

偏向電磁石電流リップルによるコヒーレントシンクロトロン振動

COHERENT SYNCHROTRON OSCILLATION BY BENDING MAGNET CURRENT RIPPLE

富澤 正人 ^{*,A)}, 武藤 亮太郎 ^{A)}, 杉山 泰之 ^{A)}, 田村 文彦 ^{B)}

Masahito Tomizawa ^{*,A)}, Ryotaro Muto ^{A)}, Yasuyuki Sugiyama ^{A)}, Fumihiko Tamura ^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization/J-PARC Center

^{B)} J-PARC Center/Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The J-PARC Main Ring has been modified to ramp up beam power by reducing acceleration time. Six independent power supplies for main bending magnets have been newly manufactured together with main quadrupole and chromaticity correction power supplies. Ripple reduction adjustments for these power supplies have not yet been adequately carried out. In particular, the current ripples of two out of the six power supplies are significantly larger than before the modification. A notable synchrotron oscillation in the time pattern was observed in the 2023 beam tests. In order to investigate the reason, the bending field ripple effect is implemented in a standard synchrotron oscillation mechanism, and then longitudinal tracking simulations turn by turn have been conducted. The simulated result is compared with the measured synchrotron oscillation data.

1. はじめに

J-PARC メインリングは、加速時間を短くして加速パターンの繰り返しを上げることにより、ビーム出力を増強する改造を行ってきた [1]。四極電磁石電源、クロマチシティー補正電源は、新規製作の他に、一部改造前の電源を別のファミリーで再利用することになった。6台の独立した偏向電磁石 (BM) 電源は新規に製作された。これらの BM 電源に関するリップル低減調整は、現在までのところ十分にはなされていない状態にある。特に6台のうち2台の電源の電流リップルは大きく、フラットトップ (FT) において 20~100 Hz の周波数領域で顕著なピークを持つ。2023 年の夏前に行われた速い取り出しと遅い取り出しのためのビーム調整において、ビーム運動量の時間変化に顕著な振動パターンが観測された。この原因として、RF 制御の更新 [2] に伴う RF 位相のフィードバックの調整が不十分なために発生している可能性が指摘されている。一方、この現象は BM の磁場リップルにより周長が変化し、シンクロトロン振動がコヒーレントに励起されたという推測の妥当性を追求することにした。まず BM の磁場リップルによる周回時間のずれを通常用いられるシンクロトロン振動を表す式に組み込んだ。6台の BM 電源の各々からの磁場リップルの寄与が簡単な形で現すことができることがわかった。この定式化をもとに、1ターンごとの縦方向のトラッキングシミュレーションを実施した。単一の BM リップル周波数を持つ場合に加えて、ビーム試験時に取得された BM リップルデータを用いたシミュレーションも実施した。単一の周波数を持つ場合のシンクロトロン振動の特徴的な振る舞い、実際の BM リップルデータを用いた場合の計算結果とビームを使って測定されたシンクロトロン振動の比較について述べる。今回の検討は遅い取り出しの 5.2 秒周期のパターンのみを対象とした [3]。

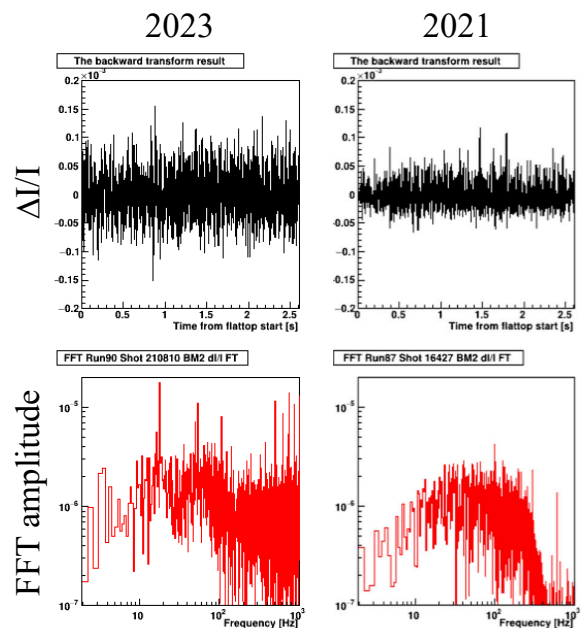


Figure 1: BM2 current, deviation and spectrum.

