(s)$) は、式 1 のように書ける。ここで第二項目の η_k が k 番目の電源に接続されている偏向電磁石 family の dispersion function で、未知数 λ_k はデータにフィットして求める。

$$x_{\text{measured}}(s) = x_{\text{COD}}(s) + \sum_{k=1}^6 \lambda_k \eta_k(s) \quad (1)$$

まず、光学計算から得られている twiss パラメーターをもとに、フィット関数を作った (Figure 4)。フィット

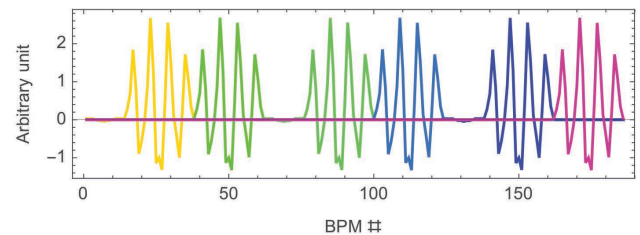


Figure 4: Momentum dispersion BPM function from optical calculation.

トシ (Figure 5)、得られた結果は Figure 6 である。それ

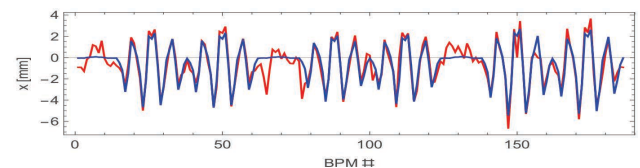


Figure 5: Fit with dispersion function. The red line is the measured value and the blue line is fitting result.

ぞれ、QFR82 と QFR152 (それぞれ BPM#71, 131 に対応) に作ったバンプ軌道が設定通り現れた。バンプ

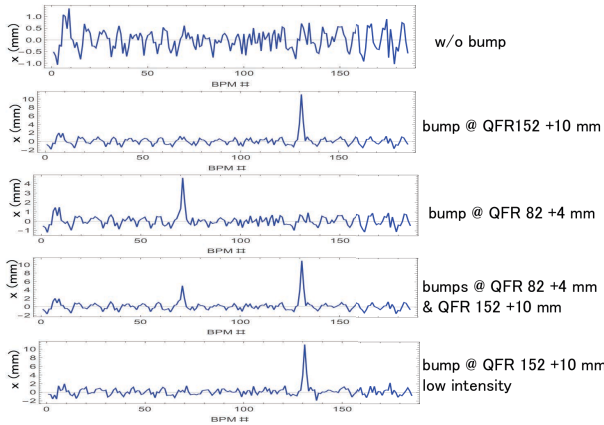


Figure 6: Dispersion effects subtracted from COD of each datasets. QFR82 and QFR152 corresponding to BPM#71 and 131.

の有無や場所に関わらず、約 10^{14} ppp を超える全ての測定で COD RMS は階段状 (Figure 1) にキッカータイミングで変動していた。Figure 7 はキッカータイミングでの差の COD であり、相似形をしていることがわかる。得られた COD は Fourier 変換するとチュー

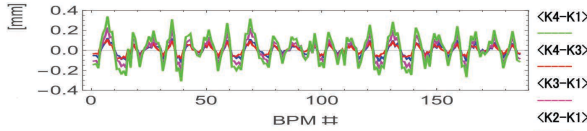


Figure 7: The COD of each difference of time with bump on QFR152. <K4-K1> is the average of COD of the K1 timing subtracted from that of K4 timing.

