

J-PARC 3GeV シンクロトロン の更なる大強度化に向けたビーム損失低減の研究 STUDY ON THE MITIGATION OF THE BEAM LOSS FOR FURTHER BEAM POWER RAMP-UP IN J-PARC RCS

小島 邦洸 ^{*}), 原田 寛之, 地村 幹, サハ プラナブ
Kunihiro Kojima ^{*}), Hiroyuki Harada, Motoki Chimura, P.K. Saha
J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

Further beam power ramp-up going beyond the design output beam power of 1 MW is proceeding in the J-PARC RCS. In MW-class rings, the residual radioactivity accompanying the beam loss strictly limits the available beam power. While the current beam loss is mitigated to 0.1% level at the designed beam power, further beam loss mitigation prepared for the beam power ramp-up is required. Since the beam power ramp-up extends the space-charge-induced tune spread and can lead to the unallowable beam loss due to the resonance crossing, the resonance-free region must be extended enough to accommodate most of the particles for low beam loss. We conducted low-intensity beam studies on the half-integer random resonance that likely limits the width of the resonance-free region. Thanks to the simplification coming from the mitigation of the space-charge force, the successful compensation of the resonance is realized by using the trim quadrupole magnets. In the high-intensity beam studies, the resonance compensation was found to be quite effective in extending the resonance-free region.

1. はじめに

J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) はリニアックから供給される 400 MeV のビームを 25 Hz という早い繰り返しで 3 GeV まで加速し、下流の物質生命科学実験施設 (MLF) と主リングシンクロトロン (MR) に供給している [1]。Figure 1 に示すように RCS は三回対称なラティス構造を持ち、その周長は 348.333 m である。RCS では 307 ターンの多重入射により大電流ビームが生成される。その際、位相空間上におけるビームの入射位置を制御し、平坦な密度分布を形成することで、空間電荷力に起因するビーム損失及び品質の劣化を最小化している [2-4]。また、MLF と MR へは異なる条件でビーム供給が行われる。MLF 向けのビーム供給の割合が大きく、このとき横方向位相空間においてビームが占める範囲 (ペイントエリア) が 200π mm-mrad となるよう RCS への入射が行われる。MR には RCS への入射時に 50π mm-mrad のペイントエリアを持つビームを供給している。RCS は二つの行き先に条件の異なるビームを早い繰り返しで供給する難しい加速器でありながら、設計出力である 1 MW の運転において、ビーム損失を 0.1% 以下にまで低減することに成功している [5]。

RCS のような大強度加速器では、僅かなビーム損失でも深刻な装置の放射化を招くため、その低減は最重要課題である。現在 RCS では、設計出力を超える大強度化に向けた研究開発を進めており、その達成において空間電荷力に起因するビーム損失の低減は必要不可欠である。特に、ビーム供給割合の大きい MLF 向けの利用運転におけるビーム損失低減の重要度が高い。Figure 2 に MLF 向けのビーム供給において、多重入射過程が終了した直後のチューンスプレッドを示す。1 MW のビーム出力で既にチューンスプレッドは構造共鳴 $\nu_x = 6$ 及び $\nu_y = 6$ の近傍にまで達しており、1.5 MW では $\nu_y = 6$ 抵触している。ビームの構造共鳴への抵触は品質の劣

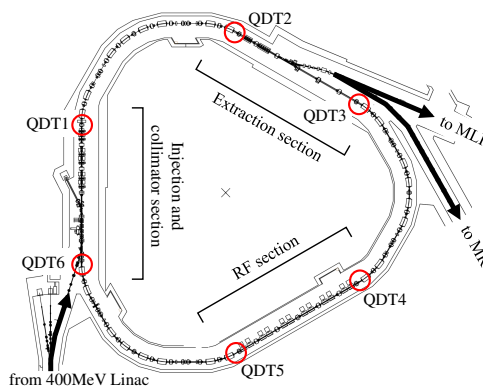


Figure 1: Schematic layout of the J-PARC RCS. The positions of the QDTs are indicated by the red circles.

