

J-PARC MR 入射誤差調整のための応答行列測定 MEASUREMENT OF RESPONSE MATRIX FOR INJECTION ERROR CORRECTION OF J-PARC MR

畠山 衆一郎 ^{*A)}、外山 毅 ^{B)}、
Shuichiro Hatakeyama ^{*A)}、 Takeshi Toyama ^{B)}
^{A)}Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd, ^{B)}KEK

Abstract

In the J-PARC Main Ring (MR), when the beam is injected from the transport line to MR, it is necessary to correct the injection error to reduce the beam loss at injection phase. The injection error is originated from a mismatch between the center of the beam bunch and the center of the magnet field of the Quadrupole magnet in transverse direction. To minimize the injection error we measured the response matrix of two beam position monitors (BPMs) and two injection magnets (Septum and kicker magnets for horizontal, two vertical steering magnets for vertical). This measurement is performed for every injected bunches in one cycle. We will introduce how to minimize these injection errors and show the result of the measurement of the response matrix.

1. はじめに

J-PARC MR ではビーム輸送ラインからビームを入射する際、ビーム軸に対して横方向の入射誤差に起因するビームロスを減少させるため入射誤差調整を行う必要がある。s 軸をビームライン方向、x, y 軸を s 軸に直交する平面のそれぞれ水平、垂直方向とすると、入射誤差を最小にするには入射キッカー通過後の点でビームバンチの位相空間上での位置 (x_0, x'_0) 、 (y_0, y'_0) を共に $(0, 0)$ に近づけなければならない。ここで $x'_0 = dx_0/ds$ 、 $y'_0 = dy_0/ds$ は絶対値で規格化されたビームの運動量のそれぞれ x, y 方向の成分である。x 方向の入射誤差 (dx_0, dx'_0) は入射軌道を制御する電磁石の磁場の誤差に起因している。磁場の誤差は電磁石の電流値の誤差に比例しているため、制御する N 台の電磁石の電流値の誤差を $dI_n (n = 1 \sim N)$ とすると、入射誤差は、

$$dx_0 = \sum_{n=1}^N \frac{\partial x_0}{\partial I_n} dI_n \quad (1)$$

$$dx'_0 = \sum_{n=1}^N \frac{\partial x'_0}{\partial I_n} dI_n \quad (2)$$

の関係式で表される。なおキッカー電磁石の磁場はパルスの電圧値に比例しているがここでは便宜上 I と表現している。入射点 ($s = 0$) より少し下流の場所 ($s = 1$) のビームの位相空間上の位置 (x_1, x'_1) は転送行列を用いて、

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} \\ m_{10} & m_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表せる。ベータatron位相の進み ψ_{01} が π の整数倍でなければ $m_{01} = \sqrt{\beta_0\beta_1} \sin \psi_{01} \neq 0$ となるので、

$$x'_0 = \frac{1}{m_{01}}(x_1 - m_{00} x_0) \quad (4)$$

と表せる。これにより $(x_0, x'_0) \rightarrow (0, 0)$ は $(x_0, x_1) \rightarrow (0, 0)$ と同義となり、式 (1)、(2) の入射誤差の関係式は BPM の測定値 x_0, x_1 を用いて、

$$dx_0 = \sum_{n=1}^N \frac{\partial x_0}{\partial I_n} dI_n \quad (5)$$

$$dx_1 = \sum_{n=1}^N \frac{\partial x_1}{\partial I_n} dI_n \quad (6)$$

と表せる。ここで測定値には閉軌道の歪み (COD) が含まれるのでそれを差し引いた位置

$$\begin{bmatrix} dx_0 \\ dx_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 - x_{\text{COD},0} \\ x_1 - x_{\text{COD},1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

を用いている。式 (5)、(6) の関係式を $N = 2$ にして行列形式で表すと、

$$\begin{bmatrix} dx_0 \\ dx_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial x_0/\partial I_1 & \partial x_0/\partial I_2 \\ \partial x_1/\partial I_1 & \partial x_1/\partial I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dI_1 \\ dI_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる。ここで、

$$M_x = \begin{bmatrix} \partial x_0/\partial I_1 & \partial x_0/\partial I_2 \\ \partial x_1/\partial I_1 & \partial x_1/\partial I_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

