

Longitudinal Painting by Using Large Amplitude Second Harmonic RF

Fumihiko Tamura*, Masanobu Yamamoto, Masahito Yoshii, Chihiro Ohmori,
Masahiro Nomura, Alexander Schnase, Makoto Toda, Hiromitsu Suzuki,
Taihei Shimada, Keigo Hara, Katsushi Hasegawa
J-PARC Center, KEK & JAEA, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan 319-1195

Abstract

For stable acceleration of the high intensity proton beams, increasing the bunching factor by the longitudinal painting is essentially important to reduce the space-charge tune shift. The momentum offset injection method and applying the second harmonic RF are employed for the longitudinal painting in the J-PARC RCS. We employ wide band magnetic alloy (MA) cavities to realize the dual-harmonic operation, in which each cavity is driven by the superposition of the fundamental and the second harmonic RF signals. By the dual-harmonic operation we can generate the large amplitude second harmonic RF without extra cavities for the second harmonic. We report the beam test results of the longitudinal painting.

大振幅の2倍高調波重畳による縦方向ペインティング

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の速い繰り返しのシンクロトロン (RCS) では、大電流陽子ビーム加速の際のスペースチャージチューンシフトを軽減するために、入射時に、横方向のペインティングに加え、縦方向のペインティングを行うことが必要である。J-PARC RCS では、縦方向ペインティングの手法として、運動量オフセット入射と2倍高調波重畳を採用している。

表1にRCSのパラメータを示した。金属磁性体 (MA) 空腔を採用し、 $Q = 2$ という広帯域に設定することにより、高い最大加速電圧を発生させるとともに、デュアルハーモニック運転^[1]を可能にしている。デュアルハーモニック運転では、加速に用いる基本波 ($h = 2$) とパンチ整形に用いる2倍高調波 ($h = 4$) を重畳したRF電圧でそれぞれの空腔を駆動する。これにより、2倍高調波専用の空腔を準備することなく、大振幅の2倍高調波を発生させることが可能となった。RCSでは、基本波に対し80%以上の振幅の2倍高調波を発生させることができる。周長が限られているRCSにおいては、デュアルハーモニック運転は必須である。

ペインティングの評価に、平均電流とピーク電流の比、 $B_f = (\text{平均電流})/(\text{ピーク電流})$ で定義される

表1: Parameters of the J-PARC RCS and its RF system.

circumference	348.333 m
energy	0.181–3 GeV
accelerating frequency	0.938–1.671 MHz
harmonic number	2
maximum RF voltage	450 kV
repetition	25 Hz
No. of cavities	11
Q-value	2

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

表2: Beam test parameters.

macro pulse width	500 μ s
chopping width	560 ns
linac peak current	5 mA
number of filled buckets	2
number of accelerated protons	0.8×10^{13}
momentum spread of linac beam	$\pm 0.05\%$
RF frequency during injection	0.938–0.939 MHz
RF voltage during injection	78–111 kV
bucket height during injection	1.03–1.24%
synchrotron freq. near injection	3370–4009 Hz
phase feedback	on

バンチングファクターを用いる。RCSでは、1 MW 運転時には、入射時の B_f を0.4以上とすることが必要である。

今回の試験では、ビームを加速しながら、ペインティングのパラメータの調査を行った^[2]。

2. ビーム試験結果

表2に、ビーム試験のパラメータを示した。今回の試験では、2パンチで 0.8×10^{13} 個の陽子を加速している。これは、25 Hz 運転で100 kW 相当のビームになる。マクロパルス幅は500 μ s であり、磁場の励磁のボトム前後117ターンずつ、計234ターンに相当する。

ウォールカレントモニター (WCM) からのビーム信号を、LLRFシステムで生成した周回クロック信号とともにロングメモリオシロスコープ (WP950) で記録し、PCで処理した。

今回の試験では、2倍高調波の振幅、および運動量オフセットをパラメータとして、パンチ波形、バンチングファクターの比較を行った。基本波に対する2倍高調波振幅は、入射から1 msまでは最大の比率で保持し、その後比率をリニアに減少させ、3 msでゼロとなるパターンとした。運動量オフセットは、 η をス

