

J-PARC MR におけるエキサイターのキック角のビームによる校正 THE KICK ANGLE CALIBRATION OF THE EXCITER IN THE J-PARC MR

外山 毅^{#,A)}, 岡田雅之^{A)}
Takeshi Toyama^{#,A)}, Masashi Okada^{A)}
^{A)} KEK

Abstract

In J-PARC MR transverse stripline kickers are used for the transverse betatron tune measurements, bunch-by-bunch feedback damping, intra-bunch feedback damping and spill structure improvements at slow beam extraction (the system is called as “exciter”). One system consists of two opposite electrodes excited by two RF power amplifier sets with out-of-phase RF power (TEM mode), respectively. Recently quadrupole kick is produced with in-phase RF power and beam responses are measured using a quadrupole pickup. In these operations the kick angle is an important quantity. We used the design values so far. But recently we obtain the experimental value that agrees well with the design value, exciting the beam with a burst sinusoidal wave and detecting the betatron oscillation with the BPM.

1. はじめに

J-PARC Main Ring (MR)では、横方向のチューン測定、バンチ毎フィードバック、イントラバンチ・フィードバック、および遅い取出しのスピル・リップル改善のための”Transverse RF”用にストリップライン・キッカーを使用している(慣習によりエキサイターと呼ぶ)[1,2]。対向する2電極で構成され逆相のRFパワーをそれぞれに入力し、水平または垂直方向にキックを行っている。特定の周波数・RFパワーでのマルチパケティングを抑制するために、初期にはソレノイド巻き、その後SEY低減のための電極表面・真空ダクト内面コーティングを行っている[1]。最近さらには同相RFパワーを入力することにより4極キックを発生させビーム応答試験を行っている[3]。これらのオペレーションには、キック角が重要な量となっている。これまでは設計計算のみを使っていたが、今回、ビームをバースト状の正弦波で2極キックしてビーム応答をBPMにより測定し、2極キック角を導出し、低周波において設計計算とほぼ同程度の結果を得た。

2. MRの“エキサイター”

ストリップライン・キッカーでは、対向して設置された2つの電極に、ビームと逆方向に進行するTEM波を発生させて、ビームを電場及び磁場の両方で高速にキック(偏向)する(Figure 1)[4]。横方向の姿態は電極形状によって決まる。我々の設計は、① dipole mode が主で、それ以上のmodeは小さくなる、② 構造・製作工程が出来るだけ簡単になる、③ ビーム・アクセプタンスを十分確保する、という要求を満たすようになされた。

初号機(エキサイター1)は、横方向のチューン測定を目的として、水平、垂直用それぞれ1台ずつ、長さ~1.5mのものを製作した。シャントインピーダンス~29 kΩ/m、周波数特性はFigure 2の通りである。その後、遅い取出しのスピル・リップル改善のための”Transverse RF”用、バンチ毎フィードバックにも使用している。

[#] takeshi.toyama@kek.jp

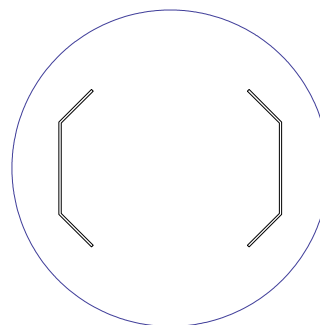


Figure 1: Cross section of the exciter. Inner diameter of the beam duct is 203.3 mm, distance between the electrodes 140 mm, characteristic impedance ~ 50 Ω.

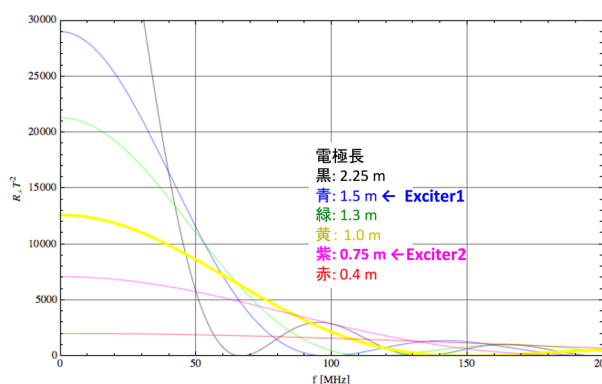


Figure 2: Frequency response of the exciters.

