

J-PARC MR におけるイントラバンチ・フィードバックのシステム更新のための 評価

EVALUATION FOR UPDATING THE INTRA-BUNCH FEEDBACK AT J-PARC MAIN RING

吉村 宣倅 ^{*A)}, 外山 毅 ^{B)}, 小林 愛音 ^{B)}, 中村 剛 ^{B)}, 岡田 雅之 ^{B)}, 菖蒲田 義博 ^{C)}, 中家 剛 ^{A)}
Nobuyuki Yoshimura ^{* A)}, Takeshi Toyama ^{B)}, Aine Kobayashi ^{B)}, Takeshi Nakamura ^{B)},
Masashi Okada ^{B)} Yoshihiro Shobuda ^{C)}, Tsuyoshi Nakaya ^{A)},
^{A)} Kyoto University,
^{B)} KEK,
^{C)} JAEA

Abstract

The J-PARC Main Ring (MR) is being upgraded from the current 510 kW to 1.3 MW. To cope with the increased beam intensity, the Intra-bunch feedback system (IBFB) with beam position monitor (BPM), FPGA, and stipline kicker needs to be upgraded to support high frequency up to about 200 MHz. In order to examine the performance requirements for the IBFB equipment, the damping rate of the current betatron oscillation suppression was measured, indicating that the current IBFB may have a severe upper performance limit. The emittance at the extraction was measured and compared with the normalized emittance during utilization operation, and the upper limit of acceptable emittance was set for future adjustment. In addition, the benchmark test of a simulation program under development was performed, and the beam instability in the simulations was found to be close to the theoretical.

1. はじめに

大強度ビーム加速器では、ビームによって誘起されたウェイク場がビーム自身に働くことでコヒーレントなベータatron振動が励起され、振動振幅がビームパイプのアーチャーを超えてビームロスが発生する。この横方向ビーム不安定性 (インスタビリティ) がビーム強度の増強に制限を与える。J-PARC Main Ring (MR) には、ビームロスを防ぐために、フィードバック制御によってベータatron振動を減衰させるシステムが導入されている。またビーム入射などで発生するベータatron振動を高速で減衰させ、ビームの実効サイズを小さくすることができる [1]。

バンチ内フィードバック (Intra-Bunch feedback, IBFB) が 2014 年に導入され [2] 不安定性の抑制は大幅に改善されたが、導入当時のビームパワー約 250 kW からさらなるビーム増強の結果、最大ビームパワー 500 kW 前後では横方向ビーム不安定性が再び制限要因の一つとなっている。

主電磁石電源のアップグレードが7月に完了し MR 繰り返し周期の短縮 (2.48 s \Rightarrow 1.36 s) により、2022 年内にビームパワー 750 kW を目標としている。そして、RF システムのアップグレードにより MR 繰り返し周期の短縮 (1.36 s \Rightarrow 1.16 s) とバンチあたりの粒子数を増やすことで、最終的に 1.3 MW を達成することを目標としている。さらなるビームパワーで陽子ビームを安定に供給し、ビーム強度に依存した不安定性が増加することによるビームロスを低減するために、さらなるビーム安定化のためのシステムが必要である。

2. バンチ内フィードバックシステムの概要

MR での IBFB はニュートリノ/Aポート分岐点下流の直線部に設置された、テーパー電極 BPM [3]、FPGA を用いた高速信号処理回路 (iGp12H)、3 kW アンプ、ストリップラインキッカー [4] で構成されている。

このシステムは、BPM からの信号を差分した信号 (Δ 信号) を RF 周波数の 64 倍の周波数でサンプリングした後、処理回路で差分してビーム位置を測定する。そして、FIR フィルターを通してバンチスライスごとにベータatron振動を検出し、補正のためのキック量を計算する。フィードバック信号をアンプで増幅してキッカーにかけることで、実際にビームを補正する。

このシステムは各 RF バケットを 64 スライスに分割してサンプリングし、フィードバックをかけることができるため、バンチ内振動の補正に適している [2]。バンチ長を 60~80 m とすると、1 バンチは 22~29 スライスに対応する。

