

縦方向計算コード BLoND の J-PARC RCS への適用に向けたベンチマーク BENCHMARKING OF LONGITUDINAL CALCULATION CODE BLOND FOR APPLICATION TO J-PARC RCS

沖田英史 ^{*A)}、田村文彦 ^{A)}、山本昌亘 ^{A)}、野村昌弘 ^{A)}、島田太平 ^{A)}、
吉井正人 ^{B)}、大森千広 ^{B)}、杉山泰之 ^{B)}、長谷川豪志 ^{B)}、原圭吾 ^{B)}、古澤将司 ^{B)}

Hidefumi Okita^{*A)}, Fumihiko Tamura^{A)}, Masanobu Yamamoto^{A)}, Masahiro Nomura^{A)}, Taihei Shimada^{A)},
Masahito Yoshii^{B)}, Chihiro Ohmori^{B)}, Yasuyuki Sugiyama^{B)}, Katsushi Hasegawa^{B)}, Keigo Hara^{B)}, Masashi Furusawa^{B)}
^{A)}J-PARC center, JAEA
^{B)}J-PARC center, KEK

Abstract

Longitudinal beam simulation code BLoND (Beam Longitudinal Dynamics), which has been developed by CERN in recent years, can simulate the longitudinal beam motion for a variety of situations, for example, collective effect and multi-harmonic acceleration. In addition, this code is written by Python, which makes it highly readable and general-purpose code. We are currently conducting a benchmarking of BLoND studying for further improvements of longitudinal beam manipulation of the J-PARC 3GeV synchrotron (RCS). The results of BLoND simulation using the parameters of RCS 1MW beam operation reproduce the experimental results well and it was confirmed that BLoND is useful for longitudinal beam simulation of RCS.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン (RCS: Rapid Cycling Synchrotron) は、これまでに設計ビームパワー 1MW での 40 時間連続運転試験を実現している。現在、バンチングファクターや縦方向エミッタンスの更なる向上を目指し、再度パラメータの最適化を検討している。

これらを検討する縦方向ビームシミュレーションコードとして BLoND (Beam Longitudinal Dynamics) [1] の導入を進めている。RCS の縦方向のビームシミュレーションにはこれまで内製コード [2] を使用しており、BLoND を用いたシミュレーションは今回が最初である。そこで、BLoND の RCS への適用可能性を検証するベンチマークとして、BLoND を用いて現行の 1MW 運転パラメータを反映した縦方向ビームシミュレーションを実施し、バンチングファクターやバンチ形状を測定値と比較した。

本発表では、初めに BLoND のアルゴリズムについて簡単にまとめ、その後、現行の RCS の 1MW 運転パラメータについて説明し、最後に BLoND のシミュレーション結果と測定値を比較した結果について報告する。

2. BLOND について

BLoND は CERN が開発を進めている縦方向ビームシミュレーションコードで、ウェイク電圧やマルチハーモニック加速といった様々な状況を想定した計算が可能である。加えて、BLoND は主な部分

が Python で記述されており、コードの中身の可読性や汎用性が高いという利点がある。

BLoND (version 2.0.11) の縦方向ビームシミュレーションの基本的なアルゴリズムについて以下に説明する。詳細は BLoND の User's Guide [1] に記載されている。

BLoND の主な出力は、各ターンの粒子の同期エネルギー E_s^n からのエネルギーの差 ΔE^n と同期エネルギーでリングを周回する粒子 (これを同期粒子とする) からの時間の差 Δt^n である。ここで、 n はターン数を表す添字で、各ターンの同期エネルギー E_s^n は入力値として与える。

ΔE^{n+1} は Eq. (1) を用いて計算される。ここでは簡単のため、ウェイク電圧などによるエネルギー変化については省略して説明する。 V_k^n は RF 電圧を表し入力値として与える。 k は n_{rf} 個の高調波成分を表す添字である。 $\phi_{rf,k}(\Delta t^n)$ は Δt^n に相当する RF 位相を表し、Eq. (2) で計算される。Eq. (2) の $\omega_{rf,k}^n$ と h_k^n はそれぞれ RF 角周波数とハーモニック数で入力値として与える。 ω_0 は E_s^n から計算される同期粒子の周回角周波数である。

$$\Delta E^{n+1} = \Delta E^n - (E_s^{n+1} - E_s^n) + \sum_{k=0}^{n_{rf}-1} V_k^n \sin(\phi_{rf,k}(\Delta t^n)) \quad (1)$$

$$\phi_{rf,k}(\Delta t^n) = \omega_{rf,k}^n \Delta t^n + \phi_{offset,k}^n + \sum_{i=1}^n \frac{\omega_{rf,k}^i - h_k^i \omega_0^i}{h_k^i \omega_0^i} 2\pi h_k^i \quad (2)$$