更に、高周波・大パワーでの使用を企図して、長さ~0.75m(エキサイター2)のシステムを増設した [1] [2]。本システムは、水平用エキサイター3台・1台 切替、垂直用エキサイター1台からなる。

エキサイター2の周波数特性はFigure 2の通り、カバーする周波数は100 KHz~100MHz(RFパワーアンプで決まっている)、RFパワーは3kW×2である。

MR のバンチ長は、加速とともに 200 ns – 40 ns の範囲を変化するが、3 GeV 入射エネルギーでは 100 - 200ns 程度である。入射・取出しキッカーと異なり、1ターンあたりのキック角は、3GeV で 3.2 $\mu\text{rad}/\text{turn}$ (エキサイター2, 1台あたり 3 kW \times 2)、今回は 3 台シリーズ連結としたので 9.6 $\mu\text{rad}/\text{turn}$ と、非常に小さいので、1ターンあたりの軌道変化で校正することは困難である。そこで、ステップ的に立ち上がる正弦波を加えて、それによるベータatron振動の増大を BPM (Beam Position Monitor) で検出して校正を試みた。

3. 測定原理

MR では、ベータatronチューン ν_x が電源リップルによりふらつくので、エキサイターの周波数(チューン) ν_{RF} と一致せず、さらにショット毎に異なることが予想された。

正弦波をステップ的に加えた場合 (Figure 3)、すなわち正弦波 $\Delta\theta \cdot \sin[2\pi \nu_{RF} n]$ (n : number of turn) を $n = 0$ で瞬間的に印加した場合、1粒子、オプティクス一定 (B, Q などの電磁石は一定磁場) と仮定すると、 n ターン目のベータatron振動は以下のように表される[5]。

$$x(n) = \frac{\beta_k \Delta\theta}{2} [\xi_0 + \xi_+ + \xi_-]$$

$$\xi_0 = \sin[\pi \nu_x n] \sin[\Delta\phi]$$

$$\xi_+ = \frac{\sin[\pi(\nu_{RF} + \nu_x)n] \cdot \cos[\pi(\nu_x - \nu_{RF})n + \Delta\phi]}{\tan[\pi(\nu_x + \nu_{RF})]}$$

$$\xi_- = -\frac{\sin[\pi(\nu_x - \nu_{RF})n] \cdot \cos[\pi(\nu_{RF} + \nu_x)n + \Delta\phi]}{\tan[\pi(\nu_x - \nu_{RF})]}$$

ここで、 $\Delta\theta$ はキック角(設計値: 9.6 μrad @3 kickers, 3 kW \times 2, 3 GeV), β_k, β_{PU} はそれぞれキッカーの場所のベータ関数, $\Delta\phi$ はビームと□□信号との位相差(n -th turn の中で、バンチがある位相)である。チューンのズレに応じて、周期 $1/|\nu_x - \nu_{RF}|$ でビートが起きる。

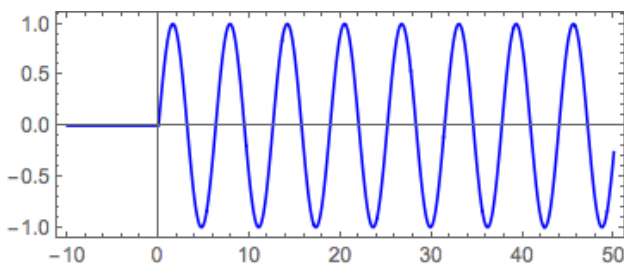


Figure 3: Ideal input RF waveform for the exciter.