化や損失につながる可能性があり、これらの影響を低減するために動作点を高チューン側に移動させる必要がある。一方で、これまでのビーム試験より、動作点の僅かな変更に対してもビーム損失が大幅に増大することが確認されている。したがって、ビーム大強度化のために高チューン側へ向けて安定領域を拡充する必要がある。

先行研究において、動作点の近傍にある半整数共鳴 $2\nu_x = 13$ が強く励起していることが確認されている [6]。また、運動量広がり ($\pm 1\%$) と水平方向のクロマティシティ (-8.0) が生むチューンシフト (± 0.08) によって、水平方向のチューンが 6.5 ± 0.08 の範囲内であれば、ビームは半整数共鳴に抵触し、その影響を受ける可能性がある。したがって、半整数共鳴の補正が安定領域の拡充に直結すると我々は考えた。この目的の下、空間電荷力の影響を無視できる低強度ビームを用いて、単純化された状況の下で最適な補正状況を追求した。加えて、その補正状況が、利用運転時の損失低減、及び安定領域の拡充に寄与するかを、大強度ビーム試験により検証した。

^{*} kunihiro.kojima@j-parc.jp

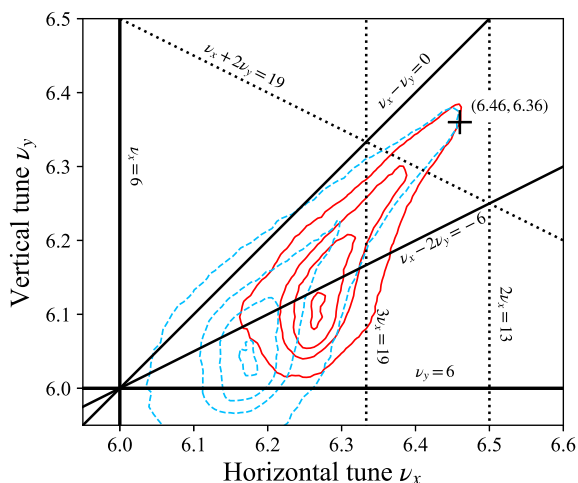


Figure 2: Tune footprint immediately after the multitrans injection calculated for the output beam power of 1-MW (red solid curves) and 1.5-MW (blue dashed curves). The random resonances up to third and structure resonances are plotted in black dotted and solid lines, respectively.

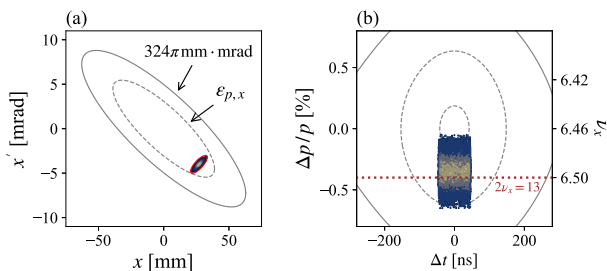


Figure 3: Schematic diagram of the beam injection configuration in the (a) horizontal and (b) longitudinal phase spaces.

2. 低強度ビーム試験

非構造共鳴の励起はビームに加えられる外部収束力のみで決まるため、空間電荷力の影響を無視できる低強度ビームによる試験を行った。

RCSの動作点は一定ではなく決まったパターンに従って推移するように制御されている。本ビーム試験では水平方向のチューンが20msの間に約0.08減少するパターンを使用した。動作点が時間に依存し変化することで、ビームは加速途中で半整数共鳴に接近したり、遠ざかったりすることが予想される。こういった複雑さを避けるために、以降では入射から4msまでの動作点をおよそ一定とみなせる範囲でのビーム損失に注目する。

2.1 半整数共鳴の励起

まず、現行の動作点 $(\nu_x, \nu_y) = (6.46, 6.36)$ における半整数共鳴への抵触について調査した。ビームの入射条件をFig.3に示す。短パルスビームを1ターンのみ入射し、このときのビーム出力は約0.3kW相当である。水平方向についてはペイントエリアが $\epsilon_{p,x}$ となるよう

