

COMMISSIONING OF MULTIHARMONIC FEEDFORWARD SYSTEM FOR J-PARC MR

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

Abstract

For acceleration of high intensity proton beam, it is important to compensate the beam loading due to the wake voltages in accelerating cavities. The Q-value of the magnetic-alloy cavity in the J-PARC MR is set to 22 to cover the frequency sweep of the accelerating harmonic ($h = 9$) without tuning bias loop. The cavity bandwidth also covers the neighbor harmonics ($h = 8, 10$). Thus, the wake voltage consists of the accelerating harmonic ($h = 9$) and the neighbor harmonics ($h = 8, 10$). We employ the RF feedforward method to compensate the multiharmonic beam loading. The full-digital feedforward system has been developed for the MR. We present the commissioning results of the system with high intensity (1.0×10^{14} ppp) proton beams.

J-PARC MR のマルチハーモニック RF フィードフォワードシステムの調整

1. はじめに

J-PARC のシンクロトロン (RCS および MR) では、大強度陽子ビームの加速に必要な高い加速電圧を発生させるために、金属磁性体 (MA) 空胴を採用している。MR および MR RF システムの主なパラメータを表 1 に示す。現在までに、 1.0×10^{14} ppp のビーム強度を達成している^[1]。これは、2.56 秒周期での運転でビームパワー 200 kW に相当する。

MR では、デュアルハーモニック運転^[2]を行っている RCS と異なり、空胴はシングルハーモニック ($h = 9$) で駆動されている。空胴台数は 8 台で、最大電圧は 280 kV である。空胴 Q 値は 22 に調整され、加速ハーモニックの周波数スイープ (1.67–1.72 MHz) を無同調でカバーできる。一方、空胴帯域には加速ハーモニックに隣接するハーモニクス ($h = 8, 10$) も含まれるため、空胴に誘起されるウェーク電圧は、加速ハーモニック成分およびこれら隣接するハーモニック成分の重畳となっている。大強度陽子ビーム加速のためには空胴に誘起されるウェーク電圧によるビームローディングの補償は重要な課題である。加速ハーモニックのビームローディングは主にバンチ重心の運動に影響を与える。また、隣接ハーモニクスのビームローディングは、周期的過渡ビームローディングと呼ばれ、RF バケツの変形やカップルドバンチ instability の原因となる。J-PARC MR では、RCS 同様に RF フィードフォワード法を採用し、マルチハーモニックのビームローディング補償を行っている。

2. 空胴に誘起されるウェーク電圧

MR には、RCS から 2 バンチずつ 4 回、計 8 個のバンチが入射される。入射間隔は 40 ms で、4 回の入射タイミングは“K1”、“K2”、“K3”、“K4”と呼ばれる。空胴 1 台の RF 出力を停止しビームを入射することにより、ウェーク電圧を直接測定することができる。バッチあたり強度 2.5×10^{13} の陽子を入射していった時の、K1–K4 直後のウェーク電圧波形を、図 1 に示す。周回周期の $5.32 \mu\text{s}$ の時間だけプロットした。縦軸は加速ギャップ

表 1: J-PARC MR および RF システムのパラメータ

circumference	1567.5 m
energy	3–30 GeV
beam intensity	(achieved) 1.0×10^{14} ppp
accelerating frequency	1.67–1.72 MHz
harmonic number	9
number of bunches	8
maximum rf voltage	280 kV
repetition period	2.56 s
No. of cavities	8
Acc. gaps in a cavity	3
cavity resonant frequency	1.72 MHz
Q-value of rf cavity	22

電圧である。バンチは前方よりバンチ間隔約 600 ns で 2 バンチずつ詰められていく。K1 入射直後では、2 バンチしか周回しておらず、また $Q = 22$ と低い Q 値のため、周回周期の後半にかけ減衰していく様子がわかる。また、K2 では、4 つのバンチのウェークが重なり周期中盤にかけ増大し、その後減少に転ずることがわかる。6 バンチおよび 8 バンチが周回する K3、K4 では、9 個の RF バケツのうち多くにバンチが入射されているために、ウェーク電圧の周回周期中のモジュレーションは小さくなっていく。

