

Beam-Based AlignmentのためのJ-PARC RCSでの光学モデルの決定 OPTICS MODEL DETERMINATION FOR BEAM-BASED ALIGNMENT OF THE J-PARC RCS

林 直樹 *^{A)}、発知英明 ^{A)}、原田寛之 ^{A)}
Naoki Hayashi*^{A)}, Hideaki Hotchi^{A)}, Hiroyuki Harada^{A)}
^{A)}Accelerator Division, J-PARC Center, JAEA

Abstract

Beam-Based Alignment (BBA) of BPM is indispensable procedure to determine accurate offset of quadrupole magnet nearby. In the J-PARC RCS, its quadrupole magnets cannot be controlled their current individually. Because the precise optics model is already available, one can calculate absolute beam position inside the quadrupole magnet based on the model. Comparing the predicted value and measured position, one can determine the offset, namely performing BBA. Using all COD data, kicked by all steering magnets, one can emulate a local bump orbit at the quadrupole magnet. By changing focusing force of the quadrupole magnet, one can record the modification of the orbit and it is directly related to the original model. In this paper, we carry it out about one of seven quadrupole magnet families and report the comparison between the obtained results and the optics model.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、3つの加速器と3つの実験施設からなる複合研究施設である。その中の2番目の加速器であるJ-PARC RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) は、3 GeV 出射、25 Hz の速い繰返し陽子シンクロトロンであり、MLF (Material Life Science Facility, 物質生命科学実験施設) へのビーム供給と 2.48 ~ 6.0 s の時間間隔で入射する MR (Main Ring) のブースターとしての役割を担っている。直近では、MLF へはビームパワー 500 kW の運転を行っている^[1]。また、ビームパワー設計値は、1 MW、1 パルス当たり陽子数は、 8.3×10^{13} ppp (protons per pulse) で、1 ショット限定ながら、今年初めにこの設計値に到達した^[2]。

BPM (Beam Position Monitor) の Beam-Based Alignment (BBA) は、近くの四極電磁石中心からのオフセットを決める非常に重要な校正である。J-PARC RCS では、四極電磁石は、個別電流制御ができないが、グループで収束力が変化しても、BBA が可能な方法を考案し実施している。これは、非常に精度よく光学モデルが、決定できているので、それをベースにした計算と収束力変化による全周の軌道変化とを比較し、四極電磁石内部でのビーム絶対位置をまず決定する。その後、各 BPM の生の測定値と比べ、オフセットを決めるものである。

今回の狙いは、この重要な BPM の校正に使っているモデルの妥当性を確認することである。そのために、1つの四極電磁石ファミリーについて、より多くの条件で測定を行い、モデルと実測の比較をしたので、その結果について報告する。

2. RCSの主電磁石、補正電磁石およびBPM

RCS のラティスは、一周 348.3 m の 3 回対称性を持ち、四極電磁石 (Quadrupole magnet, QM) は、全部で 60 台、7つのファミリー (QFL, QDL, QFM, QDX, QFN,

QDN, QFX) で構成され、機能としては、27つのセルに区分けされている¹⁾。四極電磁石の3つの直線部の並びは、QDX-QFL-QDL-QFM-QDL-QFL-QDX となっており、アーク部は、QDX-QFN-QDN-QFX-QFX-QDN-QFN-QDX の並びが2回繰り返している。例えば、今回着目する QFL は、3つの直線部にそれぞれ2台、全周で合計6台が (01, 05, 21, 25, 41, 45 番目に) 配置されている。

周回軌道補正用のダイポール補正電磁石 (Steering magnet) は、真空容器の口径が大きくなる入射部を除いて、四極電磁石直近の上流または、下流に、水平方向、垂直方向用に各々26台が設置されている。BPM は、各セルに2台、全部で54台あり、原則、補正電磁石内部に配置されている。入射部は、補正電磁石はないが、通常より大きな真空容器口径に合わせて、設計・製作されたものが置かれている^[3]。

