

MULTI-HARMONIC BEAM LOADING COMPENSATION IN THE J-PARC RCS

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

Abstract

For acceleration of high intensity proton beams in the J-PARC RCS, the beam loading compensation is important. In the wide-band ($Q = 2$) MA-loaded RF cavity, the wake voltage consists of not only the fundamental accelerating harmonic component ($h = 2$) but also the higher harmonics. The higher harmonic components cause the RF bucket distortion. We employ the RF feedforward method to compensate the multi-harmonic beam loading. The full-digital feedforward system is developed, which compensates the most important three harmonic components ($h = 2, 4, 6$) of the wake voltages. We present the results of the beam commissioning with a high intensity proton beam (2.5×10^{13} ppp). The impedance seen by the beam is greatly reduced. We also report the beneficial effects of the feedforward compensation in the beam operation.

J-PARC RCS におけるマルチハーモニックビームローディング補償

1. はじめに

J-PARC の 3 GeV シンクロトロン (RCS) は、1 MW のビームパワー出力を目指して調整が進められてきた。RCS および RF システムのパラメータを表 1 に示す。シングルショットで達成した粒子数は 3.3×10^{13} ppp で、これは 25 Hz 運転で 400 kW のビームパワーに相当する。

RCS では、広帯域 ($Q = 2$) の金属磁性体 (MA) 空胴を採用することで、高い加速電界を実現するとともに、2 倍高調波を重畳した RF 電圧を発生させ、縦方向のパンチ整形を実現している。縦方向のパンチ整形は、空間電荷力の緩和に非常に有効である^[1]。その一方で、広帯域であるために、空胴に発生する wake 電圧も高調波の成分をもつ。大強度陽子ビームの加速に際しては、加速周波数の基本波成分 ($h = 2$) のビームローディングのみならず、wake の高調波成分による RF バケツの変形も問題となる。

このため、RF フィードフォワード法によるマルチハーモニック ($h = 2, 4, 6$) のビームローディング補償システムを開発した。Wake 電圧をキャンセルするためのフィードフォワードゲインおよび位相のパターン調整を確立し、11 台の全ての空胴について、300 kW 相当の大強度ビームを用いてフィードフォワードの調整を行った^[2]。システムの概要、調整手法の詳細について報告する。ビームローディング補償を行うことにより、ビームの品質が改善し、またビームロスが減らすことにも成功した。これらの調整結果の詳細についても述べる。

2. 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 1 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、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 $-i_{\text{beam}}$ なる電流を空胴に供給することで、wake 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、空胴が広帯域であ

表 1: J-PARC RCS および RF システムのパラメータ

circumference	348.333 m
energy	(design) 0.400–3 GeV (present) 0.181–3 GeV
beam intensity	(design) 8.3×10^{13} ppp (achieved) 3.3×10^{13} ppp
accelerating frequency	0.938–1.671 MHz
harmonic number	2
maximum rf voltage	(design) 450 kV (achieved) 400 kV
repetition	25 Hz
No. of cavities	(design) 12 (installed) 11
Q-value of rf cavity	2

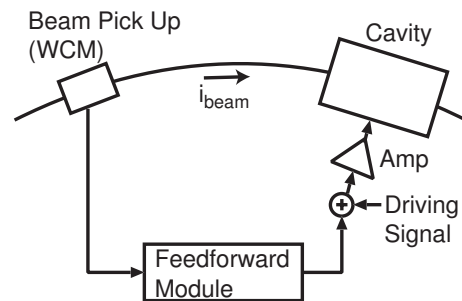


図 1: RF フィードフォワード法の概念。

るために、wake 電圧も高調波成分を持つので、高調波成分までのビームローディング補償が必要である。このため、RCS では、マルチハーモニック ($h = 2, 4, 6$) のフィードフォワードシステムを、デジタル LLRF システムの一部として開発した。