入射期間中のウェーク電圧のハーモニック成分を図 2 に示す。ギャップ電圧モニター電圧波形を各入射タイミング (K1–K4) から 10 ms の間ずつ捕捉し、ハーモニック解析を行った。図 2 中、時間軸はオシロスコープに捕捉された合計時間である。K1–K4 とビーム電流が増えるにつれ、加速ハーモニック ($h = 9$) 成分はビーム電流に比例して増加していく。その一方、上に示したように、RF バケツを埋めていくに従いウェーク電圧の周回周期中のモジュレーションが小さくなっていくため、隣接するハーモニクス ($h = 8, 10$) 成分は K2 ではやや増加するものの、K3、K4 では減少に転ずる。また、K3、K4 では ($h = 8, 10$) 成分に振動が見られるが、これは、

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

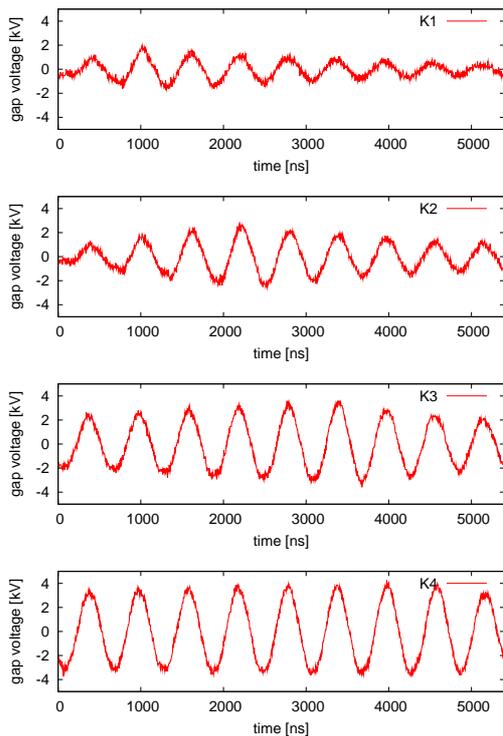


図 1: K1、k2、K3、K4 入射直後のウェーク電圧波形。

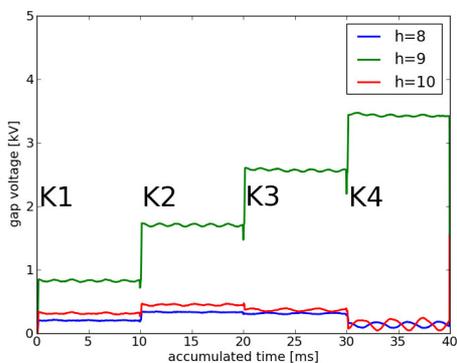


図 2: 入射期間中のウェーク電圧のハーモニック成分。

K1 から K4 まで入射されたバンチの縦方向ダイポール振動に位相が異なるためであると考えられる。

K4 で 1.0×10^{14} の陽子が入射された状態では、ギャップに立つウェーク電圧の ($h = 9$) 振幅は約 3.5 kV に達する。8 台の空胴 (合計 24 ギャップある) では 84 kV となり、入射待ち受け電圧 (120 kV から 150 kV) を考慮すると、強いビームローディングが発生することがわかる。このようなビームローディングに対処するために、マルチハーモニック RF フィードフォワードシステムを開発した。