* hidefumi.okita@j-parc.jp

Equation (2) の各項について説明する。1 項目は Δt^n に相当する位相進み、2 項目の $\phi_{offset,k}^n$ は各高調波の RF 位相のオフセットであり入力値として与える。3 項目は RF 角周波数と E_s^n から計算される角周波数が異なる場合に生じる位相差を計算するもので、RF 周波数にオフセットがあるときに必要となる。この 3 項目であるが、現行 Version の BLoND では User's Guide には記述されているが実際のコードからは欠落している。これについての詳細は次節で説明する。

Equation (1) で計算された ΔE^{n+1} から Δt^{n+1} は、Eq. (3) のようにスリップ係数 η^n を用いて計算される。ここでは、簡単のためスリップ係数が線形成分のみの場合についての式を記載しているが、BLoND では高次項を考慮した計算も可能である。 T_0^n と β_s^n はそれぞれ同期粒子の周期、同期粒子の速さと光速の比である。以上が BLoND の縦方向ビームシミュレーションの基本的なアルゴリズムである。

$$\Delta t^{n+1} = \Delta t^n + \frac{\eta^{n+1} T_0^{n+1}}{(\beta_s^{n+1})^2 E_s^{n+1}} \Delta E^{n+1} \quad (3)$$

3. RF 周波数にオフセットがあるときの BLoND の計算方法

現行の Version の BLoND では RF 周波数を入力値として与えることはできるが、実際は上述の理由で正しく計算されない。今回のベンチマークでは RF 周波数にオフセットがある条件でのシミュレーションが必要であるため、対処法を模索した。

そこで、RF 周波数のオフセットを BLoND のシミュレーションに反映させるために、Eq. (2) の 3 項目で計算される位相のずれを含んだ $\phi_{offset,k}^n$ を入力値として与える手法を採用した。つまり、 $\phi_{offset,k}^n$ は元々の各高調波の位相のオフセットの入力値と Eq. (2) の 3 項目で計算される位相を足し合わせた値となる。

この手法を用いて、RF 周波数に一定のオフセットがあるときの BLoND シミュレーション結果を Fig. 1 示す。Figure 1 は、ビームを加速せずに捕獲し続けたときのシミュレーション結果である。RF 電圧は基本波と 2 倍高調波が重畳されたデュアルハーモニック運転を想定している。図中の赤線は RF 周波数のオフセットがないときのセパトリスである。Figure 1 が示すように、ビームが作る RF バケツが上側に平行移動しており、上述の手法で RF 周波数のオフセットを反映した BLoND シミュレーションができていることが分かる。

次に注意すべきは Δt^n の取り扱いである。 Δt^n はその定義から E_s^n と同期する粒子からの時間差であり、RF 周波数と同期する粒子からの時間差 Δt_{rf}^n ではない。上述の手法で RF 周波数のオフセットがあるときの計算をした場合、Eq. (4) に示す関係で Δt_{rf}^n は Δt^n からずれていく。ここで、 h_{fund} は基本波のハーモニック数を表す。BLoND のデフォルトの設定では、各ターンの粒子の時間分布を Δt^n で出力する。バンチングファクターの解析などでは、 Δt_{rf}^n を

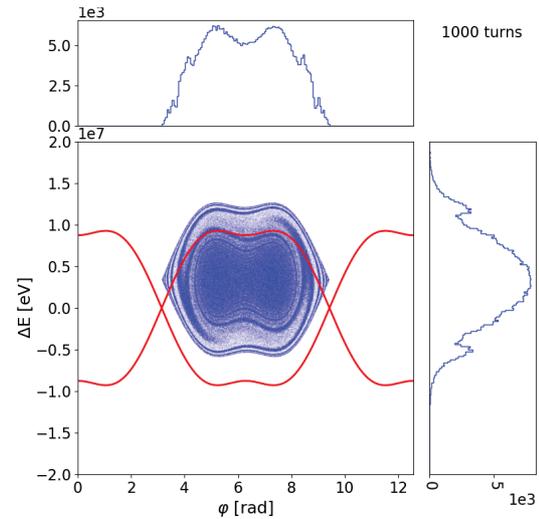


Figure 1: Demonstration of the BLoND simulation with the RF frequency offset. The red line shows the separatrix in the case without the RF frequency offset and the blue dots show the particle distribution with the RF frequency offset.

