

## OPTICS MEASUREMENT AND CORRECTION IN J-PARC MR

Susumu Igarashi <sup>#A)</sup>, Hiroyuki Harada <sup>B)</sup>, Shuichiro Hatakeyama <sup>B)</sup>, Tadashi Koseki <sup>A)</sup>,  
Masashi Shirakata <sup>A)</sup>, Junpei Takano <sup>A)</sup>, Fumihiko Tamura <sup>B)</sup>, Takeshi Toyama <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakatashirame, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1195

### Abstract

Optics parameters have been measured and corrected for the main ring (MR) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). The betatron oscillations with intentional injection errors have been measured at all available beam position monitors for the betatron amplitude function ( $\beta$ ). The closed orbit distortions have been measured for certain momentum shifts for the dispersion function ( $\eta$ ). The measured optics have modulation of about 12% in root mean square (rms) and the modulation has a three-fold symmetry. Correction factors for the magnetic field settings of the 11 families of the quadrupole magnets were fitted to reproduce the designed  $\beta$ ,  $\eta$  and betatron tune. The rms of  $\beta$  modulation was reduced to be within 5% with the correction. We observed improvement in the beam loss localization.

## J-PARC MRにおける光学測定とその補正

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)の主リング(MR)は大強度の陽子を 3 GeV で入射し、30 GeV まで加速して取り出す加速器で、2011 年 3 月にはパルスあたり  $9.2 \times 10^{13}$  個の陽子、ビームパワーとして 145 kW のビームをユーザーに供給した。機器の放射化を最小限にするため、ビームロスの低減とコリメータへの局在化が重要となっている。ビームロスは主に 3 GeV のときに発生し、平均的なロス粒子数は 2 % 弱で、ロスパワーは 250 W であった。ビームロスをコリメータに局在させるため、コリメータ部を含む MR 全体のベータートロン振幅関数( $\beta$ )とディスパージョン関数( $\eta$ )が正しく設定されていることが必要となる。

今まではステアリング電磁石を使って  $\beta$  の測定を行っていた<sup>[1]</sup>。ステアリング電磁石により 0.2 mrad のキック量を与えたときの閉軌道(COD)を測定し、ステアリング電磁石とほぼ同じ位置にあるビーム位置モニター(BPM)での  $\beta$  を算出した。また、rf 周波数を変えることにより運動量を変え、そのときの COD を測定することにより、 $\eta$  の測定を行った<sup>[2]</sup>。

今回、入射エラーを意図的に作った場合のベータートロン振動振幅をターンごとに測定することにより、全ての BPM での  $\beta$  を測定した。ステアリング電磁石を使う方法と比較して、個々のステアリング電磁石のキック量のばらつきが測定エラーとなることを排除できることが利点となる。

今回の測定により、 $\beta$  の変調が 20%以上ある場所があり、その変調が 3 回対称となっていることが分かった。変調の主な要因は 11 ファミリーの四極電磁石の設定のずれであると考えられ、その補正を

行った。これらの光学測定とその補正、およびそれによるビームロスの変化について報告する。

### 2. $\beta$ 測定

$\beta$  測定のためにビーム強度を  $5 \times 10^{11}$  ppb とし、1 バンチ入射した。BPM の測定モードのひとつでターンごとの位置を測定し<sup>[3]</sup>、入射直後から 200 ターンまでの測定を全ての BPM を使って行った。図 1 に BPM001 での水平方向ビーム位置の測定結果を示す。入射セプトラム電磁石の電流設定を入射エラーがない状態から 4 A 変え、入射エラーを作り、6 mm 程度のベータートロン振動が観測できる。MR では六極電磁石によりクロマティシティの補正を行っている。六極電磁石による非線形のためか、若干、振幅がダンプしている。最初の 40 ターンまでの測定点を sin 関数でフィットし振幅を求めた。