2. BM リップルの現状

MR の高繰り返し化のための主電源アップグレード後の 2023 年前半に実施された 5.2 秒サイクルの遅い取り出し調整運転における、FT 中の BM2 の電流偏差 ΔI と電流 I の比、この比の周波数スペクトルを Fig. 1 左側に示す。右側は比較のための主電源アップグレード前 (2021 年) の 5.2 秒サイクルのプロットである。横軸時間の原点は FT 開始タイミングである。6台の BM 電源の中で、アップグレード後の BM1 と BM2 の電流リップルは電源調整が不十分なためアップグレード前と比較して、FB から FT の全領域で大きなリップルが発生している。Figure 1 からわかるように、FT のタイミング

* masahito.tomizawa@kek.jp

では 20~100 Hz 領域に大きなピークが存在する。 $\Delta I/I$ で言うと $\pm 1 \times 10^{-4}$ 程度と読み取れる。

Figure 2 は、主電源アップグレード前後の遅い取り出し調整運転において、RF 周波数等の調整を行った後のコヒーレントなビーム運動量振動のプロットである。運動量のずれはアーク部の dispersion が大きい位置での複数の BPM の ΔR 信号から求めている。横軸の原点は P1 と言われるタイミングで最初のビーム入射タイミングである。入射は横軸の 0.12 秒で完了し、その 0.1 秒後から加速が開始され、1.53 秒で加速が終了する。FT は実際には 2.61 秒間続くが便宜上途中でカットしている。Figure 2 上図はアップグレード前、下図はアップグレード後のものである。RF 電圧パターン等については次の章の Fig. 3 に示されている。RF 位相フィードバック（規格化）ゲインは、上図・下図とも、 $t=0.1$ 秒まではゼロ、 $t=0.23\sim 0.40$ 秒間は適正值の半分、 $t=0.50\sim 1.50$ 秒間は適正值に設定されている。 $t=1.54$ 秒以降は上図のゲインはゼロ、下図は適正值のままである。位相フィードバックゲインが適正值である $t=0.5\sim 1.5$ 秒の領域で比較すると、アップグレード後の下図の方が振動振幅が顕著に大きいことがわかる（上図の単調ドリフトは [4] を参照）。

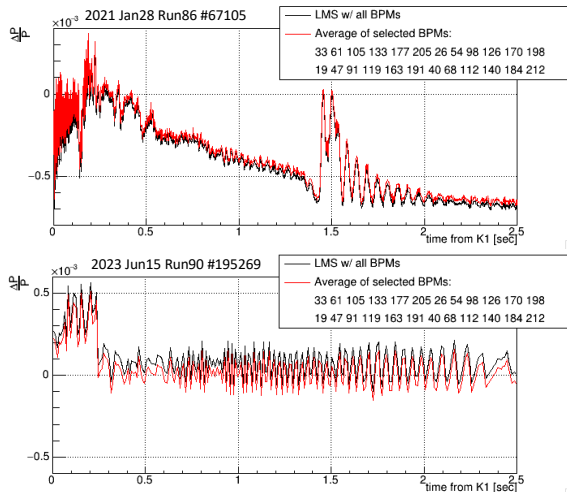


Figure 2: Measured $\Delta p/p$ comparison.

3. BM リップルを含んだ縦方向運動

偏向電磁石 (BM) のビームダクト内に発生する実際の磁場は電源電流リップルにより時間的に変動している。磁場のずれの比ずれを $\Delta B/B$ とする。まずは簡単のため、 $\Delta B/B$ は全ての BM で同じとする。

BM の曲げ角を θ_{BM} 、 i 番目の BM の平均 dispersion を $\langle D_i \rangle$ とすると momentum compaction factor α_c は

$$\alpha_c \simeq \frac{1}{C} \sum_i \langle D_i \rangle \theta_{BM} \quad (1)$$

と書ける。また、BM の曲げ角のずれを $\Delta \theta_{BM}$ とすると、周長のずれは

$$\Delta C_{BM} \simeq \sum_i \langle D_i \rangle \Delta \theta_{BM}, \quad (2)$$