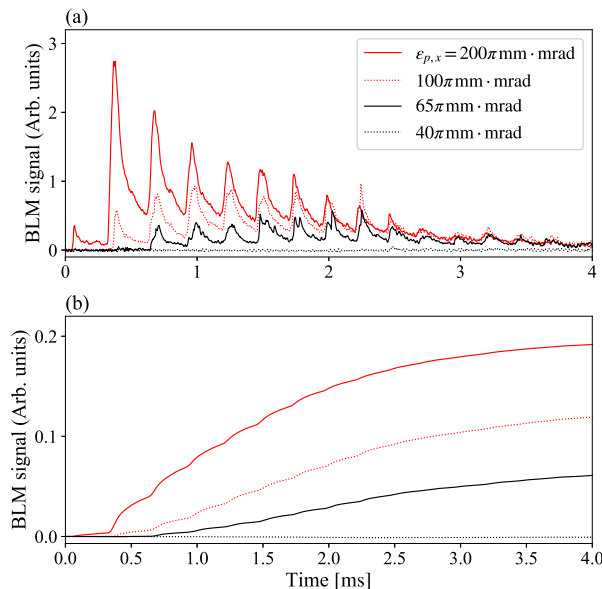


Figure 4: (a) BLM signals over the first 4ms measured in the collimator section with 4 different injection painting areas in the horizontal plane and (b) integrations of them.

な入射オフセットを与えた。また、クロマティシティと運動量広がりが生むチューンスプレッドの半整数共鳴への抵触を再現するため、縦方向についても入射運動量を-0.35%オフセットさせた。このとき、実行的なチューンはシンクロトロン振動と同期して増減し、周期的に半整数共鳴へ抵触する。鉛直方向については入射位置をオフセットしない。

Figure 4にコリメータ部に設置されたビームロスモニタ(BLM)の信号を示す。シンクロトロン振動と同期して周期的に信号強度が高くなっており、これは半整数共鳴への抵触がビーム損失の主因であることを示している。また、ペイントエリアが $\epsilon_{p,x} = 65\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 以上の全ての場合について有意なビーム損失を確認できる。したがって、半整数共鳴が強く励起しており、これに抵触している粒子の力学口径が $65\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 以下に劣化していることが判明した。

2.2 半整数共鳴の補正

半整数共鳴の励起と補正を議論するため、ドライビングターム(RDT)を導入する。設計上は存在しない余分な場を考慮するとき、ビーム横方向の二次元自由度についてハミルトンは以下で与えられる。

$$H(x, y, x', y'; s) = \frac{x'^2 + y'^2}{2} + \frac{K_x(s)x^2 + K_y(s)y^2}{2} + \delta V, \quad (1)$$

ここで、独立変数 s は軌道長、 δV は余分な場であり、 $K_x(s)$ 及び $K_y(s)$ は収束構造で決まる関数を表す。半整数共鳴を駆動するエラー場として $\delta V = \kappa(s)(x^2 - y^2)/2$

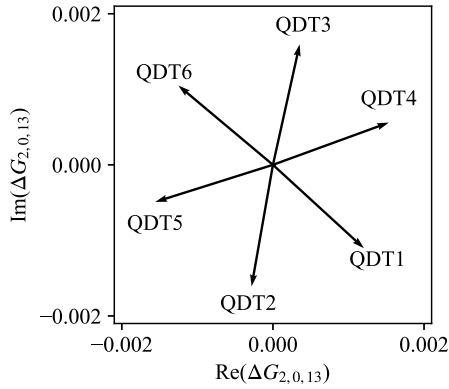


Figure 5: Comparison of RDTs for each QDT at the injection energy of 400 MeV. All of the QDTs are excited with the current of 30 A, and the abscissa and ordinate represent the real and imaginary parts of the RDTs.

を仮定すれば、以下の RDT を得る。

$$\Delta G_{2,0,13} = \oint \frac{\beta_x(s)\kappa_1(s)}{4\pi} e^{j[2\chi_x(s)-(2\nu_x-13)\theta]} ds, \quad (2)$$

β_x はベータ関数、 $\chi_x \equiv \int_0^s ds/\beta_x$ は位相進み、 θ は RCS の周長 L を用いて $\theta = 2\pi s/L$ のようにスケールされた軌道長を表す。 $\kappa_1(s)$ が RCS 周上の狭い範囲でしか有意な値を持たないと仮定すれば Eq. (2) を以下で近似できる。

$$\Delta G_{2,0,13} \approx \frac{\beta_x(s_0)K_1}{4\pi} e^{j[2\chi_x(s_0)-(2\nu_x-13)\theta_0]}, \quad (3)$$

