

# J-PARC 主リングの加速中におけるベータ関数の測定 MEASUREMENT BETATRON AMPLITUDE FUNCTION DURING ACCELERATION IN J-PARC MAIN RING

仲村 佳悟 \*A), 栗本 佳典 B)  
Keigo Nakamura\*<sup>A)</sup>, Yoshinori Kurimoto<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup>Kyoto University, <sup>B)</sup>KEK

## Abstract

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) Main Ring (MR) has been operated with about 350kW beam power. To increase the beam power, the reduction of the beam loss is the most important issue. Especially the beam loss at the beginning of acceleration limits the beam power now. Beta function is one of the most important parameters of beam optics, but it was never measured during acceleration. We developed new FPGA module which enables us to excite betatron oscillation at any time. We successfully measured the beta function with this module. This measurement is the first measurement of beta function during acceleration at J-PARC MR. From this measurement, we corrected the beam optics and succeeded in accelerating the beam with new operation points.

## 1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) Main Ring (MR) は現在ニュートリノビームラインに対して速い取り出し運転で約 350kW でのビーム強度を供給している。現在ビーム強度はビームロスによって制限されており、ビーム加速に伴う Beam Optics の高精度制御の未実施がロスの主原因の一つである可能性がある。そのため加速中での Beam Optics を理解することが急務である。 $\beta$  関数は Beam Optics を決める重要なパラメータでこれまで J-PARC MR ではステアリング電磁石を用いた測定<sup>[1]</sup>、入射エラーを用いた測定<sup>[2]</sup>が行われてきた。これらの測定はビーム入射時であるフラットベースにおける測定であり、これらの方法では加速中にベータトロン振動を励起させることが出来ないため  $\beta$  関数を測定するのが困難であった。そのため加速中で  $\beta$  関数を測定するには任意の時間にベータトロン振動を励起させる必要がある。そこで FPGA モジュールでベータトロン振動に同期した信号をストリップライン型キッカーに入力し、徐々にビーム重心の振動を励起させ、全周の Beam Position Monitor (BPM) の周回ごとの振動を測定することで  $\beta$  関数の測定を行った。J-PARC MR における加速中での  $\beta$  関数の測定は本測定が初めてである。

## 2. セットアップ

### 2.1 装置

信号生成用の FPGA モジュールには Altera 社の Cyclone5 SOC が搭載されており、16bitDAC(DAC34H84) 評価ボードと接続されている。また、FPGA ボードはイーサネット PC と接続されており、外部トリガーが入力されてから信号を出力する時間 (Figure 2 の start timing)、出力の持続時間 (Figure 2 の kick span)、ゲイン、周波数を指定できる。外部トリガーが入力されると指定した周波数のサイン波を指定された期間に DAC から出力する。クロックには RF 周波数に同期した信号を

64 通倍したものを使用し、外部トリガーには MR サイクルの開始タイミング ( $=p_0$ ) を用いた。FPGA モジュールには波形取り込み用の ADC も組み込んであるが今回の測定では使用しなかった。

測定の概要図を Figure 1 に示す。ベータトロン振動に同期し振動を励起するための FPGA モジュールからの出力信号はパワーアンプを通してキッカーに送られる。パワーアンプ、キッカーは Intra-bunch feedback system<sup>[3]</sup> 及び Transverse RF system<sup>[4]</sup> に使用している DLC コーティングを施したストリップライン型キッカー<sup>[5]</sup> を使用した。BPM は全周に設置されている対角線カット型 BPM<sup>[6]</sup> を使用し、BPM からのデータ取得は MR 全周 BPM データ処理システムを用いてターン毎の位置を測定した<sup>[7]</sup>。

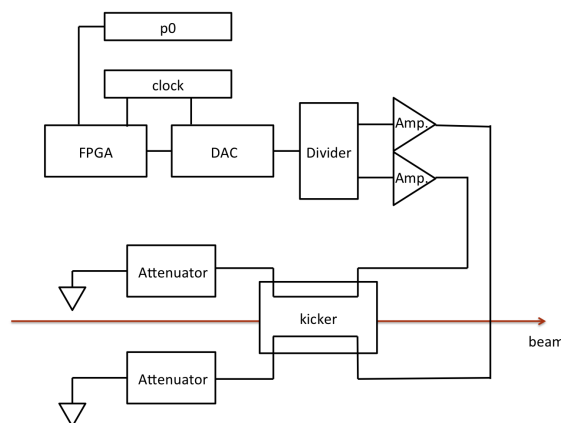


Figure 1: Schematic view of the setup.