は (dx_0, dx_1) と (dI_1, dI_2) の関係性を表す応答行列である。入射誤差をゼロにするための電磁石の補正量は COD を差し引いた 2ヶ所のビーム位置と応答行列の逆行列を用いて、

$$\begin{bmatrix} dI_1 \\ dI_2 \end{bmatrix} = M_x^{-1} \begin{bmatrix} dx_0 \\ dx_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

のように求めることができる。y 方向の入射誤差の補正に関してはビーム輸送ラインにある 2 台の垂直ステアリング電磁石を用いて同様の方法で求めることができる。

* hatake@post.j-parc.jp

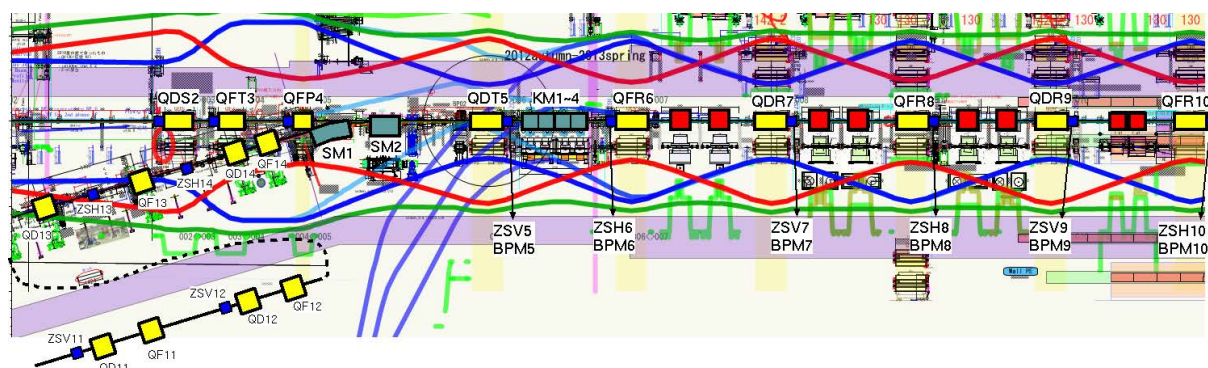


Figure 1: MR injection line. QF*/QD* are focus/defocusing quadrupole magnets, ZSH*/ZSV* are horizontal/vertical steering magnets, SM* are septum magnets, KM* are kicker magnets.

2. 入射誤差測定のための BPM

Figure 1 に MR の入射ビームラインを示す。 x 方向で、 $s = 0$ に対応する BPM は KM4 と QFR6 の間の BPM6 を用いる。 $s = 1$ では測定精度を上げるため β の大きい QFR8 直後の BPM8 を用いる。 BPM6 と BPM8 の間の位相差は $\psi_{01} = 0.5184\pi$ なので式 (4) が使える。 y 方向についても β が大きくなる QDR7 直後の BPM7、 QDR9 直後の BPM9 を用いる。 BPM7 と BPM9 の間の位相差は $\psi_{01} = 0.4382\pi$ なのでこちらも式 (4) が使える。

3. 入射誤差調整のための電磁石

MR ではビーム輸送ラインから周回リングへビームを大きく曲げる必要があり、そのために 2 台のセプタム電磁石 (SM1, SM2) と 4 台のキッカー電磁石 (KM1~4) がある (Figure 1 参照)。 SM1 は完全にビーム輸送ライン側にあり幅約 100ms の長いパルスで 1 サイクル分の 8 バンチのビームを曲げる。 SM2 はビーム輸送ラインと周回リングの境目にあり周回ビームに影響を与えない工夫がなされた渦電流型セプタムである。 4 台のキッカー電磁石は完全に周回リングの中にあり、幅約 $1\mu\text{s}$ の短いパルスで 1 バッチ分の 2 バンチのビームを曲げる。 水平方向の入射誤差 (dx_0) の調整では式 (8) の I_1 に相当するものとして電流の調整幅に余裕のある SM1 を用いる。 また I_2 に相当するものとして 4 台の KM を 1 台の電磁石とみなして電圧を同時に変更する。 垂直方向の入射誤差 (dy_0) の調整では I_1 、 I_2 に相当するものとしてビーム輸送ラインにある 2 台の垂直ステアリング電磁石 ZSV11、 ZSV12 を用いる。

4. 入射チューン及び COD の測定

入射誤差 (dx_0) の測定では 1 ターン目の位置 (x_0) と COD($x_{\text{cod},0}$) を以下のようにして求める。

- (1) BPM の電極波形データからターン毎の位置を計算しバンチ毎に選別する
- (2) 得られた位置を FFT で変換しターン毎の振動数 (ベータトロンチューン) の少数部を求める
- (3) 得られたチューンを使ってターン毎の位置を正弦関数でフィッティングする

