

J-PARC 主リングにおける COD 応答を用いた高精度 Optics 測定 HIGH-PRECISION OPTICS MEASUREMENT USING COD RESPONSE IN J-PARC MAIN RING

浅見高史 ^{*,A,B)}, 五十嵐進 ^{B)}, 佐藤洋一 ^{B)}, 發知英明 ^{B)}, 安居孝晃 ^{B)}, 小関忠 ^{A,B)}

Takashi Asami ^{*,A,B)}, Susumu Igarashi ^{B)}, Yoichi Sato ^{B)}, Hideaki Hotchi ^{B)}, Takaaki Yasui ^{B)}, Tadashi Koseki ^{A,B)}

^{A)} The University of Tokyo

^{B)} KEK

Abstract

In high intensity proton synchrotron J-PARC MR, beam commissioning study for 1.3 MW upgrade plan is now in progress. The upgrade will be done by shortening the repetition period and increasing the number of protons. In MR, the betatron function measurement is being done by using turn-by-turn signal of the beam position monitor with accuracy evaluated to be 3%. However, in evaluating such effects as space charge forces and eddy currents on beam optics whose impact will be largen by the upgrade, precise measurement of the beta function will be even more important. In this study, we have developed and installed high-precision beta function measurement method using COD response from the steering magnets in MR. By conducting beam experiment, we have evaluated and suppressed variance in betatron function measurement using COD response to be less than 1%. Also, we have estimated the effects of systematic error by simulation. In this paper, details and results of the experiment and simulation will be reported.

1. 背景

1.1 J-PARC MR のアップグレード計画

J-PARC 主リング (MR) は、陽子を 3 GeV から 30 GeV まで加速する大強度陽子シンクロトロンであり、ニュートリノ・ハドロンの各実験施設へ陽子ビームを供給している。MR の速い取り出し (FX) 運転では 515 kW 強度の陽子ビームをニュートリノ実験施設へ安定的に供給する事に成功している。MR では FX 運転における供給ビーム強度をさらに 1.3 MW へのアップグレードする計画が進行しており [1]、現在そのためのビーム調整が行われている。アップグレードは陽子数の増加と、運転サイクルを以前の 2.48 秒から 1.36 秒へ高繰り返しにする事によって行われ、それらのビーム光学 (Optics) への影響を理解することが不可欠である。Optics を考察・測定する上で特に重要となる MR の基本パラメータを Table 1 に示す。

Table 1: Basic Parameters of J-PARC MR Important for Considering and Measuring MR Beam Optics

Circumference	1567.5 m
Energy	3-30 GeV
Superperiod	3
Number of quadrupole magnets	216
Number of BPMs	Horizontal 186 Vertical 186

1.2 MR におけるベータトロン関数制御の重要性

ベータトロン関数 β はビーム運動を決める最重要パラメータの 1 つである。 β は加速器における四極磁場の分

布と強さで決まる。MR は 3 回対称に設計されているため、MR における β のモデル値 β_{model} も 3 回対称である。MR では、ビーム重心のベータトロン振動を励起し毎週のビーム重心位置を BPM で測定する事でベータトロン関数の測定が行われてきた (以降「Turn by Turn 手法」)。その測定値 β_{obs} はモデル値 β_{model} との相対誤差 (以降「 β 設定誤差」) によって評価されており、現在 MR は 3% 程度の β 設定誤差で運用されている [2]。

ところで 2022 年 6 月から開始された高繰り返し化後のビーム調整では、 5.4×10^{13} protons per pulse (ppp) 強度条件下で、ロス最小化のためのビーム調整後の入射期間 (130 ms) の DCCT で測定したロス量は 2% であった [2]。高繰り返し化前のロス最小化調整で測定されたロス量は 1% であり、ロス量が増加した事が分かる。これは高繰り返し化のための主電磁石電源アップグレードに伴い、四極電磁石ファミリーの一部を分割した事によって MR の Optics の 3 回対称性が悪化したためと考えられている [2]。ただし電磁石ファミリーとは同一電源によって通電されている電磁石の組の事である。