ン ($\nu_x = 21.35$) に一番近い整数 21 での周波数成分が最大をとることも確認されたので (Hill's equation の解 [6])、BPM 固有の問題ではなく、軌道に起因する変動であることがわかる。

4.3 エラーソース探し

光学計算をもとに、COD を動かす原因となっているソース (エラーソース) をシミュレーションツール SAD [7] に実装されたアルゴリズム Micado を用いて計算した。いくつかの磁石と最小二乗法を用いて COD 補正をする方法は文献 [8] 等に載っている。式 2 のように、軌道 $x(s_j)$ は、エラーソース $\theta(s_i)$ の影響を受けて観測される。

$$x(s_j) = \sum_{i=1} \frac{\sqrt{\beta(s_j)\beta(s_i)}}{2 \sin(\pi\nu)} \cos(\pi\nu - |\psi(s_i) - \psi(s_j)|) \theta(s_i) \quad (2)$$

バンプを QFR152 に立てたデータは大強度と低強度の測定を行なった。大強度のときに一番 COD の変位が大きい K4 と低強度で一番 COD の変位が小さい K1 それぞれの時間での COD を平均し (Figure 8 の上図)、Figure 8 の真ん中の図がその差である。一番下の図は計算上得られる COD であり、実際には他にもエラーソースがあることが予想される。Figure 8 の真ん中の

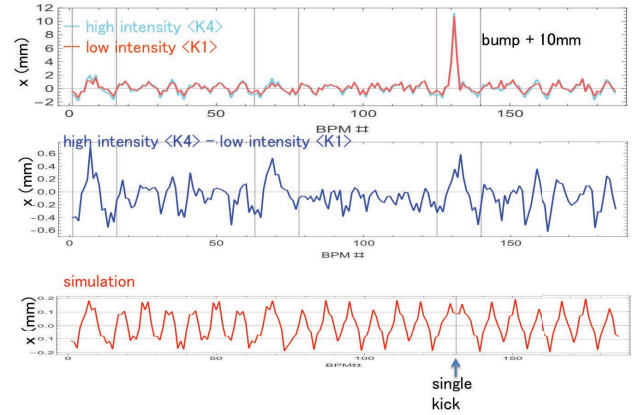


Figure 8: The COD with bump on QFR152 (BPM131) with high and low intensity (top), their difference is the middle, and the simulated COD, which supposed single kick on BPM131, is the bottom.

図の COD を用いてエラーソース探しを行った。SAD の計算から得られた結果は Figure 9 であり、バンプを立てている FX キッカーのある付近がエラーソースになっている。

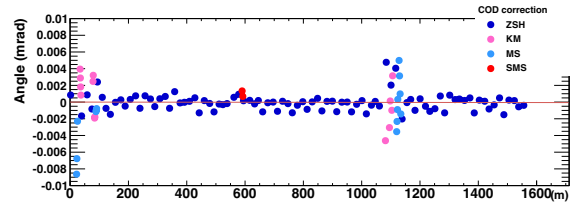


Figure 9: Correction from each sources for COD subtracted <K1> of low intensity from <K4> of high intensity.

バンプを QFR152 または QFR82 に立てたデータと、バンプなしのデータそれぞれの、K4 と K1 の COD 平均の差を用いてエラーソースを探した結果が Figure 10 である。QFR82 にはセプタムのアパチャーが小さく、4 mm の大きさしかバンプを立てられなかった。

4.4 ウェイク場

キッカーにビームが通って発生するウェイク場を CST PARTICLE STUDIO [9] を用いて計算した。キッカーの形状は文献 [10, 11] を参考に、Figure 11-12 のようにモデル化した。ウェイク場のソースとなるビームの経路を水平方向に 10 mm ずらし、ウェイク場の積分路はキッカーの中心を通るように設定した。得られたウェイクポテンシャルとウェイクインピーダンスはそれぞれ Figure 13-14 に示した。過去に FX キッカーでのウェイクインピーダンスの実測が行われており [12]、ウェイクインピーダンスの Z を見ると Figure 15 はオーダー的に同じであった。キック量は式 3 より計算できる [13]。

$$\kappa_{\perp} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} d\omega \text{Im}(Z_{\perp}(\omega)) |\lambda(\omega)|^2 \quad (3)$$

