

BEAM BASED MEASUREMENT OF TWISS BETA OF J-PARC 3-50BT

Yoichi Sato^{#,A)}, Masashi Shirakata^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

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

Abstract

Twiss beta, phase advance in a beam transport can be measured not only at its beam profile monitors but at its beam position monitors with using the 2 steering magnets in its upstream. The coupled steering magnets can make a beam into an oriented position and angle freely in a downstream position. The beam center can be plotted on an ellipse in the phase space having certain area. The amplitude of the ellipse can be measured at each beam profile monitors and beam position monitors in the downstream and tell Twiss beta, if there is no beam loss among steering magnets and monitors. The ellipse rotation can tell phase advance simultaneously. In this proceeding, the first application of this method is presented for the injection beam transport (3-50BT) into the J-PARC main ring.

J-PARC 3-50BT における beam based Twiss beta 測定

1. はじめに

J-PARC では、速い繰り返しの 3 GeV シンクロトロン (RCS) から主リング (MR) へのビーム入射輸送ライン (3-50BT) がある。3-50BT のプロファイルモニター各点でのプロファイルサイズとビーム計算から予想した β 関数から算出されるエミッタンス値において 3-50BT 上流と下流で相違があり、 β 関数の精度の高い測定によるモデル検証が要求された。現在までの所、3-50BT でのビームエミッタンスがアクセプタンスに対し余裕があることもあり、特に 3-50BT モデルに頼った運転は行っていない。MR との Twiss マッチングは MR 内のビーム振動を見て調整している。しかし、今後の MR 大強度化にあたっては、ビームエミッタンスの増加が予想され、3-50BT コリメータと MR リングコリメータでビームロスのバランスを取る必要が考えられる^[1,2]。その際にコリメータ設定の基準として必要となるのが 3-50BT の精密なモデルである。

ビーム輸送ライン (BT) における β 関数測定手法としては 4 極磁場スキャンもしくは 3 点以上のビームプロファイル測定が一般的であるが、プロファイルの広いビームを作り測定精度を上げようとするとビームロスの影響を受け、またプロファイルモニター間の 4 極磁石の設定と実際の磁場のズレに応じて誤差が積み上がる。また、これらの方法だとプロファイルモニターの位置でしか β 関数を測定できない。そこで BT β 関数の新しい測定法として、上流ステアラー 2 台 1 組によりビーム中心を、位相空間上で決まったエミッタンス楕円上をなぞるように複数ショットを重ね、下流側固定点 (プロファイルモニター、ビーム位置モニターの設置点) でのビーム中心を重ね合わせれば、ペアステアラーとモニター間の 4 極磁場を仮定することなく β 関数を測定できる。ビーム中心さえ出れば測定できるため、プロファイルモニター設置点だけでなくビーム位置モニター設置点での β 関数測定も可能となる。同時に位相差の測定も可能である。

本稿ではこの手法の紹介と適用例としての J-PARC 3-50BT の β 関数と位相差の測定結果を示す。

2. 手法紹介と 3-50BT での測定

2.1 手法紹介

水平方向と鉛直方向それぞれに対し 2 台ずつのステアラーを組み合わせるにより、ビーム軌道中心の 4 次元成分(x, x', y, y')を自由に操作できる。教科書的には、4 つの独立なベクトルを用意し、下流側のモニターで中心位置を見れば組ステアラーとモニター間の 4 次元マトリックス M の内、第 1 行成分と第 3 行成分を同定できる。簡単のため、水平方向に限って言えば M_{11} 成分と M_{12} 成分

$$M_{11} = \sqrt{\beta_{x\text{mon}}/\beta_{x0}} (\cos \Delta\phi_x + \alpha_{x0} \sin \Delta\phi_x), \quad (1)$$

$$M_{12} = \sqrt{\beta_{x\text{mon}}\beta_{x0}} \sin \Delta\phi_x$$

が求まる ($\Delta\phi_x$ はベクトル設定点とモニターの位相差、 $\beta_{x\text{mon}}$ はモニター点の水平方向 β 関数、 β_{x0} 、 α_{x0} はベクトル設定点での水平方向 β 、 α 関数)。これだけでは β 関数は決まらないが、ベクトル設定点において一つの位相空間上楕円に沿ったベクトル

$$x_0 = \sqrt{\varepsilon_{x0}\beta_{x0}} \cos \phi_{x0} \quad (2)$$

$$x'_0 = -\sqrt{\varepsilon_{x0}/\beta_{x0}} (\alpha_{x0} \cos \phi_{x0} + \sin \phi_{x0})$$