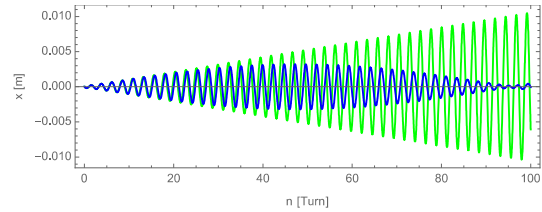


Figure 4: Calculated beam response to the sinusoidal dipole kick. Blue: $v/v_{RF}=0.975$, Green: $v/v_{RF}=1$.

$|(v_x - v_{RF})n| \ll 1$ の時、すなわちチューンのズレが小さい、または初期時間付近では、振幅は直線的に増加する (Figure 4)。

$$x(n) \approx -\frac{\beta_k \Delta\theta}{2} n \cdot \cos(2\pi \nu_{RF} n) \quad (2)$$

実際には、ビームは多粒子で構成されており、運動量広がり $\Delta p/p$ を持つビーム内の構成粒子のシンクロtron振動により[6]、また、時間的に変化する電磁石リップル電流により[7]、上記の運動は影響を受ける。しかし、Eq (2) からも予想されるように、上記のようなビーム変動があったとしても、シンクロtron振動の周期 ~ 3 ms、主要なリップルの周期 $< \sim 1$ msより充分小さい時間: 数 100 μs (数 10 \sim 100 ターン; ~ 5.3 $\mu\text{s}/\text{turn}$) でのデータを取り扱えば、一定の精度の範囲内でキック角 $\Delta\theta$ が求められると考え実験を行った。ここでは、2015年12月23日のスタディで取得したデータの解析結果を示す。

3. セットアップ

キック角を出来るだけ大きくするために、エキサイター2の水平方向のキッカーを3連で使用した。MR 磁場パターンを「3 GeV DC mode」とし、ビームを、タイミング K4で入射し、タイミング K3+1.5 s でビーム・アポルトへ取り出した。入射直後は、ビームパラメータ(軌道、チューン)が時間的に変動する要因となる入射エラー、入射セプタムの漏れ磁場があるので、それらが十分弱くなるタイミング P1+1 s で、上記エキサイターに正弦波を印加した。3連エキサイターおよびビームのパラメータを Table 1 にまとめる。また、使用したキッカーの配線図を Figure 5 に示す。

Table 1: Parameters of the Exciter and the Beam

Input power	Figure 7 and 8
RF frequency	263,469 Hz
Revolution frequency	185,711.5 Hz
Betatron tune ν_x	~ 22.42
Synchrotron tune ν_s	~ 0.00118
Number of protons	$\sim 1.33 \times 10^{12}$ protons
Number of bunches	1
Beam energy	3 GeV
Chromaticity	80% or 95% of the full correction

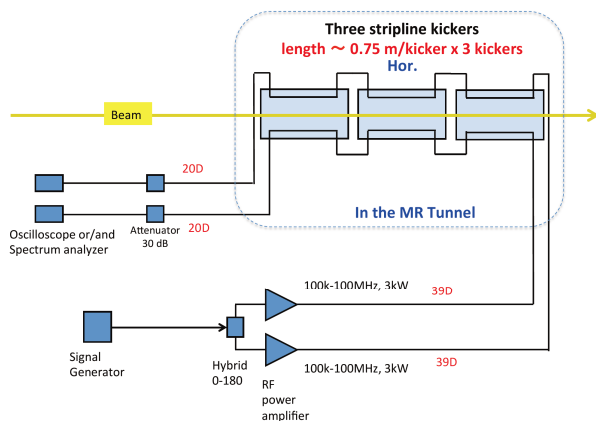


Figure 5: Three-series exciter.