K_1 は $\kappa_1(s)$ に対応した積分磁場である。 s_0, θ_0 はエラー場が存在する位置での s, θ を表す。半整数共鳴の補正とは $\Delta G_{2,0,13}$ の振幅を十分に小さくする操作であり、それは別な四極磁場を重畳し、エラー場が生む $\Delta G_{2,0,13}$ を打ち消すことで達成できる。

共鳴補正に利用可能な装置の候補として、補正四極電磁石 (QDT) が挙げられる。QDT は個別のユニポーラ電源で励磁される発散型の四極電磁石であり、RCS の構造の対称性を操作できる。Figure 1 に示すように RCS 全周に光学的に等価な配置で合わせて 6 台の QDT が設置されている。各 QDT について計算した $\Delta G_{2,0,13}$ を Fig. 5 に示す。全ての QDT が複素平面上で異なる方向を向いており、また QDT1,2,4 と 6,3,5 がそれぞれほぼ逆の方向をむいていることが分かる。つまり、適切な 2 台の QDT を用いることで、バイポーラ電源を用意したり、極性を変更することなく、任意のエラー場を補正することが原理的には可能である。

QDT が実際に共鳴補正に利用可能であることをビーム試験により検証した。ビームの入射直後の位相空間分布を Fig. 6 に示す。ビームの入射は短パルスかつ 30 ターンのみとした。この場合もビーム強度は約 5 kW 相当と非常に低いため空間電荷力はビームの運動に殆ど影響しない。また、半整数共鳴の影響を観測しやすくするため、水平方向についてのみベイントエリアが 120π mm·mrad となるオフセットを与えてビームを入

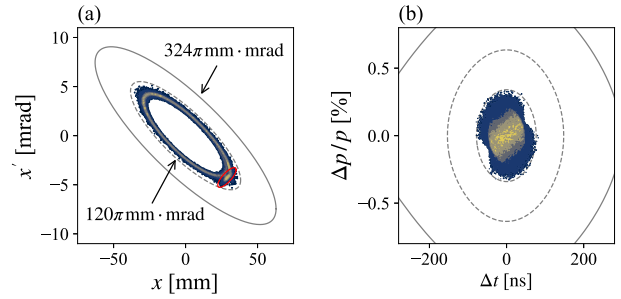


Figure 6: Schematic diagram of the beam injection configuration in the (a) horizontal and (b) longitudinal phase spaces.

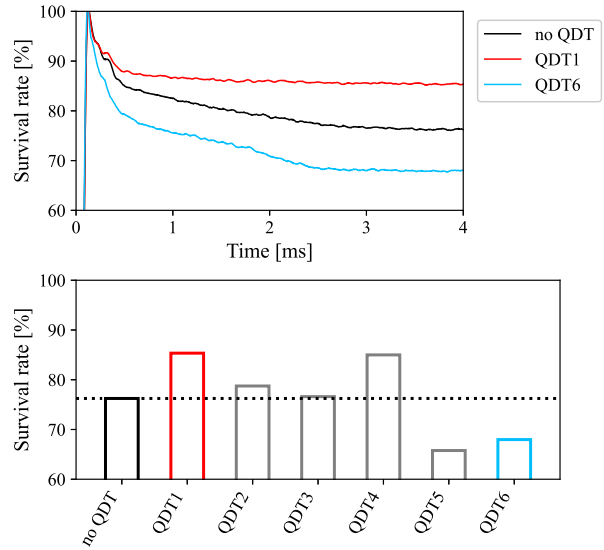


Figure 7: (a) Time evolution of the particle survival rate over 4 ms from the injection and (b) particle survival rates after 4 ms with the addition of each of 6 QDTs independently. The excitation peak currents were set to 30 A in all cases excluding no QDT.