BPM の直近四極電磁石の磁場中心からのずれ、オフセットの決定は、ビームを使って行うのが合理的である。原理的には、各電極に対応するケーブルの信号減衰など考慮すれば予測できるかもしれないが、実用的ではない。どんなに丁寧に製作し、据付を実施しても、何らかの不定性は残るので、結局はビームを使った校正が必要となる。

通常の BBA は、個別電源や四極電磁石の補助巻線を使うことで、四極電磁石1台ずつの励磁量を制御し、それによる初期からの軌道変化量を調べ、軌道変化が無くなる所を四極電磁石の中心をビームが通ったとする。それと BPM の測定値から、オフセットを決定する。但し、RCS の四極電磁石には、補助巻線はなく、電源も 25 Hz 共振のため、各ファミリー毎で共通電源になっており、個別の磁石の制御ができない。そこで、複数台の四極電磁石が同時に変化する場合について、考察し、そのモデルを当てはめることで、ビーム位置を推定する

¹⁾QF は、水平方向に focus, QD は、defocus である。実際、1つのファミリー、QFX については、配置の都合上、必要な長さを半分に分けて六極電磁石を設置しているので、見かけの台数がセル数の2倍、54台より多くなっている。

*naoki.hayashi@j-parc.jp

方法を考案し、運用しているところである [4, 5]。

3. BBA について

四極電磁石の磁場制御が独立に 1 台ずつ可能な場合は、教科書 [6] にも書かれており、KEKB [7], J-PARC MR [8] がその実例として挙げられる。以下にまず、この場合について記す。 x_n を着目する四極電磁石のリング上の位置 $s = n$ でのビーム位置、 ΔK を四極電磁石の収束力変化量、とすると、これによる任意の場所 $s = m$ でのビーム変位量 δx_m は、厳密には、次のようになる。

$$\delta x_m = -a_{mn} \frac{1}{1 + \Delta K a_{nn}} x_n \Delta K \quad (1)$$

である。ここでは、分母の $[1 + \Delta K a_{nn}]$ が新しい部分である。また、一箇所のキックによる COD の公式によく出てくる a_{nm} は、

$$a_{nm} = \frac{\sqrt{\beta_n \beta_m}}{2 \sin \pi \nu} \cos(\pi \nu - |\phi_n - \phi_m|). \quad (2)$$

であり、 $\beta_n \equiv \beta(s_n)$, $\phi_n \equiv \phi(s_n)$ は、位置 $s = n$ での、 β 関数および、位相である。 ν は、ベータトロニックである。

ここで、分母の a_{nn} を行列 A 、行列要素は a_{nj} 、に置き換え、 x_n を x_j ($j = 1, \dots, N$) とし単なる一つの地点でのビーム位置でなく、着目するファミリーの四極電磁石 N 台の多地点でのビーム位置のベクトルと考えれば、複数台 (N 台) の四極電磁石が同時に変化するときの式になる [5]。

$$\begin{aligned} \delta x_m &= - \sum_{n,j} a_{mn} \left(\frac{1}{1 + \Delta K A} \right)_{nj} x_j \Delta K \\ &= \sum_{n,j} (b_{mj}) x_j \Delta K \end{aligned} \quad (3)$$

$$B = (b_{mj}) = \sum_{n=1}^N a_{mn} \left(\frac{1}{1 + \Delta K A} \right)_{nj} \quad (4)$$

全周に 6 台ある QFL を例にとれば、行列 A は、 6×6 の行列になる。それを含む逆行列 $[1 + \Delta K A]^{-1}$ も同様である。行列 B は、 m の最大数が BPM の台数 54 なので、54 行 \times 6 列の行列になる。