このような影響を抑制するためには誤差四極磁場の影響を正しく評価し補正する事が重要となる。実際、高繰り返し化後の 5.4×10^{13} ppp 条件下のロス調整では、分割されたファミリー間の磁場ずれを補正する事で入射期間 (130 ms) のロス量が 7% から 2% へと大きく改善した [2]。また、補正前の分割ファミリー間の磁場ずれは相対誤差で 1% より小さい事が試算される。したがって、MR のアップグレードでは誤差四極磁場を 1% 以下の精度で評価し制御する事が重要となる。そのためには、ベータトロン関数を同等の精度で測定・補正する事が必須である。

また、高繰り返し化で加速期間における電磁石電流パターンが急峻になる事によって、真空ダクトに流れる渦電流による磁場応答が増大する。例えば、高繰り返し化後の条件下では MR の FX 取り出し部の 1 箇所を設置されている変形ダクトの壁に流れる渦電流が、主四極電磁石強度に対して最大 1.5% 程度の四極磁場応答を与える

* tasami@post.j-parc.jp

事が電磁場シミュレーションによって示される [3]。このような四極磁場応答は加速中に Optics の 3 回対称性を悪化させる原因となりうるため、MR のアップグレードでは加速中のベータトロン関数制御も重要な課題である。

1.3 ベータトロン関数測定における測定誤差について

ベータトロン関数の測定値 β_{obs} は Eq. (1) のように分解出来る。

$$\beta_{\text{obs}} = \beta_{\text{true}} + \Delta\beta_{\text{SD}} + \Delta\beta_{\text{sys}} \quad (1)$$

β_{obs} 及び β_{true} はそれぞれベータトロン関数の測定値と真値である。 $\Delta\beta_{\text{SD}}$ は測定毎に特定の統計分布に従って生成される標準偏差項を表す。また、 $\Delta\beta_{\text{sys}}$ は測定機器の設置誤差や測定によって Optics に与えられる系統的な外乱に由来する系統誤差項である。

1.4 MR における測定誤差評価に関する現状

誤差四極磁場を正確に評価するためにはモデル Optics と実際の Optics との乖離を正しく評価する事が必要である。本来、そのために重要なのは β_{true} とモデル値 β_{model} との間の差分である。しかし、これまで MR では、測定値 β_{obs} のみが評価され、 $\Delta\beta_{\text{SD}}$ や $\Delta\beta_{\text{sys}}$ の寄与について注目されて来なかった。また、従来の Turn by Turn 測定手法で用いる BPM の読み値に付加されるランダムエラーがベータトロン関数測定の標準偏差項 $\Delta\beta_{\text{SD}}$ に 2% 程度寄与する可能性が指摘されており [1]、これは現状の MR の β 設定誤差と同程度である。

2. 研究目的

MR の 1.3 MW アップグレードに向けたビーム調整のための β 測定では、誤差項 $\Delta\beta_{\text{SD}}$ と $\Delta\beta_{\text{sys}}$ の寄与が合わせて 1% 以下に抑えられる事、加速中に測定可能である事、及びビーム調整における現実的な測定時間 (10 分程度) で測定できる事の 3 点を満たした手法を用いる事が重要である。本研究ではそのような手法として COD 応答による Optics 測定手法 (以降「COD ベース手法」) を使用する。COD ベース手法は KEKB で開発された β 測定手法 [4] を基としており、MR では 2021 年までに β 設定誤差を 5% まで合わせこむ事に成功している [5]。本研究の目的は、高精度化のためにツールを刷新した上で MR に実装し、その性能評価を行う事である。

3. COD ベース手法

3.1 測定に用いる機器

本 Optics 測定手法で用いる機器は主にステアリング電磁石と BPM の 2 点である。ステアリング電磁石は MR に設置される小型の偏向電磁石であり、これらを励磁する事でリング全周に閉軌道のずれ (COD) を与える事が可能である。MR には Horizontal, Vertical 用にそれぞれ 93 台のステアリング電磁石が設置されている。また、MR には Horizontal, Vertical 方向測定用にそれぞれ 186 台ずつの BPM が設置されている。BPM にはビームの入射位置から進行方向に沿って、0 番から 185 番

