

J-PARC MR におけるベータトロンチューン補正システムの応用

APPLICATION OF THE BETATRON TUNE CORRECTION SYSTEM IN THE J-PARC MR

内藤大地 ^{*A)}、栗本佳典 ^{A)}、下川哲司 ^{A)}、三浦一喜 ^{A)}、森田 裕一 ^{A)}
Daichi Naito ^{*A)}, Yoshinori Kurimoto ^{A)}, Tetsushi Shimogawa ^{A)}, Kazuki Miura ^{A)}, Yuichi Morita ^{A)}
^{A)}High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The performance of synchrotron is influenced by the stability of the magnetic fields, which are fluctuated by their power supplies. The instability of the magnetic fields change Closed Orbit Distortion (COD), betatron tune, and the amplitude of the 3rd order resonance. These phenomena could cause beam loss and limit the beam power in the main ring of the Japan Proton Accelerator Research Complex. In this paper, we examined the contribution of the power supplies of bending magnets and the real-time correction of the COD.

1. はじめに

シンクロトロン加速器では磁石励磁用の電源の電流出力精度が、加速器の性能を決定付ける。電流出力の安定性が悪いと磁石の発生する磁場が揺らぎ、閉軌道歪み (COD) やベータトロンチューン、3次共鳴の強さが変化する。特に大強度陽子加速器研究施設 (J-PARC) のメインリング (MR) での遅いビーム取り出しでは、電源由来のベータトロンチューンの変動がビームの品質に深刻な影響を与えている。そこで我々の研究グループでは電源の出力電流をモニターし、リアルタイムで補正するシステムを開発し [1]、実際のビーム取り出しに適用する事で取り出されるビームの品質を改善させる事に成功した [2]。一方で J-PARC MR での速いビーム取り出しではビーム入射と加速初期でのビームロスが問題となっており [3]、電源電流の変動がビームロスに寄与している可能性がある。そこで本発表では速いビーム取り出しにおける偏向電磁石用電源出力の変動の寄与とその補正の検討について報告する。

2. 偏向電磁石用電源と閉軌道歪み

ビーム入射期における偏向電磁石用電源の出力電流と電流指令値の例を Fig. 1 に示す。電流指令値が一定なのに対して、電源から出力される電流が変動している事がわかる。さらに出力電流から電流指令値を引いたもの (ΔI) を高速フーリエ変換した結果を Fig. 2 に示す。電流変動の起源が 200 Hz 以下の広い帯域によって占められている事が分かる。これは出力電流制御部に不可避免的に混入するホワイトノイズによるものである。また数 kHz の領域に見えるピークは電源内部の半導体素子のスイッチングによって生み出されている。これらの電流変動が偏向電磁石で磁場の変動を生み、陽子が余計に蹴られる事で水平方向に COD が生じる。

Figure 3 に J-PARC MR での偏向電磁石の配線図を示す。PS が電源を、電源から伸びる黒線と赤線が

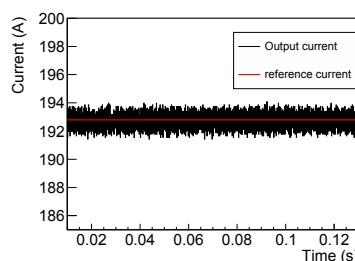


Figure 1: Comparison between the output and reference current.

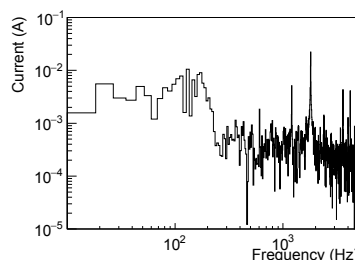


Figure 2: The FFT of the current deviation.

