

# J-PARC RCS 用イントラバンチ型ビーム不安定性抑制装置の検討 DESIGN OF AN INTRA-BUNCH TRANSVERSE BEAM STABILIZER FOR J-PARC RCS

山田逸平 <sup>\*,A)</sup>, 菖蒲田義博 <sup>A)</sup>, 小林愛音 <sup>B)</sup>, 中村剛 <sup>B)</sup>, 外山毅 <sup>B)</sup>

Ippei Yamada <sup>\*,A)</sup>, Yoshihiro Shobuda <sup>A)</sup>, Aine Kobayashi <sup>B)</sup>, Takeshi Nakamura <sup>B)</sup>, Takeshi Toyama <sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup> J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## Abstract

J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) achieved the designed 1 MW stable operation. For the next beam power upgrade plan, 1.5 or 2 MW, a counter measure for transverse beam instability is under consideration. As the first step, the instability damper is designed to mitigate the instability due to the current primary impedance source, which is the extraction kicker magnet. The damper system kicks a beam based on the signals in some past turns obtained by the beam position monitor (BPM). The conversion from BPM signals to the kick is calculated as an FIR filter. The whole feedback damper system with the FIR filter was evaluated in Z domain, and the designed system can damp an oscillation up to 0.25 mm amplitude with a faster rate than the typical instability growth rate because of the kicker power limitation.

## 1. 研究背景

J-PARC 3 GeV シンクロトロン (RCS) は設計値である 1 MW における安定な利用運転を達成している。このような強度の運転においても、0.1% 程度以下の非常に少ないビームロスでのビーム輸送を実現している [1]。次のステップとして、1.5 MW ないしは 2 MW での利用運転を目指した検討を開始した。本論文では、特にビーム不安定性への対策方法について述べる。

J-PARC RCS のビーム不安定性の主なソースは出射キッカー電磁石の横（水平）方向インピーダンスである [2]。建築当初からキッカーインピーダンスによる不安定化は懸念されており、1 MW 運転時のビーム不安定性対策として、キッカー電磁石のインピーダンス低減措置を実施してきた。昨年度の夏季メンテナンスで上記対策は完了し、不安定性が生じることなく運転可能なパラメータ空間の拡張に成功した [3]。また、数値計算上では、2 MW 運転でも不安定化することなく運転可能なパラメータの存在は確認できている。一方で、ビームの大強度化により共鳴の回避がより厳しくなることから、さらに広域なパラメータ選択の可能性を広げておく必要がある。また、現在主要なインピーダンスの低減には成功したものの別のインピーダンス源の顕在化や、今後の加速器構成要素の変更等における新たなインピーダンス源の発生に対して有効な不安定性対策として、フィードバック型の重心振動抑制装置の検討を開始した。本論文では初期段階の設計として、現在のビーム不安定性の詳細、使用機器の検討、フィードバック制御システムの設計に関して報告する。

## 2. J-PARC RCS のビーム不安定性

先述の通りこれまでのインピーダンス低減措置により、十分広域な空間で運転パラメータを決定することができるようになったものの、ビーム不安定化が生じるパラメータも存在する。本章では実際に生じるビーム不安

定性がキッカーインピーダンスにより説明できることを、周波数の観点から述べる。

J-PARC RCS の主要なインピーダンスソースである出射キッカー電磁石のインピーダンスの周波数特性は、Table 1 に示す周波数で共振するような構造である。Sacherer の Growth rate の式によると横方向不安定

Table 1: Real part of the kicker impedance in total of eight kicker magnets. The double signs are in the same order.