までの通し番号が付けられている。本稿ではこの番号を「BPM index」と呼ぶ事とする。

3.2 手法の原理

添字 j で指定されるステアリング電磁石 1 台を蹴り角 $\Delta\theta^{(k)}$ で励磁した時、添字 i で指定される BPM で観測される COD $\Delta\chi_i^{(j,k)}$ は Eq. (2) のようになる。

$$\Delta\chi_i^{(j,k)} = \Delta\theta^{(k)} \frac{\sqrt{\beta_i\beta^{(j)}}}{2 \sin \pi\nu} \cos(\pi\nu - |\phi_i - \phi^{(j)}|) \quad (2)$$

ただし、 β_i 、 ϕ_i 、 $\beta^{(j)}$ 、 $\phi^{(j)}$ を各々 BPM i とステアリング電磁石 j におけるベータ関数とベータトロン位相とし、 ν をチューンとする。以降、励磁するステアリング電磁石とその蹴り角の組をステアリング条件と呼び、 $l \equiv (j, k)$ で指定するものとする。

直接ビームベースで測定する量は Eq. (2) 左辺の $\Delta\chi_i^{(l)}$ (以降「 $\Delta\chi$ 行列」) のみであり、変数 β_i 、 ϕ_i 、 $\frac{\Delta\theta^{(k)}\sqrt{\beta^{(j)}}}{2 \sin \pi\nu}$ 、 $\phi^{(j)}$ 、 ν をフリーパラメータとして Eq. (2) にフィットし求める。本手法では、 $\Delta\theta^{(k)}$ がフリーパラメータに含まれる事に注意する。また、原理的にモデル値 β_{model} に関する仮定が不要である。本研究で最も重要な測定量は BPM 位置でのベータトロン関数 β_i であるが、チューン ν も同時に測定可能である。

ここで、従来の Turn by Turn 測定手法と COD ベース手法を比較する。まず、測定で使用するビーム位置信号について考える。Turn by Turn 手法では原理的に毎週のビーム位置を測定する必要がありその読み値に 300 μm 程度の誤差が付く [1]。しかし COD ベース手法では周波数処理でノイズを低減しながら 1 ms 間隔で測定する BPM の測定モード (COD モード) を使用する事ができ、その読み値につく誤差は 30 μm 程度 [6] である。次に、MR の入射期間 (130 ms) に 100 サンプルの測定結果を得るために必要なショット数について着目する。Turn by Turn 手法では 100 ショット必要であるが、COD ベース手法では 10 ショット程度で済む。なぜならば、MR では入射期間におけるエネルギーが 3 GeV で一定であり電磁石電流の設定値も時間変化しないため、各パターン時刻で求めた $\Delta\chi$ 行列のそれぞれを 1 つのサンプルと見做せるからである。例えば BPM の COD モードを用いれば 1 ms 間隔データのそれぞれがサンプルとなり、入射期間 (130 ms) で一挙に 130 サンプル得られる。このとき必要なショット数はステアリング条件の数 (10 程度) と同等である。最後に、加速調整における運用について考える。Turn by Turn 手法の適用可能範囲は入射から加速初期までであり、かつ 1 ショットにつきパターン時刻 1 点のみの Optics しか得る事が出来ない。対して COD ベース手法では任意のタイミングにおける β を一挙に測定する事が出来る。

以上のように、MR は COD ベース手法は従来の手法に比べて短時間で高精度に測定する事ができ、さらに加速中であっても安定的に運用可能である事が分かる。

3.3 データ取得について

COD ベース Optics 測定手法では 1 つの $\Delta\chi$ 行列が与えられれば、対応する全周のベータトロン関数を一意に

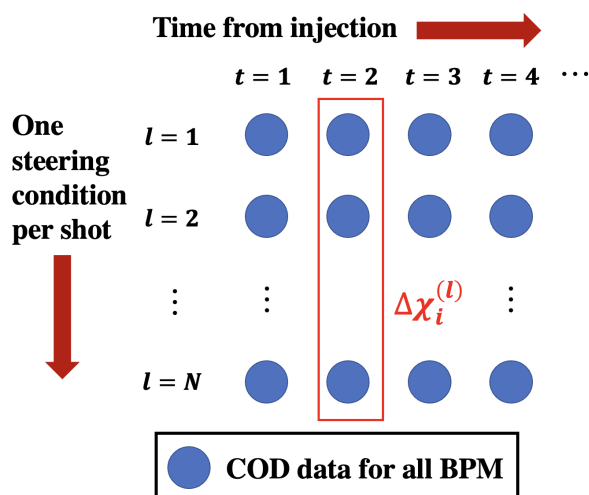


Figure 1: Data taking scheme for $\Delta\chi$ matrix.