と表される。 $\Delta \theta_{BM} = -\theta_{BM} \Delta B/B$ の関係と Eqs. (1)、(2) から

$$\frac{\Delta C_{BM}}{C} = -\alpha_c \frac{\Delta B}{B} \quad (3)$$

という単純な式が導かれる。通常用いられる運動量のずれの比 $\Delta p/p$ からの周長のずれ ΔC_P への寄与と合わせると、

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta C_P}{C} + \frac{\Delta C_{BM}}{C} = \alpha_c \left(\frac{\Delta p}{p} - \frac{\Delta B}{B} \right) \quad (4)$$

となる。従って、周回時間を T 、ずれを ΔT とすると、

$$\frac{\Delta T}{T} = \alpha_c \left(\frac{\Delta p}{p} - \frac{\Delta B}{B} \right) - \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta p}{p} \quad (5)$$

となる。ここで γ はローレンツ因子である。

MR の 96 台の BM は、実際には 16 台ずつに分割され 6 台の独立した電源で励磁されている。従って電源リップルは各々の電源で同じとは限らない。ただし 6 つに分割された BM の光学 (D_i) の対称性は保たれている。この条件では各々の電源からのリップルが違っていても、合計の周長のずれは単純な関係

$$\frac{\Delta C_{BM}}{C} = -\alpha_c \left(\frac{\Delta B}{B} \right)_{av}, \quad (6)$$

が成り立つ。ここで磁場のずれの比の平均を

$$\left(\frac{\Delta B}{B} \right)_{av} = \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta B_1}{B_1} + \dots + \frac{\Delta B_6}{B_6} \right) \quad (7)$$

とした。従って BM 分割の効果を取り入れる場合、Eq. (4) の中で Eq. (6) を使うことにより、Eq. (5) は

$$\frac{\Delta T}{T} = \alpha_c \left(\frac{\Delta p}{p} - \left(\frac{\Delta B}{B} \right)_{av} \right) - \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta p}{p} \quad (8)$$

と書くことができる。したがって分割された場合のリップルの評価も比較的容易にシミュレーションで評価することができる。

4. シミュレーション結果

3 章で述べた BM のリップル効果を取り入れた式を用いて縦方向の 1 ターンごとの単粒子トラッキングシミュレーションを行った。単粒子の初期条件は位相、運動量のずれともゼロとした。momentum compaction factor α_c は -0.001 とした。Figure 3 は遅い取り出しの 5.2 秒サイクルでの RF 電圧、同期粒子の運動量、シンクロトロン振動数 f_s の時間パターンである。 $t=0$ は P0 タイミングで最初のビームバッチが入射するタイミングの 10 ミリ秒前である。 $t=1.54$ 秒が加速終了で、その後 $t=4.15$

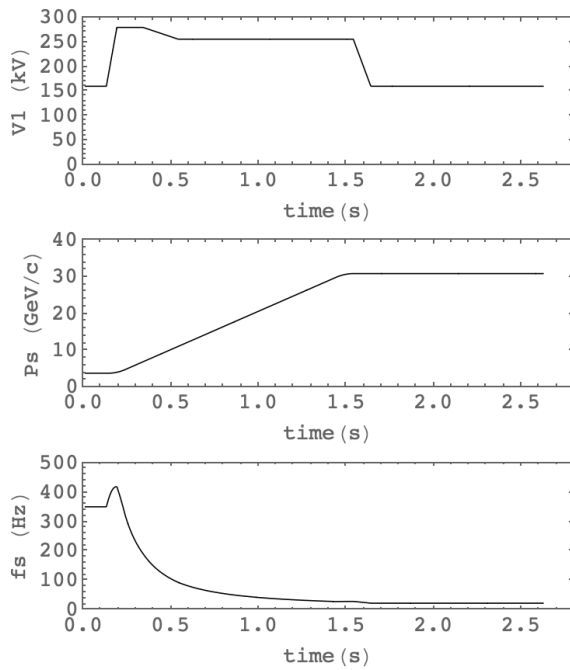


Figure 3: Longitudinal RF patterns.