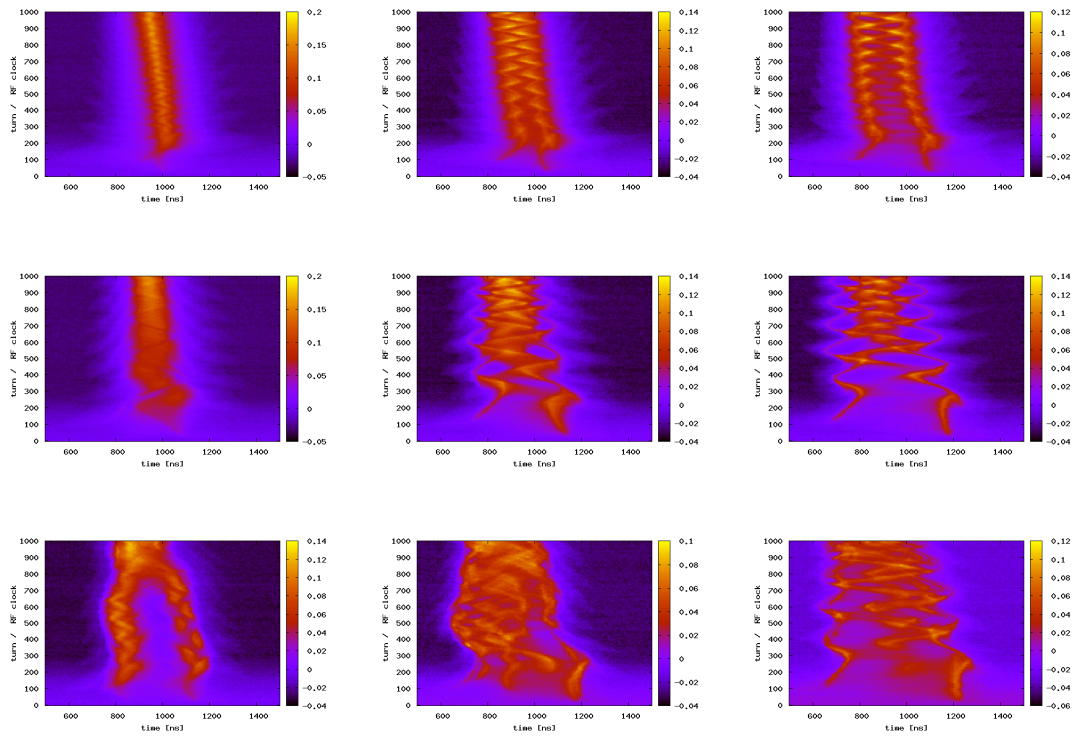


図 1: 入射後のマウンテンプロット。上段：基本波のみ、中段：2 倍高調波振幅 50%、下段：2 倍高調波振幅 80%。左から右に、運動量オフセット 0%、 -0.2% 、 -0.4% の順。

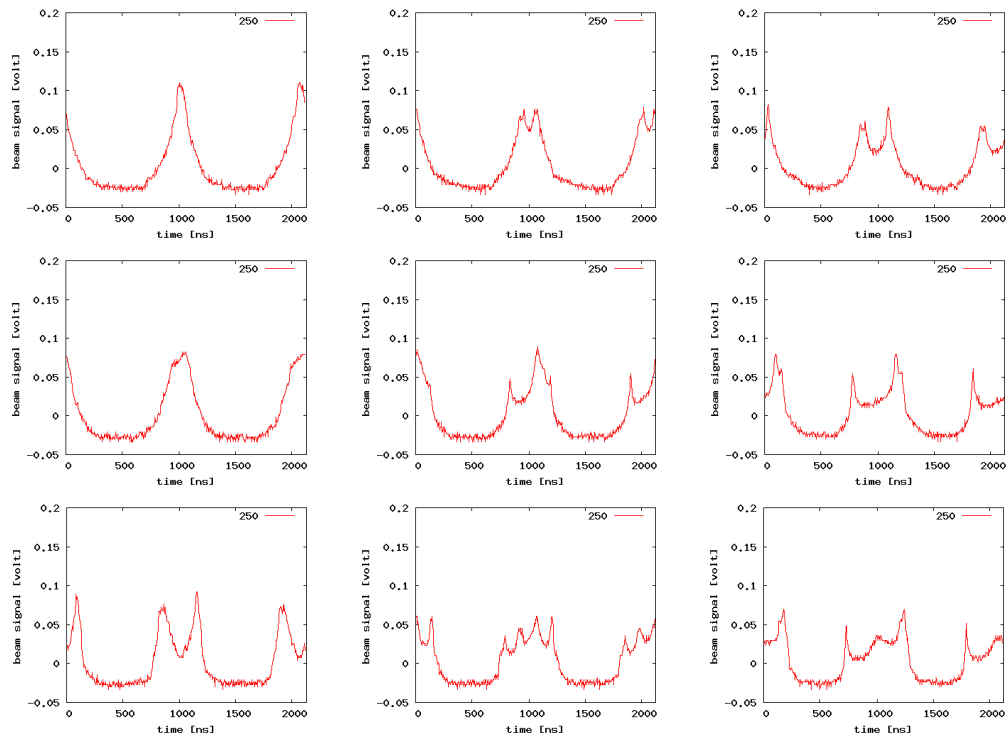


図 2: 入射後 250 ターンでのバンチ波形。上段：基本波のみ、中段：2 倍高調波振幅 50%、下段：2 倍高調波振幅 80%。左から右に、運動量オフセット 0%、 -0.2% 、 -0.4% の順。