各スライスに対して 4 タップデジタル FIR フィルターによりベータatron振動を抽出し、各スライスにキック信号 $y_m[n]$ をフィードバックする。

$$y_m[n] = g \sum_{k=0}^4 b_k x_m[n-k] \quad (1)$$

ここで g はゲイン、 $x[n]$ は n ターン目の入力、 $y[n]$ は n ターン目の出力、 b_k は k ターン前の入力に掛けるフィルター係数である。

$$b_k = \sin(k\omega T_s + \Delta\phi) - \Delta \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^3 \sin(k\omega T_s + \Delta\phi) \quad (3)$$

* yoshimura.nobuyuki.76w@st.kyoto-u.ac.jp,
nyoshimu@post.kek.jp

ω は周波数、 T_s はサンプリング時間、 $\Delta\phi$ は位相である。FIR フィルタ変数のゲイン g 、周波数 ω 、位相 $\Delta\phi$ を調整することで、ビーム条件に応じてバンチ内振動を抑制し不安定性を抑制することができる。

3. フィードバックシステムの高度化

ニュートリノ振動実験 T2K による CP 対称性の破れの発見と CP 位相 δ_{CP} の測定のため、ビームパワーを 1.3 MW への増強する必要があると、主電磁石電源のアップグレードがおこなわれた [5]。最終的に繰り返し周期は 1.16 s、取り出し時の 8 バンチの陽子数は 3.3×10^{14} ppp (protons per pulse) となり、加速陽子数は現在から 30% ほど増加する予定である。六極電磁石を用いた上で、現在 2.4×10^{14} ppp (8 バンチ, IBFB なし) における不安定性の増大率 growth rate は $\sim 4100/s$ であり、IBFB がこの増大を抑制していると考えられる。しかし、 3.3×10^{14} ppp (8 バンチ, IBFB なし) まで外挿すると、growth rate は $\sim 5600/s$ 程度になると想定され、IBFB がこれを抑制できるか調査する必要がある [6]。

大強度 $N_B = 3.1 \times 10^{13}$ ppb (protons per bunch) ($\times 2$ バンチ, IBFB なし) においては Fig. 1,2,3 のように、 ~ 100 MHz 程度の高周波成分の割合が増えているタイミングで、ビーム振幅情報に相当する量 (4.3 章の計算と同義) も増加し、ビームロスも発生している。

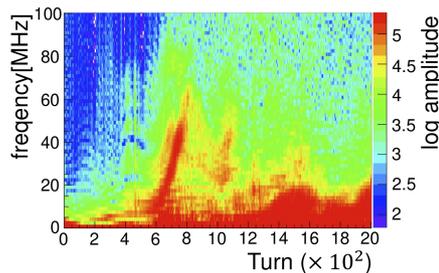


Figure 1: Frequency components when instability is occurring at $N_B = 3.1 \times 10^{13}$ ppb.

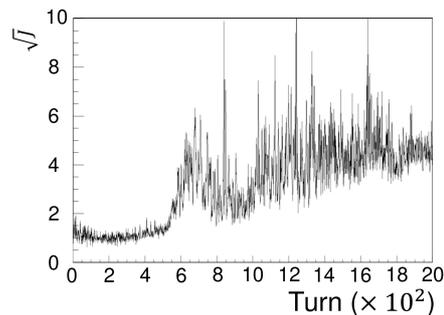


Figure 2: Average at Courant-Snyder invariant \sqrt{J} in bunch, which corresponds beam amplitude.

IBFB が失敗する原因と想定される解決策は、

1. 現在の処理周波数である加速 RF 周波数の 64 通倍 (107-110 MHz) では、ナイキスト周波数以上の周波数のインスタビリティ (バンチ内振動) を抑制できないことが原因である。これは処理周波数を現在の 2 倍の 128 通倍 (214-220 MHz) にすれば、50 MHz 以上の不安定性も抑制できると予想されている [6]。

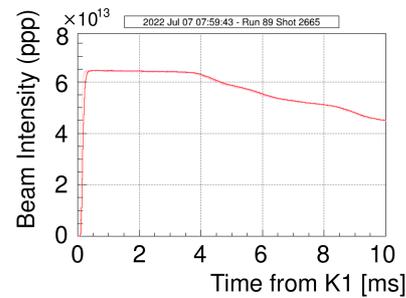


Figure 3: Beam intensity variation of 2 bunches. 10 ms corresponds to about 2000 turns in J-PARC MR.