実際のベータatron振動数の時間的な変化は Figure 6 のようなものであると考えられる[7]。

また、理論計算における条件と実験条件の相違事項として、RF パワーアンプの過渡特性、飽和特性が判明した。それぞれ、Figure 7 に過渡特性を、Figure 8 に飽和特性を示めた。

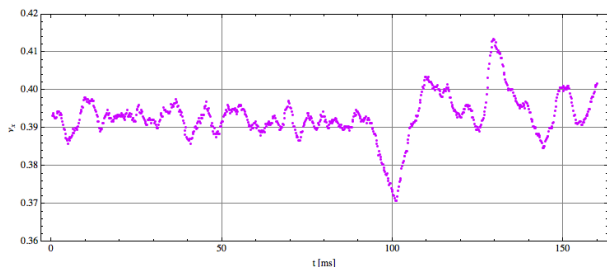


Figure 6: Betatron tune variation during the injection flat bottom.

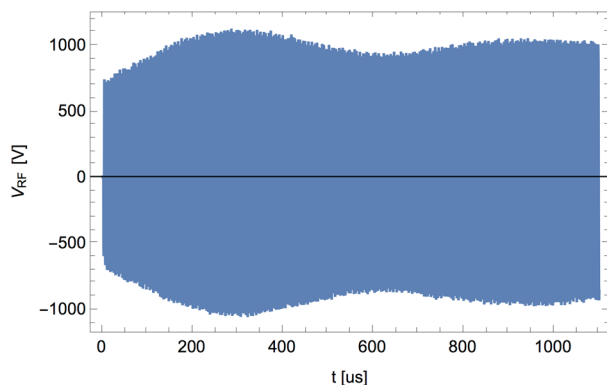


Figure 7: Transient response of the RF power amplifier. Corrected the attenuation due to the 60.1 dB attenuator.

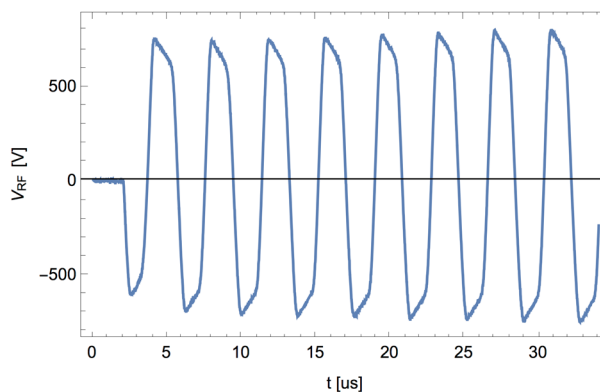


Figure 8: Saturation of the RF power amplifier.

エキサイターに RF パワーを印加した直後の BPM 出力を以下のように解析した。まず、右電極、左電極からの信号の時系列データを、それぞれ1ターン毎のデータに切り分けた。その後、Fourier 変換を行い、ピーク値および両側 3 点の値の和をとり、n ターンでの値をそれぞれ $V_R(n), V_L(n)$ とし、

$$x(n) = \kappa_x \frac{V_L(n) - V_R(n)}{V_L(n) + V_R(n)} \quad (3)$$

により n ターン目の位置を算出した。ここで、 $\kappa_x = 78.951$, 158 番地 BPM の位置感度係数(水平方向)である。

各クロマチシティに対して、複数ショットのデータを取得した。Figure 9 に 80%補正、Figure 10 に 95%補正の場合の結果を示す。また、80%補正、95%補正の場合の結果を重ね書きした結果をそれぞれ Figure 11, 12 に示す。Figure 9, 10 では、6 極電磁石の励磁量の違いで、ベータatron振動の減衰に強弱が現れていることがわかる。これを引き起こすのは、6 極電磁石の非線形効果、クロマチシティが考えられる。

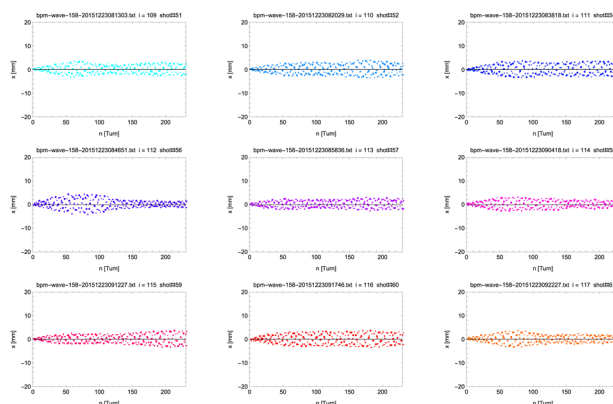


Figure 9: Beam response measured at the address 158 with the chromaticity of 80 % correction.