を、水平方向ステアラー 2 台組により ϕ_{x0} のみを変えビーム群を作成すれば、全体として楕円面積 ε_x のエミッタンスを持つ筒型ビームと見なせる。(1)、(2)から、下流モニターにおけるビーム中心は、

$$\begin{aligned} x_{\text{mon}} &= M_{11}x_0 + M_{12}x'_0 \\ &= \sqrt{\beta_{x\text{mon}}\varepsilon_{x0}} \cos(\Delta\phi_x - \phi_{x0}) \end{aligned} \quad (3)$$

として観測されるため、ビーム群に対するビーム中心の振れ幅から $\beta_{x, \text{mon}}$ が求まる。またモニターでのビーム中心は ϕ_{x0} に対し正弦波を描き、各モニターでの位相差をみれば $\Delta \phi_x$ が求まる。鉛直方向に対しても同手順で $\beta_{y, \text{mon}}$ と $\Delta \phi_y$ を測定できる。

本手法の長所としては

- ビームプロファイルモニターだけでなくビーム位置モニターでの測定も可能。
- モニター間の電磁石設定を仮定することなく測定できる。

- ビーム中心だけを見るため、裾部分のモニター間ロス、Space charge による広がりの影響をほとんど受けない。
- アクセプタンスの狭いところでも測定可能。が挙げられる。そのため、BT のモデル確認に適した手法と言える。またディスパージョン関数および運動量広がり別手法により既知であれば、プロファイルモニターは、BT モデルに依らずに測定 β 関数を基にしたエミッタンスモニターとして使える。

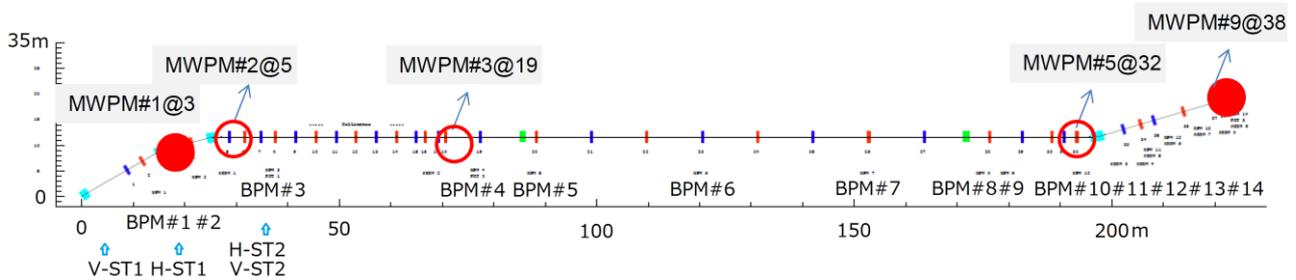


図 1 3-50BT におけるステアラーおよびモニター位置。左側が上流。H-ST1, H-ST2 は水平方向ステアラー、V-ST1, V-ST2 は鉛直方向ステアラー、MRPM#1~9 はマルチリボンプロファイルモニター、BPM#1~14 はビーム位置モニター。V-ST1 の上流には RCS からの別の行き先との振り分け電磁石がある。

2.2 測定手順

β 関数測定の精度はステアラー精度とモニターでの中心位置測定精度で決まる。プロファイルモニターとビーム位置モニターの校正に加え、ステアラー1枚毎の蹴り角を確認することによりステアラー精度を決められる。3-50BT における β 関数測定は、まずステアラー校正とモニター校正を踏まえた上で行った。

図 1 は 3-50BT におけるステアラー位置、マルチリボンプロファイルモニター (MRPM)、ビーム位置モニター (BPM) の位置を示す。3-50BT の Twiss β 測定では、水平方向に H-ST1, H-ST2、鉛直方向に V-ST1, V-ST2 と呼ばれる 4 台のステアラーを使用した。ステアラー間の磁石としてはセクター型偏光電磁石と 4 極電磁石のみがあるため、4 次元ベクトル構成に当っては線形応答のみを考慮すれば良い。なお、H-ST2, V-ST2 下流直線部のディスパージョン関数は 0 で設計されている。ステアラー 4 台に対し、V-ST1 直下流からの 5 台の BPM (BPM#1~5) を用いた校正の結果、ステアラーによる誤差は 1 台当り 3~5% となっている。そのため、位相空間上楕円の面積設定の精度は水平方向 8.4%、鉛直方向 6.5% となっている^[3]。MRPM によるビーム中心位置の測定誤差は ~ 1 mm。BPM は位置と信号の線形応答性の確認の結果、位置の測定誤差は ~ 0.3 mm となっている。図 2 は MRPM#3 での位相空間上で、ステアラー 4 台で軌道を変えた 20 点のビーム群により構成可能なエミッタンス 60π mmmrad 楕円を示す。