RCS で実施している BBA の手法は、この行列 B を使い、全周の軌道の変化 δx_m と ΔK から、 x_j を求めている。今までは、モデルを前提に行列 B を導出していた。今回は、測定からこの行列を決定して、モデルから計算した行列 B と比べる。この行列 B の一要素 (1 列分)、QFL05 での初期のオフセット 10 mm に対する量を Figure 1 に示す。但し、比較し易くするため、 $\Delta K/K = +2\%$ に規格化している。水平方向 X については、非線形性が認められるが、これは、 β 関数および a_{nn} が大きく、複数台同時変化のときにそれが現れている。一方、垂直方向 Y については、defocus になるので、磁石がある場所での β 関数の値が小さく a_{nn} も大きくないので、非線形性はあまり認められない。

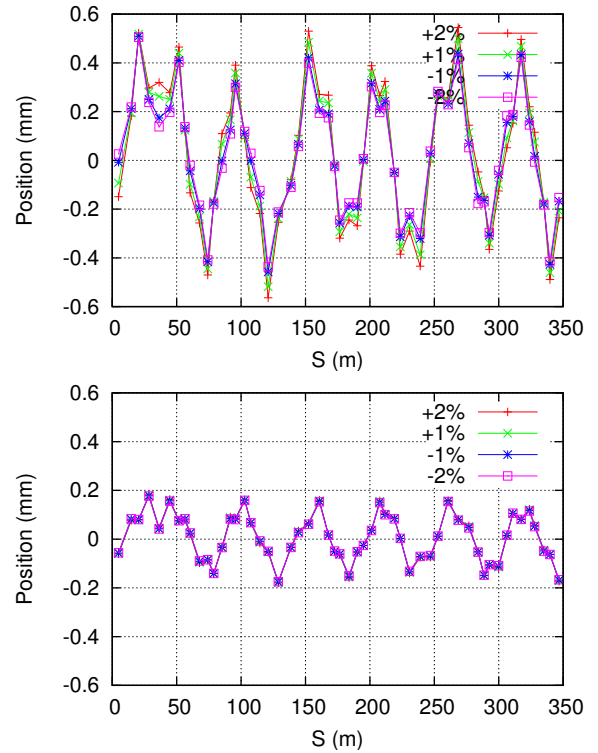


Figure 1: Expected orbit modification due to QFL focusing changed, when the original orbit (beam position) has 10 mm offset only at QFL05. Both X- (upper) and Y-plane (lower) are shown. Sign and strength are normalized to +2% case.

4. 測定データおよび結果

4.1 測定条件および手順

測定は、通常の加速モードではなく、入射エネルギー 400 MeV を保持したモードで実施した。ビームの保持時間は、普段と同じ 20 ms で、その間に 1 ms 間隔で 20 回測定を行っているが、そのうち後半 10 ms 分を使い、更に数回の同条件での測定データを全て平均する。分散関数の大ききなところは、縦方向のシンクロトロン振動による水平方向の変位があるので、この部分は、その影響を小さくするためにも平均するのが重要である。この時のビーム強度は、約 2.1×10^{12} ppp、チューンは、(6.37, 6.40) であった。

四極電磁石の励磁量を変える前、収束力を $\pm 2\%$ 変化させた後で、水平・垂直各 26 台の補正電磁石毎のキック有り無し (+0.5, 0, -0.5 mrad) と条件を変え、COD を測定した。

例えば、QFL は全周で、6 台あるが、着目する QFL05 の前後の 3 台の水平方向用補正電磁石でキックされたデータ (Figure 2 (a)) を適切な重みをかけて 1 次結合させると、その QFL05 1 台のみで仮想的に局所的なバンブ軌道を立て他の部分は、全てオフセットをほぼゼロにすることができる (Figure 2 (b))。その後、QFL ファミリーの収束力変化による軌道変化を実測データから導出できる (Figure 2 (c))。これは、QFL05 のオフセットが源であるから、モデルから予想される変化 (Figure 1)