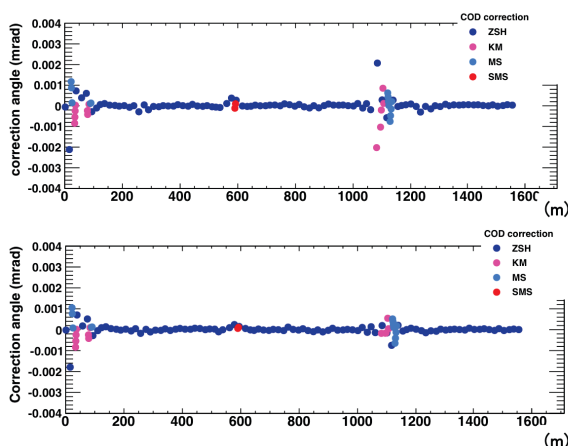


Figure 10: The error source of COD, subtracted the COD of <K4-K1> without bump from the COD <K4-K1> with bump on QFR152 (top) and QFR82 (bottom). Note that the Y-range is smaller than that of Figure 9.

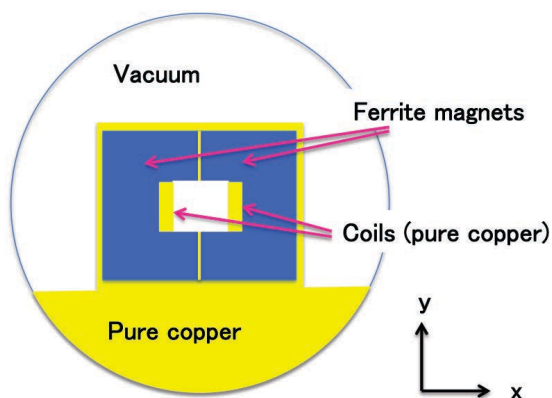


Figure 11: The schematic view of the simplified FX kicker cross-section. The kicker is made of ferrite magnets, pure copper coils and plates, and resistive elements, putting into a vacuum cylinder.

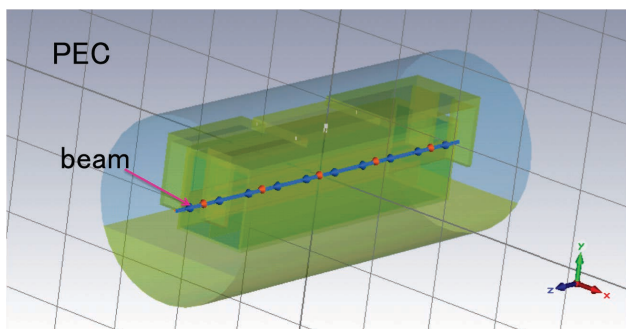


Figure 12: The simplified FX kicker model for a wake field estimation. The appropriate boundary conditions and a simplified resistive circuit [10, 11] are applied.

これより、10 mm の大きさのローカルバンパがあるときの 1 バンチあたりのキック量は式 3 から、

$$\Delta\theta = \frac{q}{(B\rho)c} \kappa_{\perp} \Delta x \quad (4)$$

約 0.001 mrad であり、4.3 章での結果で考えられる範囲である。

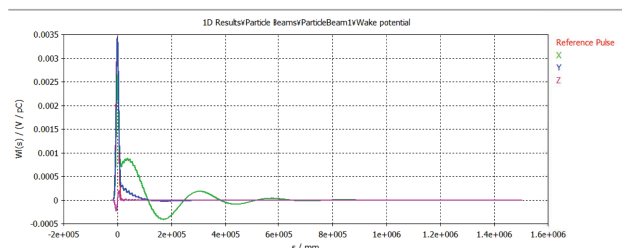


Figure 13: Wake potential.