取り扱う方が便利であり、後述のシミュレーションでは Eq. (4) を用いて、 Δt^n から Δt_{rf}^n を出力する処理を行なっている。

$$\Delta t_{rf}^n = \Delta t^n + 2\pi \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\omega_0^i} - \frac{h_{fund}}{\omega_{rf}^i} \right) \quad (4)$$

4. RCS 1MW 運転パラメータ

RCS のリングの基本パラメータと磁場のパターンの模式図を Table 1 と Fig. 2 に示す。400 MeV で入射された陽子ビームは約 20 ms で 3 GeV まで加速される。加速中のビームの同期運動量は Fig. 2 に示す正弦波形状の磁場のパターンに従う。ここで、磁場が最小となるタイミングを $t = 0$ s とする。RCS ではマルチターン入射を行っており、マクロパルス幅の 500 μ s の間、すなわち -250 μ s から +250 μ s の 307 ターンに相当する期間、リングにビームを入射し続けている。

RCS では、入射、加速中のバンチングファクターを良くするために基本波 ($h = 2$) と 2 倍高調波 ($h = 4$) を用いたデュアルハーモニック運転を行っている。空洞の Q 値は約 2 に調整されており [3]、空洞の周波数帯域が広いために 1 台の空洞で基本波と 2 倍高調波の両方の電圧を出力する。基本波と 2 倍高調波の電圧の入力パターンを Fig. 3 の実線に示す。

Table 1: Parameters of J-PARC RCS

Injection energy	400 MeV
Extraction energy	3 GeV
Number of protons	8.33×10^{13} ppp
Harmonic number	2
Repetition rate	25 Hz
Acceleration period	20 ms
Circumference	348.333 m
Momentum Compaction Factor	0.0119798
Max. Acc. Voltage	438 kV
Number of cavities	12

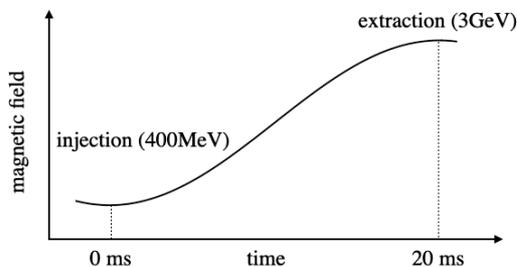


Figure 2: Schematic view of the ramping pattern of RCS.

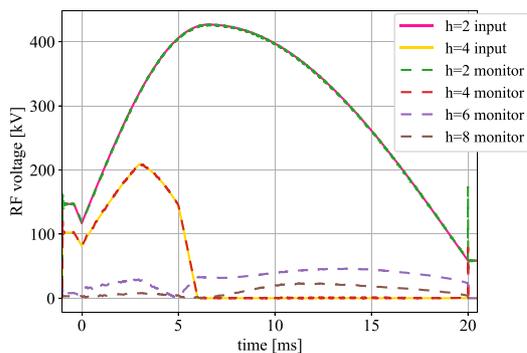


Figure 3: The time variation of the RF voltage for the each harmonic component. The solid lines show the input RF pattern and the dashed lines show the monitored RF voltage up to $h = 8$ measured at the 1MW beam operation.

RCS ではバンチングファクターの最適化として、RF 周波数調整による運動量オフセット入射と 2 倍高調波の位相オフセット操作を行っている。現行の運転パターンでは、マルチターン入射中の RF 周波数にオフセットを加え、RF バケツ中心から運動量方向にずれた位置にビームを入射させている。これにより、シンクロトロン振動を大きくさせ、RF バケツの広い範囲にビームを分布させることができ、ピーク電流値を低減させ、バンチングファクターを増加させている [2,4]。RF 周波数のオフセット量は運動量のズレにして -0.10% に相当する $+588$ Hz で、Fig. 4 に示すように 0 ms まで一定のオフセットをかけ、その

後 1.0ms に向けて直線的に減らしていくという操作を行っている。

運動量オフセット入射では、シンクロトロン振動が進むにつれ一時的に電荷密度に偏りが生じる。これによるバンチングファクターの悪化を防ぐために、2 倍高調波の位相にオフセットを加え、RF バケツを歪め、電荷密度の偏りを低減させる操作を行っている [2]。2 倍高調波の位相オフセットの入力値を Fig. 5 に示す。この図の縦軸は基本波の同期位相を基準としたときの 2 倍高調波の位相のオフセット量を表している。