### 2.2 パラメータ

測定時の主なビームパラメータを Table 1 に載せる。この測定は現在の利用運転用のチューン (22.41,20.75) で

\* nakakei@post.j-parc.jp

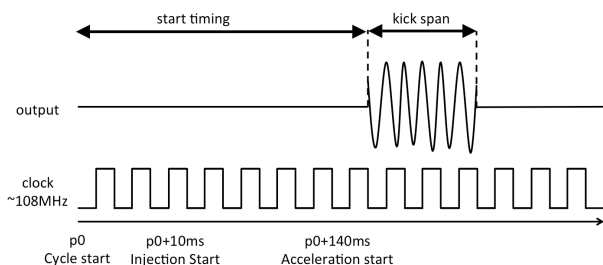


Figure 2: Overview of Timing.

はなく、空間電荷効果によるロスを抑えるために現在スタディを行っている (21.25,21.4) での加速中の  $\beta$  関数測定を行った<sup>[8]</sup>。

Table 1: Main Beam Parameters of the Measurement

パラメータ	値
Beam intensity	2.0 e+12
Horizontal tune	21.25
Vertical tune	21.4
Chromaticity	$\sim 0$

Figure 3 は kick 開始時間 p0+100ms キック終了時間 p0+250ms でキックした時のストリップライン型 BPM の水平方向の差信号である。これより、FPGA モジュール

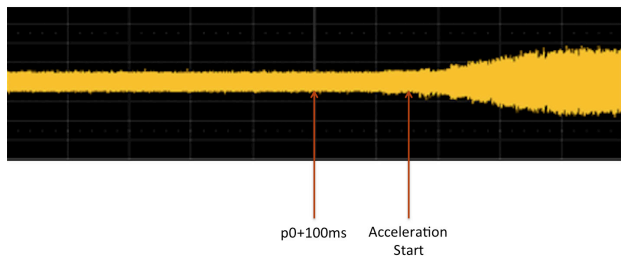


Figure 3: Stripline BPM signal measured by oscilloscope.

ルによって加速中でもベータトロン振動を励起できることを確認した。現状のシステムではチューンを予め指令値として入力する必要があるが、電源リップルの影響などでチューンが設定値からずれている部分があるため各

測定点に対して効果的にベータトロン振動を励起できるチューンの値を適時設定した。また、現在のシステムでは加速に伴い clock 信号の周波数も変化するため終了時間の指令値と実際の時間にズレが生じる。現在のシステムでは約 1ms 分のデータしか取得出来ないため、励起終了時間から余裕をもたせるためにデータ取得開始時間を少しずらしている。Table 2 に各測定点における設定値をまとめる。各測定点に置いて 3 回ずつデータを取得した。

Table 2: FPGA Module Setting and Start Timing of DAQ

kick start	kick end	DAQ start(p0+)	tune(hor/ver)
90ms	100ms	100ms	0.25 / 0.41
190ms	200ms	201ms	0.25 / 0.40
290ms	300ms	306ms	0.27 / 0.40
390ms	400ms	410ms	0.285 / 0.40

### 3. 解析

#### 3.1 $\beta$ 関数の導出

例としてある BPM (BPM No.11) で測定した周回ごとのビーム位置 (黒点) を Figure 4 に載せる。

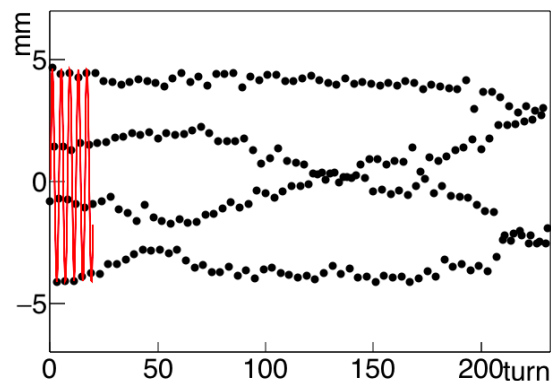


Figure 4: Turn by turn horizontal beam position measured by BPM No. 11.

