

J-PARC RCSにおける大強度ビーム加速時に  
加速ギャップに発生する高次高調波の評価

EVALUATION OF HIGHER HARMONICS GENERATED IN ACCELERATION GAPS  
DURING THE HIGH POWER BEAM ACCELERATION AT J-PARC RCS

沖田英史<sup>\*,A)</sup>, 田村文彦<sup>A)</sup>, 山本昌亘<sup>A)</sup>, 野村昌弘<sup>A)</sup>, 島田太平<sup>A)</sup>,  
吉井正人<sup>B)</sup>, 大森千広<sup>B)</sup>, 原圭吾<sup>B)</sup>, 長谷川豪志<sup>B)</sup>, 杉山泰之<sup>B)</sup>,  
Hidefumi Okita<sup>\*,A)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>A)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>A)</sup>, Masahiro Nomura<sup>A)</sup>, Taihei Shimada<sup>A)</sup>,  
Masahito Yoshii<sup>B)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>B)</sup>, Keigo Hara<sup>B)</sup>, Katsushi Hasegawa<sup>B)</sup>, Yasuyuki Sugiyama<sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup> J-PARC center, JAEA, <sup>B)</sup> J-PARC center, KEK

Abstract

The J-PARC 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) employs wideband RF cavities. During the high power beam acceleration, the acceleration gap voltage includes not only the driving harmonics, but also other multiple harmonic components due to the wake field. The low level RF control system for the RCS demodulates the harmonic components up to the fourth harmonic ( $h = 8$ ) of the accelerator gap voltage. The recent beam tracking simulation studies suggested that the higher harmonic components above  $h = 8$  may affect the longitudinal beam behavior during the high power beam acceleration. In this study, we measured the acceleration gap voltage during the 1 MW beam operation, and analyzed the higher harmonic components existing in it. Longitudinal beam tracking simulation is carried out to evaluate the effect of the higher harmonic components on the longitudinal beam behavior. The result of tracking simulation shows that the higher harmonic components deform the potential and bunch shapes at the end of the 1 MW beam operation.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン (RCS) では、金属磁性体 (MA) を装填した広帯域の RF 空洞を使用している。そのため、一台の RF 空洞で複数の高調波を駆動することが可能で、大強度ビーム運転では基本波と二倍高調波を重畳した RF 電圧を駆動するデュアルハーモニック運転を行っている。二倍高調波を重畳することで、バンチ形状は平滑化され空間電荷効果が低減する。デュアルハーモニック運転は安定した大強度ビーム運転に必要な不可欠なものとなっている。

大強度ビーム運転中の加速ギャップ電圧は、ビーム電流が誘起するウェイク電圧の影響を受ける。RCS の RF 空洞は広帯域であるため、ウェイク電圧には複数の高調波成分が含まれる。RCS の LLRF (Low Level RF) 制御システムは加速ギャップ電圧を観測しており、四倍高調波 ( $h = 8$ ) までの高調波成分の検波と制御が可能である [1]。

近年、RCS の大強度ビーム運転中の縦方向のビーム挙動を評価するビームトラッキングシミュレーションが進められている [2]。ビームトラッキングシミュレーションの結果、1 MW ビーム運転中の縦方向のビーム挙動に  $h = 8$  より高次の高調波が影響している可能性が示唆されていた [3]。

本研究では、1 MW ビーム運転中の加速ギャップ電圧を測定し、周波数解析から加速ギャップ電圧に含まれる高次高調波の評価した。加えて、ビームトラッキングシミュレーションを用いて高次高調波電圧が縦方向のビーム挙動に与える影響を評価した。

本論文では、1 MW ビーム運転中の加速ギャップに発生している高次高調波の解析と高次高調波電圧を反映したビームトラッキングシミュレーションの詳細について報告する。

2. RCS の RF システムの概要

RCS の RF システムのパラメータを Table. 1 に示す。RCS には 12 台の RF 空洞があり、2 種類の RF 空洞で構成される。4 号機がシングルエンド型 [4] で、それ以外の 11 台はプッシュプル型の RF 空洞である。ハーモニック数は  $h = 2$  であり、加速に伴い基本波の RF 周波数は 1.227 MHz–1.671 MHz まで変化する。