図 2 に、マルチハーモニックフィードフォワードのブロック図を示す。WCM からのビーム信号は、A/D コンバータでデジタル信号に変換され、各ハーモニック ($h = 2, 4, 6$) の I/Q 検波ブロックへ入力される。検波ブ

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

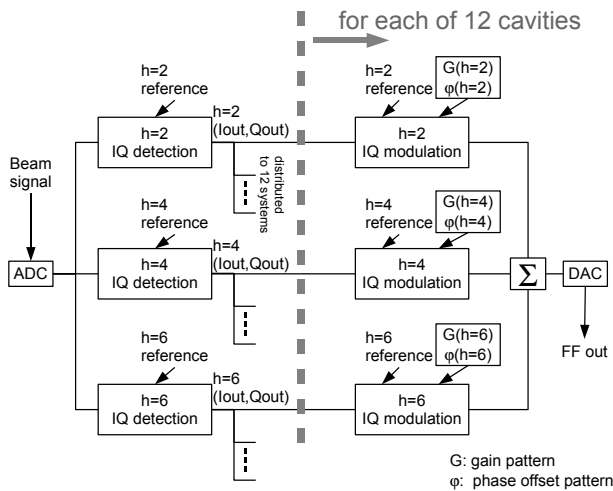


図 2: マルチハーモニック RF フィードフォワードシステムのブロック図。

ロックでは、位相基準信号から生成された単位振幅のコサインおよびサイン信号との掛け算のあと、ローパスフィルターにより各ハーモニックの I/Q ベクトルが以下のように得られる。

$$I_{out} = A(h, t) \sin(\phi(h, t)), \quad (1)$$

$$Q_{out} = A(h, t) \cos(\phi(h, t)). \quad (2)$$

ここに、 h は選択されたハーモニック、 $A(h, t)$ および $\phi(h, t)$ はそれぞれ選択されたハーモニックの振幅および位相である。I/Q ベクトルは、11 台 (最大 12 台) の各空胴に対応したフィードフォワード信号を生成するために分配される。

各空胴ごとの RF フィードフォワード信号を生成するためには以下の I/Q モジュレーション演算が行われる。

$$\begin{aligned} (\text{I/Q modulation output}) &= \\ G(I_{out} \cos(\omega_h t + \psi) + Q_{out} \sin(\omega_h t + \psi)) \\ &= GA(h, t) \sin(\omega_h t + \phi(h, t) + \psi). \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 G および ψ はゲインおよび位相パターン、 ω_h は選択されたハーモニックの角周波数、すなわち $\omega_h = h \times \omega_{rev}$ (ビーム周回角周波数) である。各ハーモニックの I/Q モジュレーションを出力足し合わせて生成されたフィードフォワード信号は、D/A コンバータによりアナログ信号に変換され、サムアンプにより空胴ドライブ信号と足し合わされる。このシステムは、本質的に各ハーモニクス毎のゲインおよび位相をパターン化できるバンドパスフィルターとして動作することがわかる。空胴ドライブ信号と共通の位相基準信号を用いているため、加速に伴う周波数スイープに対応して各ハーモニックのパスバンドも追従する。