$\beta$  関数は各位置のベータトロン振動の振幅の二乗として計算できるため、各 BPM で測定した振動から振幅を求めれば良い。入射時の  $\beta$  測定の解析では<sup>[2]</sup>、Figure 4 の赤線の様に各 BPM のビーム位置に対してサイン関数でフィットすることで振幅を導出していった。しかし、この方法では BPM の COD の時間変化やチューンの変化などの影響により正しくフィット出来ないことがある。そこで各 BPM の周回ごとのビーム位置にフーリエ変換をかけ、フーリエ振幅のチューン付近でのピーク値をその BPM での相対的な振幅として導出した (Figure 5)。

また、全周の BPM の  $\beta$  関数の平均と加速器モデルによる計算値の平均が一致するように規格化を行った。それぞれの測定点での結果を Figure 6~9 に示す。黒線が水平方向、点線が垂直方向の加速器モデルによる計算

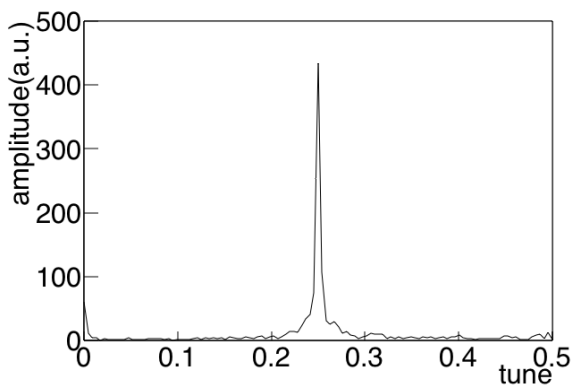


Figure 5: Fourier amplitude spectrum of turn by turn horizontal beam position measured by BPM11.

値、丸印は水平方向、三角は垂直方向の測定値を表している。また、赤は1回目、緑は2回目、青が3回目の測定である。

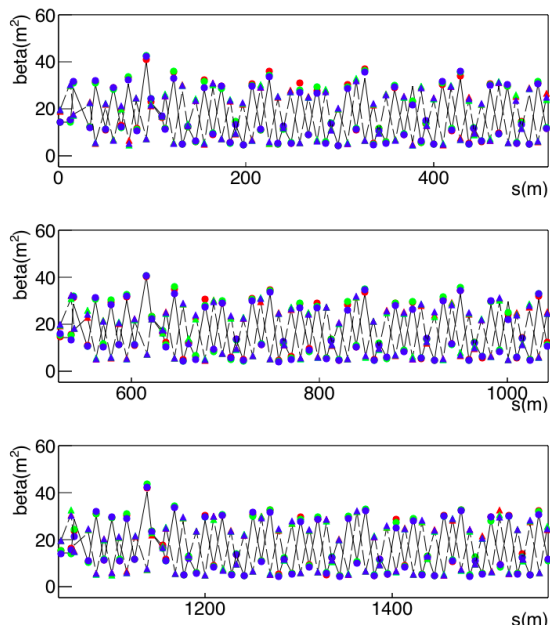


Figure 7: Measured beta function at p0+201ms.

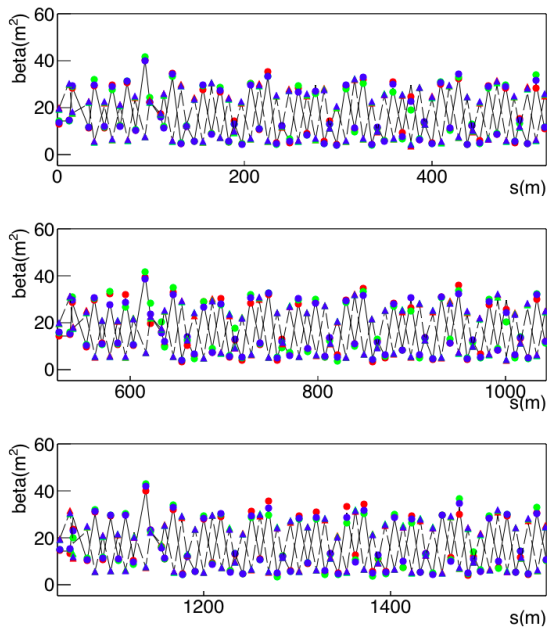


Figure 6: Measured beta function at p0+100ms.