RCS では 1 台の RF 空洞で基本波と 2 倍高調波 ( $h = 4$ ) の 2 つの高調波を駆動させている。現在の加速パターンにおける、基本波の最大振幅は 12 台の RF 空洞の合計で約 440 kV であり、2 倍高調波振幅の基本波に対する割合は最大で 70% である。

RCS の RF 空洞は RLC 並列共振回路と考えることができ、RF 空洞のインピーダンス  $Z$  は、

$$Z(f) = \frac{R_s}{1 + jQ(f/f_r - f_r/f)} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $j$  は虚数単位である。 $R_s, f_r, Q$  はそれぞれ、シャントインピーダンス、共振周波数、Q 値である。RCS の代表的な RF 空洞の  $R_s, f_r, Q$  の値はそれぞれ 2400  $\Omega$ /cavity、2.1 MHz、2.3 である。(1) 式を用いて計算された RF 空洞一台あたりのインピーダンスの絶対値  $|Z|$  を Fig. 1 に示す。RCS の RF 空洞は Q 値が低く広帯域であり、インピーダンスは高周波側で緩やかに減衰する。

\* hidefumi.okita@j-parc.jp

Table 1: Parameters of the RF System of the RCS

Number of cavities	12
Fundamental harmonic number	2
RF frequency ( $h=2$ )	1.227 MHz–1.671 MHz
Driving harmonics	2, 4
Max. acc. voltage ( $h=2$ )	440 kV
Shunt impedance ( $R_s$ )	2400 $\Omega$ /cavity
Resonant frequency ( $f_r$ )	2.1 MHz
Q value	2.3

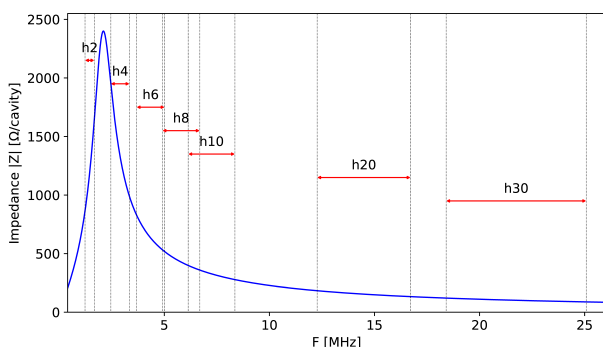


Figure 1: Impedance of typical RF cavities of the RCS. The frequency range of the representative harmonic components is also depicted.

ビーム運転中、加速ギャップにはビーム電流  $I_{\text{beam}}$  が誘起するウェイク電圧  $V_{\text{ind}}$  が発生する。 $V_{\text{ind}}$  と  $I_{\text{beam}}$  には、

$$V_{\text{ind}}(f) = Z(f)I_{\text{beam}}(f) \quad (2)$$

の関係がある。大強度ビーム運転中の  $I_{\text{beam}}$  には複数の高調波成分が含まれる。RCS の RF 空胴のインピーダンス  $Z$  は広帯域であるため、複数の高調波成分を含む  $V_{\text{ind}}$  が加速ギャップに現れる。

RCS では空胴ギャップ電圧モニタ (以下、「電圧モニタ」とする。) を用いて加速ギャップ電圧を測定している。電圧モニタは各 RF 空胴の加速ギャップに直接取り付けられている。電圧モニタは内部に容量分圧回路をもち、加速ギャップ電圧を 1/2000 に降圧させて LLRF 制御システムをはじめとした各種機器に信号を送っている [3]。

RCS では LLRF 制御システムにマルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバック [1] を導入している。フィードバックでは、電圧モニタの信号を検波し、各高調波の複素振幅がプログラム通りになるよう制御している。現在の LLRF 制御システムは、 $h=1$  から 4 倍高調波 ( $h=8$ ) までの 8 つの高調波成分を検波している。

LLRF 制御システムで検波した 1 MW ビーム運転中の加速ギャップ電圧に含まれる  $h=8$  までの各高調波の振幅と位相を Fig. 2 に示す。Figure 2 は、12 台の各 RF 空胴の検波結果を RF 空胴間の位相差を考慮