秒まで FT は続くがその途中までがプロットされている。加速開始時の RF 電圧 280 kV で f_s は 400 Hz を超えるがその後 RF 電圧は 256 kV となり加速終了時には 29 Hz まで下がる。遅い取り出し運転時にはデバンチさせるために、FT で RF 電圧はゼロになる。一方ビーム調整時には FT の電圧を 160 kV にして調整を行うことがある。このパターンはその際のものであり f_s は 23 Hz である。

まず個々の BM のリップルが入射から FT まで同じ大きさ $\Delta B/B = \pm 8 \times 10^{-5}$ で周波数が 20 Hz と 60 Hz、リップル位相は同じ条件での結果を Fig. 4 に示す。リップル周波数が 20 Hz の場合、加速とともにシンクロトロン振動の振幅がゆっくりと増大している。これは加速とともに f_s がリップル周波数に近づいたためだと考えられる。 f_s が 23 Hz となる FT 領域では、うなり現象と思われる振動が見える。うなりの周期は f_s とリップルの周期の差にほぼ対応している。リップル周波数が 60 Hz の場合、加速の途中でシンクロトロン振動の振幅が急速に増大する。このタイミングで f_s がリップルと同じ周波数 60 Hz に近くなる。以上から、シンクロトロン振動に BM のリップルが加わると、単振動に強制振動が加わる描像と同様な運動が励起されると考えることができる。

次に、実際のビーム調整時に 10 kHz のサンプリングで取得された個々の BM 電源の電流 I と電流偏差 ΔI のパターンデータを使ったトラッキングシミュレーションを試みた。用いたデータは、Fig. 2 のプロットと同じショット番号である。ビームが BM ダクト内で感じる $\Delta B/B$ は $\Delta I/I$ と同じと仮定した。この仮定は周波数が低い場合には良い近似になる。6 台の BM 電源の $\Delta I/I$ は個々に 2 kHz の LPF を通し、その後 6 台の平均を求めた。Equation (8) を使って 1 ターンごとにトラッキングシミュレーションを行うために、6 台の平均

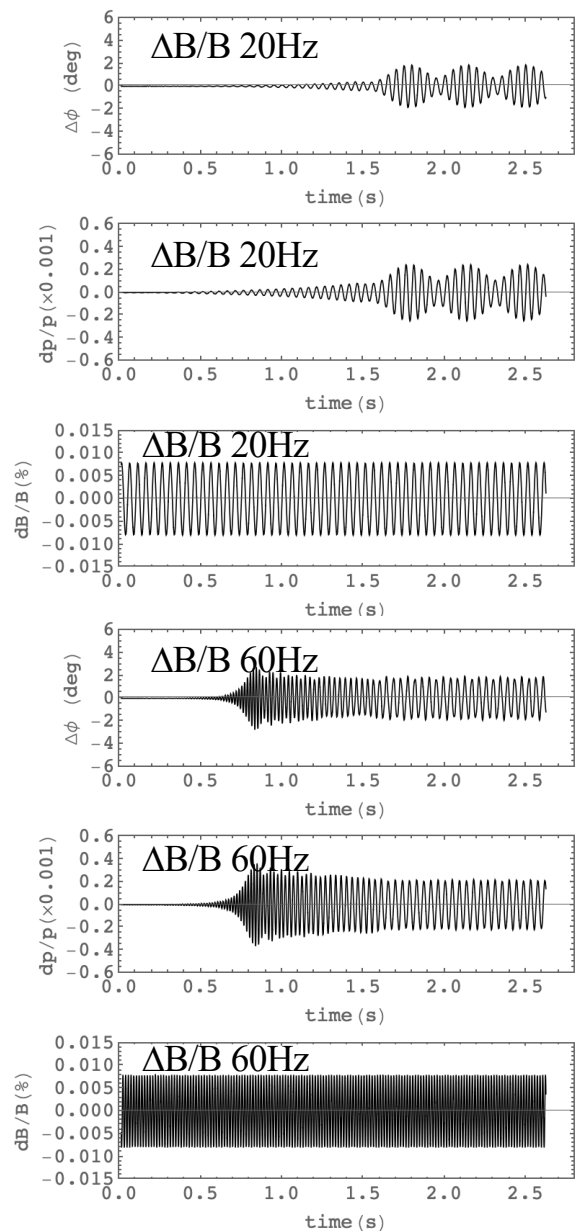


Figure 4: Longitudinal tracking simulation using a single frequency ripple.