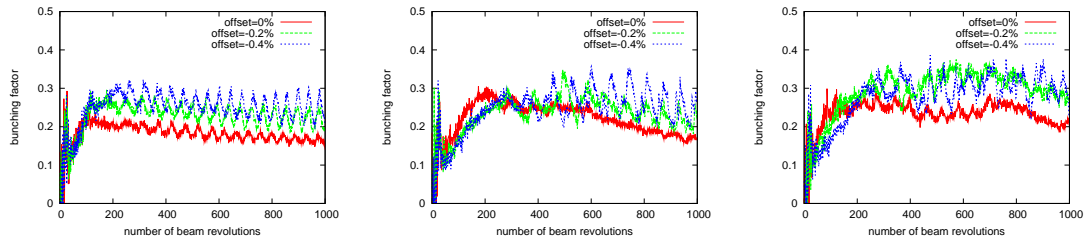


図 3: 入射後 1000 ターンまでのバンチングファクター。左: 基本波のみ、中: 2 倍高調波振幅 50%、右: 2 倍高調波振幅 80%。それぞれのプロットで、赤: 運動量オフセットなし、緑: -0.2% 、青: -0.4% 。

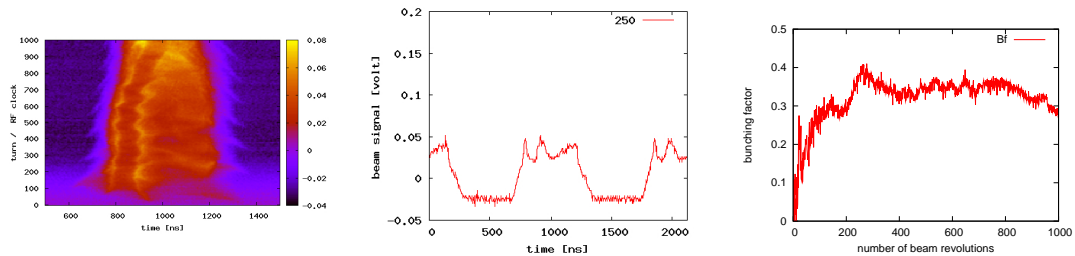


図 4: 2 倍高調波振幅 80%、運動量オフセット -0.2% に加え、位相スイープ 80 度を加えた時のマウンテンプロット、250 ターンでのバンチ波形、バンチングファクター。

リッページとして、 $df/f = \eta \times dp/p$ で定義される周波数オフセットを与えることにより実現した。また入射期間中に基本波に対する 2 倍高調波の位相をスイープする、「2 倍高調波位相スイープ」も行った。これにより入射期間中の RF バケツの形を動的に変化させ、より効率的にペインティングを行うことができる。2 倍高調波位相スイープでは、基本波に対する 2 倍高調波の位相を、 $\phi_{(h=4)} = \frac{\phi_{\text{sweep}}}{T_{\text{inj}}} \left(t - \frac{T_{\text{inj}}}{2} \right) - 2\phi_s$ [度] のように変化させる。ここに、 $\phi_{(h=4)}$ は 2 倍高調波の位相、 ϕ_{sweep} は設定したスイープの範囲、 T_{inj} は入射期間、 ϕ_s は同期位相である。

基本波のみ、2 倍高調波振幅 (基本波に対し) 50%、80% の時に、運動量オフセットを 0%、 -0.2% 、 -0.4% 設定した時のマウンテンプロットを図 1、250 ターンでのバンチ波形を図 2、バンチングファクターを図 3 に示した。基本波のみで運動量オフセット 0% (ペインティングを行わない場合) では、バンチ中央付近の電荷密度が高くなるのがわかる。入射直後の 250 ターン付近ではバンチングファクターは 0.2 程度である。運動量オフセットを -0.2% 、 -0.4% と与えていくと、ビームはホロウになっていき、またバンチングファクターはそれぞれ 0.27、0.3 程度まで改善する。また、四極振動が増加し、バンチングファクターの振動が見られる。

2 倍高調波 50% の場合、運動量オフセットなしで、バンチングファクターは (250 ターン付近で) 0.28 程度まで改善する。2 倍高調波 50% の場合は、運動量オフセットによりバンチ波形はホロウになっていくが、オフセットを -0.4% までかけた場合でも、バンチングファクター改善の効果があまり見られなかった。2 倍高調波 50% と運動量オフセットの組み合わせ

せは、あまり良くないことがわかる。

2 倍高調波 80% の場合、RF バケツは中心がくびれた形となるため、運動量オフセットなしの時、バンチもピークをふたつ持つ形となる。運動量オフセットは -0.2% がバンチ波形もあまりホロウにならず、250 ターンでのバンチングファクターも約 0.32 と最も良かった。この条件で、2 倍高調波位相スイープを 80 度加えた時のデータを、図 4 に示した。バンチは非常に平坦であり、250 ターンでのバンチングファクターは 0.4 近くを達成した。また、バンチングファクターの振動が非常に少ないことから、四極振動も少ないことがわかる。

今回の試験では、ペインティングの有無によらずビームロスは少なく、3% 以下だった。より大強度の場合にはペインティングによるロスの低減効果が見られるものと期待される。

3. まとめ

2 倍高調波を大振幅 (基本波に対して 80% の振幅) で重畳することにより、非常に効率的な縦方向ペインティングができることを実証した。今後は、より大強度のビームを用い、横方向のペインティングと組み合わせ、ロス低減の効果を検証していく。

参考文献

- [1] F. Tamura *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 11, 072001, 2008.
- [2] F. Tamura *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 12, 041001, 2009.