偏向電磁石の配線を、青枠で囲まれた部分が偏向電磁石 1 台分を示す。偏向電磁石は 16 台ずつ直列に接続され、16 台毎に一つの電源で制御される。その結果、偏向電磁石は 6 つのファミリーに分割される。従って電流変動による水平方向の COD はディスパージョン関数 η を使って

$$x_{\text{COD}}(s) \approx \sum_{k=1}^6 \eta_k(s) \frac{\Delta B_k}{B} \quad (1)$$

と近似できる。ここで s は陽子の周回軌道上での位置、 $\eta_k(s)$ はそれぞれのファミリーのディスパージョン関数、 $\Delta B_k/B$ はファミリー毎の電流変動による磁場変動を表す。J-PARC MR のディスパージョン関数を Fig. 4、COD の計算例を Fig. 5 に示す。Figure 4、5

* daichi.naito@kek.jp

ともに横軸は周回軌道軸上での位置を示す。Figure 4の縦軸は各位置でのディスパージョン関数、Fig. 5の縦軸は電流変動から計算した磁場変動を軌道シミュレーション (SAD) に入力して計算した閉軌道の歪みを表す。J-PARC MR ではアーク部だけにディスパージョンが有り、直線部には無い構造になっている。電流変動があると Eq. (1) に従って Fig. 5 のように各ファミリーに該当する場所毎に異なる COD が生じる。

COD が存在するとアーク部に置かれた六極電磁石内部でも中心軌道がずれる。すると六極磁石内部で四極磁場成分が生じ、ベータトロン振動の振幅が変調される。するとベータトロンチューンや3次共鳴の強さが電流変動に従って時事刻々と変化してしまう。しかもその変動源であるノイズはビームと同期されていないのでリアルタイム補正が必須となる。

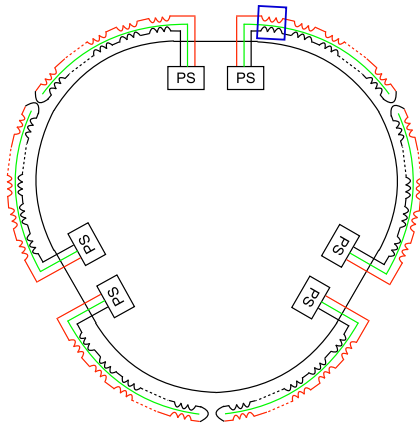


Figure 3: The wiring scheme of the bending magnets in the J-PARC MR.

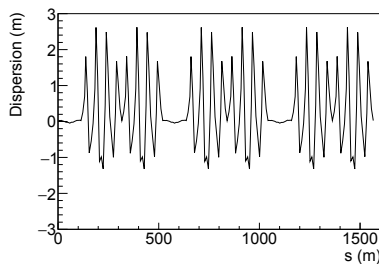


Figure 4: The distribution of the dispersion function in the J-PARC MR.

3. 閉軌道歪みの測定

J-PARC MR で閉軌道の歪みが電源由来である事を確かめるために、ビームポジションモニター (BPM) を用いて COD の測定を行った。Table 1 に利用運転時と COD 測定での代表的なパラメータを示す。測定ではビームパワーを下げて空間電荷効果の影響を軽減した。さらに COD が測定しやすいようにビームは通常 8 バunchのところ、最初の 2 バunchだけ入射さ

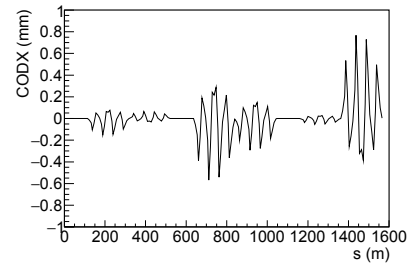


Figure 5: An example of the COD calculated from the current deviation.