をとった 10 kHz の $(\Delta B/B)_{av}$ データ点から、3 次のスプライン補間でターンごとの値を求めた。Figure 5 はこの結果を示す。 $(\Delta B/B)_{av}$ は入射のタイミングで最も大きく加速とともに小さくなっている。実際のリップルとは違うノイズを含んでいる可能性があり、結果には影響を及ぼさない可能性がある。 $(\Delta B/B)_{av}$ が大きい入射の領域では、シンクロトロン振動はそれほど増大していない。加速初期から振幅は大きくなるが途中で小さくなるタイミングがあることがわかる。入射タイミングを除く FT を含む領域での振動パターンは、振幅も含めて Fig. 2 のパターンを大まかに再現していると言える。

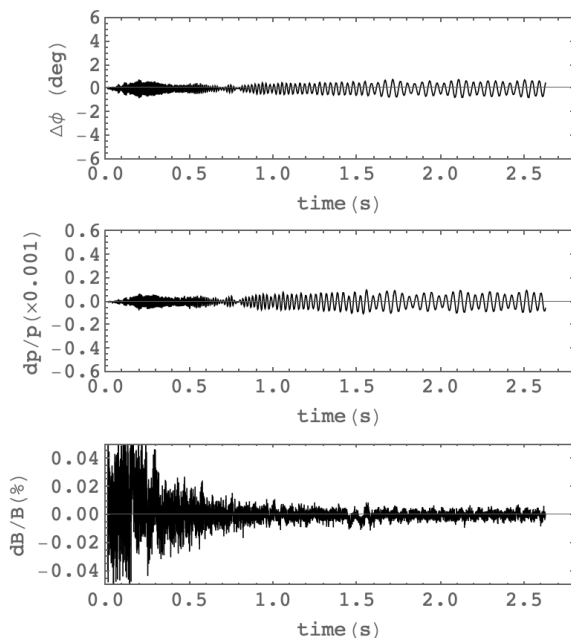


Figure 5: Longitudinal tracking simulation using measured BM ripple data.

5. まとめ

J-PARC メインリングは、加速時間を短くし、加速パターンの繰り返しを上げることにより、ビーム出力を増強するための改造を行ってきた。その目的で6台の独立したBM電源は新規に製作された。ただこれらの電源に関するリップル低減調整はまだ十分にはなされていない状態にある。BM電源の電流リップルによる磁場変動は周長の変化をもたらし、その結果周回時間が変動する。この時間変動と運動量のずれの両者を含んだ時間変化を定式化した。その式を使い単粒子トラッキングシミュレーションを実施した。単純なリップル条件での結果から、シンクロトン振動数とリップル振動数が近くなるとシンクロトン振幅が増大したりうなりに類似した現象が生じることがわかった。これらは単振動における強制振動の振る舞いに類似する。さらにビーム調整時に記録された磁場データを使ってトラッキングシミュレーションを行った。加速途中以降のシンクロトン振動パターンは、実測された振動パターンを大まかには再現できていることがわかった。この結果は観測されている運動量のコヒーレント振動はBMのリップル起因であることを示唆する。現在のところ、この振動によるビームロス増加は観測されていない。実際の遅い取り出し運転ではデバンチするためRF電圧をゼロにして遅い取り出しを開始する。デバンチ直前のシンクロトン振動による運動量のずれがデバンチ後の運動量を定めるため、その量が大きく加速サイクルごとにばらつく実験に支障をきたす可能性がある。次回の遅い取り出し運転では、加速時間が短くなり加速電圧は510 kVになりシンクロトン振動数は41 Hzに増える。この条件でのBM電源リップルのシンクロトン振動への影響を注意深く見守る必要

がある。

謝辞

BM電流と偏差のアーカイブデータの抽出方法に関して、MR制御グループの山田秀衛氏に丁寧に教えていただきました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Morita, “Upgrading magnet power supply system in J-PARC main ring”, in *Proc. IPAC’23, Venezia*, 05 2023, pp. 3715-3718. doi:10.18429/jacow-ipac2023-wepm082
- [2] Y. Sugiyama *et al.*, “J-PARC MR 次世代 LLRF 制御システム”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Oct. 18-21, 2022, pp. 92-96. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/WE0B/WE0B07.pdf
- [3] M. Tomizawa *et al.*, “Slow Extraction Operation at J-PARC Main Ring”, in *Proc. HB’21, Batavia, IL, USA*, Oct. 2021, pp. 219-224. doi:10.18429/JACoW-HB2021-THDC1
- [4] M. Tomizawa *et al.*, “Long-Term Beam Position and Angle Stabilities for the J-Parc Main Ring Slow Extraction”, in *Proc. IPAC’20, Caen, France*, May 2020, pp. 31-34. doi:10.18429/JACoW-IPAC2020-TUVIR15