±295 kHz	±39.4 kΩ/m
±890 kHz	±104 kΩ/m
±1.49 MHz	±116 kΩ/m
±2.09 MHz	±124 kΩ/m
±2.70 MHz	±130 kΩ/m
±3.29 MHz	±91.5 kΩ/m
±3.84 MHz	±76.0 kΩ/m
±4.36 MHz	±21.4 kΩ/m

性が成長するモードは

$$\omega = \omega_0(\nu_\beta + Mk + \mu + m\nu_s) \quad (1)$$

と書ける [4]。ここで、 $\omega_0$  はビームバンチの周回周波数、 $\nu_\beta$  はベータトロンチューン、 $M$  はバンチ数、 $k$  は任意の整数、 $0 \leq \mu \leq M - 1$  はバンチ結合モード、および  $\nu_s$  はシンクロトロンチューンである。J-PARC RCS の場合、 $\omega_0/(2\pi) = 614\text{--}837$  kHz、 $\nu_\beta = 6\text{--}6.5$  (周回周波数の変化とは対応しない)、 $M = 2$  より  $\mu = 0, 1$  であり、不安定性が生じる加速後半で  $\nu_s = 0.0005$  である。シンクロトロンチューンはベータトロンチューンと比べて十分小さいため無視すると、RCS の不安定化モードは

$$\omega = \omega_0(\nu_\beta + 2k) \text{ or } \omega_0(\nu_\beta + 2k + 1) \quad (2)$$

となる。ただし、横方向不安定化するモードは上記周波数が負の領域 ( $k \leq -1$ ) である。ビームは加速により常に周回周波数が変化し、さらにビームロス低減のためにベータトロンチューンを変化させているため、不安定化

\* ippei.yamada@j-parc.jp

モードは時間的に変化する。インピーダンスがスパイク構造を持つことから、不安定性が成長するには少なくとも Eq. (2) のモードが負のインピーダンススパイクを与える周波数と一致する必要がある。

まず、Fig. 1 にビームパワー 1 MW 時のビーム不安定性が生じるパラメータにおけるビーム重心位置モニタ (BPM) の波形を示す。図よりビーム不安定性は入射から 10 ms 以降で生じていることがわかる。また、この不安定性の成長時間は約 1 ms (約 800 ターン) であると読み取れる。Figure 2 に Eq. (2) の右辺と、左辺としてのキッカーインピーダンスの時間に対する比較を示す。インピーダンスの周波数はスパイク構造の周波数幅を考慮して、2本のラインで表示している。ビーム不安定性が生じている 10 ms 前後に着目すると、7 ms のタイミングで  $(k, \mu) = (-2, 0)$  のモードが  $\omega = 2.70$  MHz、9 ms のタイミングで  $(k, \mu) = (-3, 0)$  のモードが  $\omega = 4.36$  MHz、および 11 ms のタイミングで  $(k, \mu) = (-2, 1)$  のモードが  $\omega = 2.10$  MHz のインピーダンスと接触していることがわかる。また、不安定性の成長時間 1 ms に対し、十分なインピーダンススパイク内の滞在時間があることも確認できる。以上のことから、観測されたビーム重心振動はキッカー電磁石のインピーダンスが原因であるとして説明可能である。

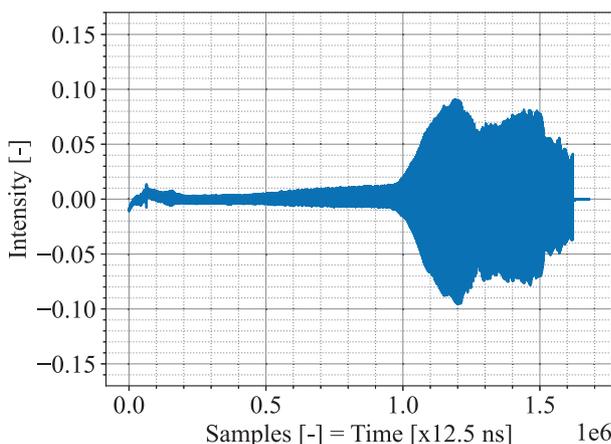


Figure 1: The waveform of the differential signal detected by a BPM from injection to extraction.