3. マルチハーモニック RF フィードフォワードシステム

RF フィードフォワード法の概念を図 3 に示す。ビーム電流 (i_{beam}) をウォールカレントモニターで検出し、

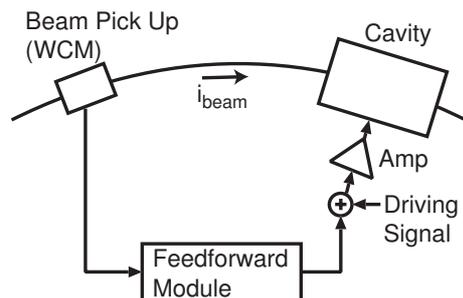


図 3: RF フィードフォワードの概念。

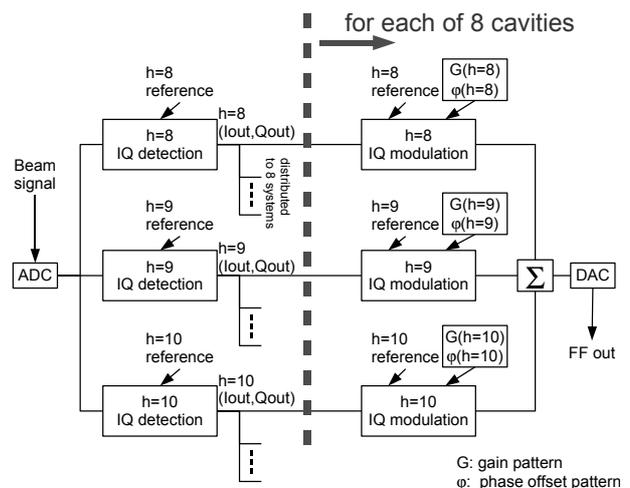


図 4: MR 用フィードフォワードシステムのブロック図。

空胴電圧発生のためのドライブ電流に加えて、フィードフォワードシステムが $-i_{beam}$ なる電流を空胴に供給することで、ウェーク電圧をキャンセルする、というのが動作原理である。先に述べたように、ウェーク電圧が複数のハーモニックを含むため、フィードフォワードもマルチハーモニックでなければならない。

MR のフィードフォワードシステムは、デジタル LLRF システムの一部として製作された。フィードフォワードの回路構成は、RCS [3] と同様であり、異なる点は、対象とするハーモニックが加速ハーモニックとその隣接するハーモニック ($h = 8, 9, 10$) である点である。

MR のフィードフォワードシステムのブロック図を図 4 に示した。フィードフォワードは、WCM で検出されたビーム信号を用い、フィードフォワード補償信号を生成するものである。補償信号によりビーム電流と同じ振幅、逆位相で電流を供給することで、ウェーク電圧をキャンセルする。A/D 変換されたビーム信号から、I/Q 検波により、ビーム信号の ($h = 8, 9, 10$) I/Q ベクトルを得る。この I/Q ベクトルは、8 台の空胴に対応するモジュールに分配される。I/Q 検波に使用される位相基準信号は、DDS (direct digital synthesis) により生成されたもので、位相基準信号は加速電圧の周波数スイープに完璧に追従させることができる。

分配された I/Q ベクトルから、各ハーモニックのゲインおよび位相パターンを使って、I/Q モジュレーションすることでフィードフォワード補償信号を生成する。I/Q モジュレーションにも、検波と同じ位相基準信号が用い

られる。ハーモニクス補償信号を足し合わせ、D/A 変換することで、各空洞用の補償信号を出力する。補償信号はサムアンプで空洞ドライブ信号と合成される。これにより、空洞電圧は加速電圧とフィードフォワード補償信号の重畳となる。

フィードフォワードシステムは本質的にトラッキングバンドパスフィルターとして動作する。フィルターのパスバンド ($h = 8, 9, 10$) は加速周波数スイープに追従し、また、各ハーモニクスのゲインおよび位相は、プログラムされたパターンに従う。

4. フィードフォワードの調整

フィードフォワードの調整とは、各空洞、各ハーモニクのゲインおよび位相パターンの調整に他ならない。これらパターンは、ビームを実際に加速しながら調整を行う必要がある。

MR のフィードフォワード調整は、RCS で確立された手法^[3]を適用して行われた。フィードフォワード ON でのビーム加速時には、空洞電圧の加速ハーモニク ($h = 9$) 成分は、加速電圧 $V_{cav,dr}(h, t)$ 、ウェーク電圧 $V_{cav,wake}(h, t)$ 、フィードフォワード電圧 $V_{cav,FF}(h, t)$ の重畳となり、以下の関係がある。