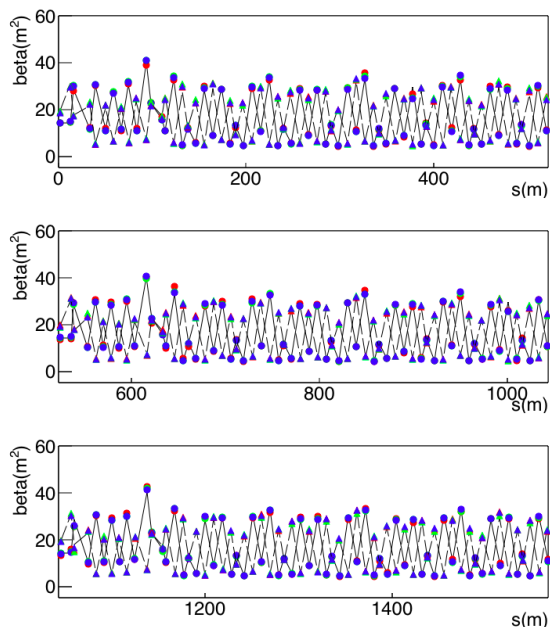


Figure 8: Measured beta function at p0+306ms.

この測定結果及び分散関数、チューンの測定結果から四極電磁石の設定のずれを仮定して、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加速中の Beam Optics の補正をした。この補正により加速中のロス減らし、現行 (1bunch あたり  $\sim 2.3 \times 10^{13}$ ) よりも大強度のビーム (1bunch あたり  $3.5 \times 10^{13}$ ) を加速することに成功している。補正や大強度調整については [8] に詳しく掲載されている。

## 4. 考察

### 4.1 測定毎のふらつき

図 10 は p0+100ms の測定の各 3 回の水平方向の  $\beta$  関数を重ね書きしたものである。

各 BPM で大きなふらつきが見られる。例として p0+100ms 測定時の BPM79(s=660 付近) の周回ごとのビームの位置を Figure 11、12 に示す。この 2 つを比べると同じ測定時間、同じ BPM にもかかわらず振幅に大

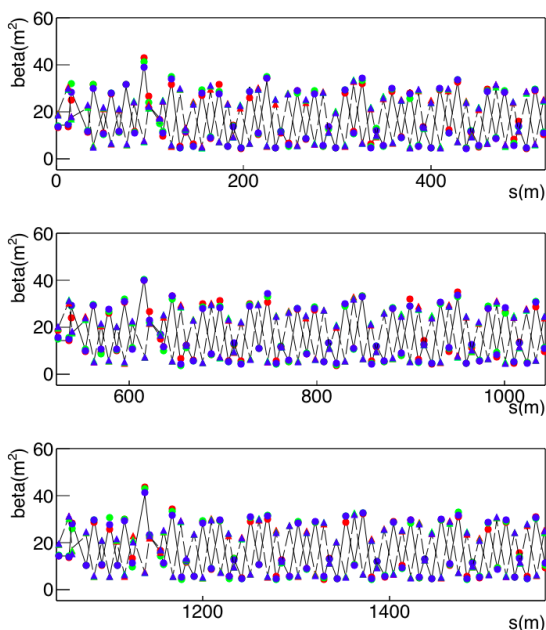


Figure 9: Measured beta function at p0+410ms.

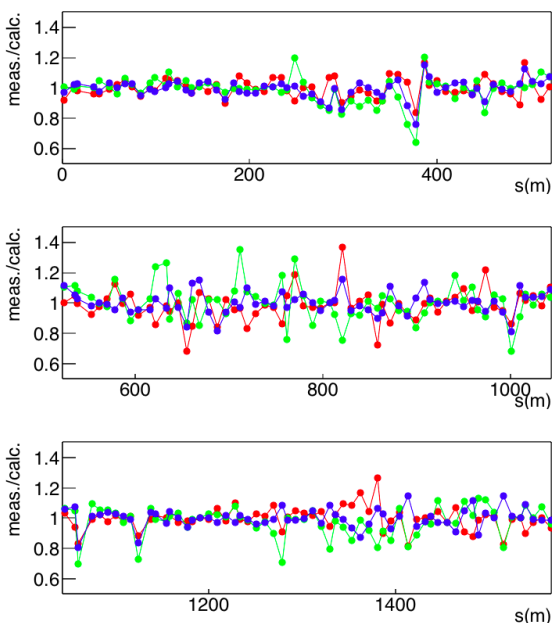


Figure 10: Measured and calculation ratio of horizontal beta function at p0+100ms. Red :1st measurement, Green: :2nd measurement、Blue:3rd measurement.