### 3. 不安定性抑制装置の検討

今後の J-PARC RCS の更なる安定化および大強度化に対するビーム不安定性対策として、フィードバック型不安定性抑制装置の検討に関して述べる。不安定性抑制装置の概要としては、BPM を用いて重心振動を検出し、適切なキックを計算し、専用キッカーにてビーム重心にキックを与える、というものである。まずは現在のキッカーインピーダンス由来の不安定性を抑制することを目標として、以下の設計を行った。

#### 3.1 ハードウェア

上述の通り、現状のビーム不安定性の解析から、主要な成長モードは数 MHz であることがわかった。この周波数は RCS の典型的なビームバンチ長 (100–500 ns) と

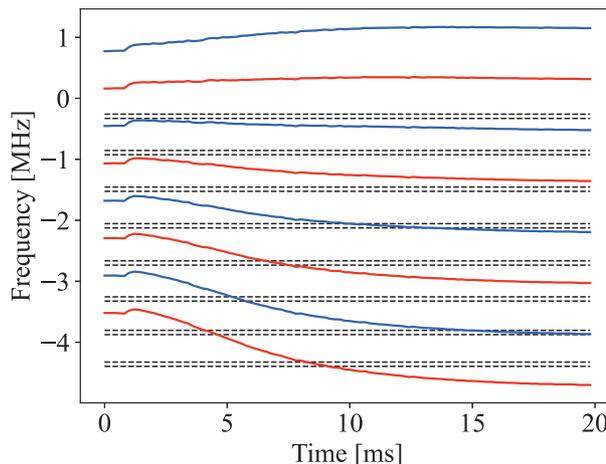


Figure 2: Comparison between the growth modes and the kicker impedance. The orange and the blue curves show the  $\mu = 0$  and  $\mu = 1$  mode, respectively, and the black broken line shows the kicker impedance.

同程度かそれ以上であるため、bunch-by-bunch 型ではなく、intra-bunch 型のシステムとし、その目標帯域は周回周波数程度である 500 kHz から、主要なインピーダンス成分の周波数より高い 10 MHz とした。このような仕様を満たすハードウェアは本来、個別に設計すべきであるが、ちょうど 500 kHz から 10 MHz 帯で使用可能な装置系として、ベータトロンチューン測定に使用している専用の BPM およびエキサイタが既に実装されているため、その使用可能性について検討した。

BPM は四枚の曲率半径 148.5 mm の 60 度分の扇型で長さ 250 mm の湾曲電極で構成される静電誘導型であり、設計上の測定分解能は 0.1 mm である。また、信号読み出し回路は高いインピーダンスで信号を受けることで、BPM の持つハイパスフィルタ特性のカットオフ周波数を下げ、微分波形ではなく、バンチ形状が直接取得可能な方式となっている。一方、エキサイタは BPM 同様の扇型の湾曲電極 (角度 76 度、長さ 586 mm) で構成されるストリップライン型である。エキサイタ用電源は各電極に 500 W を供給可能であり、キック角は最大で  $0.1 \mu\text{rad}$  と見積もられる。

BPM で得られた信号は、放射線からの保護の観点から制御室に設置する演算回路で処理され、その出力がエキサイタに輸送される。そのため、通信時間による遅延の考慮が重要となる。BPM およびエキサイタから制御室までの信号電装距離は合計でおよそ 300 m ほどであり、通信時間としては  $1.5 \mu\text{s}$  程度必要となる。一方、BPM-エキサイタ間は約 0.4 ターン分であり、RCS の周回周期は約  $1.2 \mu\text{s}$  以上であることから、最低 2 ターンの遅延が必要であり、猶予は  $2.8 \mu\text{s}$  である。つまり、各素子の遅延を含めて演算時間を  $1.3 \mu\text{s}$  以内とする必要がある。

#### 3.2 BPM 波形からキック信号への変換手法の設計

不安定性抑制装置の演算処理として主となるのは、BPM で取得した波形からキック信号への解析である。我々は、エキサイタ位置でのビーム重心の傾きの時間波

形を、BPM で取得した  $N$  ターン分の情報から推測し、その逆符号でキックを与えることとした。ビーム重心の傾き波形の推測方法としては様々な手法が考えられるが、リアルタイムかつ演算時間が固定である、ということを見ると、未知パラメータに対して線形化された関数でフィッティングする方法が候補に挙がる [5,6]。振動波形のフィッティングのため基底関数をフーリエ成分とする：