$$\begin{aligned} V_{cav}(h, t) &= \\ V_{cav,dr}(h, t) + V_{cav,wake}(h, t) + V_{cav,FF}(h, t) &= \\ = H_{dr}^{cav}(h, t) \cdot V_{dr}(h, t) + Z'_{cav}(h, t) \cdot I_{beam}(h, t) &+ \\ + Z_{FF}(h, t) \cdot I_{beam}(h, t). & \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 h は対象とするハーモニク、 t は時間、 $Z_{FF}(h, t)$ はビーム電流からフィードフォワード成分への伝達関数である。フィードフォワード ON で測定されたハーモニク成分 ($V_{cav}(h, t)$, $V_{dr}(h, t)$, $I_{beam}(h, t)$)、ビームを加速せずに得られた LLRF ドライブ信号から空洞電圧への伝達関数 ($H_{dr}^{cav}(h, t)$)、またフィードフォワード OFF でビームを加速して求めたインピーダンス ($Z'_{cav}(h, t)$) から、 $Z_{FF}(h, t)$ を求めることができる。この結果から、

$$Z_{FF}(h, t) = -Z'_{cav}(h, t) \quad (2)$$

となるようにパターンを補正する。数回の補正で、ビームの見るインピーダンス ($Z_{FF}(h, t) + Z'_{cav}(h, t)$) を十分に低くすることができる。

隣接ハーモニクス ($h = 8, 10$) については、空洞電圧はウェーク電圧とフィードフォワード電圧の重畳であり、

$$\begin{aligned} V_{cav}(h, t) &= V_{cav,wake}(h, t) + V_{cav,FF}(h, t) \\ = Z'_{cav}(h, t) \cdot I_{beam}(h, t) + Z_{FF}(h, t) \cdot I_{beam}(h, t), & \end{aligned} \quad (3)$$

の関係となる。加速ハーモニク同様、 $Z_{FF}(h, t) = -Z'_{cav}(h, t)$ となるよう調整を行う。

調整は、 1.0×10^{14} ppp の大強度ビームを用いて行われた。調整後のインピーダンスおよびフィードフォワード伝達関数の比較、およびフィードフォワードの位相エラーの例 (8 号機) を図 5 に示した。点線がフィードフォワード OFF でのビームの見るインピーダンスの振幅、細かい点線がフィードフォワード伝達関数の振幅であるが、これらが非常に近いことがわかる。フィー