とを直接比較することができる。

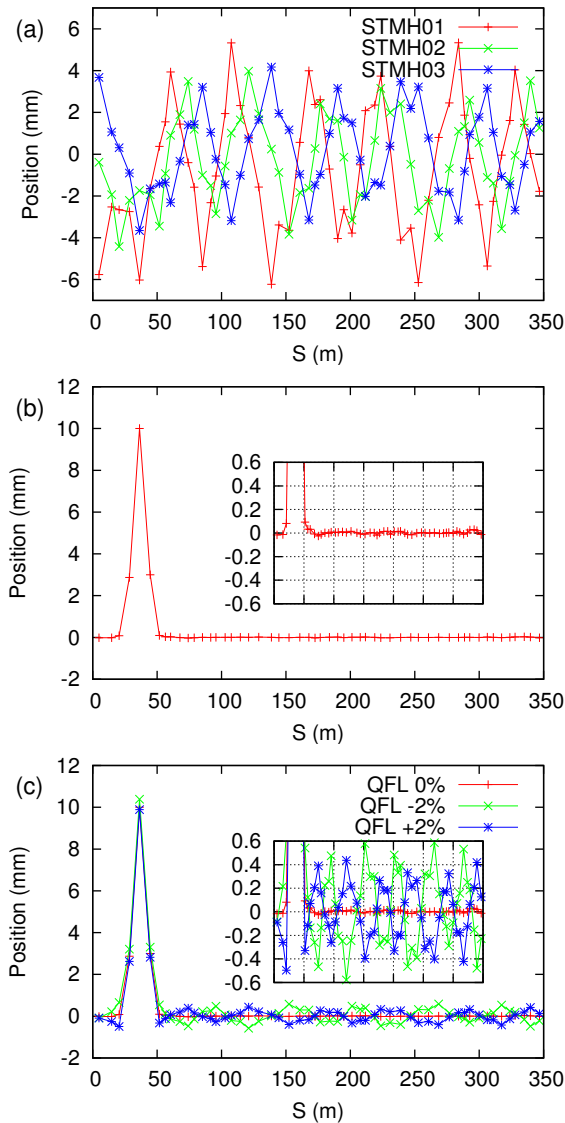


Figure 2: (a) Horizontal raw COD data due to Steering magnet kick, STMH01, 02 or 03. (b) Local bump orbit with peak at QFL05 ($s = 37.3$ m). It is a linear combination of three COD data with suitable weight. (c) Orbit modification due to QFL focusing change $\pm 2\%$. Inside small figure in (b) and (c) are enlargement of vertical scale.

局所的なバンプ軌道が、QFL 以外で作られた場合、例えば、QFL05 の下流の QFN07 (QFL05-QDX06-QFN07-QDN08-QFX09) でピークを持つような場合、Figure 3 の様に、QFL の収束力を変えても軌道はほとんど変化しない。この例では、最大 0.1 mm 程度、と推定される。

4.2 結果

以下、モデルの予想と測定したデータとを比較する。例として、QFL05 (Figure 4) と QFL21 (Figure 5) について示す。収束力変化の非線形性もきちんと対応しているのがわかる。

同様のことを垂直方向についても実施できる。但し、

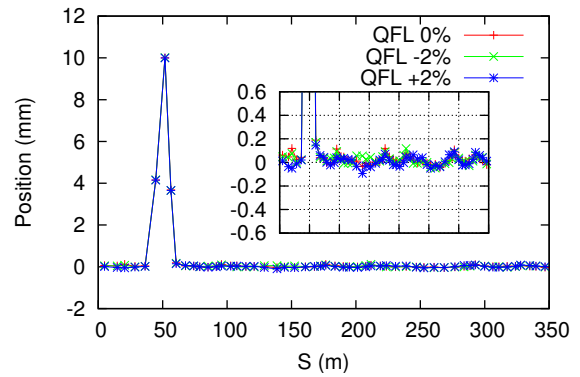


Figure 3: Reconstructed local bump orbit with peak at QFN07 ($s = 55.9$ m) from measured COD data. Orbit modification due to QFL focusing changed, are also plotted.