きな違いがあるのがわかる。Figure 11 のビーム位置では振幅の変化が見られるなど正しくベータatron振動を励起できていないか、未知の外乱によってベータatron振動に変化が生じた可能性がある。また、キックが弱く振幅が小さい時には S/N 比が悪くなるため誤差が大きかった。これらからより正確な  $\beta$  関数測定のためにはある程度の大きさの振幅を一定に保ったベータatron振

動を起こせる「質の良い」キックを加える必要がある。また、BPM 44、118、126 には水平、垂直両方すべての測定において  $\beta$  関数が 20 ~ 30% ほど小さくなっていった。これらの BPM に系統的にズレが現れている可能性が高く、現在調査中である。

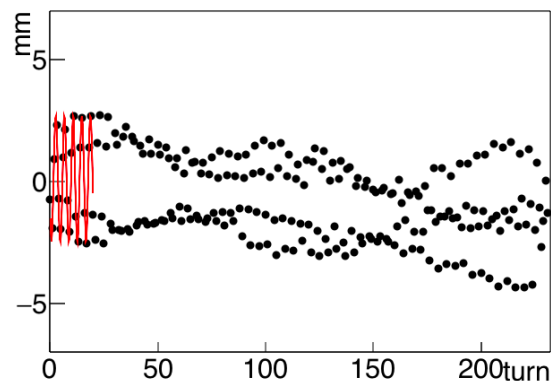


Figure 11: Horizontal beam position measured by BPM 79 at p0+100ms in 2nd measurement.

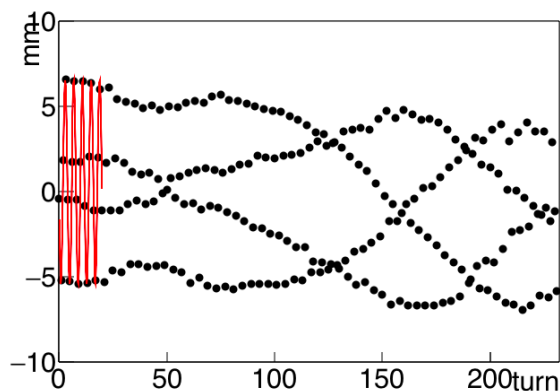


Figure 12: Horizontal beam position measured by BPM 79 at p0+100ms in 3rd measurement.

また、BPM44、118、126 で水平方向、垂直方向共に大きくずれている部分がある。すべての測定において低く出ているためこの3ヶ所で何か系統的にエラーがある可能性がある。この原因については現在調査中である。

#### 4.2 フィットによる解析との比較

サイン関数でのフィッティングでも  $\beta$  関数を導出した。前述のようにオフセットや加速による周波数の変化等などがあるため、220 ターンの測定値を 20 ターン毎に計 11 回フィッティングを行い、その平均をとることで  $\beta$  関数を求めた。関数は

$$f(x) = A \sin(2\pi\nu x + \phi) + B \quad (1)$$

を用いた。A、 $\nu$ 、 $\phi$ 、B はフリーパラメータである。パラメータの初期値として振幅 A は信号の最大値と最長値

を足したものの、CODに相当するオフセット  $B$  は最大値と最小値を引いたもの、チューン  $\nu$  は初期値をその測定点での設定値、初期位相  $\phi$  は  $0$  に設定し、 $\nu$  は設定値  $\pm 0.5$  の範囲で、 $\phi$  は  $\pm\pi$  の範囲でパラメータ領域を制限した。このパラメータで一度すべてのデータをフィットした後、 $\nu$  の平均値でを固定した後再度フィットした。そしてその時の  $A$  の二乗を  $\beta$  関数として導出した。測定との誤差が大きかった  $p0+100ms$  と比較的少なかった  $p0+306ms$  のデータでフーリエ変換との比較をしたのが Figure 13、14 である。どちらの場合でもフーリエ変換とフィットのふらつきはほぼ同程度になった。

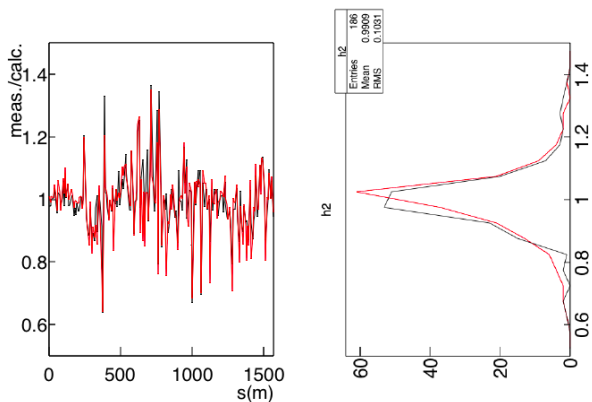


Figure 13: Fluctuation of measurement and calculation with Fit and FFT at  $p0+100ms$  (2nd measurement). Black:Fit Red:Fourier transformation.

