

J-PARC メインリングの光学補正ツールの開発

DEVELOPMENT OF BEAM OPTICS CORRECTION TOOL FOR J-PARC MAIN RING

富澤正人*, 木村琢郎, 村杉茂, 武藤亮太郎, 沼井一憲,
岡村勝也, 白壁義久, 高野淳平, 柳岡栄一

Masahito Tomizawa*, Takuro Kimura, Shigeru Murasugi, Ryotaro Muto, Kazunori Numai,
Katsuya Okamura, Yoshihisa Shirakabe, Junpei Takano, Eiichi Yanaoka
KEK/J-PARC Center

Abstract

Current slow-extracted beam power achieved to 7.0×10^{13} per 5.2s cycle corresponding to 65 kW. A high repetition operation is planned in MR aiming at higher beam power. The power supplies of the main magnets have been replaced with new ones and reused power supplies have been rearranged. The quadrupole family number increased from 11 to 16. The optics correction by the new quadrupole families is important for the coming slow extraction start-up. We have developed a beam optics correction tool. The optics correction performance derived by a preliminary beam test is reported.

1. はじめに

J-PARC メインリング (MR) では、3 次共鳴を用いた遅い取り出し方法により、3 GeV から 30 GeV まで加速された陽子ビームを約 2 秒間かけて、素粒子・原子核実験を目的としたハドロン実験施設に供給している [1,2]。2009 年 1 月に MR において 30 GeV の陽子ビームの遅い取り出しに初めて成功して以来、2022 年 6 月の段階で、5.2 秒サイクルにおける粒子数は 7.0×10^{13} 、対応するビームパワーは 65 kW に到達した。

J-PARC メインリング (MR) では、速い取り出しを用いるニュートリノ振動実験や遅い取り出しを用いるハドロン実験のビームパワーを増強するために、加速パターンの繰り返し周期を速くする計画が進行している。このために偏向電磁石 (BM)、四極電磁石 (QM) を新規に製作したが、予算の都合で QM 電源の一部とクロマティシティー補正磁石 (SM) 電源は、今まで使用されていた電源を流用することになった。その結果、QM 電源の台数は 11 台から 16 台に増えることになった。各電源の電流偏差によるビーム光学パラメータのずれの補正は運転の再開時に重要な調整項目となる。遅い取り出し運転においては、特にフラットトップのビーム光学パラメータの補正が重要である。そこで、応答行列 (R-matrix) と dispersion の測定結果を用いて、ビーム光学計算コード SAD [3,4] により、目標とするモデルに対して QM 電源の強さの補正量を求めるツールを開発した。この方法では補正量と同時に補正前の β 関数や dispersion が求まることになる。本年夏前に行われた速い取り出しのラティスによるビーム試験において、測定された R-matrix と dispersion から、実際に QM ファミリーの補正を行い、補正前後のビーム光学の結果を比較した。また過去の遅い取り出しラティスでの測定データから得られた結果についても述べる。

2. 光学測定と光学補正方法の概要

指標 n で表される水平もしくは垂直方向のステアリング磁石のキック量を $dK0_n$ 、指標 m で表されるビーム位置検出器 (BPM) でのビームの水平もしくは垂直方向の位置を x_m とすると、R-matrix の要素は

$$R_{mn} = x_m/dK0_n \quad (1)$$

で求めることができる。また指標 m で表される BPM での水平方向のディスページョンを D_m とする。キックをする水平もしくは垂直方向のステアリング磁石の合計台数を N 、使用する水平と垂直方向の BPM の合計台数を M とする。QM のファミリーの指標を k 、ファミリー数を K とする。QM ファミリーの収束の強さを $K1_k = (\partial B_y L / \partial x / B\rho)_k$ とする。要素 R_{mn} と D_m を $K1_k$ で偏微分した行列 \mathbf{J} を

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R_{11}}{\partial K1_1} & \frac{\partial R_{11}}{\partial K1_2} & \cdots & \frac{\partial R_{11}}{\partial K1_K} \\ \frac{\partial R_{21}}{\partial K1_1} & \frac{\partial R_{21}}{\partial K1_2} & \cdots & \frac{\partial R_{21}}{\partial K1_K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial R_{12}}{\partial K1_1} & \frac{\partial R_{12}}{\partial K1_2} & \cdots & \frac{\partial R_{12}}{\partial K1_K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial R_{MN}}{\partial K1_1} & \frac{\partial R_{MN}}{\partial K1_2} & \cdots & \frac{\partial R_{MN}}{\partial K1_K} \\ \frac{\partial D_1}{\partial K1_1} & \frac{\partial D_1}{\partial K1_2} & \cdots & \frac{\partial D_1}{\partial K1_K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial D_M}{\partial K1_1} & \frac{\partial D_M}{\partial K1_2} & \cdots & \frac{\partial D_M}{\partial K1_K} \end{pmatrix} \quad (2)$$