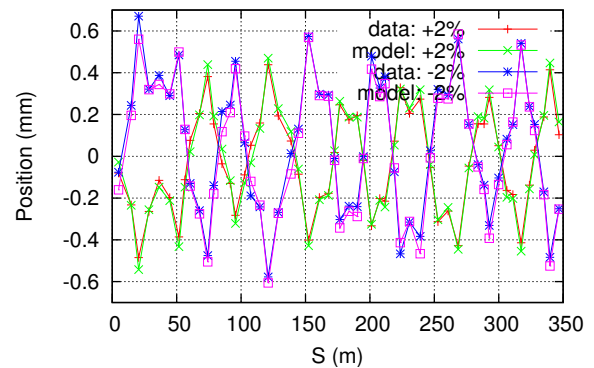


Figure 4: Measurements and expectations of orbit modification due to QFL focus change $+2\%$ or -2% . Local bump is created at QFL05.

QFL は、垂直方向では発散力として作用するので、局所的バンプ軌道の作り方を 4 台の垂直方向用補正電磁石を使った方法に変更して実施した (例えば、Figure 6)。その結果を Figure 7 に示す。水平方向に比べて変化量は、小さくなる。また、予想通り非線形性も小さい。ただ、測定のバラつきが水平方向の時より多い。BPM の分解能は、過去に $14 \sim 20 \mu\text{m}$ ^[9] と推定しているが、こ

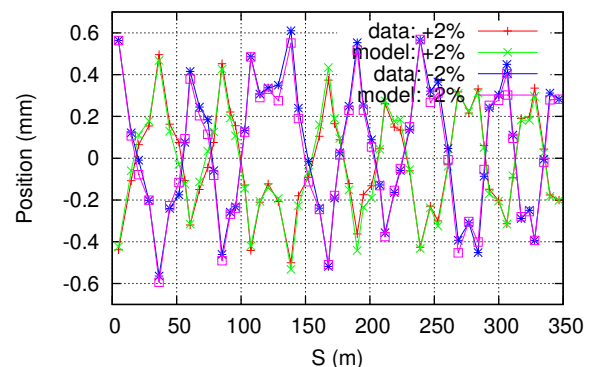


Figure 5: As same as Figure 4 but for QFL21.

れよりバラつきは大きいようであり、その要因について今後確認が必要である。

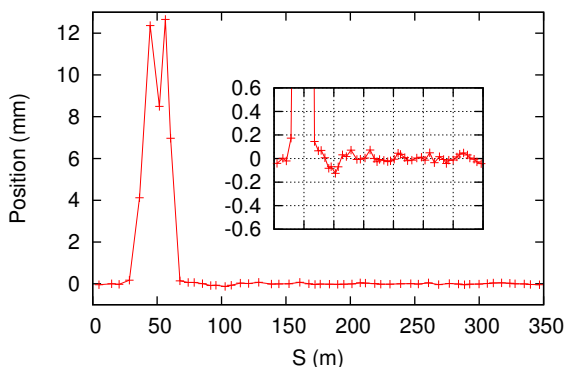


Figure 6: Local bump at QFN07 with 4-steering magnets for vertical plane.

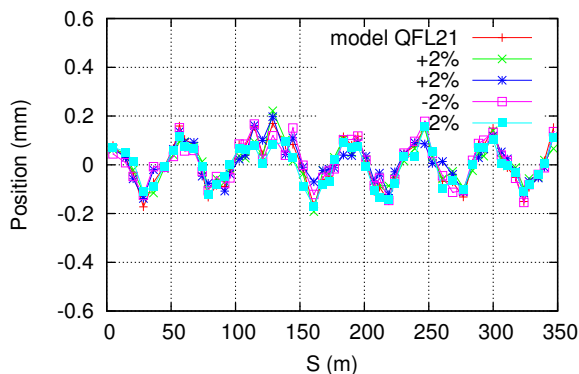


Figure 7: As same as Figure 4 but vertical case of QFL21. Model prediction is shown only one case. Both cases of kick ± 0.5 mrad data are plotted for $\pm 2\%$ case.