RCS では 4 倍高調波 ($h = 8$) までのビームローディング補償が可能なシステムが構築されている [5]。実際のビーム運転では、 $h = 5$ まではほぼ完璧に補償しており、 $h = 6$ 以上については電源の制限により、12 台ある空洞の一部で補償を行なっている。1MW 運転時に空洞の電圧モニターで観測された $h = 8$ までの各偶数ハーモニックの電圧と位相を Fig. 3 と Fig. 6 に示す。ここで、 $h = 7$ までの奇数ハーモニックの電圧はほとんど観測されていないので省略している。Figure 3 の破線に示すように、実際の加速ギャップには $h = 6, 8$ の電圧が発生している。

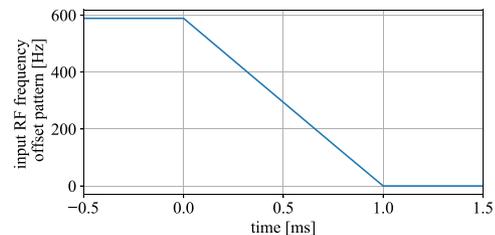


Figure 4: Input RF frequency offset pattern.

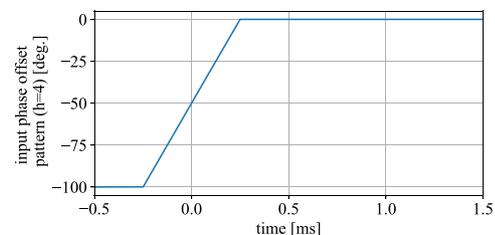


Figure 5: Input second harmonic phase offset pattern. The vertical axis shows the phase offset from the synchronous phase of the fundamental harmonic.

5. BLOND を用いた RCS の縦方向ビームシミュレーション

本節では、RCS の運転パラメータを反映した BLOND シミュレーション結果と測定値を比較した結果について説明する。

今回、電圧パターンとして入力値 (Fig. 3 の実線) と 1MW 運転時に空洞の電圧モニターで観測された値 (Fig. 3 の破線) を使った二通りのシミュレー

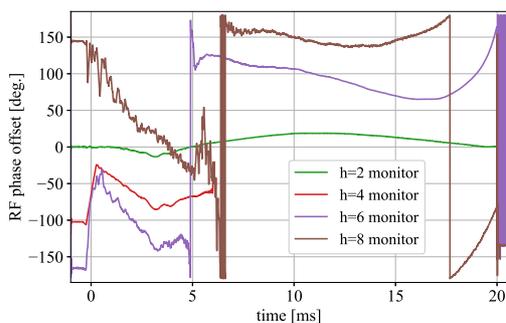


Figure 6: The time variation of the monitored RF phase offset up to $h = 8$ at the 1MW beam operation.

シミュレーションを行った。前者は、 $h = 2, 4$ のみを考慮したシミュレーションとなっている。後者は、 $h = 8$ までの偶数ハーモニック全てをシミュレーションに反映しており、測定位相については、Fig. 6 に示す測定値に電圧モニター自身の周波数特性を考慮した値を用いた。

BLoND に入力する各ターンの同期エネルギー E_s^n は Fig. 2 に示したような正弦波の磁場のパターンに従うものとした。前節で示した、マルチターン入射、RF 周波数オフセット、位相オフセット ($h = 4$) はシミュレーションに含まれている。入射ビーム分布は実測値から、運動量方向は $\sigma = 0.17\%$ のガウス分布、時間方向は幅 $440\mu\text{s}$ の一様分布とした。空間電荷効果や空洞のインピーダンスは今回のシミュレーションでは考慮していない。

BLoND シミュレーションによるバンチングファクターと測定値との比較を Fig. 7 に示す。ここでは、 $h = 4$ の電圧をオフにする 6 ms 付近までの結果を示している。バンチングファクターは 1 バンチあたりのピーク電流値と平均電流値の比として計算した。測定値の方はウォールカレントモニター (WCM) で観測されたバンチ波形を解析したものである。Figure 7 が示すように、BLoND シミュレーションによるバンチングファクターは測定値をよく再現している。

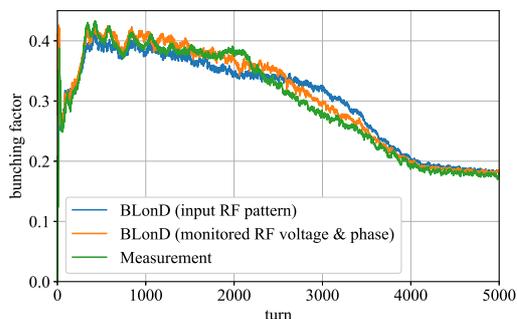


Figure 7: The comparison of the bunching factor. The blue and orange lines show the results of the BLoND simulation using the input RF pattern and the monitored RF voltage and phase, respectively. The green line shows the experimental result.