(4) 正弦関数の 1 ターン目の値を x_0 とする

(5) 正弦関数の中心値を $x_{\text{cod},0}$ とする

ターン毎の位置計算では $500\mu\text{s}$ の範囲でバンチ波形を個別に選別し 8 バンチ毎に約 93 ターン的位置を計算する [1]。 離散的なデータの正弦関数のフィッティングではサンプリングのエリアジングにより周期の不定性があるので一意的に解くことはできないが、チューンをあらかじめ規定することによって最小 2 乗法で一意的に解くことができる。 Figure 2(A) は 93 ターン的位置を FFT で変換して得られたパワースペクトラムでピークの値 (0.398) は水平方向のチューンの少数部である。 通常チューンは入射、加速のサイクルの間ビームの運動量の変化や電磁石のリップルにより変動するのだが、ここで求めたチューンは入射の $500\mu\text{s}$ の短い間での平均値であるので入射時のベータトロン振動のフィッティングにおいて規定値として使える。 Figure 2(B) は計算したチューンを用いて 10 ターン的位置を正弦関数でフィッティングしたものである。

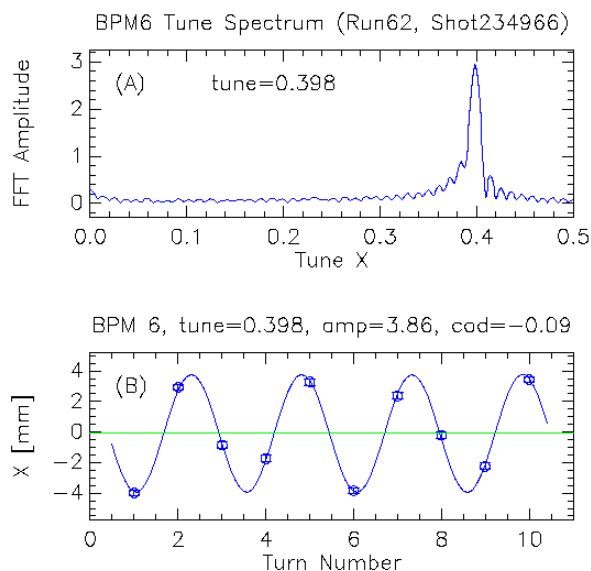


Figure 2: (A) FFT spectrum of turn-by-turn position. (B) fitting by sinusoidal function (green line is COD value).

5. 応答行列の測定

応答行列は以下の手順で測定する。

- (1) I_2 を固定し I_1 を 3 点変更し各点 3 ショットとする
- (2) I_1 を固定し I_2 を 3 点変更し各点 3 ショットとする
- (3) 2 箇所の BPM について電磁石の電流変更に対する位置の変位を直線でフィットする
- (4) フィットした 4 つの傾きの値が式 (9) の応答行列の要素となる。

$\partial x_i / \partial I_n$ の測定では SM1 の電流値を 1A ずつ変化させ、KM の電圧値を 0.5kV ずつ変化させた。 $\partial y_i / \partial I_n$ の測定では ZSV11, ZDV12 の電流値を 10A ずつ変化させた (I_2 のデータは時間の関係で 2 点のみ)。Figure 3, Figure 4 は 1 バンチ目の x, y についてそれぞれデータを直線でフィットした結果である。Table 1, 2 は 8 バンチ全てについての測定結果である。今回の測定では SM1 の電流値と KM の電圧値の振り幅が小さかったため $\partial x_0 / \partial I_2$ と $\partial x_1 / \partial I_1$ の応答行列の精度が良くなかった。その他に関しては比較的良い精度で測定できた。

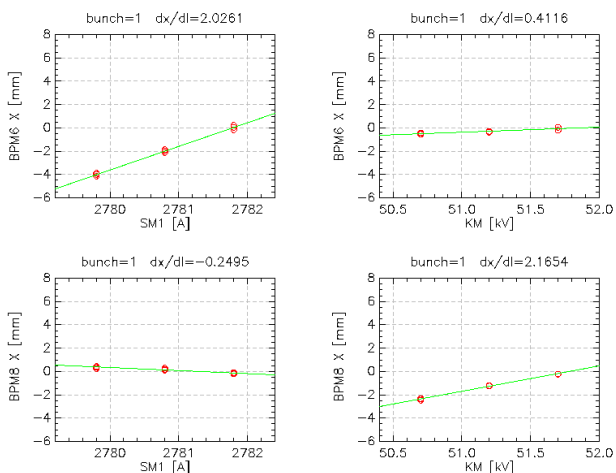


Figure 3: Linear fitting of I_n (SM1, KM) and x_i (BPM6,8).