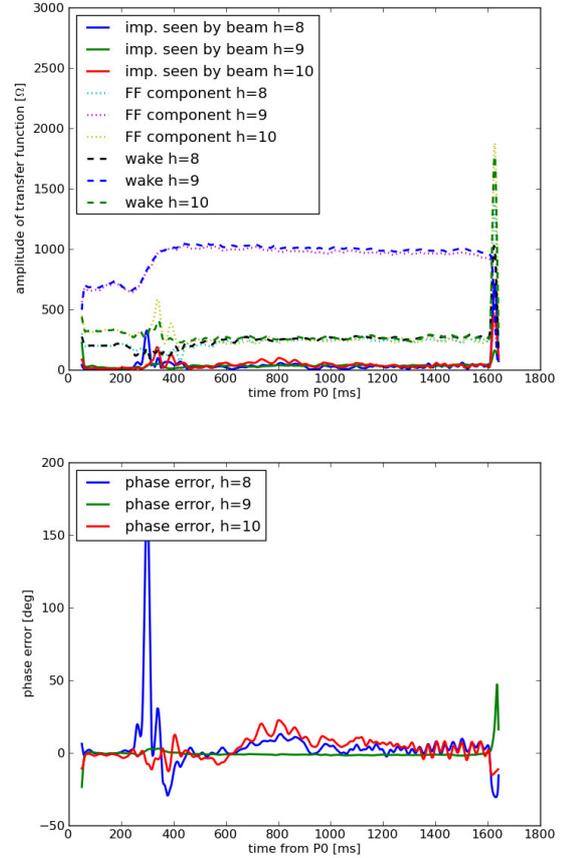


図 5: (上) FF 調整後のインピーダンス、FF 伝達関数の比較。(下) FF 伝達関数の位相のエラー。

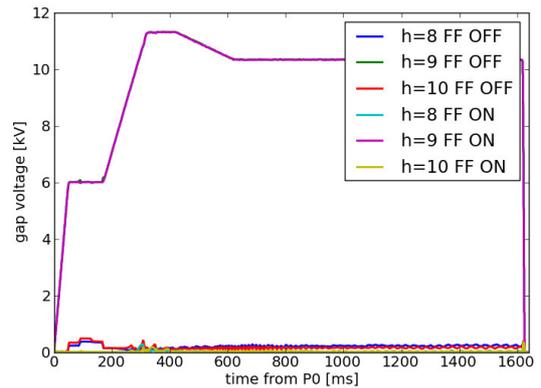


図 6: フィードフォワード調整前後でのギャップ電圧のハーモニク成分。

ドフォワード ON でのビームの見るインピーダンスを実線で示した。加速ハーモニク ($h = 9$) では、フィードフォワード OFF では最大 1100Ω 程度あるビームの見るインピーダンスを、 100Ω 以下に低減させることができている。フィードフォワード位相エラーは、逆位相 (180 度) からのずれとして定義されるが、加速ハーモ

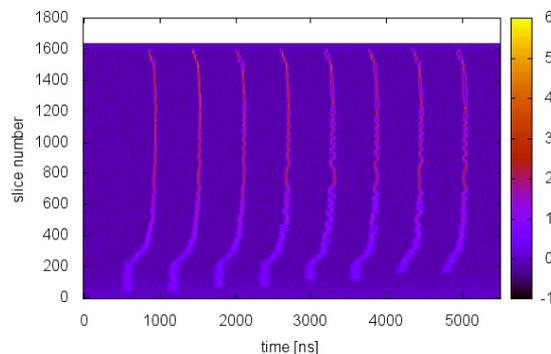
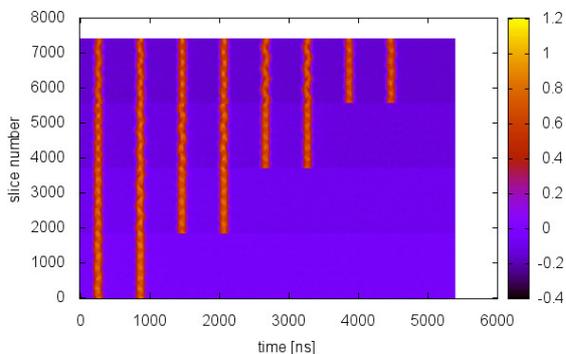
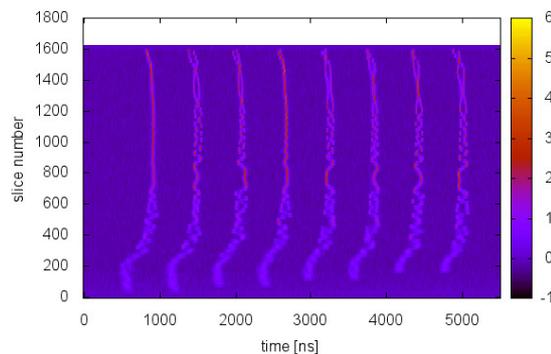
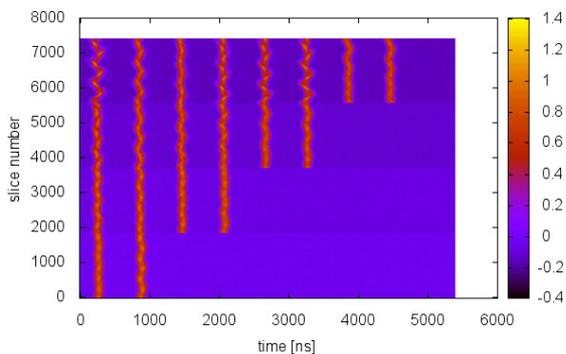


図7: フィードフォワード OFF (上) および ON (下) での入射期間中のビーム信号のマウンテンプロット。

図8: フィードフォワード OFF (上) および ON (下) での入射から取り出しまでのビーム信号のマウンテンプロット。

ニック ($h = 9$) については加速開始から終了までエラーを小さくできている。隣接ハーモニクス ($h = 8, 10$) については、8パンチが入射された後はビーム信号そのものに隣接ハーモニクスの成分が小さくなるためにややエラーが大きくなっている。このため、300 ms 周辺ではインピーダンスの低減効果が十分ではないが、特に周期的過渡ビームローディングの効果が大きい入射期間中ではビームの見るインピーダンスをよく低減できている。