求める事が出来る。ビームを用いた測定では、Fig. 1のようにステアリング条件をショット毎に変えながら測定を行い、各ショットで同じパターン時刻に対応するCODデータを組み合わせて $\Delta\chi$ 行列を作る。そのようにして、パターン時刻 t_{pat} 毎の全周のベータatron関数の測定値が得られる。ただし、パターン時刻 t_{pat} をMR運転サイクルにおける入射開始からの経過時間とする。

4. シミュレーションによる系統誤差項の評価

本研究ではSAD [7]を用いたシミュレーションによりCODベース手法の系統誤差項 $\Delta\beta_{sys}$ の評価を行った。

4.1 系統誤差要因

系統誤差要因として考えられるのは主に以下の3点である。

1. CODを与える事による六極電磁石中心からの中心軌道のずれによる四極、ねじれ四極、二極、ねじれ二極の各磁場成分
2. BPMの較正誤差
3. BPMのオフセット成分

4.2 シミュレーション内容

系統誤差要因3.については、 $\Delta\chi$ 行列の取得段階でその寄与を除去している。系統誤差要因1.と2.の影響を評価するためにSADを用いたシミュレーションを行った。まずシミュレーション上で六極電磁石をビーム試験時と同じ強さで励磁し、ビーム試験条件と同様にステアリング電磁石6台を蹴り角 ± 0.2 mradで励磁させ、 $\Delta\chi$ 行列の値を得た。CODの大きさは最大4 mm程度である。このとき、要因2.による測定値と実際のビーム位置の差分は最大でも15 μm 程度の範囲に抑えられていると仮定出来る [8, 9]。従ってSADシミュレーションで得られた $\Delta\chi$ 行列の各成分に、 $3\sigma = 15 \mu\text{m}$ の正規分布によって誤差を振った上で、 $\Delta\chi$ を用いてCODベース測定を行って β を求めモデル値との相対誤差を評価した。

4.3 シミュレーション結果

系統誤差のベータ測定結果への寄与はHorizontalがRMS 0.20%, VerticalがRMS 0.24%程度である事が示された。

5. ビームを用いた標準偏差項評価試験のセットアップ

本研究ではCODベース手法の標準偏差項 $\Delta\beta_{SD}$ を評価するためのビーム試験を行った。その詳細について説明する。

5.1 ビーム試験条件

今回はMRの入射運動エネルギーである3 GeV領域におけるOptics測定を考える。ビーム試験では 1.2×10^{12} protons per bunch(ppb)の低強度条件下で、ビームの運動エネルギーを一定にした状態で220 ms間周回させた。その間BPMのCODモードを用いてCOD測定を行い、1 ms間隔データを取得した。またステアリング電磁石6台を蹴り角 ± 0.2 mradで励磁させ合計12 shotで全周の β を求めた。例としてFig. 2にステアリング電磁石の励磁によるCOD応答のモデル値と実測値を示す。モデル値はSADで計算した。

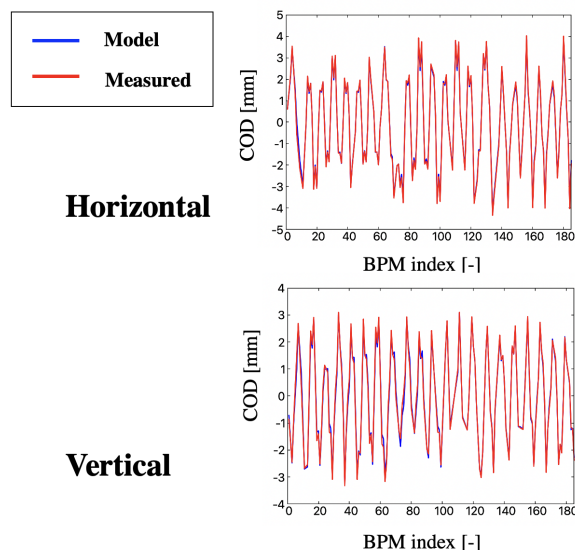


Figure 2: COD excited by one of the steering magnets with kick angle 0.2 mrad. Blue line corresponds to the COD calculated by SAD, and red line corresponds to the COD measured with BPM in the beam experiment.