とする。各ファミリーの $K1$ 値のずれのベクトルを

$$\mathbf{X} = (dK1_1 \quad dK1_2 \quad \cdots \quad dK1_K)^T \quad (3)$$

で表す。ここでインデックス T は転置を意味する。また、目標とする光学模型 (model) の R_{mn} と D_m で表現される \mathbf{f}_{model} を

$$\mathbf{f}_{model} = (R_{11} \quad R_{21} \quad \cdots \quad R_{12} \quad \cdots \quad D_1 \quad \cdots \quad D_K)^T_{model} \quad (4)$$

* masahito.tomizawa@kek.jp

、測定された R_{mn} と D_m で表現されるベクトル \mathbf{f}_{meas} を

$$\mathbf{f}_{meas} = (R_{11} \ R_{21} \ \dots \ R_{12} \ \dots D_1 \ \dots D_K)^T_{meas} \quad (5)$$

とする。このとき、 \mathbf{J} , \mathbf{X} そして $\mathbf{f}_{meas} - \mathbf{f}_{model}$ は

$$d\mathbf{f} = \mathbf{f}_{meas} - \mathbf{f}_{model} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{X} \quad (6)$$

という式で表現される。この関係式から SVD 法により \mathbf{X} の要素を求めることができる。R-matrix データを使った同様な手法は参考文献 [5] にある。また、dispersion のデータも加えた手法は参考文献 [6] にあるが、実際の測定データを用いたチェックを行ったところ、求まった \mathbf{X} は期待される値からのずれが大きくこのままでは精度が不十分であることがわかった。そこで、(6) を iteration することを試みた。具体的に書くと、iteration の指標を j として、

$$d\mathbf{f}_j = \mathbf{f}_{meas} - \mathbf{f}_{j,model} = \mathbf{J}_j \cdot \mathbf{X}_{j+1}, \quad (7)$$

$$(j = 1, j_{max})$$

から \mathbf{X}_{j+1} を求める。次のステップの計算で、 \mathbf{J}_{j+1} と $\mathbf{f}_{j+1,model}$ を求める際には、求まった \mathbf{X}_{j+1} で修正した K1 値を使ったラティスの計算結果を使う。この一連の操作を繰り返すことにより精度が格段に向上することがわかった (後述)。実は、この iteration による一連の計算は、ニュートン法の手法を多次元変数、多数の目的関数へ拡張したものに等しい。この方法では、モデルのラティスで設定された K1 値を、測定した R-matrix と dispersion に合うように補正していく。収束した条件で求まる K1 値は測定時の K1 値の予想値になっている。この予想値での optics の計算結果は測定時の optics の予想値となる。求まった K1 値とモデルの K1 値のずれが所謂 fudge factor となる。ちなみにこの方法では、水平方向の dispersion の測定結果も利用しているが、式 (2)、(4)、(5) からわかるように省略することは可能である。ただし利用したほうが得られる精度が良くなる方向になる。

3. 光学測定と補正

2022 年 7 月 5 日から 6 日にかけて、ニュートリノ実験のための速い取り出し運転用の光学ラティス設定において光学測定と補正を行なった。BPM の数は水平方向と垂直方向それぞれ 186 台である。ただし BPM の故障や精度に問題のあるものは光学測定する際には除く必要があった (後述)。応答行列を求めるためのキックを与えるステアリング磁石は、水平方向、垂直方向それぞれ 8 台が選ばれた。BPM の位置データ取得時の時間分解能は 1 ms を選び、加速をしない磁場パターンに対して、ビーム入射後 10 ms から 100 ms までつまり 90 点分の平均を求めている。今回の測定でキック力はビームロスが顕著に増えない値である ± 0.2 mrad, ± 0.1 mrad に対して BPM の測定を行い、各 BPM での応答行列を求めるために、キック力の違いによる位置のずれを規格化して平均している。また BPM の位置はキック力がない