$$X_{\text{bpm}}[n] = \sum_{i=0}^I C_i e^{j(2\pi n\nu_i + \psi_i)}. \quad (3)$$

ここで、 $n$  はターン数、 $\nu_i$  はベータトロンチューン、 $\psi_i$  は初期位相進みとする。フーリエ成分の各色に対してフィッティング操作は線形なため、以下では単色に着目して、添え字  $i$  は無視する。フィッティングのパラメータは  $(C, \nu, \psi)$  であり、これらについて線形な形に変換する必要がある。初期位相  $\psi$  についてはオイラーの公式で変形し、係数  $C$  とまとめてパラメータを置き直すことで線形化できる。一方、チューン  $\nu$  に関しては直接は線形化できないが、事前の測定や数値計算によりある程度予想できるため、その予想値  $\tilde{\nu}$  を用いて  $\nu = (1 + \delta)\tilde{\nu}$  と表現し、 $\nu = \tilde{\nu}$  周りでテイラー展開する。さらに、展開の各項  $\delta^k$  は  $k$  に対して独立ではないものの、それぞれの項は独立とみなすことで線形なパラメータとし、ターンに関する係数をまとめてパラメータ  $\mathbf{p} = (\dots, p_k^c, p_k^s, \dots)^T$  として置き直す。結局、

$$X_{\text{bpm}}[n] \sim \sum_{k=0}^K \{ (p_k^c n^k \cos 2\pi n\tilde{\nu} + p_k^s n^k \sin 2\pi n\tilde{\nu}) + j(p_k^c (-n)^k \cos 2\pi n\tilde{\nu} - p_k^s n^k \sin 2\pi n\tilde{\nu}) \} \quad (4)$$

$$\equiv (A^R + jA^I)\mathbf{p} = A\mathbf{p} \quad (5)$$

とできる。 $K$  はテイラー展開の次数を表しており、exp 関数の展開の収束半径は無有限大であるため、 $K$  が大きくなるにつれて無限に広い区間のフィッティングが可能となる。しかし、項数が増えることによる数値計算上の誤差や、 $\delta^k$  の各項を独立とみなすことで自由度が増えているため、展開次数  $K$  の増加に対する誤差の減少はある程度で下限を取る。このフィッティング関数  $X_{\text{bpm}}[n]$  を、実際に測定される BPM 信号のターンに対する列  $\mathbf{x}_{\text{bpm}}$  を用いて求めれば良い。BPM 信号として得られるデータは実部のみであるため、未知ベクトル  $\mathbf{p}$  は上式の実部を用いて

$$\mathbf{p} = A^{R+} \mathbf{x}_{\text{bpm}} \quad (6)$$

と表現できる。ここで  $A^+$  は  $A$  の一般化逆行列または Moore-Penrose の擬似逆行列である。よって  $n$  ターン目の BPM 信号は過去の  $N_{\text{tap}}$  ターン分の BPM 測定データ

$\mathbf{x}_{\text{bpm},k}$  を用いて、

$$X_{\text{bpm}}[n] \sim \sum_{k=N_d}^{N_{\text{tap}}+N_d-1} \{ (A^R A^{R+})_{nk} + j(A^I A^{R+})_{nk} \} x_{\text{bpm},n-k} \quad (7)$$

と予想できる。ここで、 $N_d$  はキックを与えるまでの遅延ターン数である。最後に、 $n$  ターン目に与えるべきキック信号は、Eq. (7) に BPM-エキサイタ間の位相差の効果  $e^{j\psi_{\text{be}}}$  及び適当なゲイン  $g$  をかけて実部を取ったものとなる。ゲイン  $g$  に関しては 3.3 節にて後述する通り、フィードバックループを考慮したシステム全体の安定性から決定する。Equation (7) の形からわかるように、キック波形は過去  $N_{\text{tap}}$  ターン分の BPM 信号と各ターンに応じた係数の積の和で表現できる、つまり BPM 信号に対する FIR フィルタの形に帰着する。FIR フィルタは周波数特性を持つため、その詳細を検証する必要がある。ここで、FIR フィルタの周波数応答は実際のビームのベータトロンチューンに対する応答を表し、設計（予想）チューン  $\tilde{\nu}$  と実際のビームのチューン  $\nu$  にずれがあるとフィッティングがうまくいかず、想定とは異なるキックを与えることを意味している。