Table 1: Response Matrix ($\partial x_i / \partial I_n$) Measured Values

	$\partial x_0 / \partial I_1$	$\partial x_0 / \partial I_2$	$\partial x_1 / \partial I_1$	$\partial x_1 / \partial I_2$
bunch 1	2.0261	0.4116	-0.2495	2.1654
bunch 2	1.9543	0.4126	-0.2047	2.3723
bunch 3	1.8914	0.2268	-0.1594	2.1584
bunch 4	1.9862	0.3352	-0.1733	2.3469
bunch 5	1.8757	0.4395	-0.2469	2.1949
bunch 6	1.9796	0.3898	-0.1950	2.3884
bunch 7	1.9301	0.4060	-0.2041	2.2475
bunch 8	1.9534	0.3852	-0.2252	2.2983
mean value	1.9496	0.3758	-0.2073	2.2715
RMS / mean	0.0239	0.1676	0.1457	0.0383

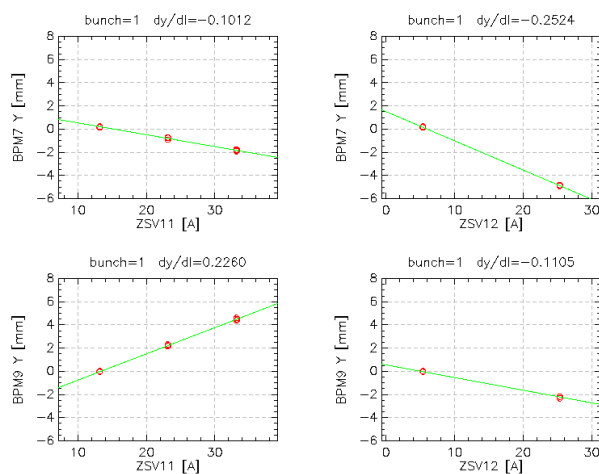


Figure 4: Linear fitting of I_n (ZSV11,12) and y_i (BPM7,9).

Table 2: Response Matrix ($\partial y_i / \partial I_n$) Measured Values

	$\partial y_0 / \partial I_1$	$\partial y_0 / \partial I_2$	$\partial y_1 / \partial I_1$	$\partial y_1 / \partial I_2$
bunch 1	-0.1012	-0.2524	0.2260	-0.1105
bunch 2	-0.0935	-0.2464	0.2281	-0.1159
bunch 3	-0.0942	-0.2351	0.2081	-0.1011
bunch 4	-0.0892	-0.2500	0.2248	-0.1089
bunch 5	-0.0844	-0.2398	0.2147	-0.0992
bunch 6	-0.0941	-0.2593	0.2299	-0.1095
bunch 7	-0.0888	-0.2371	0.2083	-0.1101
bunch 8	-0.0821	-0.2452	0.2270	-0.1018
mean value	-0.0909	-0.2457	0.2209	-0.1071
RMS / mean	0.0627	0.0313	0.0380	0.0504

6. まとめと謝辞

J-PARC MR の入射誤差調整の手法を紹介し、応答行列の測定結果を示した。今後の測定では電磁石の電流値の振り幅を大きくして測定精度を良くしたいと考えている。本発表の入射誤差調整手法は MR ビーム調整で現在運用中である [3]。MR ビーム調整においては KEK の白形政司様、石井恒次様、高野淳平様、五十嵐進様、佐藤洋一様、JAEA の原田寛之様、その他多くの方にお世話になりました。感謝致します。

参考文献

- [1] S.Hatakeyama, et al., "A SYSTEM FOR MONITORING OF THE TRANSVERSE INJECTION ERROR AND BETATRON TUNE IN J-PARC MR", Proceedings of PASJ, Himeji, 2010.
- [2] M.Shirakata, et al., "Injection Error Monitor KEK 12 GeV PS", KEK Report 93-11, 1993.
- [3] Yoichi Sato, et al., "Recent commissioning and prospect of high power beam operation of the J-PARC Main Ring", This Proceedings.