場合の BPM の位置からの差として求めた。またこの測定の前に、水平・垂直方向の COD の補正を行なった。Dispersion は、RF 周波数による運動量のずれ $\Delta p/p = 0, \pm 0.3\%$ の 3 点に対して、BPM の位置を測定することにより求めている。SM に関しては full correction の 90% にセットした。一方 SAD の計算では 100% の値を用いたが、オプティクス測定・補正結果へのこの違いの影響は無視できることは確かめている。

Figure 1 は速い取り出し用 beam optics (model) の 1/3 周分のプロットを示す。ベータトロン振動数 (tune) は $(Q_x, Q_y) = (21.350, 21.430)$ である。

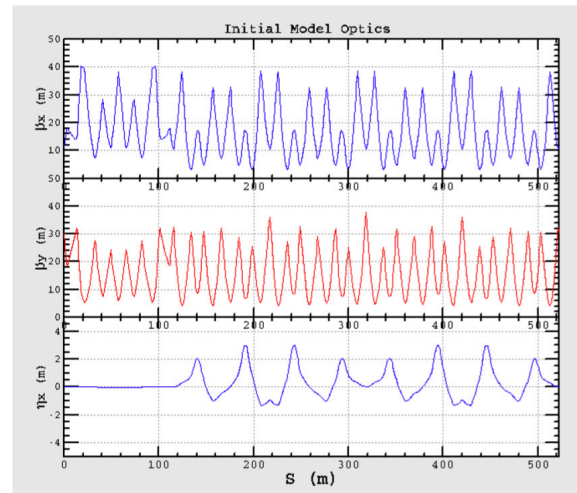


Figure 1: MR fast extraction beam optics.

式 (6) の \mathbf{J}_j の各要素を求めるためには、R-matrix と dispersion の各 QM ファミリーの K1 値の微分を求める必要がある。この計算は各 K1 値を $\pm \Delta K1$ だけずらして計算した R-matrix と dispersion の値のずれから線形性を仮定して求めた。今回は K1 値の相対的なずれの大きさは $\pm \Delta K1/K1 = \pm 0.01\%$ と設定した。 \mathbf{J}_j の列数は QM ファミリーの数と同じ 16 である。一方、行数は水平、垂直の BPM の和 186×2 とキックを行った水平・垂直方向ステアリングの台数の和 8×2 の積、水平方向 dispersion を求めた BPM の数 186 を合計した 6138 という膨大な数となる。ただし、BPM には信号が正しく出力されていないものがあるため実際に利用した BPM の台数は少なくなっている。

Figure 2 上図は、10 回の iteration 後の予想された測定時のラティスの β_x と β_y のモデルラティスとの比と dispersion のずれを表す。Dispersion のずれでは、測定された dispersion の値も緑点でプロットしている。Figure 2 下図は、iteration の回数 j に対する $d\mathbf{f}_j$ の要素の rms 値、6 組のアーチ部 (arc)、10 組の直線部 (ST) の QM ファミリーの $dK1/K1$ のプロットである。3~4 回の iteration 数で一定の値に収束していることがわかる。Figure 2 の計算では、水平方向 26 台、垂直方向 22 台の BPM のデータを除いた計算処理をしている。

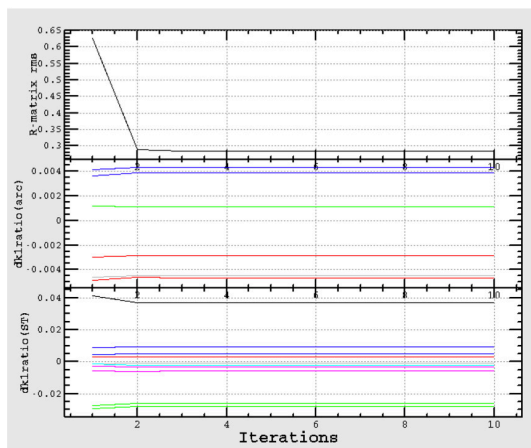
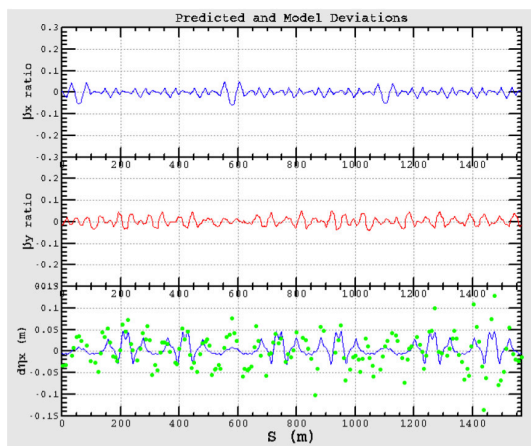


Figure 2: FX parameters before correction.