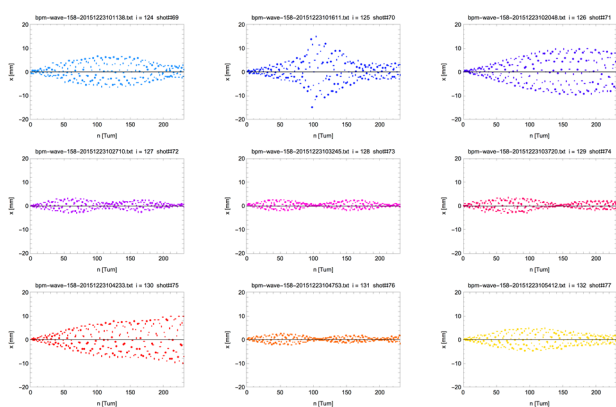


Figure 10: Beam response measured at the address 158 with the chromaticity of 95 % correction.

BPM システム、エキサイターシステムは、“Scheduled timing” [8] に同期しているので、それぞれのクロマティシティ条件でのビーム位置を平均した。その結果を、Figure 7, 8 の RF パワーアンプの特性を考慮した1粒子ベータatron振動の増大の計算結果と重ねて表示した結果を Figure 13 and 14 に示す。ここで、測定値との一致が良くなるように、1ターン内での RF とビームとの位相差 (時間差) を調整した。

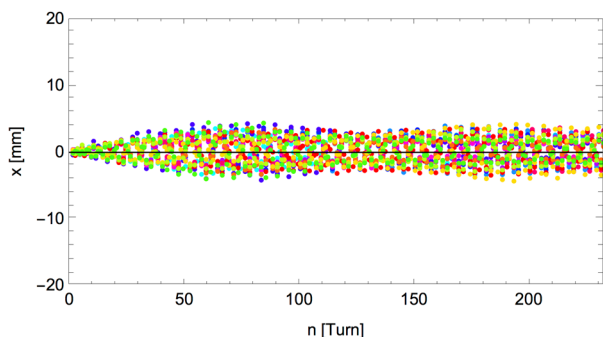


Figure 11: Overlapped plot of the BPM data at 80 % chromaticity correction.

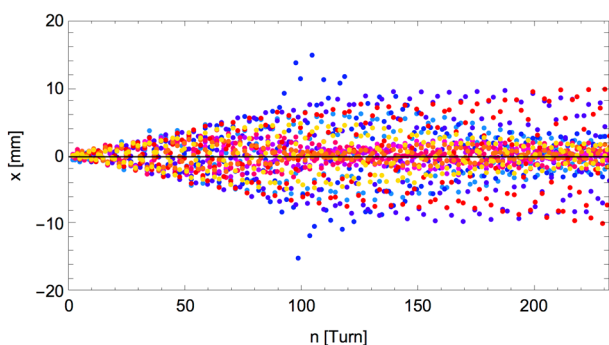


Figure 12: Overlapped plot of the BPM data at 95 % chromaticity correction.