以上の準備を基に、3-50BT の水平方向の β 関数を測定した。ビーム中心だけ見れば良いといっても、精度の点からは細いビームが望ましいため、低強度ビーム (4E11 protons per bunch) を使用した。今回の測定では x-y coupling 項の検討をしないため、水

平方方向に楕円上ビーム群を作成するときは、鉛直方向を BT 軌道中心に固定し非線形要素の影響を抑えた。鉛直方向に対しても同様に設定した。測定にあたり、最下流のモニターまでビームロスが生じないように 3-50BT コリメータは全開 (水平、鉛直方向共に 81π mmmrad 以上) にした。また、測定に使用した楕円面積は図 2 楕円と相似形で面積を 20π mmmrad、 40π mmmrad とした。 40π mmmrad 楕円による測定は現時点までに水平方向に対してのみ行った。測定精度を上げる為、楕円上の 20 点の各点に対し 10 ショットを重ね平均を取った。 20π mmmrad 楕円による測定は水平、鉛直方向に行ったが、本手法の確認用として、楕円上各点に対し単ショット、MRPM 測定のみで行った。

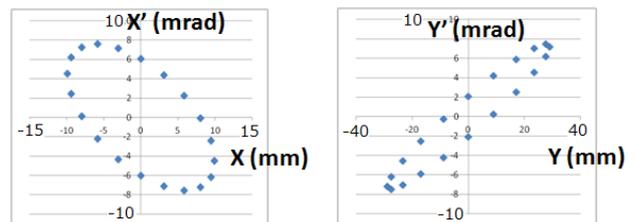


図 2 MRPM#3 (四極磁石 QDS1 入口) での位相空間上で、ステアラー 4 台で軌道を変えたビーム群により構成されたエミッタンス 60π mmmrad 楕円。左図は水平方向、右図は鉛直方向。各方向それぞれに 20 点等位相角度間隔で配置した。

2.3 測定結果

MRPM#3, #5, #9 での β 関数測定結果を表 1 に示す。20 点ビーム群で構成する楕円面積は 20π mmmrad、 40π mmmrad を使用した。楕円面積を広げることで測定精度が上がっている。表 2 は MRPM#3, #5 に

おける、表 1 の β 関数比と、水平方向 40π mmmrad 楕円（鉛直方向は軌道中心）の時に測定したビームプロファイルの σ^2 比を示す。MRPM#3,#5 はディスページョン 0 で設計された領域であり、 β 関数比と σ^2 比は一致するはずだが、鉛直方向のみが一致している。水平方向における相違はディスページョンが 0 でない可能性も示唆するが、今後の更なる測定が必要である。図 3 は水平方向 40π mmmrad 楕円上 20 点ビーム群に対して、MRPM#3,#5,#9 でのビーム中心位置を示す。横軸は各ビームの楕円上の位相角度、単位は $2\pi/20$ ラジアン。振幅 Δ (mm) に対し、 $(\Delta/2)^2/40$ がモニター位置での β 関数(m)となる。

表 1 MRPM#3,#5,#9 での β 関数測定結果

	MRPM#3	MRPM#5	MRPM#9
βx w 40 pi 楕円	$7.5 \pm 14\%$	$18.3 \pm 12\%$	$28.4 \pm 11\%$
βx w 20 pi 楕円	$6.9 \pm 17\%$	$20.5 \pm 13\%$	$34.5 \pm 12\%$
βy w 20 pi 楕円	$30.0 \pm 11\%$	$8.2 \pm 14\%$	$6.6 \pm 15\%$

表 2 MRPM#3,#5 での β 関数比及び σ^2 比

	$\beta \#5 / \beta \#3$	$\sigma^2 \#5 / \sigma^2 \#3$
水平方向	$2.44 \pm 26\%$	6.30 ± 1.61
	w X-40 pi 楕円	w X-40 pi 楕円
	$2.97 \pm 30\%$	
	w X-20 pi 楕円	
鉛直方向	$0.273 \pm 25\%$	0.266 ± 0.021
	w Y-20 pi 楕円	w Y-center