射した。簡単のため、進行方向については運動量オフセットなしでビームを入射し、クロマチシティによるチューンスプレッドを出来るだけ低減した。

Figure 7 にビーム電流モニタ (DCCT) を用いて測定した動作点 $(\nu_x, \nu_y) = (6.49, 6.36)$ における粒子数生存率の応答を示す。QDT1,4 の励磁に対し生存率は改善、QDT5,6 の場合には悪化していることが確認できる。QDT の配置は全て光学的に等価であるため、粒子数生存率の応答の差は、半整数共鳴の補正、もしくは励起の結果であると考えられる。したがって、実験的にも QDT が共鳴補正が可能な位置関係であることが確認された。また、複素平面上でおよそ反対方向に RDT を持つ QDT1,6 と QDT4,5 の 2 組について Fig. 7 に示す粒子数生存率の増減も反対であり、Fig. 5 の計算結果と矛盾しないことが分かる。

次に粒子数生存率を最大化する最適な QDT の励磁電流を調査した。RDT に基づく考察から、共鳴の補正には 2 台の QDT が必要かつ十分であると考えられる。

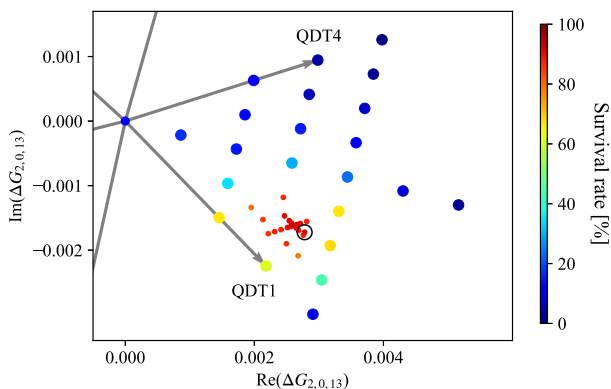


Figure 8: Scan of the excitation currents of the QDT1 and QDT4. The abscissa and ordinate represent the real and imaginary parts of the RDT generated by the addition of the QDTs at the injection energy of 400 MeV. The markers are color-coded based on the corresponding survival rate at 4 ms from the injection.

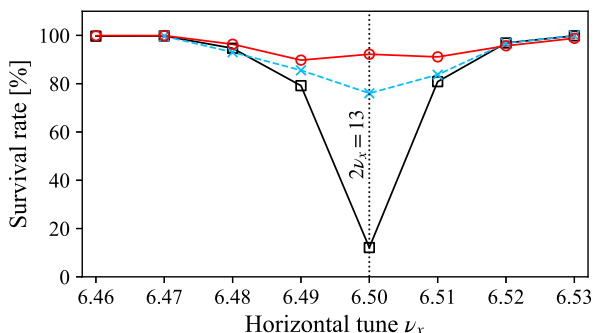


Figure 9: Horizontal tune dependence of the particle survival rate after 4 ms from the injection with the vertical tune was set at 6.36.

Figure 7に示すようにQDT1とQDT4の励磁に対し粒子数生存の改善量が比較的大きく、これら2台が共鳴の補正に適していると考えた。Figure 8に、Fig. 7と同様なビーム条件の下で、QDT1とQDT4の励磁電流をマッピングした結果を示す。動作点は半整数共鳴によるビーム損失が最も顕著な $(\nu_x, \nu_y) = (6.5, 6.36)$ に設定し、このときの共鳴補正前の粒子数生存率は約12.1%となる。QDTの励磁電流はEq. (3)に基づきRDTに換算している。マーカーの色が示すように2台のQDTの励磁電流に依存して粒子数生存率が大きく異なる。図中の黒丸が示す補正状況の下で、粒子数生存率の最大値92.2%を観測し、QDT1とQDT4の最適な励磁電流としてそれぞれ26.6Aと8.5Aを得た。また、1台のQDTのみを用いた場合には粒子数生存率は最大でも61.6%までしか改善せず、2台を用いることの必要性を示している。

チューンスキャンにより共鳴補正の効果を検証した結果をFig. 9に示す。鉛直方向のチューンは6.36に固定し、共鳴を跨ぐよう水平方向のチューンを6.46から6.54まで0.01刻みで掃引した。ビームの入射条件はFig. 7と同様とした。この共鳴を駆動するエラー場の主

な発生源が射出セプタムの漏れ磁場である可能性が高いことが先行研究で示されており[6,7]、青線が射出セプタムを停止させた場合を示す。この場合にも粒子数生存率が大幅に改善しているが、依然として20%近いビーム損失が発生している。この結果は、射出セプタムの他にもエラー場の発生源が存在することを示唆しており、漏れ磁場を遮蔽したところで完全な解決には至らないと予想される。一方で、QDTを用いた場合には射出セプタム以外のエラー場もまとめて補正が可能である。QDTを用いた共鳴補正の効果は明らかで、射出セプタムを停止させた場合と比較しても粒子数生存率の改善量が優れていることを確認できる。したがって、低電流ビーム試験においてはQDTを用いた半整数共鳴の補正が達成された。