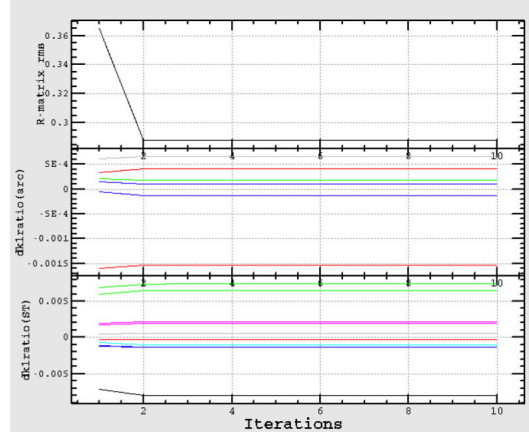
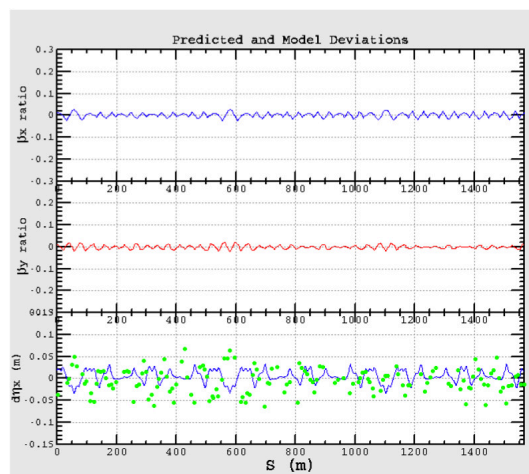


Figure 3: FX parameters after correction.

以上の計算により、測定されたラティスをモデルのラティスにするための各 QM ファミリーの K1 の補正值 (fudge 値) が求まる (Table 1 の K1 factor before corr. 参照)。この補正值 (fudge 値) を取り入れた K1 値に対応する電流値を Q 電源に設定し、再度ステアリング磁石のキックによる応答行列と dispersion の測定を行なった。10 回の Iteration 後の予言された補正後のラティスの β_x と β_y のモデルラティスとの比と dispersion のずれを Fig. 3 上図に示す。Figure 3 下図は Fig. 2 下図と同様のプロットである。 β_x 、 β_y の modulation の大きさはそれぞれ、5.4%、4.0% に減った。Dispersion の測定値のずれも補正により小さくなり予言値との差は Fig. 2 より小さくなっている。補正後の fudge factor は補正前より小さくなっており良い方向に補正されていることを示す (Table 1)。補正後の R-matrix と dispersion を求める際に未使用とした水平方向と垂直方向の BPM の台数は、それぞれ 40 台、42 台である (後述)。過去の遅い取り出しラティスを含む optics の測定で求めた tune の予言値と tune の測定値とのずれは、いずれの場合も 0.01 以下となっていた (Table 2)。

4. 使用する BPM の台数

MR の BPM は MR の運転開始時から使用されてきたが、最近では老朽化による不具合が顕著になってきている。データとして信号が常にゼロとして記録されるものや有限の値が記録されるが明らかに不自然なものが存在している。今回のビーム光学測定・補正では、それらの BPM データを使わないようにする必要がある。しかしながら、正常か正常でないかの判定は簡単ではない。今回ステアリング磁石のキックによる BPM 信号の振る舞いから、その判定を自動で行うことを試みた。前述したように応答行列を求めるために、あるステアリング磁石による ± 0.2 mrad と ± 0.1 mrad のキック時の各 BPM の測定値をそのキック力で規格化してそれらを平均した値を採用した。この際、 ± 0.2 mrad の BPM による値の比と、 ± 0.1 mrad 通しの位置の比は、共に -1 に近い値になっているはずである。今回の FX ラティスの補正後の測定において、この 2 つの比をキックするステアリングに対して求め平均した。これらの比が $\pm 10\%$ 以内に入っている BPM だけをプロットしたものを Fig. 4 に示す。上図は水平方向、下図は垂直方向の BPM の比をプロットしている。青線は ± 0.2 mrad での比、赤線は ± 0.1 mrad での比である。除か