FIR フィルタ  $h_k$  のフーリエ変換は

$$\hat{H}(\nu) = \sum_{k=N_d}^{N_{\text{tap}}+N_d-1} h_k e^{-2\pi k\nu} \quad (8)$$

と定義できる。今、FIR フィルタを決定するための任意定数は、テイラー展開の次数  $K$  及び用いる情報数（ターン数、タップ数） $N_{\text{tap}}$  である。これらに対する周波数応答の変化を確認して、FIR フィルタの設計とする。その他の任意パラメータは J-PARC RCS で実装する場合を想定して  $\psi_{\text{be}} = 5.12\pi$ 、 $N_d = 2$  とした。また、フィルタゲインは  $g = 1$  として規格化した。設計チューン（フィッティング関数）としては二色  $\tilde{\nu} = 0, 0.4$  の線形和とした。ただし、 $\tilde{\nu} = 0$  のオフセット項は BPM 信号のノイズやビームの閉軌道と BPM の電気中心のずれを表現するものであり、キック信号には反映しないようにした。具体的には、Eq. (6) の行列  $A^{R+}$  はフィッティングを表現する行列であるためオフセット項を反映し、Eq. (7) の  $A^R, A^I$  はキックを計算するための行列であるためオフセット項を表す成分を 0 とした。オフセット項は未知数が係数  $C$  のみとなるので、未知数の数は合計で  $1 + 2(K + 1)$  個である。設計目標としては、RCS のチューンは加速とともに変化するように設定されており、典型的には  $\nu = 0.4 \pm 0.05$  の領域で一定な特性が望ましい。

まず、展開次数を  $K = 1$ （未知数の数は 5）と固定して、用いるターン数  $N_{\text{tap}}$  を 5-11 の範囲で変化させた時の周波数応答を Fig. 3 に示す。縦軸は位相とゲインを組み合わせた指標  $\text{Re}\{\hat{H}(\nu)\}$  であり、実際にビームに与えられるキックのベクトルを表す。この指標が正の領域では安定化の方向、負の領域では不安定化の方向にキックを与えることを意味する。ただし、3.3 節にて後

述するが、正の領域であっても絶対値が大きすぎると不安定化を引き起こすため、必ず安定化を示すわけではない。Figure 3 より、用いる情報数を増やすと設計チューン  $\nu = 0.4$  を中心に帯域が狭くなり、また全体的なゲインの大きさの変動が小さくなるのがわかる。つまり、BPM のノイズによるキックを防ぐという観点から不要な帯域のゲインは小さく、かつ必要な帯域でゲインが一定、ということを見ると、帯域が狭くなりすぎない範囲で極力大きなターン数を選ぶことが望ましいことがわかる。

次に用いるターン数を  $N_{\text{tap}} = 1 + 2(K + 1) + 2$  として展開次数  $K$  を 0-3 の範囲で変化させた場合の周波数応答を Fig. 4 に示す。展開次数を増やすと設計チューンを中心により広範囲で平坦な特性に近づくようになるのがわかる。ただし、平坦範囲が広がるものの、J-PARC RCS のチューン変化に対応可能なほどの領域ではない。また、次数が高いと平坦な領域の外側でのゲインの増減が大きくなる。これを抑制するには、より過去の情報を使う必要があるが、チューンや周回周波数の変動等による誤差により、フィッティングの精度が悪化する。つまり、J-PARC RCS を目的とする場合は展開次数は高くしても有利とは言えない、ということがわかる。

以上の結果から、RCS のチューン変化に対応可能なフィルタは、展開次数  $K = 1$ 、タップ数  $N_{\text{tap}} = 7$  or  $9$  のようなパラメータが良いと考えられる。詳細には次節の議論を含めて決定すべきであるが、本論文では以下  $K = 1, N_{\text{tap}} = 7$  として、解析の一例を示す。

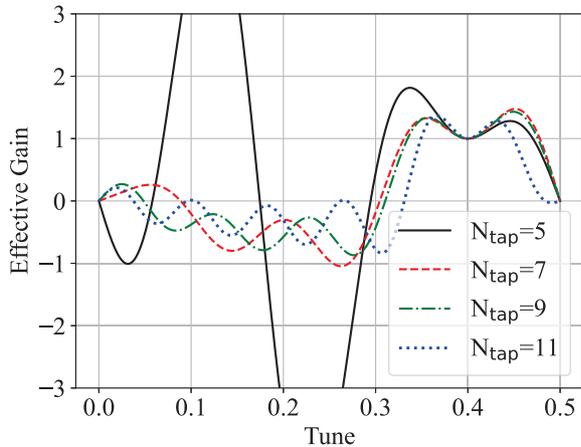


Figure 3: Tune response of the FIR filter against change of the number of tap.