エキサイターを駆動し始めてから 20-30 ターン程度までは、RF パワーアンプの特性を考慮した理論計算と、測定結果はよく一致している。その後は、チューンの変動の影響、クロマティシティの影響、ラティスの非線形性によって、計算値と測定値のズレが大きくなっていると考えられる。

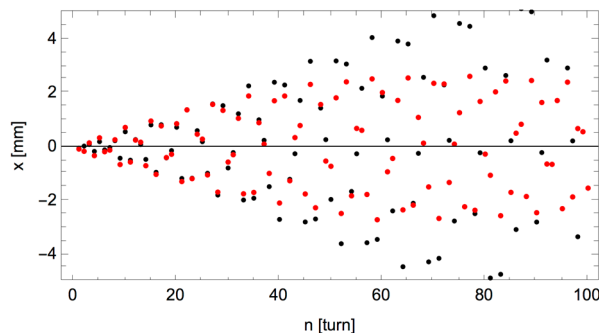


Figure 13: Beam response measured at the address 158 with the chromaticity of 80 % correction. Black dots: theoretical estimation, red dots: measured at #158.

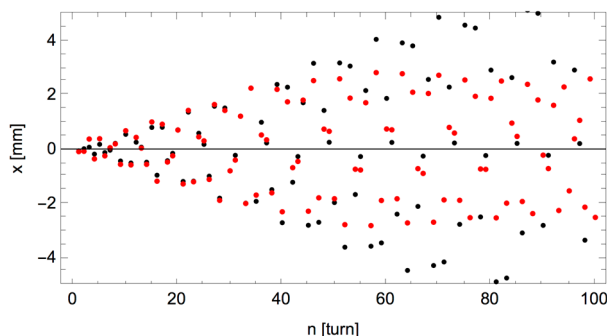


Figure 14: Beam response measured at the address 158 with the chromaticity of 95 % correction. Black dots: theoretical estimation, red dots: measured at #158.

4. 結論と展望

J-PARC MR に設置されているエキサイター (stripline kicker) の微弱なキック角 (計算値 $\sim 9.6 \mu\text{rad/turn}$) の校正を試みた。低周波 (約 260 kHz) の正弦波をステップ的に印加して、ビーム・バンチ (バンチ長 $\sim 200 \text{ ns}$, エキサイター RF 波長の約 5%) の応答を測定した。単純なシステム応答の解析では、チューンリップルの影響は立ち上がり近傍では無視できると予想された。ただし、エキサイターの RF パワーアンプの過渡応答特性、飽和特性のため、単純な解析方法は取れなかったため、RF パワーアンプの特性を取り込んだ数値計算と比較した。BPM の精度 $\sim \pm 100 \mu\text{m}$ の範囲で、計算結果、測定結果はキック開始から約 30 ターンまでの間では良く一致した。

今後の課題として以下のことが考えられる。

(1) Twiss parameter の誤差、ケーブルでの減衰、他の場所の BPM データとの比較検討、

(2) RF パワーアンプの特性の、入力信号パターンによる相殺による改善、

(3) 高周波(数 10 MHz 以上)では、バンチ内での RF 位相の変化が顕著になるので、他の校正方法の検討が必要である。

参考文献

- [1] M. Okada *et al.*, “DEVELOPMENT OF THE DLC COATED BEAM EXCITER”, proceedings of PASJ11, MOOL15 (2012) p.242.
- [2] K. Nakamura *et al.*, “Transverse Intra-bunch Feedback in the J-PARC MR”, proceedings of IPAC2014, THOAA03 (2014) p.2786 and references there in.
- [3] Y. Nakanishi *et al.*, “Measurement of beam response for the Quadrupole kicker with the stripline pickup in J-PARC MR”, TUOM05, in these proceedings.
- [4] M. Tobiyama, “Design of the exciter for betatron tune measurement in the 50GeV MR” (2006), (unpublished, in Japanese).
- [5] T. Toyama, KEK Internal Report, ASN-443 (2001), (in Japanese).
- [6] Y.H.Chin *et al.*, “HEAD-TAIL INSTABILITIES OBSERVED AT J-PARC MR AND THEIR SUPPRESSION USING A FEEDBACK SYSTEM”, proceedings of PASJ9 (2012) p.97.
- [7] T. Toyama, “Toward high sensitivity tune measurement”, J-PARC Accelerator Memo No.21, (2001), (unpublished, in Japanese).
- [8] <http://www-cont.j-parc.jp/mediawiki/index.php/Timing>