フィードフォワード調整前後でのギャップ電圧のハーモニック成分振幅を図6に示した。加速ハーモニック ($h = 9$) は電圧制御されているため、フィードフォワード OFF および ON での差はほとんどない。一方、隣接ハーモニック成分振幅はフィードフォワードによる低減効果が、特に入射期間中 (170 ms まで) で明らかである。

5. フィードフォワードによるビームへの効果

空洞全数 8 台についてフィードフォワードの調整を行った。ここでは、フィードフォワードのビームの挙動に与える効果を紹介する。 1.0×10^{14} ppp の大強度陽子ビームを用いて試験を行った。この時、隣接ハーモニクス ($h = 8, 10$) の補償については、周期的過渡ビームローディングの影響が大きい加速サイクル開始から入射期間終了まで最大、その後リニアにゲインを減少してゼロとするパターンを採用した。また、加速ハーモニッ

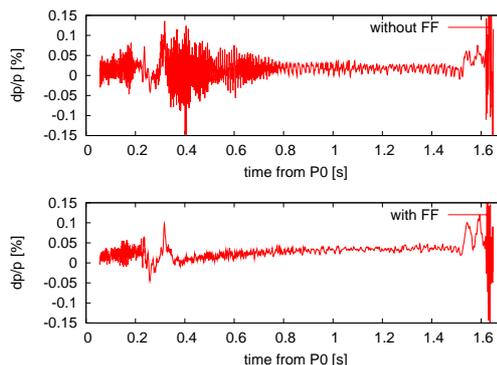


図9: フィードフォワード OFF (上) および ON (下) での入射から取り出しまでの dp/p のプロット。

ク ($h = 9$) の位相パターンについては、初期調整の結果を元に、より滑らかなパターンに微調整を行った。

図7に、フィードフォワード OFF および ON の場合の入射期間中の WCM 信号のマウンテンプロットを示した。WCM 信号は、図2同様に各入射タイミング (K1-K4) から 10 ms の間ずつ捕捉してマウンテンプロットを構成した。縦軸はターン数に対応し、1850 ターンが 10 ms に相当する。フィードフォワード OFF の場合で

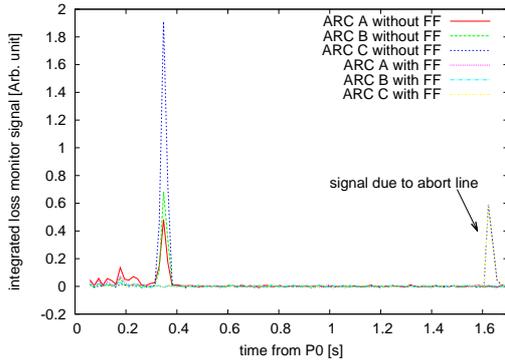


図 10: フィードフォワード OFF および ON でのアーク部のロスの積分値。

は、各入射直後に、加速ハーモニックの RF 電圧位相がビームローディング角だけジャンプするために、バンチにダイポール振動が生じる。この傾向は、ビームを積み上げていった K3、K4 タイミングで顕著である。フィードフォワードを ON とすることで、ローディング角由来のダイポール振動を抑えることができていることが、図 7 から明らかである。周期的過渡ビームローディングの影響は、K1、K2 入射後に見ることができる。フィードフォワード OFF の場合、K1 で入射された 2 つのバンチのうち、後ろバンチの振動の振幅が大きいことがわかる。フィードフォワードを ON にして隣接ハーモニクス ($h = 8, 10$) の補償を行うことで、後ろバンチの振動を抑えることができている。このように、フィードフォワードにより入射期間中のダイポール振動を減少させ、各バンチの挙動を揃えることに成功している。