本条件下では、220 ms測定12ショット分で全周の β が220サンプル得られる。さらに、このような測定を同じOpticsに対して8回繰り返す事で1760サンプル分のデータを得た。以降はこの1760サンプル分の β 測定値を用いた検討を行う。

5.2 標準偏差の評価方法

本研究ではBootstrap法 [10]を使用して測定における標準偏差を評価した。Bootstrap法は測定量のサンプル

平均値に対する標準偏差の推定方法としてよく知られ、測定値のばらつきを生成する分布に関する仮定が必要がない事の特徴とする。また、Bootstrap法で n サンプル平均につく標準偏差を求めるために必要なサンプル数は n 個のみである。Figure 3に、任意の測定量 x の n サンプル平均値につく標準偏差を Bootstrap 法によって評価する手順を示す。ただし x の測定値 n 個のそれぞれを x_i と表記する。 n 個のサンプル $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ から復元抽出で n 個のデータをサンプリングし直す事を考える。ここではこれをリサンプリングと呼ぶ。合計 B 回のリサンプリングを行う事を考え、 j 回目のリサンプリングで得られた n 個のサンプルのそれぞれを $x_i^{(j)}$ と書く。各 j における n サンプル平均を $\text{MEAN}[x_i^{(j)}]$ とすれば、 B 個の $\text{MEAN}[x_i^{(j)}]$ の標準偏差が x の n サンプル平均値の標準偏差の推定値である。今回はサンプル数によらず $B = 1000$ とした。

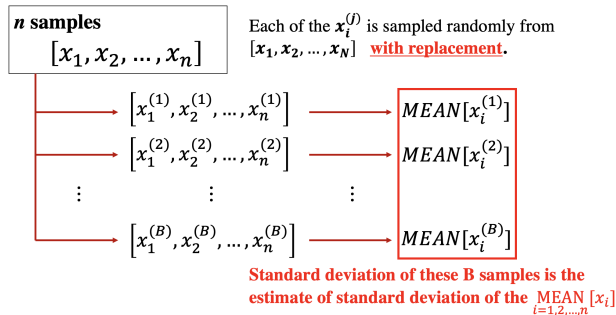


Figure 3: Evaluation of statistical error for n sample averaged value of arbitrary observable x using bootstrap method.

5.3 測定量の表記について

以降、BPM i における β の n サンプル平均値を $\beta_i^{(n)}$ とし、 $\beta_i^{(n)}$ の標準偏差を $\sigma_i^{(n)}$ と書く事にする。

6. 標準偏差項評価の結果

6.1 ビーム試験における Optics 測定結果

COD ベース手法によって求めた β の 1760 サンプル平均 $\beta_i^{(1760)}$ を β_{model} と共にプロットしたものを Fig. 4 に示す。COD ベース手法におけるモデル値との相対誤差の MR 全位置についての RMS 値は

$$\begin{aligned} \text{RMS} \left[\frac{\beta_{\text{H,model}} - \beta_{\text{H,true}}}{\beta_{\text{H,model}}} \right] &= 4.2\% \\ \text{RMS} \left[\frac{\beta_{\text{V,model}} - \beta_{\text{V,true}}}{\beta_{\text{V,model}}} \right] &= 4.5\% \end{aligned} \quad (3)$$

であった。なお、本ビーム試験は 2022 年 6 月から開始された高繰り返し化後のビーム調整における Optics 調整の途上段階で行われた評価試験であり、この段階では測定対象である実際の Optics がモデルに十分に合わせ込まれていない事に注意する。また、測定されたチューンは (Horizontal, Vertical)=(21.351, 21.426) であった。一方、MR のチューン測定で用いられるチューンメーターによ