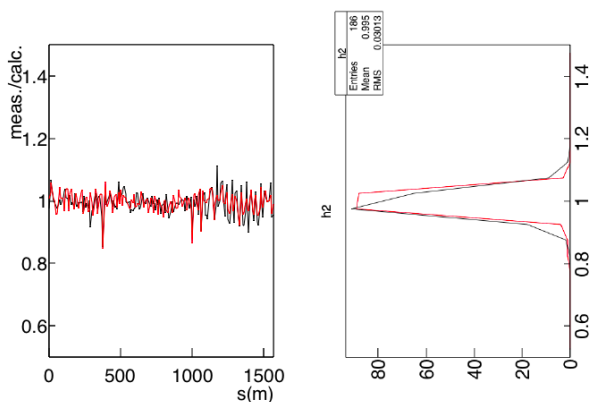


Figure 14: Fluctuation of measurement and calculation with Fit and FFT at  $p0+306ms$  (2nd measurement). Black:Fit Red:Fourier transformation.

## 5. まとめ

加速中における Beam Optics の理解、特にこれまで加速中で測定できていなかった  $\beta$  関数の測定が加速でのビームロスを抑えるのに必要不可欠である。本研究では、ベータatron振動に同期した FPGA モジュールで生成した信号をストリップライン型キッカーに入力し、

徐々にビーム重心のベータatron振動を励起させることに成功した。これにより、大強度出力時のビームロス抑制に向けて不可欠であった加速中の  $\beta$  関数測定を可能にした。チューン、分散関数に加えて加速中の  $\beta$  関数が測定できたことにより、それらの測定値とモデル計算に基づいて加速に伴う 11 シリーズの四極電磁石の磁場応答を高精度に制御することを可能にした。現時点でのビームロス抑制に向けた Beam Optics 制御には必須であり、加えて今後の高繰り返し運転に向けた速いビーム加速に対しても必須である手法や土台を確立することが出来た。キックを加える時間の補正、振動を一定に保つために BPM の情報を搭載した ADC を用いて取得しフィードバックをかけるなどのアルゴリズムの改良、キックの精度をあげることや測定毎のフラつきを抑えてより精度よく測定を行っていくのが次への課題である。

## 6. 謝辞

本測定にあたり久保木浩功氏はデータ取得を手伝っていただきました。また、佐藤洋一氏、原田寛之氏、外山毅氏、五十嵐進氏には多くの有益な助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。本研究は MEXT 科研費 26105518 新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」及び特別研究員奨励費の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] J. Takano et. al., "Measurement of Beta Function of the J-PARC MR", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, Ibaraki, Japan (2009).
- [2] S. Igarashi et. al., "OPTICS MEASUREMENT AND CORRECTION IN J-PARC MR", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Tsukuba, Japan (2011).
- [3] K. Nakamura et. al., "INTRA-BUNCH FEEDBACK SYSTEM FOR THE J-PARC MAIN RING", Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany (2014).
- [4] A. Schnase et al., "Application of Digital Narrow Band Noise to J-PARC Main Ring", Proc. of IPAC '10, Kyoto, Japan (2010).
- [5] M. Okada et. al., "DEVELOPMENT OF THE DLC COATED BEAM EXCITER" Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan (2014).
- [6] T. Toyama, et. al., "Beam Position Monitor For J-PARC Main Ring Synchrotron", DIPAC2005, Lyon, France, (2005).
- [7] S. Hatakeyama et. al., "THE DATA ACQUISITION SYSTEM OF BEAM POSITION MONITORS IN J-PARC MAIN RING", Proceedings of IPAC '10, Kyoto, Japan (2010).
- [8] Y. Sato et. al., "Recent commissioning and prospect of high power beam operation of the J-PARC Main Ring", in these proceedings.