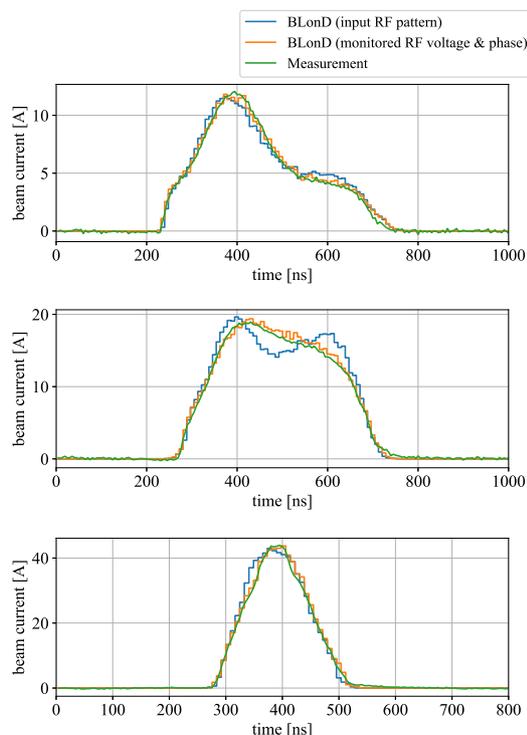


Figure 8: The comparison of bunch shape (top: 0 ms, middle: 1 ms, bottom: 6 ms). The blue and orange histograms show the results of BLoND simulation using input RF pattern and monitored RF voltage and phase, respectively. The green line shows the experimental result measured by WCM.

次にバンチ形状を測定値と比較した結果 Fig. 8 を示す。測定値は WCM の出力である。Figure 8 は上からそれぞれ、入射中の 0 ms (150 ターン)、周波数オフセット操作が終わる 1 ms (750 ターン)、 $h = 4$ の電圧をオフにする 6 ms (4000 ターン) でのバンチ波形である。BLoND シミュレーションは測定値をよく再現しており、特に電圧モニターの値を使ったシミュレーションでは、入力電圧パターンでは再現できなかった 1 ms のバンチ中心部の形状を含め全体的に非常によく再現できている。これについての考察は次節にまとめる。

このように、RCS の 1MW 運転パラメータを反映した BLoND シミュレーションの結果は、バンチングファクターやバンチ形状で測定値を非常によく再現できており、BLoND で RCS 1MW 運転時の縦方向のビーム挙動を正確にシミュレーションできていることが今回のベンチマークで確認された。

6. 考察

BLoND シミュレーションの結果、1 ms のバンチ形状が使う電圧パターン (ハーモニックの数) で異なることが確認された。以下にこの結果についての考察を述べる。

1 ms での RF 電圧波形、ポテンシャル、RF バケツを $h = 2, 4$ のみの場合と $h = 2, 4, 6$ の場合で比

較したものを Fig. 9 から Fig. 11 に示す。この時点で $h = 8$ の電圧は小さいので今回の考察では無視した。Figure 9 の緑の破線は、1 ms の時点で同期粒子が 1 ターンあたりに受けるべきエネルギーに相当する RF 電圧を示している。Figure 11 は上側が $h = 2, 4$ 、下側が $h = 2, 4, 6$ の場合の RF バケツである。

$h = 2, 4$ のみ場合、ポテンシャルの底のうねりが大きく、RF バケツで見ると中央が少しくびれた形で内部のセパトリクスが大きくなっている。そのため、ビームは左右に偏って分布することになり、パンチ波形の中心部が Fig. 8 に示したような二山構造になっていると考えられる。

一方で $h = 6$ まで考慮した場合は、ポテンシャルの底が平坦化されており、RF バケツ中央部のくびれがなくなり、内部のセパトリクスも小さくなっている。そのため、ビームの時間方向の分布の偏りを低減し、パンチ波形の中心部がなだらかな形状となり、測定値を再現できたものだと考えられる。1 ms 付近の $h = 6$ の電圧は基本波の 10% 程度であるが、このような小さい電圧でも $h = 6$ はパンチ形状を変えることが可能であることが分かる。