Table 1: K1 and dK1 of Quadrupole Family

Name	K1(model)	K1 factor before corr.	K1 factor after corr.
QFX1	0.1333	1.0028	1.0015
QDX1	-0.1717	0.9961	1.0001
QFN	0.1599	0.9981	0.9998
QDN	-0.1906	1.0045	0.9993
QFP	0.0621	0.9644	1.0080
QFR	0.1388	0.9971	1.0003
QFS1	0.1170	0.9909	1.0013
QFT1	0.1433	1.0265	0.9936
QDR	-0.1585	1.0008	0.9995
QDS1	-0.1871	1.0059	0.9995
QDT	-0.1506	1.0024	1.0010
QFX2	0.1333	1.0047	0.9996
QDX2	-0.1717	0.9957	0.9999
QFS2	0.1170	0.9951	1.0013
QFT2	0.1433	1.0289	0.9927
QDS2	-0.1871	1.0031	0.9981

れた水平と垂直方向の BPM の台数はそれぞれ、40 台と 42 台である。

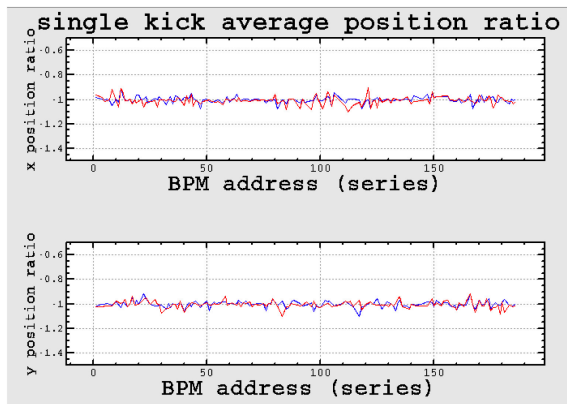


Figure 4: Beam position ratio at each BPM for the two single kicks.

Table 3 は、 ± 0.2 mrad もしくは ± 0.1 mrad の比に対する許容値を変えた場合の未使用の水平・垂直方向 BPM の台数、 df (式 6) の rms 値、 $\beta_{x,y}$ の rms 値と $Q_{x,y}$ である。許容範囲を狭くして未使用の BPM の台数を増やすと必要な情報が不十分となり df や $\beta_{x,y}$ の rms 値は大きくなる。反対に、許容範囲を $\pm 50\%$ まで広くして未使用の BPM の台数を減らした場合、あまり取束値に違いが見られなかったが、正しくない BPM 値を多く使うのは避けるべきである。従って前述の補正後の計算では、 $\pm 10\%$ に対応した水平・垂直方向 BPM の台数、それぞれ 40 台と 42 台を除くことにした。

5. ステアリングのキック力

ステアリング磁石のキックによって発生する COD を BPM で測定することにより R-matrix が求まるが、ステアリング磁石のキック力の大きさが結果にどの程度影響するかを調べた。ステアリング磁石は建設期間の MR への設置前に全台数の磁場測定が行われており、各電流と軸方向の磁場積分値の関係が求められている。この関係から、あるエネルギーで希望するキック力を与えるための電流値が決まる。Figure 5 は、すべてのキックするステアリング磁石のキック力を同じ値で変化させた場合 (R-matrix の値を同じ比で変えた場合と同じ) の df の rms 値をプロットしたものである。予言される Q_x と Q_y もプロットしている。キック力は磁場測定から得られた値の 99% 付近で最も R-matrix のずれの rms 値が小さくなっていることがわかる。従って FX のラティスでの補正前後の計算では、測定データから求まる R-matrix に 0.99 をかけた値を使用した。この補正値はエネルギーによって違う可能性もあるので注意が必要である。

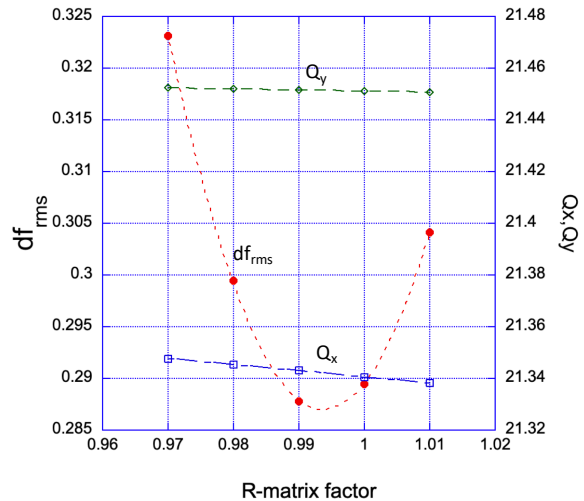


Figure 5: df_{rms} and tunes for the steering kick strength.