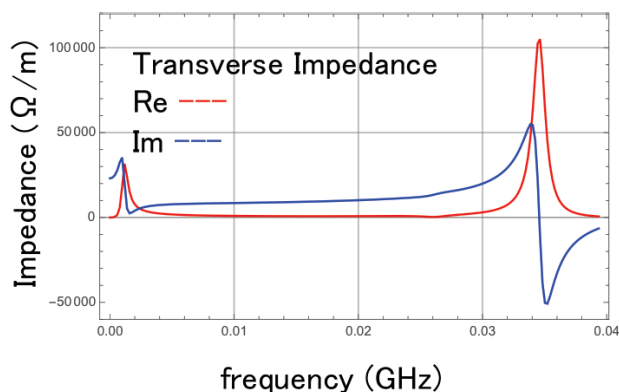


Figure 14: Transverse wake impedance of real part (red) and imaginary part (blue), applied FFT with a roll-off factor 0.2.

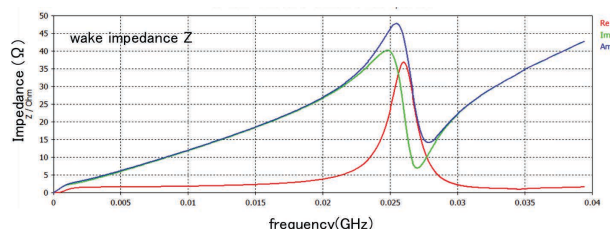


Figure 15: Wake impedance of Z. The results is consists of the previous measurement [12].

5. まとめと今後

J-PARC MR ではビーム強度増強が計画されている。大強度運転では、COD RMS が変動する現象があり、BPM 応答の問題なのか調査する必要があった。光学計算を利用したエラーソース探しを行ない、ローバンパがあるときのキッカーによるウェイク場の影響を調べた。キック量を見積ると、測定結果から考え得る範囲になった。

ベータロンチューンは実際には動いており、それが COD に影響するほどかどうかは吟味する必要がある。J-PARC におけるチューンシフトの測定は、強度が 2×10^{13} ppp の範囲でシングルバンチで 2015 年に行われた [14]。今回のような COD が変動する大強

度で相関を見るために 8 バンチでの測定も今後行いたい。

今後は、BPM の高度化に向け、大強度で操作性の向上も含めた開発を行う。

謝辞

MR 関係者の皆様、実験のご協力、研究の方針についての議論、大変感謝申し上げます。特に SAD の使い方・助言をいただいた五十嵐進氏・佐藤洋一氏・山本昇氏、バンプ軌道の操作をいただいた高野淳平氏に感謝する。本研究は JSPS 科研費 JP16H06288 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Toyama *et al.*, “J-PARC MR BPM の修理・改良”, Proceedings of the PASJ10, SUP075, 2010.
- [2] S. Igarashi, “FX kicker 設定による COD の変化”, 2017 March, private communication, J-PARC.
- [3] V. Kiselev and V. Smaluk, “Measurement of local impedance by an orbit bump method”, NIM A 525 (2004) 433-438.
- [4] S. Hatakeyama *et al.*, “A systyem for monitoring of the transverse injection error and betatron tune in J-PARC MR”, PASJ7, 2007.
- [5] T. Toyama *et al.*, “J-PARC MR における BPM のビームベースドアライメント”, Proceedings of the PASJ11, SAP088, 2011.
- [6] E. Wilson, “an introduction to PARTICLE ACCELERATORS”, Oxford university press, page 80.
- [7] SAD homepage; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/index.html>
- [8] B. Autin and Y. Marti, “Closed orbit correction of A.G. machines using a small number of magnets”, CERN ISR-MA/73-17 (1973).
- [9] CST - Computer Simulation Technology homepage; <https://www.cst.com/products/cstps>
- [10] Specifications of the FX-kicker magnet and circuit, from K. Ishii.
- [11] K. Koseki *et al.*, “Status of the Fast Extraction Kicker of the J-PARC-MR”, ATAC2010, J-PARC, 2010.
- [12] T. Toyama *et al.*, “Instability: Observation and Study Results of MR”, ATAC2011, J-PARC, 2011.
- [13] B. W. Zotter and S. A. Kheifets, “Impedances and Wakes in High-Energy Particle Accelerators”, ISBN: 9789810226268.
- [14] T. Toyama *et al.*, “Tune shift of the J-PARC MR beam”, J-PARC, 2015.