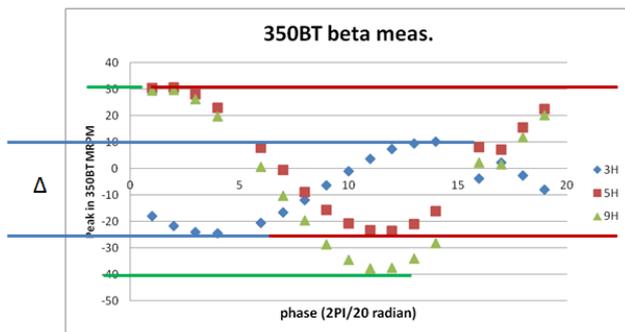


図 3 水平方向 40π mmmrad 楕円上 20 点ビーム群に対する MRPM#3,#5,#9 でのビーム中心位置。

図 4~7 は水平方向 40π mmmrad 楕円上 20 点ビーム群に対して、BPM#2~#13 でのビーム中心位置を示す。図 4~7 の横軸は楕円上の位相角度であり、単位は $2\pi/20$ ラジアン。ただし、図 4 の BPM#2 はステアラ H-ST1 と H-ST2 の間に位置するため、 β 関数測定、位相差測定には使用しない。BPM#3~13 における水平方向ビーム中心位置は正弦波でフィッティングし、振幅と位相差から β 関数と BPM#3 を起点とする位相差を算出した (図 8, 9)。水平方向 40π mmmrad 楕円上 20 点ビーム群による測定では