してベクトル合成した結果である。 $h=2, 4$  はプログラムにより駆動させている高調波であり、プログラム通りの電圧と位相が加速ギャップに現れている。 $h=6, 8$  はウェイク電圧等により加速ギャップに発生しているものである [5]。1 MW ビーム運転時、電源等の制約により、LLRF 制御システムで  $h=6, 8$  のフィードバックの設定を一部の RF 空胴でオフにしている。そのため、加速ギャップに  $h=6, 8$  が現れており、それぞれの最大振幅は 45 kV、30 kV 程度である。なお、奇数高調波成分 ( $h=1, 3, 5, 7$ ) はフィードバックによりほぼ 0 に制御できているため図示していない。

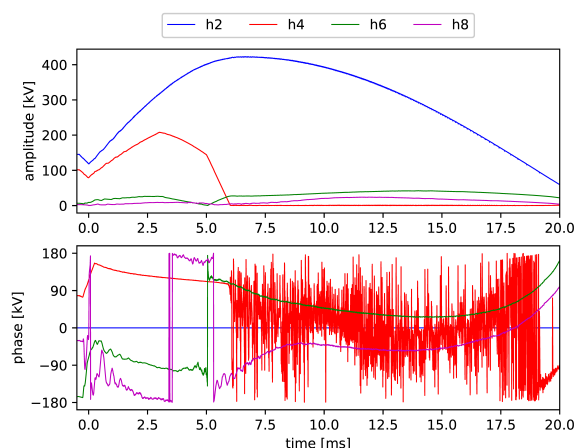


Figure 2: Harmonic components of  $h=2, 4, 6, 8$  of the acceleration gap voltage, which is demodulated by the LLRF control system at the 1 MW beam operation.

### 3. 加速ギャップ電圧に含まれる高次高調波の解析

現在の LLRF 制御システムでは、高調波成分の検波は 8 つの高調波に限られている。そこで、 $h=8$  より高次の高調波成分を評価するために、1 MW ビーム運転時の各 RF 空胴の電圧モニタの信号を加速開始から終了までオシロスコープに記録し、周波数解析を行なった。

12 台の RF 空胴の周波数解析結果をベクトル合成したものを Fig. 3 に示す。Figure 3 には、 $h=8-30$  の偶数高調波の振幅を示している。これらの振幅の評価にあたり、電圧モニタの周波数応答を考慮した。比較的大きな高調波成分は  $h=10, 12, 14$  であり、これらは最大 10 kV 程度の振幅を持つ。その他にも複数の高次高調波が存在するが、 $h=20$  以上では振幅は最大でも 3 kV 程度まで減少し、 $h=26$  以上では振幅はほぼ 0 となる。

RF 空胴毎の高次高調波電圧の発生傾向を調査するため、12 台の各 RF 空胴の高次高調波電圧の振幅を比較した。一例として  $h=12$  の振幅を比較した結果を Fig. 4 に示す。シングルエンド型である 4 号機を除き、全ての RF 空胴でほぼ均一に  $h=12$  が発生している。 $h=12$  以外についても RF 空胴毎に振幅が

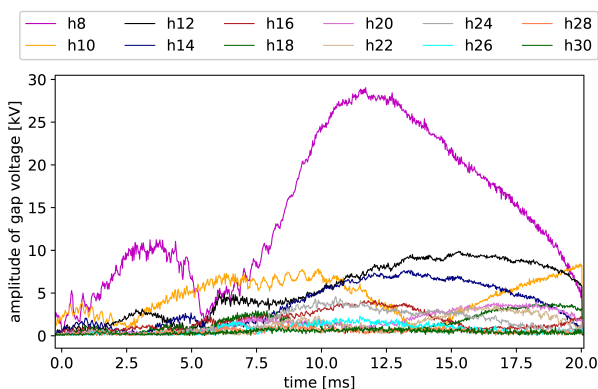


Figure 3: Amplitude of the higher harmonic components of the acceleration gap voltage at the 1 MW beam operation.