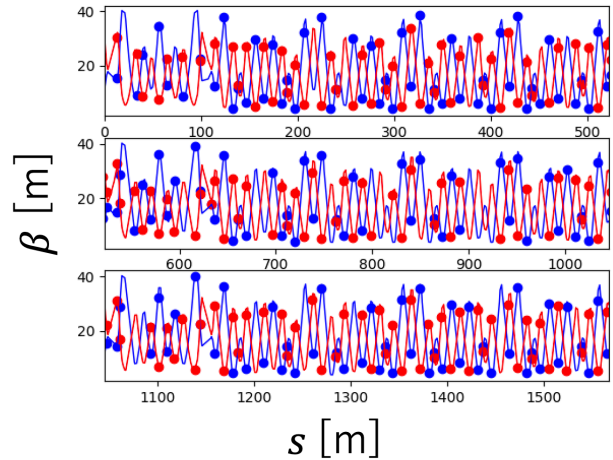


Figure 4: Betatron functions measured by COD base method plotted together with model betatron functions. Blue and red circles correspond to horizontal and vertical measurement results respectively. Blue and red lines correspond to horizontal and vertical model betatron functions respectively.

る結果は (Horizontal, Vertical)=(21.350, 21.428) であり、0.002 程度の範囲の中で一致している。

6.2 β の 1760 サンプル平均に対する標準偏差項の評価結果

1760 サンプル平均値につく標準偏差を Bootstrap 法によって評価した結果を Fig. 5 に示す。ただし、標準偏差の大きさは 1760 サンプルにおける標準偏差 $\sigma_i^{(n)}$ をモデル値 $\beta_{i,\text{model}}$ で割った値 $\frac{\sigma_i^{(n)}}{\beta_{i,\text{model}}}$ で示している。 $\frac{\sigma_i^{(n)}}{\beta_{i,\text{model}}}$ の全周の BPM に対する RMS 値は Horizontal で 0.13%、Vertical で 0.11% である。

ここまでに、1760 サンプル平均値につく系統誤差項の寄与が 0.2% 程度、標準偏差項の寄与が 0.1% 程度である事が分かった。従って原理的には Optics の調整で 0.3% 以下で β をモデルに合わせ込めると考えられる。

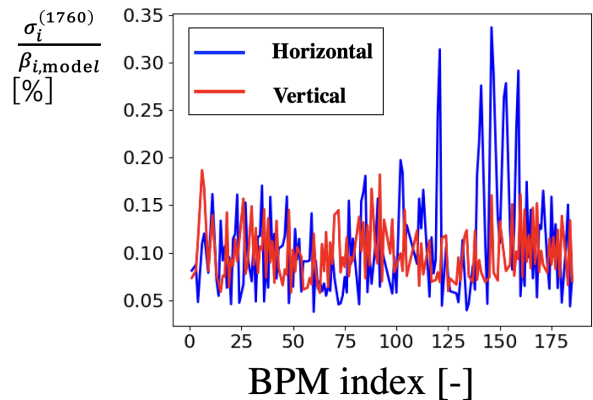


Figure 5: $\sigma_i^{(1760)}$ evaluated using bootstrap method.

6.3 標準偏差のサンプル数依存性

標準偏差 $\frac{\sigma_i^{(n)}}{\beta_{i,model}}$ のサンプル数 n 依存性を Fig. 6 に示す。例えば、Horizontal, Vertical 共に標準偏差の寄与を 0.5% 程度に抑えるためには 100 サンプル程度必要であり、1760 サンプルあれば 0.1% 程度に抑えられる事が分かる。必要な測定時間は 100 サンプルで最短 10 分程度、1760 サンプルで 1 時間半程度であり、ビーム調整における Optics 測定手法として十分有用であると考えられる。