実際に求めた結果、実測による行列 B を使って、QFLの水平方向のみについてだが、BBAのやり直しを試みた。当初のモデルによる行列 B を用いた場合が、Figure 8であり、実測に基づいた行列 B を使った場合が、Figure 9である。9つの測定、初期軌道に対し、推定されるBPMのオフセットは、同じだったが、軌道毎に出したオフセットのバラつきが小さくなったことは、確認できた。測定に対し、0.4 mm位の精度しかない場所もあったが、いずれも0.2 mm以内になった。今後時間があれば、QFL垂直方向や、他のファミリーにも適用すれば、より精度は上がると思われる。

5. まとめ

これまで、J-PARC RCSで実施してきたBBAの手法について確認し、その過程で使っていたモデルから導出した行列と、実測データから求めた行列を比較し、よく一致していることを確認した。また、モデルに依存しない方法で、より精度を上げる可能性を示した。

参考文献

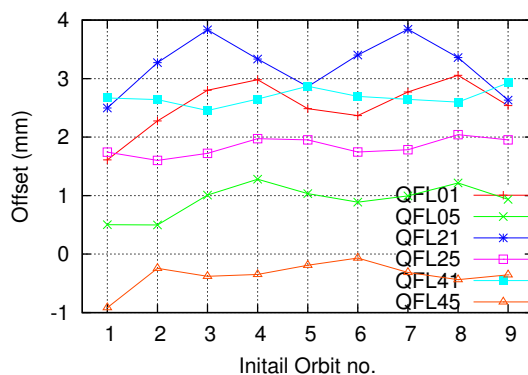


Figure 8: BPM offsets near the QFL magnets are determined for initial orbit data from 1 to 9. In this case, used matrix B is determined from the model.

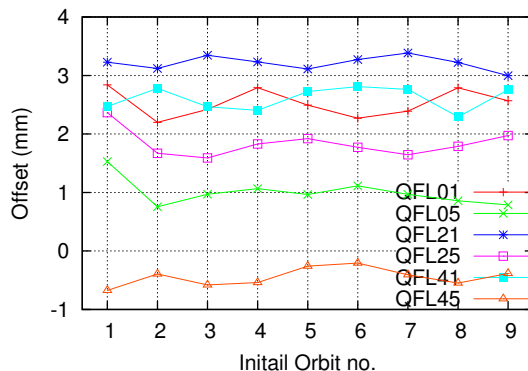


Figure 9: As same as Figure 8 but using experimentally determined matrix B .

- [1] K. Hasegawa, "Progress of Beam Intensity in the J-PARC Accelerators", Proceedings of the 12th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015, WEOLP02.
- [2] H. Hotchi, et al., "Recent progress of J-PARC RCS beam commissioning", Proceedings of the 12th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Aug. 5-7, 2015, THOL06.
- [3] N. Hayashi, et al., Nucl. Instr. Meth. A677, p.94-106. (2012)
- [4] N. Hayashi, et al., "Beam Based Alignment of the Beam Position Monitor at J-PARC RCS" Proceedings of IPAC'10, p.1005-1007., Kyoto, Japan (2010).
- [5] N. Hayashi, et al., "Beam Based Alignment of Synchrotron under Coupled Quadrupole Magnet Environment" Proceedings of HB2010, p.57-61., Morschach, Switzerland (2010).
- [6] 平松成範, 「加速器のビームモニター」, KEK Internal 2004-4, p.108-115. 文部科学省高エネルギー加速器研究機構平成15年度技術部職員専門研修.
- [7] M. Masuzawa et al., "Beam-based Calibration of Beam Position Monitors and Measurements of the Sextupole Magnet Offsets at KEKB", Proceedings of EPAC2000, Vienna, Austria (2000) WEP5A16, p1780-1782.
- [8] T. Toyama, et al., "Beam-Based Alignment of the BPMs at J-PARC MR" Proceedings of the 11th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014.
- [9] N. Hayashi, "Individual BPM resolution Measurements under Linear Lattice Accelerator Model" Proceedings of the 8th Annual Meetings of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.