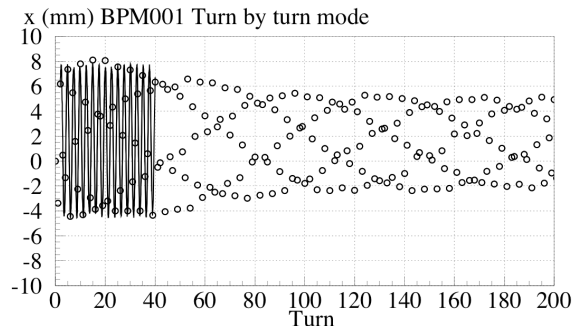


図 1 : ターンごとの水平方向ビーム位置 x (mm)。

BPM 処理回路は動作不安定となる場合があり、186 台のうち今回は 3 台の測定ができなかった。測定できた全ての BPM について同じ解析を行った。

<sup>#</sup> susumu.igarashi@kek.jp

振幅は  $\beta$  の平方根に比例する量であり、設定の  $\beta$  の平均値が、測定 of  $\beta$  の平均値となるようにスケール値を求めた。図 2 に水平方向  $\beta$  の測定値および設定値を示す。

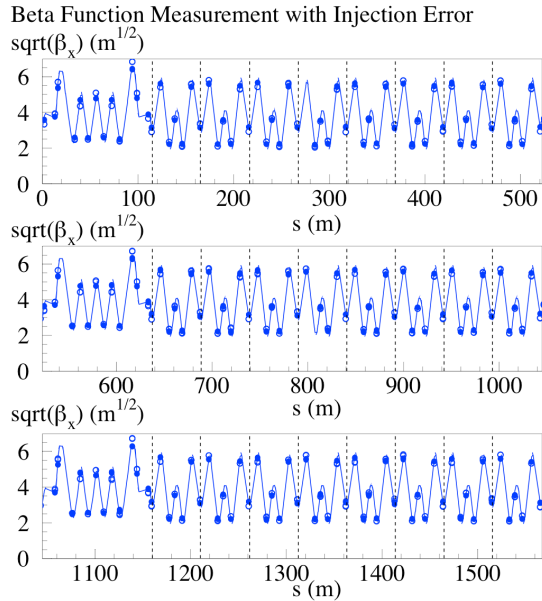


図 2 : 水平方向ベータトロン振幅関数。光学補正前(○)、光学補正後(●)、設定値(青線)。

垂直方向の  $\beta$  の測定は、RCS から MR へのビーム輸送ライン(3-50BT)最下流の垂直方向ステアリング電磁石の設定を 25 A 変えることにより、入射エラーをつくり、入射から 200 ターンのターンごとの垂直方向のビーム位置を BPM で測定することにより行った。結果を図 3 に示す。