2. IBFB の設計が不十分であるため、ナイキスト周波数以上の周波数であるエイリアシング信号のフィードバックがおこなわれてしまい、高周波成分が逆に増幅されてしまうことが原因である。これは IBFB の入力部にローパスフィルターを導入し高周波成分を削減してエイリアシングによる悪影響を防ぐことで、50 MHz 以下の不安定性が発展するより前の段階で抑制できると考えられる。

これらの調査のために、現行のフィードバックシステムの抑制性能を確認した。

4. 3 GEV DC モードでのビーム試験

当初は主電磁石電源アップグレード後の最大ビーム強度である約 6×10^{13} ppb ($\times 8$ バンチ, IBFB なし) における growth rate の測定を目標としていた。しかし、試験期間の制約のために今回可能な条件で現行システムの特性の調査を行い、今後の検討材料にすることにした。

4.1 ビーム条件

2022 年 7 月 6,7 日に、エネルギー 3 GeV で繰り返し周期 1.32 s、ビーム強度は $N_B = 1.2 \times 10^{12}$ ppb ($\times 1$ バンチ, IBFB あり) と $N_B = 1.1 \times 10^{13}, 1.6 \times 10^{13}, 2.1 \times 10^{13}$ ppb ($\times 2$ バンチ, IBFB あり) でビーム試験を行った。主なビームパラメータは、バンチ長 240 ns、チューン (ν_x, ν_y) = (21.35, 21.45), (21.36, 21.42), (21.37, 21.41)、クロマティシティ (ξ_x, ξ_y) = (-2.1, -3.48), (-5.7, -7.6)、シンクロトロンチューン $\nu_s = 1/480$ である。本試験期間中は bunch train tune shift 補正 [7] が適用されていなかったため、ビーム強度に依存して垂直・水平のそれぞれ ± 0.02 程度のずれが発生していた。また XY カップリングが大きく光学系の対称性がずれた状態だったことにより共鳴線の影響を受け、IBFB が作動していてもビームロスが発生していた (Fig. 4)。

4.2 入射振動の抑制

入射セブタムを調整することにより、入射時に垂直・水平方向のそれぞれに数 mm 程度の誤差を与える [8]。IBFB により、入射誤差によるベータatron振動を数百ターン程度で抑制できることを確認した。IBFB がオンの時にはインスタビリティによるビームロスは発生しなかったが、IBFB がオフかつビーム強度が 1.1×10^{13} ppb より大きい場合にはインスタビリティによるビームロスが発生していた。バンチ形状や長さ、ビームロスは wall

current monitor (WCM) でも測定した。

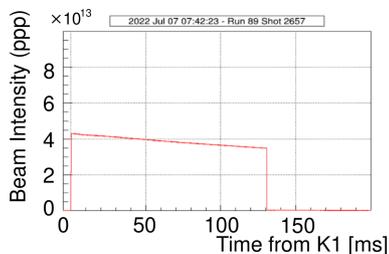


Figure 4: Beam intensity variation of 2 bunches while IBFB ON.

4.3 解析方法

信号の読み出しはオシロスコープ Lecroy HDO (6104 MS) で行った。垂直・水平方向用の BPM 信号を読み出す 4 電極があり、 $\Delta = BPM_{上} - BPM_{下}$ 、 $\Sigma = BPM_{上} + BPM_{下}$ のそれぞれについてスライス方向に積分したうえで、線形オフセットをそれぞれ補正したものを差信号 $\int_{\text{slice}=0}^{\text{slice}=a} \Delta[n]$ 、和信号 $\int_{\text{slice}=0}^{\text{slice}=a} \Sigma[n]$ とする。そして、ビーム位置を差信号と和信号の比から導出した。

$$x(\text{slice} = a)[n] = 46 \times \frac{\int_{\text{slice}=0}^{\text{slice}=a} \Delta[n]}{\int_{\text{slice}=0}^{\text{slice}=a} \Sigma[n]} [\text{mm}] \quad (4)$$

Figure 5 で示される差信号 $\int_{\text{slice}=0}^{\text{slice}=a} \Delta[n]$ は IBFB の FIR フィルタの入力に用いられる。それぞれ同じターン(時間)におけるビーム位置は Fig. 6 で示され、横方向のダイポール振動をしながら、300~1000 ターン(約 1.5~5 ms)では IBFB によって縦方向の内部振動を 50 MHz 以下に抑制している。