### 3.3 フィードバックループの安定性とダンピングタイム

BPM 信号からキックへの変換が FIR フィルタで記述できたため、デジタル制御理論を用いて、設計した FIR フィルタで安定な動作をすること及び FIR フィルタゲインに対するダンピングタイムの応答を検証した。フィードバック制御システムとして、Fig. 5 のようなループを考えた。以下、Z 変換後の関数は全てハット記号  $\hat{\cdot}$  で表現し、ハット記号のない大文字は行列を表現するものとする。まず、目標は BPM 位置での重心振動振幅が  $\hat{R}(z)$

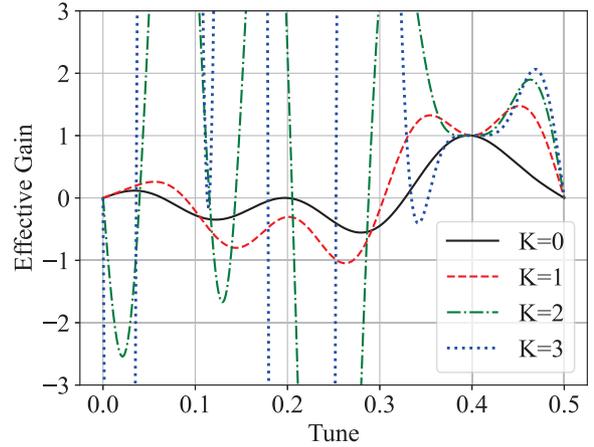


Figure 4: Tune response of the FIR filter against change of the expansion order.

になることとした。たまたまあるターン  $n$  で重心が目標値になる場合があるが、FIR フィルタは複数ターンの情報を用いるため、実質的には  $\sum_{n=0}^{N_{\text{tap}}} (x_n - r_n) = 0$  となるように制御されると考えられる。次に目標  $\hat{R}(z)$  と現在位置のモニタ読み値  $\hat{K}_b(z)\hat{X}(z)$  の差を FIR フィルタに入力し、その出力  $\hat{\Theta}(z)$  をエキサイタ  $\hat{K}_b(z)$  を介してビームに与える。そのキック自信は BPM 位置まで転送行列  $M_{\text{EB}}$  により輸送される。さらに一周前の BPM 位置のビーム情報は転送行列  $M$  によって一周して、上記キックの影響と合成されて現在の状態となる。ビーム不安定性を与えるための最初のキック（またはインピーダンスの効果）や各機器に入出力されるノイズの効果は含まれていないが、任意の点に印加することで評価できる。目標値  $\hat{R}(z)$  に対する現在位置  $\hat{X}(z)$  を結ぶ伝達関数  $\hat{G}(z)$  は、輸送行列があるため、直接的には評価されないビーム重心の傾き  $\hat{X}'$  も考慮して書き下し、重心位置  $\hat{X}$  のみで表現すると、

$$\hat{G}(z) = \frac{\hat{K}_e \{m_{12}^{\text{EB}} + (m_{22}^{\text{EB}} m_{12} - m_{12}^{\text{EB}} m_{22})z^{-1}\} \hat{H}}{\hat{D}} \quad (9)$$

$$\hat{D} = 1 + (-m_{11} - m_{22})z^{-1} + z^{-2} + \hat{K}_e \hat{K}_b \{m_{12}^{\text{EB}} + (m_{22}^{\text{EB}} m_{12} - m_{12}^{\text{EB}} m_{22})z^{-1}\} \hat{H} \quad (10)$$