RCS のローレベル RF 制御システムは 2019 年に更新された。旧システムでは基本波 ($h = 2$) と 2 倍高調波 ($h = 4$) のふたつのハーモニクスしか電圧制御が出来なかったが、新システムでは 8 ハーモニクスが制御可能である。このことから、3 倍高調波 ($h = 6$) を使ってパンチ形状やバンチングファクターの向上を目指したパラメータの最適化を今後行っていく。

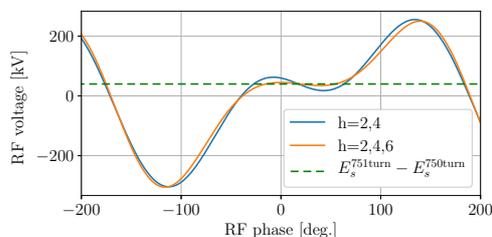


Figure 9: RF voltage wave shapes at 1 ms in the case $h = 2, 4$ and $h = 2, 4, 6$, respectively. The energy level that the synchronous particles should receive at this time is indicated by the green dashed line.

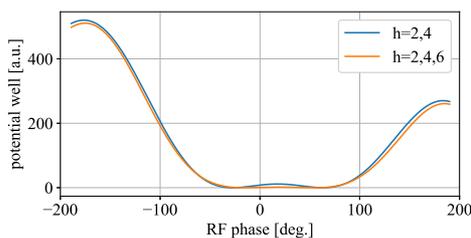


Figure 10: Potential wells at 1 ms in the case $h = 2, 4$ and $h = 2, 4, 6$, respectively.

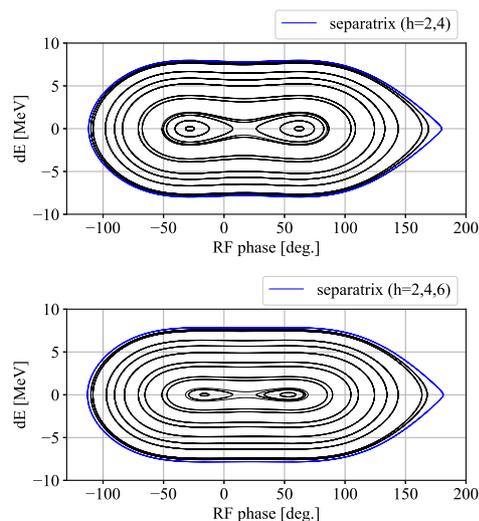


Figure 11: The trajectories in the RF bucket at 1 ms in the case $h = 2, 4$ (top figure) and $h = 2, 4, 6$ (bottom figure), respectively.

7. まとめ

J-PARC RCS の縦方向ビームシミュレーションツールとして導入を進めている BLoND のベンチマークを実施した。BLoND は主な部分が Python で書かれているため、アルゴリズムやコードの中身の理解が容易であり、RF 周波数にオフセットがある場合の BLoND シミュレーション方法を確立し、RCS の縦方向ビームシミュレーションの準備を整えた。RCS の 1MW 運転パラメータを反映した BLoND シミュレーション結果はバンチングファクターやパンチ形状などで測定値を非常によく再現しており、RCS の縦方向シミュレーションに BLoND が使えることが確認された。今後 BLoND を用いて運転パラメータの最適化 (3 倍高調波を用いたトリプルハーモニック運転等) を検討する。

参考文献

- [1] CERN Beam Longitudinal Dynamics code BLoND version 2.0.11; <https://blond.web.cern.ch>
- [2] M. Yamamoto *et al.*, "Simulation of longitudinal beam manipulation during multi-turn injection in J-PARC RCS", Nucl. Instr. Meth. A, 621, pp. 15–32 (2010).
- [3] M. Yamamoto *et al.*, "Vacuum tube operation analysis under multi-harmonic driving and heavy beam loading effect in J-PARC RCS", Nucl. Instr. Meth. A, 835, pp. 119–135 (2016).
- [4] F. Tamura *et al.*, "Longitudinal painting with large amplitude second harmonic rf voltage in the rapid cycling synchrotron of Japan Proton Accelerator Research Complex", Phy. Rev. Accell. Beams, 12, p. 041001 (2009).
- [5] F. Tamura *et al.*, "Multiharmonic vector rf voltage control for wideband cavities driven by vacuum tube amplifiers in a rapid cycling synchrotron", Phy. Rev. Accell. Beams, 22, p. 092001 (2019).