フィードフォワード OFF および ON での、入射から取り出しまでの WCM 信号のマウンテンプロットを図 8 に示した。約 1.015 ms ごとに、1 ターン分の信号をオシロスコープで捕捉しマウンテンプロットを構成した。従って図中、各スライスの間隔は 1.015 ms となる。フィードフォワード OFF の場合、入射期間 (220 スライスまで) の振動が大きいことは、上に述べた通りである。加えて、加速開始後、磁場のスムージング期間 (100 ms) の終わりにかけ (250–300 スライス付近) から振動が増大し、取り出しに至るまで大きな振動が継続している。ダイポール振動抑制のための位相フィードバックは加速開始と同時に ON となるが、この振動は各バンチがばらばらに振動しているために、位相フィードバックにより振動をダンピングすることができない。図 9 に、全周の BPM 信号から 8 バンチの平均の運動量のずれ dp/p を再構成したものを示した。フィードフォワード OFF の場合、300 ms 付近での振動の増大が顕著である。これは 8 バンチの平均の運動量のずれであり、各バンチはより大きな運動量方向の振幅を持っている。なお、振動の増大がはじまる前に 220 ms から 300 ms にかけて dp/p が変動するのは、偏向電磁石のエラーによるものである。この振動により、ディスパージョンの大きいアーク部でパケツからこぼれた粒子のロスが発生することがあった (図 10)。

フィードフォワード ON の場合、図 8 のマウンテンプロットでもわかるように、スムージング期間でのバン

チの振動の増大が大きく減少している。また、8 バンチ平均の dp/p も 300 ms 以降の大きな振動が消えていることがわかる。図 10 に示したように、アーク部でのロスの発生も抑えることができた。

以上のように、フィードフォワードにより加速中のバンチ振動の増大を抑制し、 1.0×10^{14} ppp という大強度陽子ビームの安定な加速に成功した。

6. まとめと議論

以下に、まとめを示す。

- J-PARC MR における大強度陽子加速のために、 $Q = 22$ の MA 空胴に誘起される、加速ハーモニックのみならず隣接するハーモニクス成分を含んだウェーク電圧をキャンセルする、マルチハーモニックビームローディング補償が必要である。このため、($h = 8, 9, 10$) のビームローディングを補償する、マルチハーモニック RF フィードフォワードシステムを開発した。
- マルチハーモニック RF フィードフォワードシステムは、($h = 8, 9, 10$) をパスバンドにもち、各ハーモニックごとに、ゲインと位相のパターンを設定できるバンドパスフィルターの特性を持つ。
- RCS で確立されたフィードフォワードパターンの調整方法を適用し、 1.0×10^{14} ppp の大強度ビームを用いて、8 台の全ての空胴のフィードフォワードパターンの調整を行った。
- フィードフォワードによるビームローディング補償により、入射時のバンチの振動を抑制した。また、周期的過渡ビームローディングの影響を低減することで、バンチの挙動を揃えることができた。加速中のバンチの振動の増大を抑制し、アーク部で生じるロスを防ぐことができた。

マルチハーモニック RF フィードフォワードによるビームローディング補償は今後の MR のビーム強度増強のために必須であると言えよう。

MR のフィードフォワードの調整では、オシロスコープで捕捉した波形データを PC 上で処理しハーモニック解析を行うのに時間がかかるため、空胴 1 台あたり 1 時間半から 2 時間程度の時間が必要となる。MA 空胴を使った加速システムでは、経時によるドリフトが少なく安定であるために頻繁に調整を行う必要はないが、電圧パターンを変更した場合などは、最適なフィードフォワードパターンは異なるため、調整時間の短縮が望まれる。ハーモニック解析専用のハードウェアを開発することも含め、より効率的な調整手法を検討している。

参考文献

- [1] T. Koseki: “Status of J-PARC Main Ring After Recovery from the Great East Japan Earthquake Damages”, in Proceedings of IPAC 12, THPPP083 (2012).
- [2] F. Tamura, et al.: “Longitudinal painting with large amplitude second harmonic rf voltages in the rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **12**, 041001 (2009).
- [3] F. Tamura, et al.: “Multiharmonic rf feedforward system for beam loading compensation in wide-band cavities of a rapid cycling synchrotron”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **14**, 051004 (2011).