6. まとめ

J-PARC MR のビームパワー増強を目的とした高線り返し化電源が導入された。QM ファミリー数は 11 から 16 に増えた。この変更に伴い、QM の電流設定誤差によるビーム光学の歪みを予言し補正する SAD を用いたツールを構築した。BPM 位置でのステアリング磁石のキックから求まる R-matrix と dispersion の測定結果とモデルラティスのものとの差が最小になるように iteration により QM の K1 補正值 (fudge) を求めた。いくつかの条件における optics の測定で求めた tune の予言値と tune の測定値とのずれは 0.01 以下となっていた。さらに optics の測定で同時に求まる QM の強さの補正值 fudge を取り入れた測定によって、 β_x 、 β_y の歪みの大きさはそれぞれ、5.4%、4.0% に減った。またモデルラティスにするための光学補正後の fudge 値は、補正前の補正值より小さく

Table 2: Measured and Predicted (Q_x, Q_y)

	Measured	predicted	difference
3 GeV FX before corr.(2022.7)	(21.340, 21.385)	(21.349, 21.383)	(0.009, -0.002)
3 GeV FX after corr. (2022.7)	(21.349, 21.448)	(21.342, 21.452)	(-0.007, 0.004)
30 GeV SX (2017.5)	(22.282, 20.790)	(22.284, 20.787)	(0.002, -0.003)
8 GeV SX (2021.5)	(22.308, 20.809)	(22.296, 20.808)	(-0.007, 0.004)

Table 3: Used BPM Number and Predicted Parameters

range of ratio	not used H-BPM	not used V-BPM	rms df	rms β_x	rms β_y	Q_x	Q_y
±50%	20	25	0.2868	0.1634	0.1352	21.3415	21.4521
±25%	24	29	0.2875	0.1674	0.1462	21.3417	21.4520
±10%	40	42	0.2878	0.1623	0.1456	21.3430	21.4516
±7%	53	48	0.2696	0.1642	0.1465	21.3426	21.4517
±4%	78	72	0.2704	0.1864	0.2442	21.3424	21.4518
±1%	153	155	0.3082	0.3905	0.6639	21.3314	21.4575

なっており、これも光学補正によりモデルラティスに近づいたことを示している。以上の結果から、今回構築したプログラムは、予定されている SX ラティスでの光学測定、補正をする上で十分な効果を発揮すると判断できる。目標とする Q_x, Q_y (モデルの tune) と補正後に tune 測定で求めた数値の差は、それぞれ $-0.001, +0.018$ であった。垂直方向のずれの原因は不明だが、実際の K1 値の設定誤差、個々の Q 磁石の強さのばらつき、QM 意外の quadrupole 成分を持つ磁石の存在や chromaticity 補正 SM での有限な COD による feed-down 効果等の可能性が考えられる。測定精度のさらなる向上のためにキックを与えるステアリングの配置と台数の最適化も検討する予定である。

謝辞

2022年7月に行われた FX ラティスでの光学測定・補正作業では、直前のリクエストにも関わらず、MR の beam commissioning グループから快く貴重なビームタイムの提供をして頂いた。B-factory の加速器で開発された今回とは別の手法をベースにした高精度ビーム光学測定の研究を行なっている東大の浅見高史氏には、ステアリング磁石によるキックの設定、QM 電源の電流設定に関して全面的にサポートしていただいた。また、以前の SX 運転での 8 GeV、30 GeV でのステアリング磁石のキックによるデータ取得に関しては、山本昇氏の貢献が大きい。以上の方々にここで感謝の意を表したい。

参考文献

[1] M. Tomizawa *et al.*, “Slow Extraction Operation at J-PARC Main Ring”, in *Proc. HB’21*, Batavia, USA, October 2021, pp. 219–224.

[2] R. Muto *et al.*, “Current status of slow extraction from J-PARC Main Ring”, *Journal of Physics Conference Series*, 2019, 1350:012105.
 [3] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/index.html>
 [4] <https://github.com/KatsOide/SAD>
 [5] J. Safranek, “Experimental determination of strage ring optics using orbit response measurements”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 388, 1997, pp.27-36.
 [6] Y. Shimosaki, “加速器のビーム調整”, 2020 OHO, pp.4.1-4.12.