と書ける。伝達関数の分母が 0 となる極を調べることで目標値に対する現在情報の安定性が得られる。FIR フィルタは  $z^{-(N_d + N_{\text{tap}} - 1)}$  次の関数となるため、Eq. (10) から極は  $N_d + N_{\text{tap}}$  個となる。時間領域  $n$  では、これらの極  $z_p$  に対し  $\sum_i z_{pi}^n$  の関数となるため、全ての極の大きさが 1 未満であれば振動は安定に減衰する。また、 $z_p = e^{a+ib}$  と表現した時の  $-1/a$  [turn] がダンピングタイムを表す。各極が作る減衰振動波形の総和が全体の波形となるため、全ての極の中で最大のダンピングタイムを与えるものを制御システムのダンピングタイムと定義した。また簡単のため、エキサイタおよび BPM を表す関数は定数係数 ( $\hat{K}_e = \hat{K}_b = 1$ ) とし、転送行列に用いる

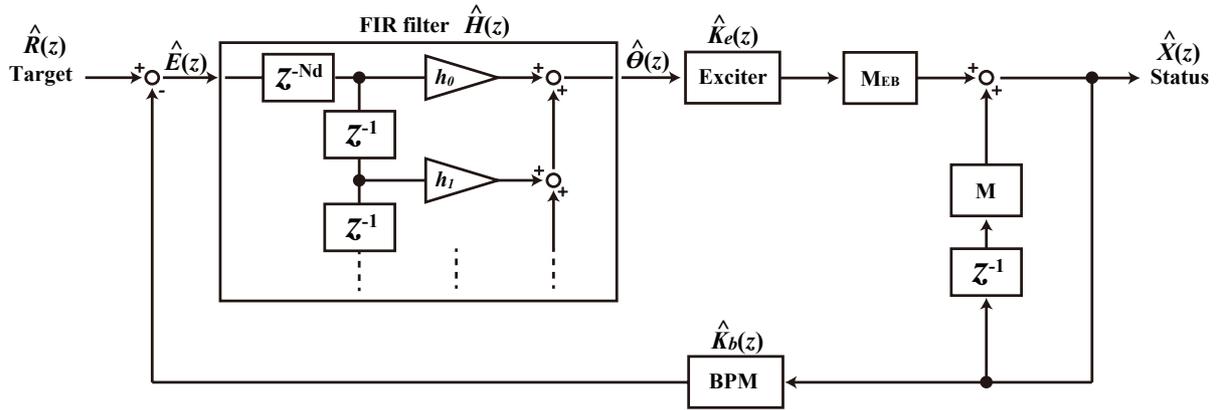


Figure 5: Feedback system block diagram.

Twiss パラメータは  $\alpha_b = 0$  および  $\beta_b = 10 \text{ m}$  とした。

まず、Fig. 6 に  $g = 0.01$  の場合の極および零点の配置を示す。また、Table 2 に各極に対応するダンピングタイムを示す。図および表から、任意の振動は 250 ターン程度で減衰できることがわかる。次に FIR フィルタゲイン  $g$  を変化させた時のダンピングタイムの応答を Table 3 に示す。ダンピングタイムが負となっているものは減衰ではなく振動が成長していることを示す。フィルタゲインに対して概ね線形にダンピングタイムが変化し、ある程度大きい場合には逆に不安定化を引き起こすことがわかる。

Table 2: Damping Time Against the Poles

Pole	Damping time [turn]
P <sub>1</sub>	0.868
P <sub>2</sub>	0.896
P <sub>3</sub>	0.975
P <sub>4</sub>	246
P <sub>5</sub>	0.941
P <sub>6</sub>	0.612

Table 3: Damping Time Against FIR Filter Gain

Gain $g$	Damping time [turn]
1	-2.75
0.1	23.7
0.01	246
0.004	617
0.001	2471

以上の見積りは任意の振動振幅に対していくらでもキック角が確保できる、という想定になっているが、実際にはエキサイタ電源が飽和するため、キック角には最大値が存在する。使用予定のエキサイタは最大キック角が  $0.1 \mu\text{rad}$  程度であり、このキックに対応する変位は簡単に Twiss  $\beta$  倍で見積もると、 $1 \mu\text{m}$  程度となる。つまり、