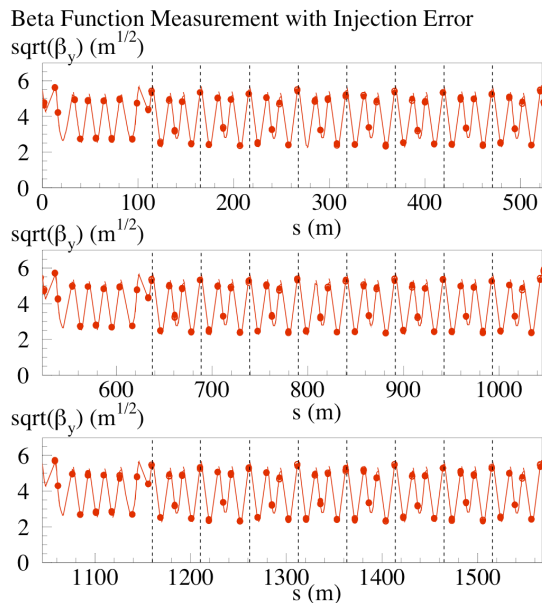


図 3 : 垂直方向ベータトロン振幅関数。光学補正前(○)、光学補正後(●)、設定値(赤線)。

設定値との比較のために測定値と設定値の比を図 4 と 5 に示す。

Beta Function Measurement with Injection Error

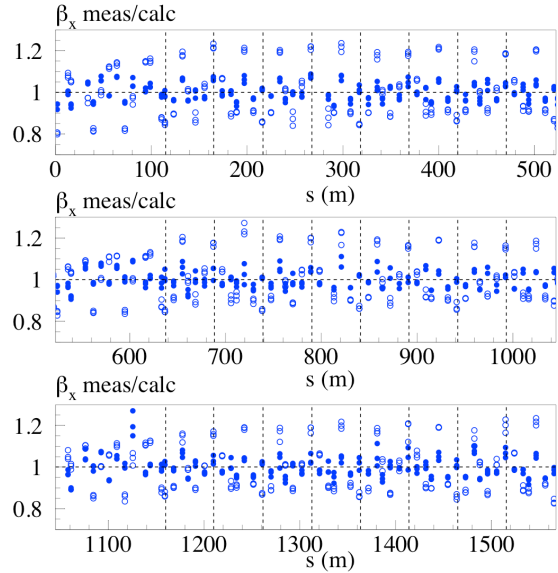


図 4 : 水平方向ベータトロン振幅関数、設定との比。光学補正前(○)、光学補正後(●)。

Beta Function Measurement with Injection Error

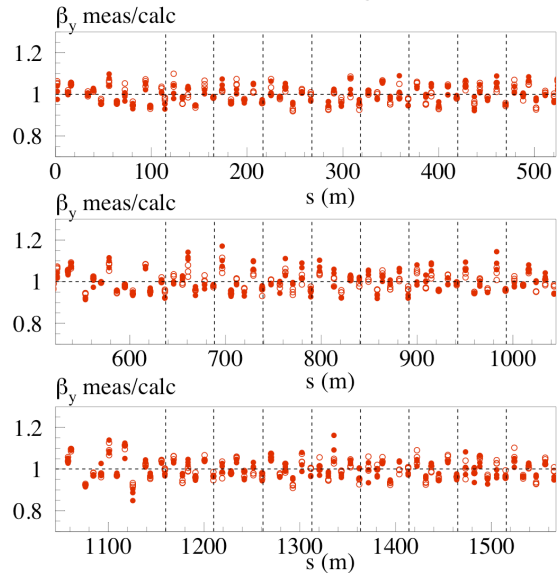


図 5 : 垂直方向ベータトロン振幅関数、設定との比。光学補正前(○)、光学補正後(●)。

垂直方向  $\beta$  は概ね 10%以内で設定と合っている。水平方向  $\beta$  は 20%を超えて合っていないものがある。特にコリメータ部で 20%近く変動しているものがあること、直線部で  $\beta$  が最大となる場所で 20%近く大きくなっていることで、ビームロスへの影響が懸念される。これらの変動には 3 回対称性が見られる。つまり  $\beta$  変動の主な要因は、個々の四極電磁石のずれではなく、四極電磁石のファミリーごとのずれであることが推測される。

### 3. $\eta$ 測定

$\eta$  の測定のために、ビーム強度はバンチあたり  $2 \times 10^{12}$  とし 2 バンチ入射した。入射後 50 ms から 100 ms のあいだに rf 周波数を変え、運動量の変化 ( $\Delta p/p$ ) を作った。  $\Delta p/p$  の設定としては 0,  $\pm 0.3$ ,  $\pm 0.5$  % の 5 種類について、COD の測定を行った。5 点のデータについてリニアフィットを行い、 $\eta$  を計算した(図 6)。

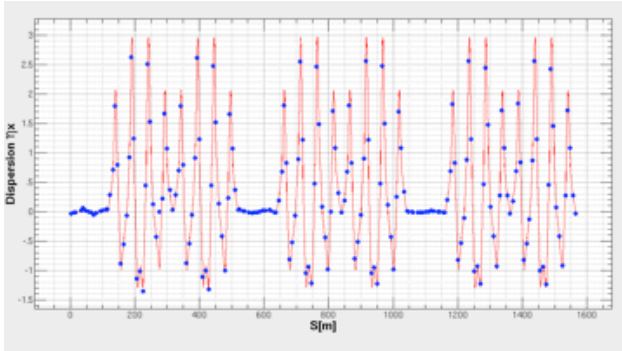


図 6 : MR 一周での  $\eta$  測定値。

### 4. 光学補正

11 ファミリーの四極電磁石の設定のずれを仮定して、 $\beta$  測定、 $\eta$  測定およびチューン測定 of 全ての測定値を再現するような四極電磁石の  $k$  値を光学計算モデル内で再構築し、設定値との比から補正係数を求めた(図 7)。アーク部のファミリーの補正係数は小さく、最大でも QFX ファミリーの -0.3 % であり、 $\eta$  のずれは小さい。補正係数の最大値は QFP ファミリーの 2.2 % であった。四極電磁石の磁場の絶対値のずれを示すものかもしれない。