そして damping rate は(後の growth rate も)ビーム位置情報からスライスごとに計算した振幅情報に相当する Courant-Snyder invariant $\sqrt{J} = A(s)$ のバンチ内平均を用いて、垂直・水平方向、バンチ毎に求めた [9]。

n ターンでのリングの 1 点における構成粒子の位置 $x[n]$ は、リング 1 周での位相進みを $2\pi\nu$ と、数ターン間は定数として $A[n] = A$ とおくと、

$$x[n] = A[n] \cos(2\pi\nu n + \psi) = A \cos(2\pi\nu n + \psi) \quad (5)$$

と表され、また 1 ターン前後の位置は、

$$x[n \pm 1] = x[n] \cos(2\pi\nu) \mp A \sin(2\pi\nu n + \psi) \sin(2\pi\nu) \quad (6)$$

となるため、 $\sqrt{J} = A(s)$ は 3 ターン分の位置情報 $x[n-1]$, $x[n]$, $x[n+1]$ を用いて表すことができる。

$$\sqrt{J} = A = \sqrt{\left(\frac{x[n+1] - x[n-1]}{2 \sin(2\pi\nu)}\right)^2 + x[n]^2} \quad (7)$$

これを用いると複数のモードが混ざったり、head-tail 振動によりバンチ内で位相変化が発生しても、振幅の増減を容易に判定できる。時間発展に伴いビーム位置と \sqrt{J} はそれぞれ Fig. 7a,7b のように減衰する。

4.4 Damping rate の評価

Damping rate の測定結果は、Fig. 8 であり、ビーム強度に依存している。ビーム強度が高くなるとフィードバック系への入力信号が大きくなり、フィードバックゲインが大きくなる。また、 2.0×10^{13} ppb での X 方向の damping rate が下がっている。ゲインを維持してビーム強度を上げるとインスタビリティが発生するため、フィードバックゲインを 0.6 倍に下げたためだと考えられる。これはフィードバックのゲインを上げて抑制効果を高めようとしたときに、逆にフィードバック自体が不安定となりフィードバックがビームの振動を励起する状況 [10] に陥った可能性がある。5000 /s 以上の damping rate を実現するため、パラメータの調整方法やアップグレードについて検討する必要がある。

4.5 エミッタンスの比較

ビームのインスタビリティによるエミッタンス増大がニュートリノラインへどのように影響するかの調査を行っている。アポルトラインにおける Multi-Ribbon Beam Profile Monitor (MRPM) [11] を用いて 1σ エミッタンスの測定をおこなった。また、これを 2021 年に測定された 3-50BT とニュートリノラインにおける規格化エミッタンス $\epsilon_{norm} = \beta\gamma\epsilon$ と比較した [12, 13]。これらの測定結果を Fig. 9a,9b,9c に示す。3-50 BT とアポルトラインの比較では、本試験での共鳴条件によりエミッタンスが増大している。3-50 BT とニュートリノラインの比較では、加速中に規格化エミッタンスが約 5π mm mrad 程度増大しているが、これは空間電荷効果と高次の磁場成分による共鳴が原因だと考えられる。

ニュートリノラインにおけるエミッタンスはニュートリノ実験側から、陽子ビームを当ててニュートリノを生成する黒鉛標的においてアップグレード後も現状を維持して欲しいと要請されている。そのため、MR の運転パラメータの調整で MR 周回中における規格化エミッタンス増加分を約 5π mm mrad (25%) 以下に抑える必要がある。

5. 粒子シミュレーション

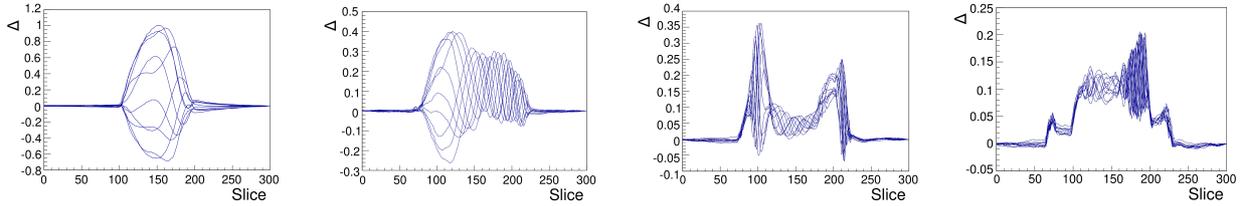
IBFB の更新後の性能を予測するためにはシミュレーションによる計算が不可欠である。以前までのシミュレーションの妥当性を確認するためにベンチマークにおける理論値との比較をおこなった。