3. 大強度ビーム試験

利用運転時における共鳴補正の効果を検証するために、大強度ビーム試験を行った。ビーム条件はMLF向けの利用運転時と同様とし、ビーム強度は1MW相当である。Figure 10は多粒子シミュレーションによる多重入射過程の再現である。多重入射過程初期では運動量広がりやクロマチシティの影響で、多くの粒子が半整数共鳴に抵触している。その後、ビーム強度が増大するにつれて空間電荷力の影響が支配的となり、粒子は低チューン側に移動する。100ターン目の水平方向のペイントエリアが約 70π mm-mradの時点でビームは既に半整数共鳴に抵触していないことが分かる。

Figure 11にコリメータ部のBLMで観測したビーム損失の信号を示す。動作点を利用運転時と同じ $(\nu_x, \nu_y) = (6.46, 6.36)$ に設定した場合には、半整数共鳴の補正場を重畳してもビーム損失は殆ど変化していない。これは、Fig. 10に示すように、ビームが半整数共鳴に抵触している入射過程初期では、殆どの粒子が力学口径の内側において、損失しないためであると考えられる。一方で、補正場の重畳による有意なビーム損失の増大が発生していないことから、半整数共鳴の補正が $3\nu_x = 19, \nu_x + 2\nu_y = 19$ 等の、より高次の非構造共鳴の励起に及ぼす影響は無視できる程度でしかないと考えられる。

動作点がより半整数共鳴に近い $(\nu_x, \nu_y) = (6.49, 6.36)$ の場合には共鳴補正の効果は明らかで、Fig. 11(b)に示すように補正前後を比較してBLMの信号の強度が1/3程度になっている。したがって、QDTを用いた共鳴補正が高チューン側に向けた安定領域の拡充において、効果的であることが実証された。一方で、共鳴補正後も依然として無視できないビーム損失が発生している。これには、半整数共鳴を完全に補正できていないことが少なからず影響している可能性が高い。Figure 8で見出された最適な補正状況においても4ms時点で7%程度のビーム損失が確認されている。これらのビーム損失はQDTによる補正場の強度が時間的に一定であり、四極電磁石の個体差等の時間変動するエラー場を原理的に補正できないためであると考えられる。

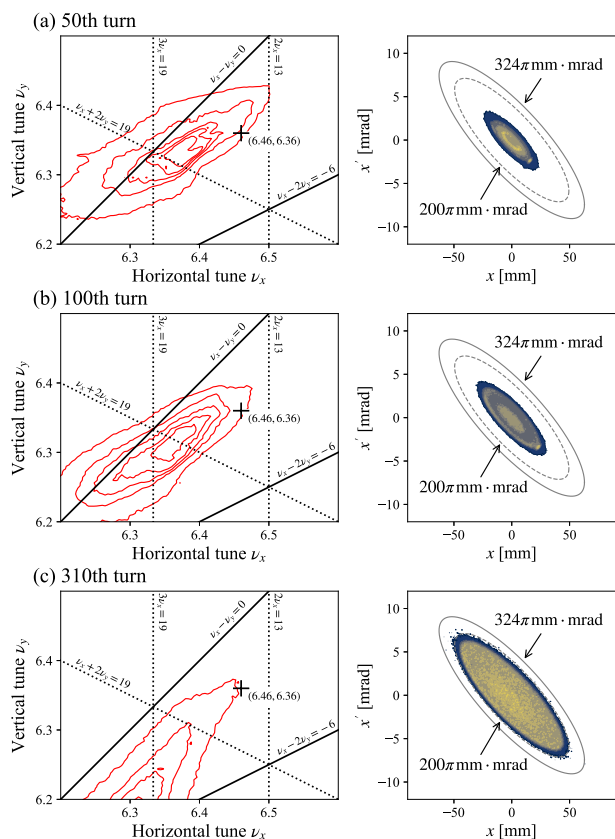


Figure 10: Tune footprints (left) and horizontal (center) phase spaces at (a) 10th, (b) 50th, and (c) 310th turn during the multi-turn beam injection reproduced by the numerical simulation.