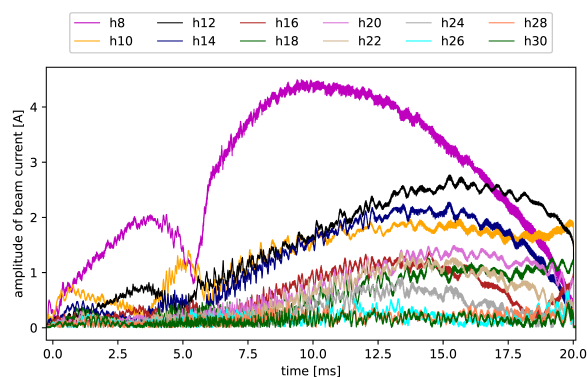


Figure 5: Amplitude of the higher harmonic components of the beam current distribution at the 1 MW beam operation.

大きく変動しないことを確認している。

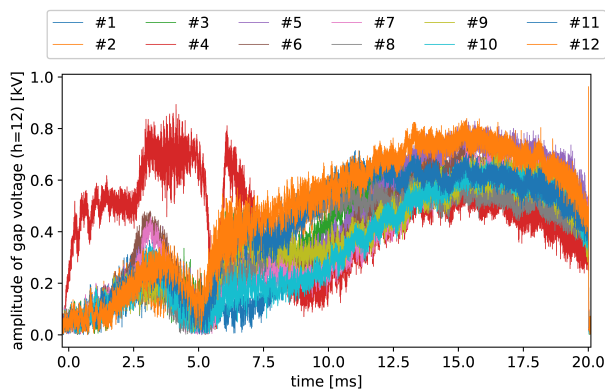


Figure 4: Comparison of the amplitude of the  $h = 12$  component of the acceleration gap voltage for each RF cavity.

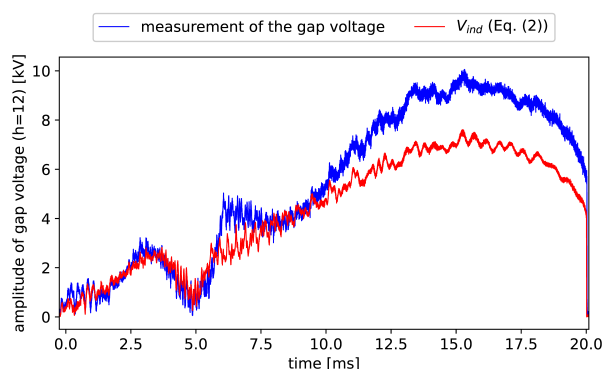


Figure 6: Comparison the amplitude of  $h = 12$  component of acceleration gap voltage. The red line shows the direct measurement of the acceleration gap voltage. The blue line shows the wake voltage  $V_{ind}$  obtained by the calculation using  $Z$  and  $I_{beam}$ .

加速ギャップ電圧に含まれる高次高調波と  $I_{beam}$  との関係を知るため、1 MW ビーム運転時に Wall Current Monitor (WCM) で観測したビーム信号の周波数解析を行なった。Figure 5 は 1 MW ビーム運転時の WCM の信号を周波数解析した結果である。加速後半ではバンチ長が短くなるため、 $I_{beam}$  の高次高調波成分が大きくなる。 $h = 26$  以上では  $I_{beam}$  の振幅もほぼ 0 となる。

Figures 1, 5 で示した  $Z$  と  $I_{beam}$  を用いて  $V_{ind}$  を計算し、電圧モニタの測定値と比較した。一例として  $h = 12$  の振幅を比較した結果を Fig. 6 に示す。 $I_{beam}$  から計算された  $V_{ind}$  の振幅と応答は電圧モニタの測定値と大凡一致することから、1 MW ビーム運転中の加速ギャップに発生している高次高調波が主にビーム由来であることが分かる。

#### 4. 高次高調波電圧を考慮した縦方向ビームトラッキングシミュレーション

加速ギャップ電圧に含まれる高次高調波が縦方向のビーム挙動へ与える影響を評価するために、縦方向ビームトラッキングシミュレーションを実施

した。シミュレーションには、CERN で開発された BLongD (Beam Longitudinal Dynamics) [6] を使用した。BLongD シミュレーションで使用する RF 電圧パターンには、Fig. 3 で示した電圧モニタの測定値を用いた。縦方向の空間電荷効果や RF 空胴以外の各機器のインピーダンスの効果はシミュレーションに含めていない。その理由は、RCS では縦方向の空間電荷効果や RF 空胴以外の各機器のインピーダンスは十分小さく無視できる。また、RF 空胴のインピーダンスや位相フィードバックの効果は電圧モニタの測定値に含まれているためである。その他の BLongD を用いた RCS の縦方向ビームシミュレーションについては Ref. [2] に記載している。