5.1 シミュレーションの設定

陽子ビームの設定は 1 バンチ、バンチ長 $\hat{z} = 30\text{m}$ 、マクロ粒子数 1.0×10^6 、シンクロトロンチューン $\nu_s = 1/480$ であり、縦方向位相空間は Air Bag モデル近似を用い、スリッページファクター $\eta = -0.0578$ 、インピーダンス源として一定量のウェイク W_0 [V/Cm] がバンチ長だけ伝搬するコンスタントウェイクモデルを用いた。各マクロ粒子は空間離散化の際に三角形の縦方向ビーム近似の重ね合わせとして表現している [14]。

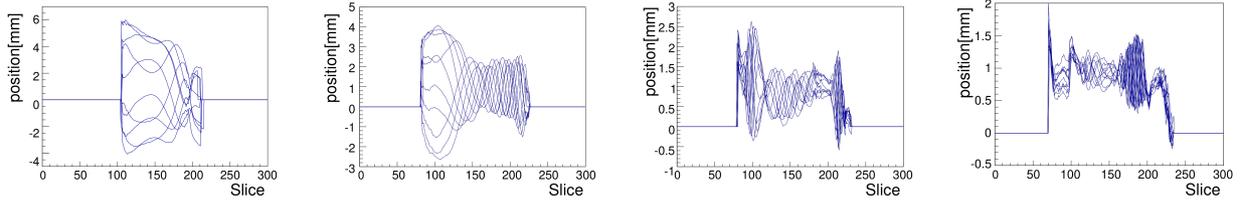
5.2 モード結合不安定性の閾値

コンスタントウェイクの場合、モード結合不安定性が発生する閾値は無次元パラメータ Υ を用いて以下のよ



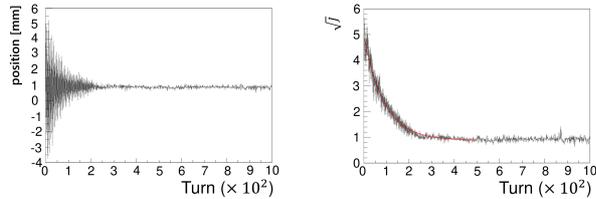
(a) turn=66~75 (0.3ms after injection) (b) turn=150~159 (0.8ms after injection) (c) turn=300~309 (1.6ms after injection) (d) turn=600~609 (3.2ms after injection)

Figure 5: Time evolution of difference signal $\int_{\text{slice}=0}^{\text{slice}=a} \Delta[n] = \int_{\text{slice}=0}^{\text{slice}=a} (BPM_{\text{上}}[n] - BPM_{\text{下}}[n])$.



(a) turn=66~75 (0.3ms after injection) (b) turn=150~159 (0.8ms after injection) (c) turn=300~309 (1.6ms after injection) (d) turn=600~609 (3.2ms after injection)

Figure 6: Time evolution of beam position $x(\text{slice} = a)[n] = 46 \times \frac{\int_{\text{slice}=0}^{\text{slice}=a} \Delta[n]}{\int_{\text{slice}=0}^{\text{slice}=a} \Sigma[n]}$ [mm].



(a) Average at beam position in bunch (b) Average at Courant-Snyder invariant \sqrt{J} in bunch

Figure 7: Damping of betatron oscillation at each turn.

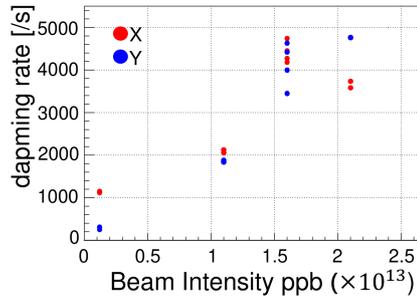


Figure 8: The measured damping rate of injection error. うに表される [15].

$$\begin{aligned} \Upsilon &= \frac{\pi N_B r_0 c W_0}{4\omega_s \gamma T_0 \omega_\beta} = \frac{\pi e N_B c W_0}{4\omega_s 2\pi\nu_\beta E/e} \\ &= 2.9 \times 10^{-26} N_B W_0 < 1.8 \end{aligned} \quad (8)$$

ウェイク強度 $W_0 = 1.0 \times 10^{12}$ V/Cm、ビーム強度 $N_B = 5.0 \times 10^{13}$ 、クロマチシティ $\xi = 0$ においてモード結合不安定が観測されたが、 $N_B W_0$ がそれ以下の場合には不安定性が観測されなかった。シミュレーションにおいてモード結合が発生する $N_B W_0$ の閾値は理論値に対