β 関数の測定誤差が 14~22%となっている。測定精度を上げるにはビーム群の点数を増やす、エミッタンスサイズを大きくすることが考えられる。

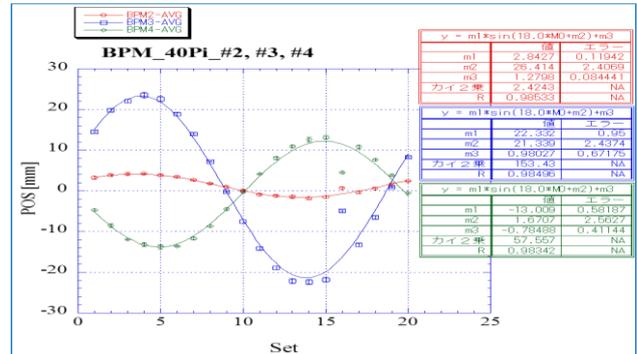


図 4 BPM#2,#3,#4 でのビーム中心位置。

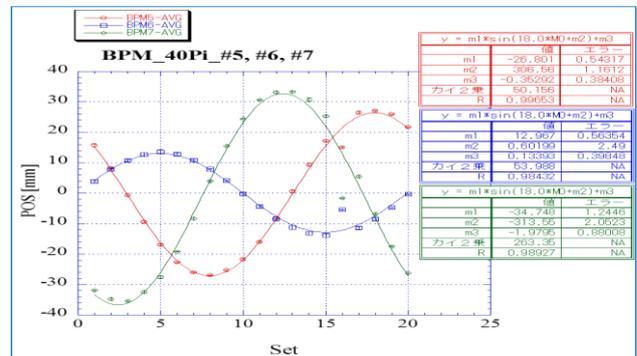


図 5 BPM#5,#6,#7 でのビーム中心位置。

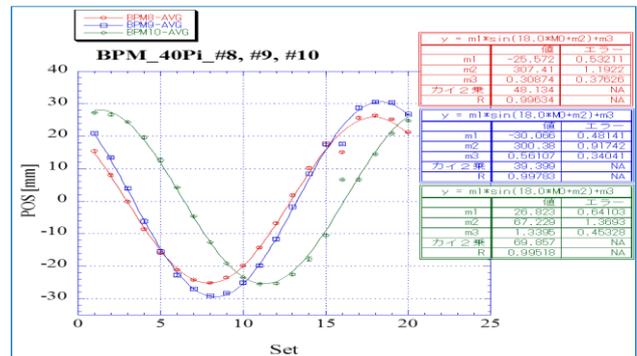


図 6 BPM#8,#9,#10 でのビーム中心位置。

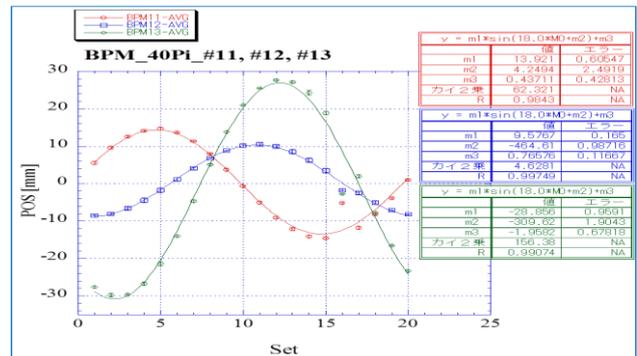


図 7 BPM#11,#12,#13 でのビーム中心位置。

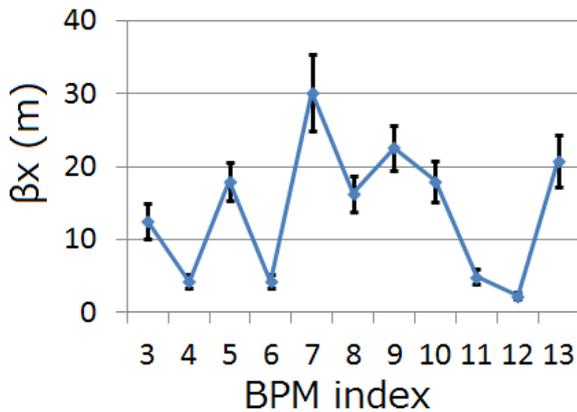


図 8 40 π mmmrad 楕円上ビーム群で測定した BPM#3~13 における水平方向 β 関数。誤差は 14~22%。

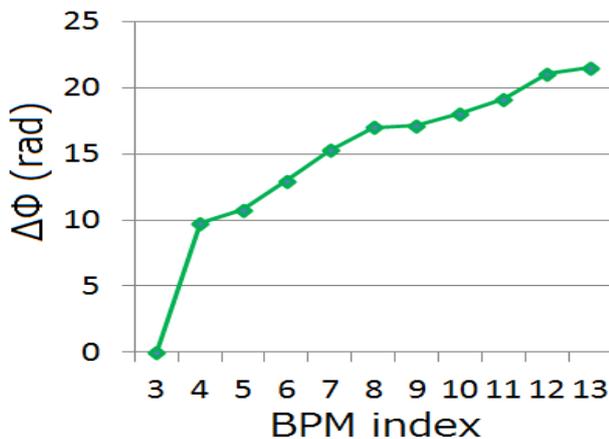


図 9 40 π mmmrad 楕円上ビーム群で測定した BPM#3~13 における水平方向位相差。BPM#3 の位相を起点とする。誤差は 0.02~0.05 rad。

3. 今後の課題

ビーム輸送系における β 関数と位相差の測定の新手法の提案と J-PARC 3-50BT での測定結果を示した。3-50BT β 関数測定に対する今後の課題としては以下のものがあげられる。

- ディスパージョンと運動量広がり を考慮したビーム幅との比較による検証。
- 4 極磁場スキャンとの比較による検証。
- ビーム群点数増加による測定精度向上。
- 鉛直方向の測定を行った上で 3-50 BT の新モデルを構築。
- RCS からのもう一方の行き先である物質・生命科学実験施設までの BT との共同により、上流への β 関数測定区間の拡張。

なお、4 台のステアラーを用いたベクトル設定は、 β 関数と位相差の測定以外にも、3-50BT コリメータの位置確認^[3]、3-50BT 空気イオンチェンバーの校

正^[4]にも使用されている。MR 大強度化に向けて 3-50BT と MR のコリメータバランスをとるためにはビームロスを確認しながらコリメータを設定する。そのためにも 3-50 BT の統合的な理解が必要となる。

謝辞

本研究は J-PARC MR グループの全面的協力によってなされた。スタディ時間の確保に協力して頂いた関係各氏に改めて謝意を表したい。

参考文献

- [1] H. Hotchi et al, “Beam Halo Reduction in the J-PARC 3 GeV RCS”, Proc. IPAC12, New Orleans, USA, 2012, THPPP080.
- [2] Y. Sato et al, “Beam Dynamics Simulations of J-PARC Main Ring for Upgrade Plan of Fast Extraction Operation”, Proc. IPAC11, San Sebastian, Spain, 2011, p598.
- [3] M. Shirakata et al, “Present Status of the Beam Collimation in J-PARC 3-50BT Line”, this proceedings, WEPS092.
- [4] K. Satou et al, “Beam halo monitoring at J-PARC 3-50 beam transport line using long air ionization chambers”, this proceedings, WEPS089.