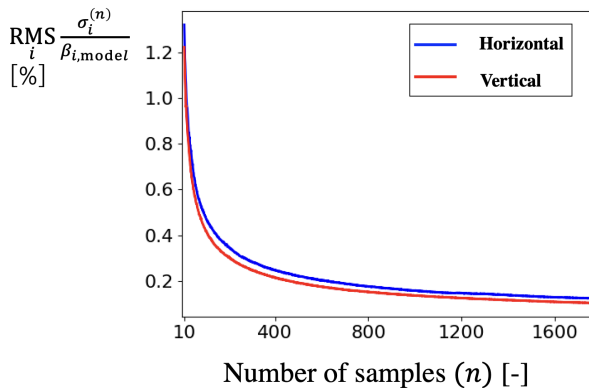


Figure 6: Sampling number dependency of $RMS[\sigma_i^{(n)}/\beta_{i,model}]$ evaluated using bootstrap method.

7. 結論

本研究では、高精度 Optics 測定手法の確立に向け COD ベース Optics 測定手法を MR に実装した。また MR でこれまで注目されて来なかった β 測定における系統誤差項 $\Delta\beta_{sys}$ と標準偏差項 $\Delta\beta_{SD}$ の評価を行った。結果、標準偏差項 $\Delta\beta_{SD}$ は、ビーム試験によりその寄与を 100 サンプルで 0.5% 程度、1760 サンプルで 0.1% 程度まで抑えられる事を示した。また、COD ベース手法の系統誤差 $\Delta\beta_{sys}$ も、シミュレーションにより β の測定結果に 0.2% 程度の寄与であることが示された。さらに、100 サンプル得るために必要な測定時間は最短 10 分程度、1760 サンプルでは最短 1 時間半程度である。また、以上より Optics 調整によって原理的には 0.3% 程度の範囲まで β をモデルに合わせる事が可能である事が示される。

8. 展望

今回は入射エネルギーである 3 GeV 領域での Optics 測定について考慮した。しかし、COD ベース手法はビームエネルギーによらず運転サイクルの任意のタイミングにおける β を少ないショット数で安定的に測定する事ができ、時間依存する Optics に対する測定手法として用いる事が可能である。またショット数を増やす事で、 β のサンプル数も同様に増やす事ができ高精度測定が可能である。加速中の Optics 測定は、高繰り返し化によって増大する真空ダクトに流れる渦電流の影響などを評価する上で特に重要である。以降、アップグレード計画における加速調整における高精度 Optics 測定手法として COD ベース手法の原理検証試験を実施する予定である。

また、本手法は MR で初めて β 測定における標準偏差項と系統誤差項の寄与が 1% 以下となる事が実証された手法であり、MR の Optics の 3 回対称化のための Optics 調整における強力な手段となる。以降、MR 1.3 MW アップグレードのための高精度 Optics 測定手法として運用していく予定である。

謝辞

MR における COD ベース測定手法の原理・実装・運用について幅広く助言頂いた山本昇氏、及びビーム試験中長時間に渡りご協力頂いた高野淳平氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC main ring”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* vol. 2021, 033G01 (2021). doi:10.1093/ptep/ptab011
- [2] T. Yasui *et al.*, “J-PARC MR における高繰り返しビーム試験結果”, in Proc. PASJ’ 19, Online, FROA01.
- [3] T. Asami *et al.*, “J-PARC MR における真空ダクト上渦電流の影響評価”, in Proc. PASJ’ 18, Online, TUP017; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP017.pdf
- [4] A. Morita *et al.*, “Measurement and correction of on- and off-momentum beta functions at KEKB”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 10, p. 72801, 2007. doi:10.1103/PhysRevSTAB.10.072801
- [5] N. Yamamoto and J. Takano, Private communication.
- [6] K. Satou *et al.*, “J-PARC MR 新 BPM 信号処理システムのための低反射・低歪信号アテネータの開発”, in Proc. PASJ’ 19, Online, THP016.
- [7] SAD; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [8] Y. Hashimoto *et al.*, “J-PARC MR BPM の校正データの解析”, in Proc. PASJ’ 4, Wako, WP31; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32/contents/PDF/WP/WP31.pdf
- [9] T. Toyama, Private communication.
- [10] B. Efron, “Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife”, *Ann. Statist.* 7 (1) 1 - 26, January, 1979. doi: 10.1214/aos/1176344552