フィードフォワードの調整では、ゲインおよび位相パターンの調整方法が鍵となる。以下で、調整方法の詳細について示す。

3. フィードフォワードの調整

加速中の周波数変化、および加速電圧がパターンであることにより、フィードフォワードのゲインおよび位相

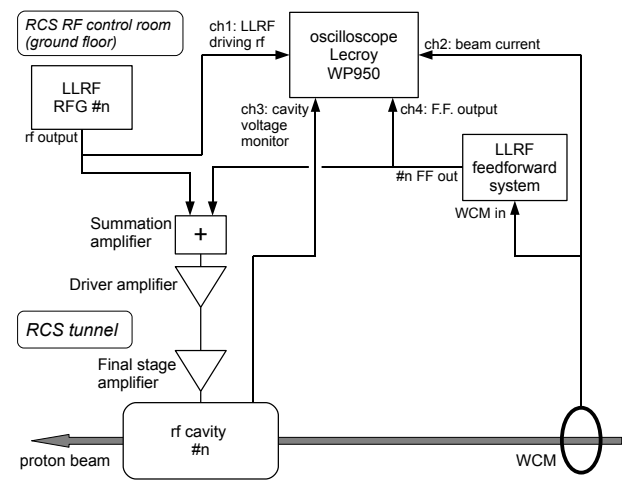


図 3: フィードフォワード調整のセットアップ。#n は空胴の番号を示す。

のパターンの調整方法は自明ではない。空胴の電圧は、加速のためのドライブ電圧と wake 電圧の重畳であり、これらを分離して解析することが必要となる。

図 3 に、調整のセットアップを示す。調整は空胴 1 台ごとに行われる。ロングメモリーのオシロスコープ (Lecroy WP950) により、(ch1) LLRF のドライブ信号、(ch2) WCM ビーム信号、(ch3) 空胴電圧信号、(ch4) FF 出力信号が加速開始から終了まで記録される。サンプリング周波数は 200 Ms/s で、各チャンネルごとに 4.15M 点に及ぶ。これら信号は、PC によりハーモニック解析され、($h = 2, 4, 6$) の複素振幅信号が得られる。

25 Hz 運転で 300 kW 相当となるビーム強度、 2.5×10^{13} ppp の大強度ビームを用いて調整を行った。

3.1 Step 1

まず、LLRF ドライブ信号から空胴電圧への伝達関数を求める。ビームを加速しない状態で、加速サイクル中の LLRF ドライブ信号と空胴電圧信号を記録し、ハーモニック解析を行う。ハーモニック解析の結果の例を図 4 に示した。図からわかるように、空胴電圧には、ドライブしていないにもかかわらず 3 倍高調波 ($h = 6$) の成分が 0 ms から 15 ms に至るまで発生していることがわかる。これは、基本波成分をドライブしたことで終段アンプの真空管が発生する歪みによるものである。この歪みにより、($h = 6$) では wake 電圧とドライブ電圧の分離が困難となっている。このため、($h = 6$) については、一定のゲインパターンおよび RF をドライブしない時の調整で得られた位相パターンによるフィードフォワード信号の生成とせざるを得なかった。

LLRF ドライブ信号および空胴電圧の各ハーモニック ($h = 2, 4$) の複素振幅 ($V_{dr}(h, t)$ および $V_{cav}(h, t)$) から、ドライブ信号から空胴電圧への伝達関数 ($H_{dr}^{cav}(h, t)$) は