して 20 % 程度小さいことがわかった。

5.3 head-tail 不安定性

モード結合不安定が発生しないパラメータである、ウェイク強度 $W_0 = 1.0 \times 10^{12}$ V/Cm、ビーム強度 $N_B = 4.0 \times 10^{13}$, 1.0×10^{13} において、クロマチシティ ξ を変化させることで head-tail 不安定性を発生させ、その growth rate を計測した。ここでは 4 章と同様に Eq.(7) を用いて growth rate の計算をおこなった。コンスタントウェイクの場合、モード l における growth rate の理論値は以下のように表される [15].

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau^{(l)}} &= -\frac{N_B r_0 c W_0}{\gamma T_0 \omega_\beta} \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \frac{1}{\omega'} J_l^2((\omega' - \frac{\xi}{\eta}\omega) \frac{\hat{z}}{c}) \\ &= -9.0 \times 10^{-23} N_B W_0 \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \frac{1}{\omega'} J_l^2((\omega' - \frac{\xi}{\eta}\omega) \frac{\hat{z}}{c}) \end{aligned} \quad (9)$$

Growth rate の理論値とシミュレーション結果を Fig. 10,11 に示した。これらの比較からモードが切り替わるクロマチシティについては一致するが、growth rate は理論値より 1.2~2 倍程度大きくなっていることがわかる。原因としては、複数のモードが混合することにより growth rate が正しくフィッティングできていない可能性や、Air bag モデルによりバンチ端で粒子密度が高くなっている所でウェイクの立ち上がり計算が正しく計算できていない可能性が考えられる。

6. まとめ

J-PARC MR において IBFB によるベータトロンの抑制率 damping rate を測定した。そして、取り出し時のエミッタンスの測定を行い、利用運転時の規格化エミッタンスとの比較をおこなった。1.3 MW に向けた

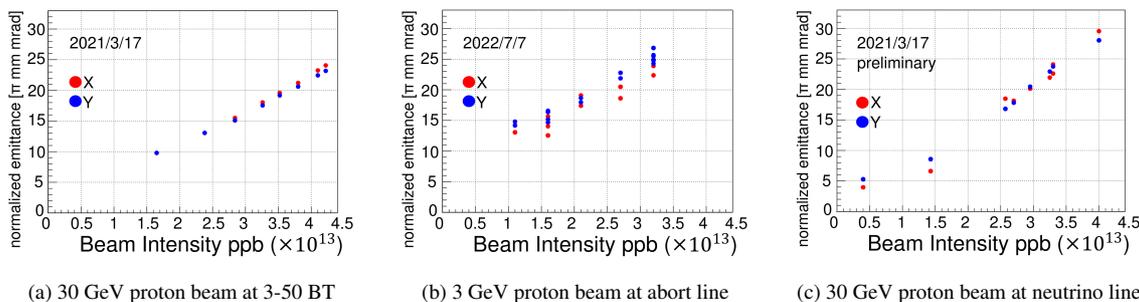


Figure 9: Comparison of normalized emittance for injection and extraction.

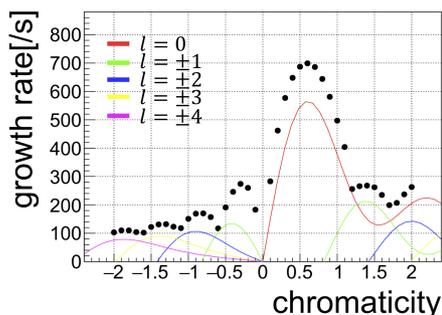


Figure 10: Comparison of growth rates simulated and calculated as a function of chromaticity at $N_B = 4.0 \times 10^{13}$ ppb.

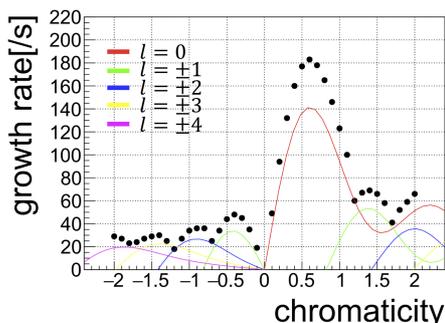


Figure 11: Comparison of growth rates simulated and calculated as a function of chromaticity at $N_B = 1.0 \times 10^{13}$ ppb.