4. まとめと今後の展望

J-PARC RCS の更なる大強度化に向けた安定領域の拡充を目的とし、半整数共鳴に注目したビーム試験を行った。低強度ビーム試験において、QDTを用いた半整数共鳴の最適な補正状況を追求した。その結果、QDT1とQDT4をそれぞれ26.6 Aと8.5 Aで励磁した際に、半整数共鳴上の動作点における粒子数生存率の12%から93%への大幅な改善を実現した。また、エラー場の主な成分である出射セプタムの漏れ磁場への対策と比較しても、QDTを用いた共鳴補正はより効果的であることを示した。大強度ビーム試験では、現行の動作点である $(\nu_x, \nu_y) = (6.46, 6.36)$ において、補正場の重畳によるビーム損失の有意な増大は確認されず、半整数共鳴の補正が他の非構造共鳴に殆ど影響を及ぼさないことを確認した。また、より半整数共鳴に近い $(\nu_x, \nu_y) = (6.49, 6.36)$ においては、コリメータ部のBLM信号強度が1/3程度となる大幅な損失低減を実現した。したがって、QDTを用いた共鳴補正は安定領域の拡充に効果的であることが実証された。

一方で動作点 $(\nu_x, \nu_y) = (6.49, 6.36)$ における大強度ビーム試験では、本研究で見出された最適な補正状況

においても現行の利用運転時の状況と比較して、ビーム損失が増大してしまう。その主な原因は、エラー場

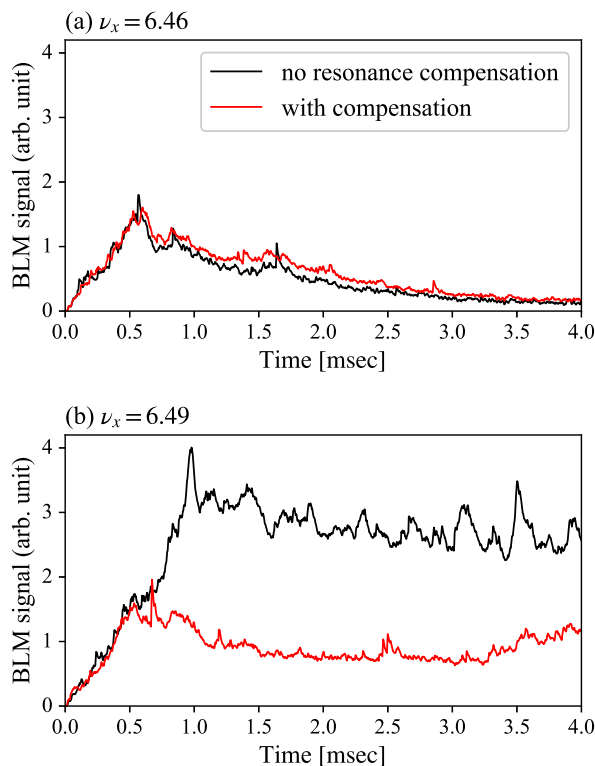


Figure 11: BLM signals over the first 4 ms measured in the collimator section with (red) and without (black) the addition of the QDTs at the operating point of (a) $(\nu_x, \nu_y) = (6.46, 6.36)$ and (b) $(6.49, 6.36)$.

の時間変動を考慮していないことにある可能性が高い。今後は、こういった時間変動も考慮して共鳴補正手法を改良し、高チューン側におけるビーム損失の低減と安定領域の拡充を目指す。

参考文献

- [1] High-intensity Proton Accelerator Project Team, JAERI Report No. JAERI-Tech 2003-044.
- [2] H. Harada, Ph.D thesis of Hiroshima University / KEK report 2009-7, 2009.
- [3] P.K. Saha *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 12, 040403, (2009).
- [4] H. Hotchi *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 02B003 (2012).
- [5] P.K. Saha *et al.*, in Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, 2022, pp. 1-5.
- [6] K. Kojima, H. Harada, and P.K. Saha, in Proc. of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, 2023, pp. 127-131.
- [7] M. Yoshimoto *et al.*, in Proc. of European Particle Accelerator Conference, pp. 3626-3628 (2008).