本研究では、 $h = 8$  まで考慮した電圧パターンと  $h = 26$  まで考慮した電圧パターンを用いた 2 通りの BLongD シミュレーションを実施した。Figure 7 に、5, 10, 15, 20 ms のタイミングでの BLongD シミュレーションで得られたバンチ形状と 1 MW ビーム運転時の WCM の測定値の比較を示す。

加速前半の 5 ms, 10 ms では、2 通りのシミュレーションでバンチ形状に目立った違いはなく、どちら

とも測定値をよく再現している。一方で、加速後半の 15 ms, 20 ms では、2通りのシミュレーションでバンチ形状が異なり、 $h = 26$  まで考慮した方が WCM の測定値をよく再現している。このように、RCS の 1 MW ビーム運転では、加速後半で高次高調波電圧が縦方向のビーム挙動に影響を与えており、 $h = 26$  まで考慮すれば加速全般にわたり 1 MW ビーム運転中のビーム挙動をよく再現する。

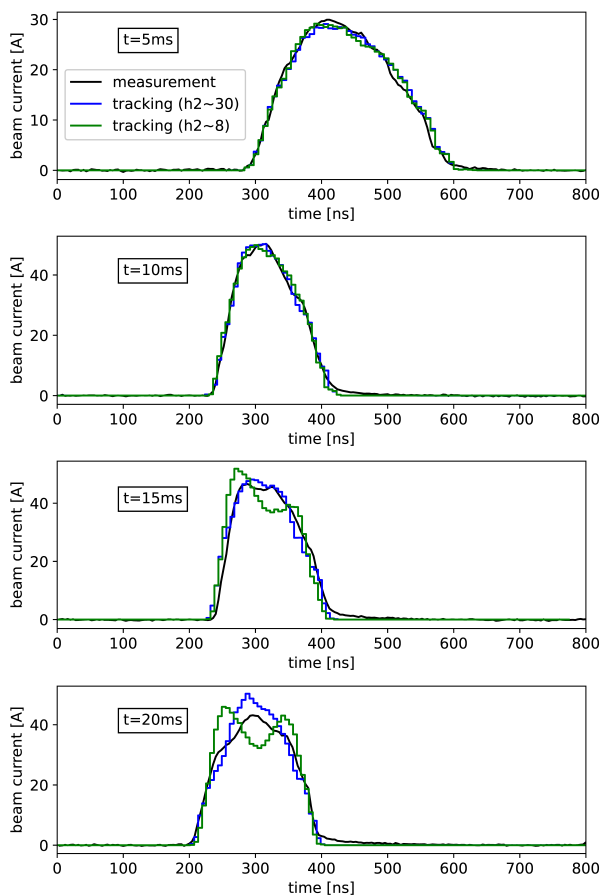


Figure 7: Comparison of bunch shapes at 5 ms (top), 10 ms (2nd stage), 15 ms (3rd stage), and 20 ms (bottom). Black lines show the measured bunch shapes acquired by the WCM at the 1 MW beam operation. Green and blue lines are simulated bunch shapes considering the harmonic components up to  $h = 8$  and  $h = 26$ , respectively.