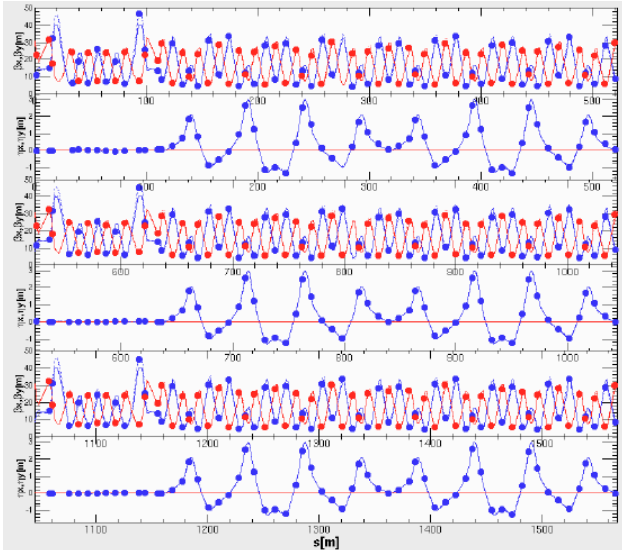


図 7 : 光学測定をもとに四極電磁石  $k$  値をパラメータとして再構築した光学パラメータ(点線)、設計光学パラメータ(実線)、水平方向測定値(●)、垂直方向測定値(●)。

この補正後の  $\beta$  の測定結果を図 2 ~ 5 に示す。主に水平方向  $\beta$  に改善が見られる。水平方向  $\beta$  変調の

root mean square (rms) は、補正前の 12.0 % から補正後に 4.5 % と改善した。垂直方向  $\beta$  については元々あまりずれがなかったため、 $\beta$  変調の rms は補正前の 4.3 % から補正後の 4.7 % とほぼ変化なかった。

また、この補正により、直線部の  $\beta$  の最大となる場所で 20% 近く大きかったものが補正された。 $\beta$  の最大となる場所のひとつ QFP004 では、補正前には大きなビームロスが観測されていたが、この補正後にはビームロスが低減した(図 8)。このビームロスの観測には、別の日の補正パラメータが使われている。

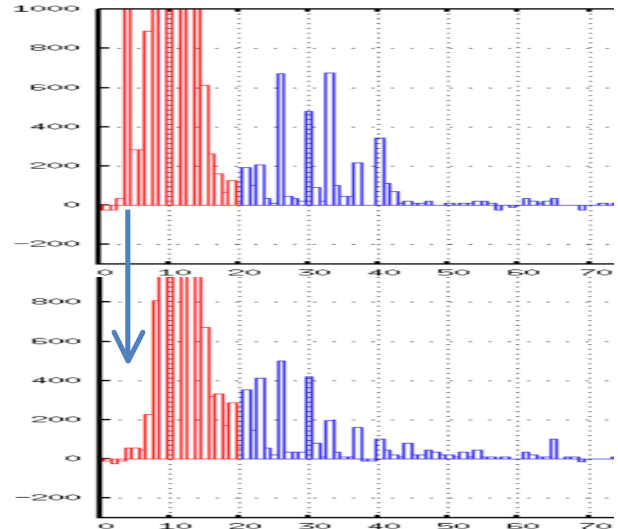


図 8 : 光学補正前(上)と補正後(下)のビームロス分布 (MR の 1/3 周、入射直線部とアーク A)。#4 の位置でのロスの低減が見られる。

### 5. まとめ

J-PARC MR において  $\beta$  および  $\eta$  の測定を行った。入射エラーを故意に作り、ベータatron 振動振幅を BPM で測定することにより、 $\beta$  を求めた。 $\eta$  の測定は rf 周波数を変えたときの COD の変化を測定することにより行った。設計光学パラメータと比べ測定された水平方向の  $\beta$  変調は rms で 12.0% あり、その変調には 3 回対称性が見られた。11 ファミリーの四極電磁石の設定のずれを仮定して、 $k$  値の補正により、光学補正を行った。補正後、水平方向の  $\beta$  変調は rms で 4.5% と改善した。また、ビームロスのコリメータへの局在化についても改善した。

### 参考文献

- [1] J. Takano, et al., “ステアリング電磁石を用いた J-PARC MR の  $\beta$  関数測定”, Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting, Naka, Ibaraki, Aug. 5-7, 2009
- [2] J. Takano, et al., “J-PARC MR の Dispersion 測定”, Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting, Naka, Ibaraki, Aug. 5-7, 2009
- [3] S. Hatakeyama, et al., “J-PARC MR 横方向の入射エラー及びベータatron チューンモニターシステム”, Proceedings of the 7th Particle Accelerator Society Meeting, Himeji, Hyogo, Aug. 4-6, 2010