せて測定した。またビームの加速はシンクロトロン振動を妨げない加速設定にした。電源の設定は利用運転と同じ設定と、1 台の電源の電流設定値を 0.3% 上昇させ、他の 5 台の設定値を 0.06% 下げた 2 種類で測定を行った。Figure 6 に COD 測定でのビームサイクルを示す。入射のために 0.14 秒間一定で、その後 1.4 秒かけて加速する、ニュートリノビームラインにビーム取り出しする時と同じパターンになっている。この測定ではビームは加速された後、ビームダンプに捨てられた。このサイクルで 80 回ずつ、2 種類の電源の設定で COD を測定した。

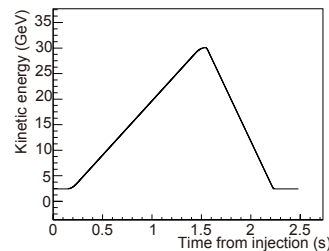


Figure 6: The operation cycle during the COD measurement.

80 回の平均波形の例を Fig. 7 に示す。横軸はビーム入射からの経過時間、縦軸は水平方向の COD を示す。この平均波形は Fig. 4 の横軸で $s=188.8\text{m}$ のところに置かれた BPM での測定値である。ビームの運動量が低いうちはシンクロトロン振動が見えているが、加速開始とともにシンクロトロン振動がダンプしている様子が分かる。また加速の最後で磁石とビームの運動量がずれているために再びシンクロトロン振動が励起されている様子が見える。今回はこの励起されたシンクロトロン振動を

$$y = p_0 \cdot \cos(p_1 \cdot x + p_2) + p_3 \quad (2)$$

で fit し、 p_3 の値を各 BPM での COD とした。Figure 8 に解析結果を示す。横軸が周回軌道軸上の位置、縦軸が COD を示す。黒点が利用運転と同じ設定で測定した COD、赤点が電流値を変更して測定した COD、緑線が黒点の結果に変更した電流値と Eq. (1) を用いて計算した COD 変動を足した結果である。図の左半分が電流値を 0.06% 変更した電源が受け持つ偏向

Table 1: Parameters of the User Operation and the COD Measurement

Parameter	User operation	COD measurement
beam power (kW)	450	9
# of bunch	8	2
Proton on target	6.25e13	4.72e12
RF cavity	Fundamental+2nd harmonic	Fundamental
RF phase offset	On	Off
COD correction by steering magnets	On	Off

電磁石が置かれている領域、右半分が電流を 0.3% 変更した電源が受け持つ領域である。電流変化による COD の変化を計算により正しく予測できている事が分かる。

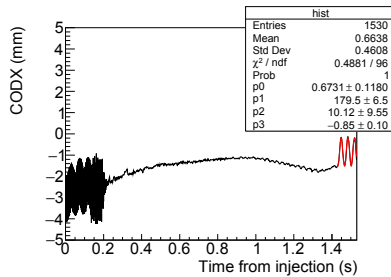


Figure 7: An example of the time-dependent COD.

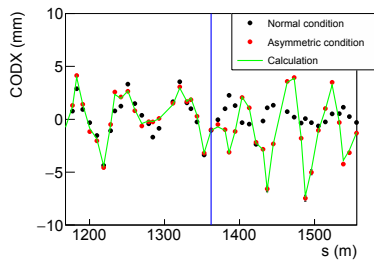


Figure 8: The distribution of the COD in the arc section.

電源電流変動による COD を正しく再構築できたので、今度はシンクロトン振動以外の時間変動する COD と電源電流の相関について調べた。BPM で測定した COD の時間分布では、1 回の測定結果から 80 回平均した測定結果を差し引く事で時間変動する成分のみを取り出した。電源電流変動による COD については一度フーリエ変換したのち、200Hz 以下の成分を逆フーリエ変換して計算した。Figure 9 に $s=188.8$ m のところに置かれた BPM での結果を示す。横軸がビーム入射からの経過時間、縦軸が COD を示す。黒線が BPM での測定結果、赤線が電源の電流変動である。200Hz 以下の電流変動の主成分によって、入射のたびに变化する COD を説明できる事が分かった。

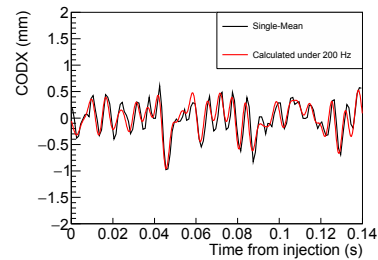


Figure 9: The distribution of the COD without synchrotron oscillation.