## 5. 高次高調波電圧がビーム挙動に与える影響の考察

高次高調波電圧が加速後半でバンチ形状を変形させる理由について考察する。縦方向のビーム挙動は RF 電圧が形成するポテンシャル  $U$  に従う振動運動である。バンチ形状はそのときのポテンシャル形状に大きく依存する。複数の高調波を含む RF 電圧が形成するポテンシャルは、

$$U(\phi) = \frac{eV_0}{2\pi} \left\{ \sum_i \left[ \frac{h_0}{h_i} \frac{V_i}{V_0} \cos \left( \frac{h_i}{h_0} \phi - \phi_i + \frac{h_i}{h_0} \phi_0 \right) \right] + \frac{\Delta E_s}{eV_0} \phi \right\} + \text{const} \quad (3)$$

で表される。ここで、 $V$ 、 $\phi$ 、 $h$ 、 $\Delta E_s$ 、 $e$  はそれぞれ、RF 電圧の振幅と位相、ハーモニック数、同期粒子のエネルギー変化量、電荷数を表す。下付きの 0 と  $i$  はそれぞれ基本波とそれ以外の高調波成分を示す。

(3) 式が示すように、各高調波の振幅  $V_i$  は  $(h_0/h_i)(V_i/V_0)$  でポテンシャル形状に影響することが分かる。そこで、Fig. 3 で示した各高調波の振幅を  $(h_0/h_i)(V_i/V_0)$  の形で表したものを Fig. 8 に示す。 $(h_0/h_i)(V_i/V_0)$  は加速終盤にかけて増加する。これは、Fig. 2 で示すように、RCS の基本波の振幅  $V_0$  は加速後半で減少し続けるため、基本波に対する各高調波の振幅  $V_i/V_0$  が増加するためである。

Figure 9 に 10 ms と 20 ms における  $h = 8$  まで、及び  $h = 26$  までを考慮したときのそれぞれのポテンシャル形状を示す。10 ms では高次高調波電圧の有無でポテンシャル形状の違いが見られない一方で、20 ms では高次高調波電圧がポテンシャルを歪ませている。また、Fig. 9 が示すように、加速後半では、 $h = 8$  までの高調波が形成するポテンシャルが広く平坦となっており、これも高次高調波電圧の影響がより大きく反映されている要因である。

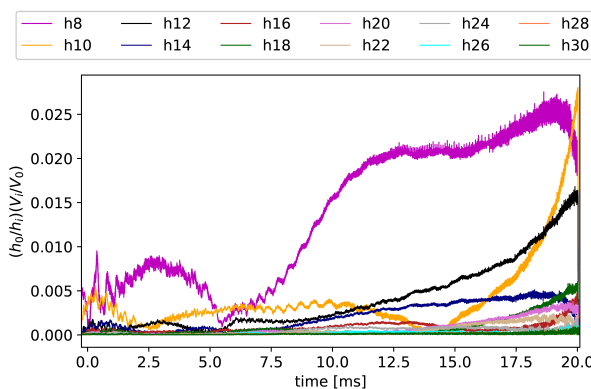


Figure 8: The behavior of  $(h_0/h_i)(V_i/V_0)$  during the 1 MW beam operation.

ポテンシャルの変形がビーム分布に与える影響を評価するため、高次高調波電圧の有無での RF バケツ形状と位相空間上の粒子分布を比較した。Figure 10 に 20 ms における  $h = 8$  まで、及び  $h = 26$  までを考慮したときのそれぞれの RF バケツ形状と BLD シミュレーション結果の比較を示す。高次高調波電圧がポテンシャルを歪ませることで RF バケツの内部構造が変形している。 $h = 8$  までしか考慮しない場合、RF バケツには二つの内部セパトリティクスが存在し、これにより、粒子は左右に別れて分布している。それ故、バンチ形状は Fig. 7 に示したような双

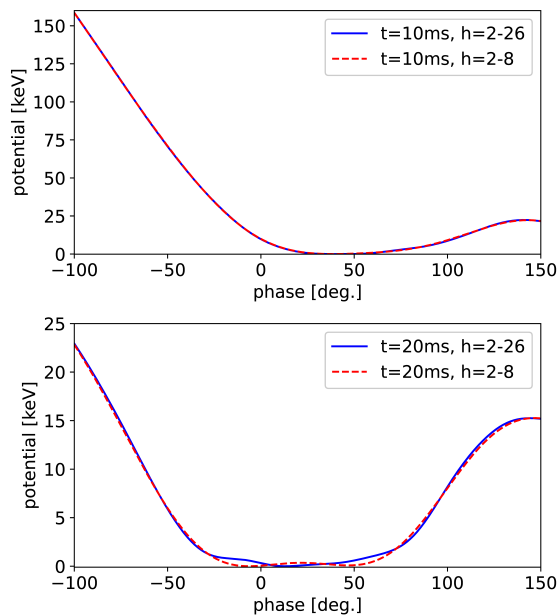


Figure 9: Comparison of the potential shapes at the 10 ms (top) and 20 ms (bottom) with and without considering the higher harmonics.