IBFB の広帯域化の方針を策定するため、開発中のシミュレーションプログラムのベンチマークテストを行った。

今後は、BPM からの出力 (差信号) にローパスフィルタを導入することで、システム周波数が対応する約 50 MHz 以下の周波数に限定した場合のフィードバック性能を検証する予定である。また、加速中は RF クロックの同期が iGp12 とビーム間でずれを起こし、抑制性能の低下を引き起こすために遅延時間の調整が必要となるため、主電磁石電源交換後初めての加速試験において加速中のフィードバック系のタイミング調整とエミッタンス測定を計画している。シミュレーションに関しては、今後 MR における growth rate の測定結果や PyHEADTAIL [16] を用いたシミュレーション計算結果 [17] との比較を行う。また、ウェイク場モデルのマルチターン化、空間電荷効果等の粒子運動の非線形性、複数バンチ、フィードバック機器の周波数特性の影響を考慮した詳細な検討が必要である。

謝辞

RF 操作と WCM 測定を杉山泰之氏、チューンとクロマティシティーの設定と操作を安居孝晃氏に協力していただきました。3-50BT でのエミッタンス測定データを五十嵐進氏、ニュートリノラインでのエミッタンス測定データを坂下健氏に提供していただきました。他にも実験や議論に関わってくださった佐藤洋一氏をはじめとする関係者の皆様に感謝いたします。

本研究は JST 科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業 JPMJFS2123 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Nakamura *et al.*, “Traceverse Bunch-by-bunch feedback system for the Spring-8 storage ring”, EPAC2004, Lucerne, Switzerland, p.2649 (2004).; <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e04/PAPERS/THPLT068.pdf>
- [2] K. Nakamura *et al.*, “Intra-bunch feedback system for the J-PARC Main Ring”, IPAC2014, Dresden, Germany, p.2786, (2014).; <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2014/papers/thoaa03.pdf>
- [3] K. Nakamura *et al.*, “Fabrication of tapered coupler for Intra-bunch feedback system in J-PARC Main Ring”, PASJ2014, p.58 (2014).; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAOM/SAOM03.pdf
- [4] M. Okada *et al.*, “Development of the DLC coated beam exciter”, PASJ2014, p.242 (2014).; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/M00L/M00L15.pdf
- [5] T. Koseki, “Upgrade Plan of J-PARC MR - Toward 1.3 MW Beam Power”, IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, p.966 (2018).; <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2018/papers/tupak005.pdf>
- [6] T. Toyama *et al.*, “Analysis and upgrade plan of the tranverse Intra-bunch feedback system in the J-PARC MR”, PASJ2019, p.1130, (2019).; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI040.pdf
- [7] A. Kobayashi *et al.*, “Bunch train tune shift study for higher beam power at J-PARC MR”, PASJ2018, p.60 (2018).; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEOM/WEOM01.pdf
- [8] T. Sugimoto *et al.*, “Upgrade of the injection kicker system for J-PARC Main Ring”, IPAC14, Dresden, Ger-

- many, p.526 (2014).; <https://accelconf.web.cern.ch/IPAC2014/papers/mopme069.pdf>
- [9] T. Nakamura, internal document.
- [10] T. Nakamura, “Transverse and Longitudinal Bunch-by-bunch Feedback for Storage Ring”, IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, p.1198 (2018).; <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2018/papers/tuzgbd2.pdf>
- [11] K. Sato *et al.*, “Development and evaluation of Multi-Ribbon Profile Monitor at J-PARC MR abort line”, PASJ2019, p.1118 (2019).; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI036.pdf
- [12] S. Igarashi, internal document.
- [13] K. Sakashita, internal document.
- [14] G. Sabbi, CERN SL/95-25(AP), (1995).
- [15] A. W. Chao, “Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators”.
- [16] A. Oeftiger *et al.*, “An Overview of PyHEAD-TAIL”, CERNACC-NOTE-2019-0013, (2019).; <https://cds.cern.ch/record/2672381/files/CERN-ACC-NOTE-2019-0013.pdf>
- [17] A. Kobayashi *et al.*, “Study of the transverse beam instability caused by the resistive-wall impedance at the J-PARC Main Ring”, PASJ2020, p.684 (2020).; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FRPP/FRPP06.pdf