4. 閉軌道歪みの評価

COD の影響として、3 次共鳴の大きさを評価した。J-PARC MR のアーク部にはクロマチシティー補正のための六極電磁石が設置されており、六極電磁石内部で COD があると陽子は四極磁場を感じる。これによりベータトロン振動が変調されて 3 次共鳴の強さが変わる。今回は利用運転でのベータトロンチューン $(\nu_x, \nu_y) = (21.35, 21.45)$ に対して $3\nu_x = 64$ を満たす 3 次共鳴のドライビングタームの大きさを評価した。ドライビングターム $(G_{3,0,64})$ は

$$G_{3,0,64} = \left| \frac{\sqrt{2}}{24\pi} \sum_{j=1}^{72} \sqrt{\beta_{x,j}^3} K_{2,j} e^{i(3\phi_{x,j} - (3\nu_x - 64)\theta_j)} \right| \quad (3)$$

で計算した。ここで $\beta_{x,j}$ は j 番目の 6 極電磁石でのベータ関数、 $K_{2,j}$ は 6 極磁場の強さ、 $\phi_{x,j}$ はベータトロン振動の位相、 θ_j は軌道軸上での位相角を表す。各 6 極磁石でのパラメータは SAD を用いて計算した。SAD の入力には偏向電磁石用電源の出力電流モニターの値を利用した。各測定点での電流変動による 2 極磁場のズレを SAD に入力し、各点でのドライビングタームを計算した。計算結果を Fig. 10 に示す。横軸がドライビングターム、縦軸がイベント数を示す。この結果よりドライビングタームが最大で 2.5×10^{-2} になる事が分かった。一方で利用運転での三次共鳴のドライビングタームは 5.7×10^{-2} であり、電流変動によるドライビングタームが無視できないほど大きい事が分かった。

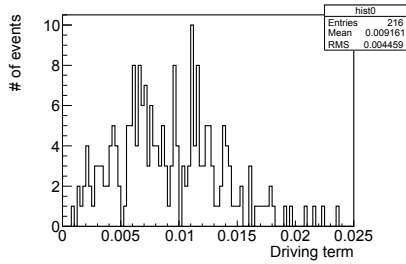


Figure 10: The distribution of the driving term.

5. 閉軌道歪み補正の検討

J-PARC MRには水平方向の蹴り角を与えるステアリング電磁石が93台設置されている。このステアリング電磁石を使ってリアルタイムでCODを補正する事を検討した。まず何台のステアリング電磁石があれば各電源によるCODの乱れが補正できるかを検討した。検討にはビームの軌道シミュレーションSADを用いた。電源電流によるCODを再現し、SADで用意されている軌道補正関数を用いてステアリング電磁石での補正を評価した。検討の結果、一つの偏向電磁石用電源が分担する箇所ごとに7台、合計で42台のステアリング電磁石を用いれば補正できる事が分かった。これはFig. 4に示したようにディスページョン関数が7つの節を持った周期構造となっており、節ごとに補正を行わなければならないためである。補正結果の一例をFig. 11に示す。横軸が軌道軸上での位置、縦軸が水平方向のCODを示す。黒が電源電流から再構成したCODの例、赤がCOD補正後のCODである。大きなCODを生み出している箇所でもCODが0.1 mmほどに減少しており、解析で仮定したBPMの位置分解能(0.2 mm)と比べて十分な補正が達成できている。

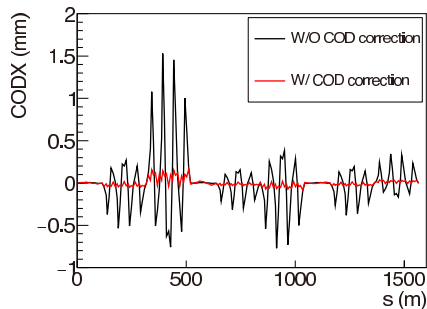


Figure 11: The distribution of the COD without and with the COD correction.