峰型となる。一方で、 $h = 26$  までを考慮した場合は、二つの内部セパトロクスが消え、かつ中央が膨らんだ RF バケツ形状になっている。そのため、粒子は中心に集まるように分布し、バンチ形状は WCM で観測されたような単峰型のバンチ構造になる。このように、高次高調波電圧は最大でも 10kV 程度だが加速後半のポテンシャル及びバンチ形状を変形させるに十分であることが分かった。

## 6. まとめ

J-PARC RCS の大強度ビーム運転中の加速ギャップに発生する高次高調波電圧とその縦方向のビーム挙動への影響の評価を行なった。1 MW ビーム運転中の加速ギャップ電圧測定とその周波数解析の結果、加速ギャップに複数の高次高調波が発生していることが分かった。ビーム電流分布の周波数解析とその評価の結果、高次高調波電圧は主にビーム由来であることが分かった。高次高調波電圧を考慮した縦方向ビームトラッキングシミュレーションの結果、高次高調波電圧の有無で加速後半のバンチ形状が変形し、高次高調波電圧を考慮する方が実際のバンチ形状をより精度良く再現した。ポテンシャル形状に関する考察から、高次高調波電圧は加速後半のポテンシャルを歪ませるのに十分大きく、それによりバンチ形状が変形していることが分かった。今後、高次高調波電圧を常に観測可能な環境の構築を進める。

## 参考文献

- [1] 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

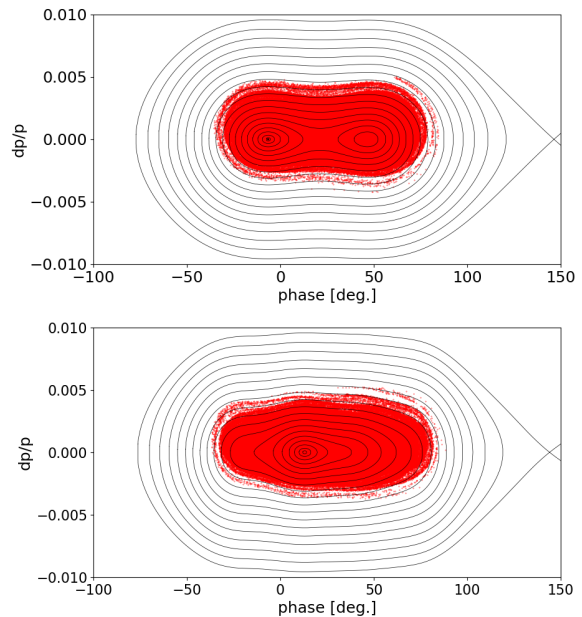


Figure 10: Comparison of RF bucket shapes and simulated particle distribution at 20 ms with (bottom) and without (top) considering the higher harmonic components. The particle distribution shown in red dots is obtained by the BLoND simulation.

- (2019).
- [2] H. Okita *et al.*, "Benchmarking of longitudinal calculation code BLoND for application to J-PARC RCS", *Proc. of PASJ2020*, pp. 674-678, (2020).
- [3] H. Okita *et al.*, "Evaluation of the frequency response of the acceleration gap voltage monitor of the J-PARC RCS", *Proc. of PASJ2021*, pp. 840-844, (2021).
- [4] M. Yamamoto *et al.*, "Conceptual design of a single-ended MA cavity for J-PARC RCS upgrade", *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1067 52014 (2018).
- [5] F. Tamura *et al.*, "Commissioning of the next-generation llrf control system for the rapid cycling synchrotron of the japan proton accelerator research complex", *Nucl. Instr. Meth. A*, 999m, (2021); doi:10.1016/j.nima.2021.165211
- [6] CERN, Beam Longitudinal Dynamics code BLoND version 2.0.11; <https://blond.web.cern.ch>