上記の計算におけるゲイン  $g = 1$  は  $1 \mu\text{m}$  の振動をダンピングする場合が上限であり、例えば  $1 \text{ mm}$  の振動をダンピングするには  $g = 10^{-3}$  が最大ゲインとなり、ダンピングタイムは約 2500 ターンとなる。一方、J-PARC RCS のビーム不安定性が成長する典型的な時定数は 600 ターン以上であることから、 $1 \text{ mm}$  の振動はダンピングが間に合わず、ダンピング可能な重心振動の最大値は  $0.25 \text{ mm}$  程度 ( $g = 0.004$ ) となる。よって、BPM の設計上の測定精度  $0.1 \text{ mm}$  であれば、対応可能であると考えられる。ただし、信号ノイズ比による影響は別途検討する必要がある。

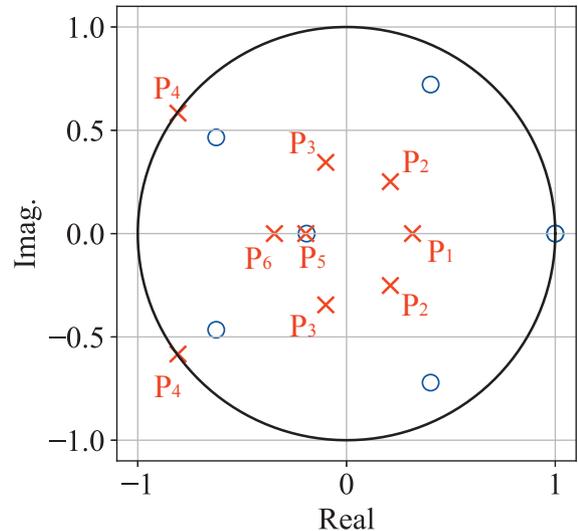


Figure 6: An example of arrangement of poles and zeros. The cross and circle markers show poles and zeros, respectively.

#### 4. まとめ

J-PARC RCS の  $1 \text{ MW}$  以上の運転に向けた、横方向ビーム不安定化の対策の検討状況について述べた。システム開発の第一歩として、BPM およびキッカーを用いた不安定性抑制装置の実証に向けて、既存のベータatron チューン測定用 BPM およびエキサイタを用いて、現

在主要な出射キッカー電磁石のインピーダンスによる不安定化を抑制することを目標に、機器の使用可能性および演算部の設計を行った。その結果、ノイズの影響を無視すれば、既存のシステムでも十分なダンピングタイムが得られ、不安定化対策が可能であるという見積りが得られた。今後、演算回路の開発を進めるとともに、ノイズによるフィードバックループの安定性への影響およびその際のビームへの影響を評価する予定である。

## 参考文献

- [1] P. K. Saha *et al.*, “State-of-the-art beam loss minimization at high-intensity beam operation of the 3 GeV rapid cycling synchrotron at the Japan Proton Accelerator Research Complex”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 28, p. 074201, 2025.  
doi:10.1103/tbyh-jcq3
- [2] Y. Shobuda *et al.*, “Demonstration of a kicker impedance reduction scheme with diode stack and resistors by operating the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 26, p. 053501, 2023.  
doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.26.053501
- [3] Y. Shobuda *et al.*, “Performance of the diode stack with resistors to suppress beam instability at the J-PARC RCS”, *Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC2025)*, Taipei, Taiwan, Jun. 2025, WEPS002.  
doi:10.18429/jacow-ipac25-weps002
- [4] F. J. Sacherer, “Transverse Bunched Beam Instabilities - Theory”, *Conf. Proc. C*, 740502, pp. 347–351, 1975.
- [5] T. Nakamura *et al.*, “Transverse Bunch-by-Bunch Feedback System for the SPring-8 Storage Ring”, *Proc. of European Particle Accelerator Conference (EPAC 2004)*, Lucerne, Switzerland, July 2004, THPLT068.
- [6] T. Nakamura, “Single-Loop Multi-Dimensional Digital Feedback by FIR Filters”.  
[https://research.kek.jp/people/nkmr/reports/Feedback\\_with\\_FIR\\_Filter\\_draft1.pdf](https://research.kek.jp/people/nkmr/reports/Feedback_with_FIR_Filter_draft1.pdf)