ステアリング電磁石の位置でビームを蹴る事で電源電流によるCODを補正できる事が分かったので、実際のステアリング電磁石が補正可能な性能を保持しているかを確認した。補正に必要な2極磁場の計算には、ビーム入射期間中の偏向電磁石用電源の出力電流モニター値を用いた。電流モニター値を I_{meas} 、

電流指令値を I_{ref} として補正に必要な2極磁場 K_0 を

$$K_0 = (I_{\text{meas}} - I_{\text{ref}}) \cdot C_{\text{Str}} \quad (4)$$

と計算した。ここで補正磁場は $K_0 = BL/B\rho$ で定義される量、 C_{Str} はディスページョンが一番大きい場所でのステアリング電磁石による補正量を電流で規格化した値である。この補正係数 C_{Str} はSADを用いて計算した。各データ点における補正磁場を重ね書きした結果をFig. 12に示す。この図より補正磁場は $\pm 1.55 \times 10^{-5}$ の広がりを持つ事が分かった。一方でステアリング電磁石で励磁可能な補正磁場はステアリング電磁石用電源の性能から、 $4 \times 10^{-5}/\text{1ms}$ と決まっている。従ってFig. 12の 3σ 程度の領域をステアリング電磁石で補正可能だと分かった。また電流変動の主成分が200 Hz以下である事を加味すると 3σ の領域を十分補正可能である。

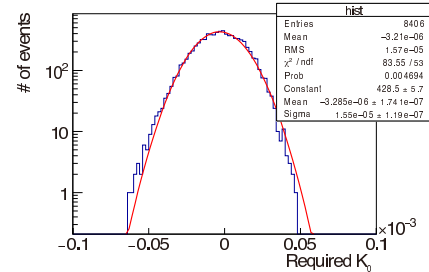


Figure 12: The distribution of the required K_0 for the COD correction.

6. まとめ

J-PARC MRでの速いビーム取り出しではビーム入射と加速初期でのビームロスが問題となっており、電源電流の変動がビームロスに寄与している可能性があった。そこで偏向電磁石用電源出力の変動の寄与を評価するため、CODを測定した。測定の結果、時間変動するCODが偏向電磁石用電源に由来する事が明らかになった。時間変動するCODに由来する三次共鳴を評価したところ、無視できない寄与を与える場合があると判明した。このCODをステアリング電磁石で補正可能かどうかを電源の出力電流モニター値とビーム軌道シミュレーションを用いて検討した。93台あるステアリング電磁石のうち、42台を用いる事でCODが十分補正できる事が分かった。我々が開発してきたリアルタイム補正システムを入力値としてステアリング電磁石用電源に与えることで十分補正可能である事を示す事ができた。

参考文献

- [1] Y. Kurimoto *et al.*, “Real-time betatron tune correction with the precise measurement of magnet current”, IEEE Trans. Nucl. Sci. **66**, 7 (2019); <https://ieeexplore.ieee.org/document/8572781>
- [2] D. Naito *et al.*, “Real-time correction of betatron tune ripples on a slowly extracted beam”, Phys. Rev. Accel. Beams.

22, 072802 (2019); <https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.072802>

- [3] S. Igarashi *et al.*, “Challenges to higher beam power in J-PARC: Achieved performance and future prospects”, in Proc. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC’ 19), Melbourne, Australia, May. 2019, pp. 6-11; <http://inspirehep.net/record/1743328/files/moyplm1.pdf>