$$H_{dr}^{cav}(h, t) = \frac{V_{cav}(h, t)}{V_{dr}(h, t)}, \quad (4)$$

のように求められる。

2 倍高調波 ($h = 4$) の場合、入射から 2 ms で電圧プログラムはゼロになる。電圧プログラムがゼロの場合、

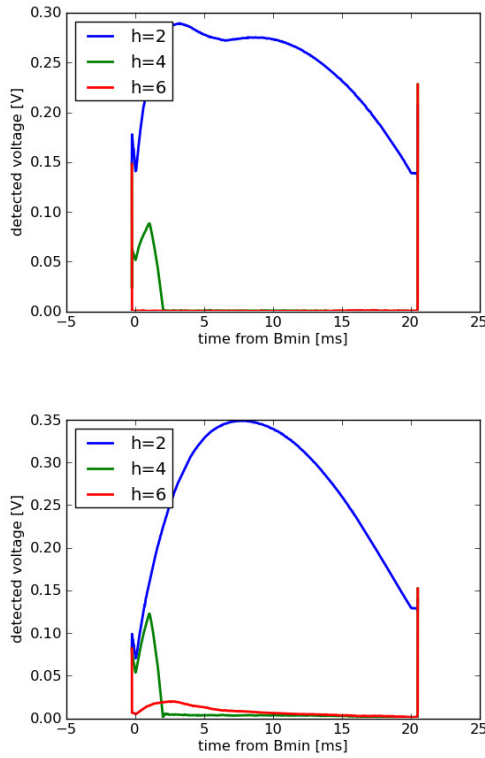


図 4: Step 1 の例 (空洞 #1)。(上) LLRF ドライブ信号 (下) 空洞電圧信号のハーモニック成分。

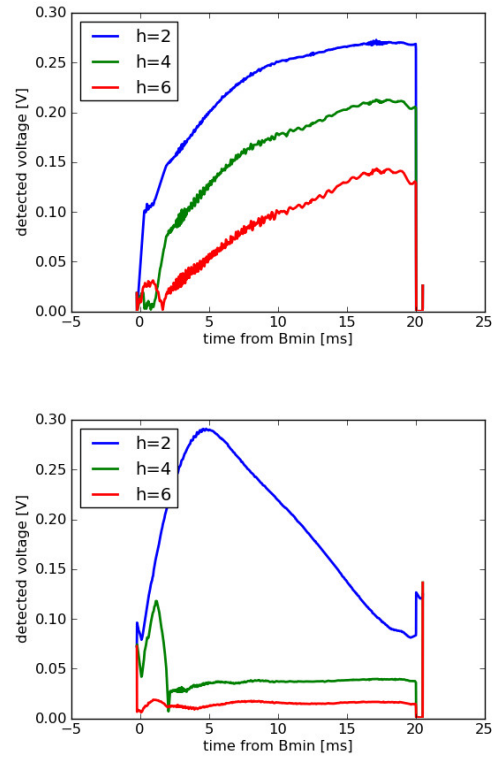


図 5: Step 2 の例 (空洞 #1)。(上) WCM 信号 (下) 空洞電圧信号のハーモニック成分。

(4) は分母が小さくなり非常に大きなエラーを生ずる。これを回避するために、 $V_{dr}(h, t)$ が一定以上小さい値の場合は $H_{dr}^{cav}(h, t) = 0$ とする。

3.2 Step 2

次に、加速電圧パターンを発生させる時の真空管の電流の下でのビームの見るインピーダンスを求める。条件の変動を避けるために、当該の空洞を電圧制御をオフにして、ビームなしの時に電圧制御ありと同様の電圧を発生させるパターンで空洞をドライブする。

テストビームを加速し、LLRF ドライブ信号、WCM ビーム信号、空洞電圧信号を記録し、ハーモニック解析を行う。図 5 に、WCM および空洞電圧のハーモニック成分をプロットした。電圧制御がオフの場合、wake 電圧により、特に基本波で空洞電圧がビームなしの時と比べて大きく逸脱していることがわかる。

このステップでは、空洞電圧は、ドライブ成分 ($V_{cav,dr}(h, t)$) と wake 電圧 ($V_{cav,wake}(h, t)$) の重畳である。各ハーモニック ($h = 2, 4$) について、

$$V_{cav}(h, t) = V_{cav,dr}(h, t) + V_{cav,wake}(h, t) = H_{dr}^{cav}(h, t) \cdot V_{dr}(h, t) + Z'_{cav}(h, t) \cdot I_{beam}(h, t), \quad (5)$$

の関係がある。ここに、 $Z'_{cav}(h, t)$ はこの真空管電流の条件下でのビームの見るインピーダンス、および $I_{beam}(h, t)$ はビーム電流の複素振幅である。測定された電圧および電流の複素振幅、step 1 で求められた伝達関数 ($H_{dr}^{cav}(h, t)$) を用いて、 $Z'_{cav}(h, t)$ を求めることができる。

3.3 Step 3

Step 1, 2 の結果をもとに、フィードフォワード信号を当該の空洞に加えビームを加速し、パターンの調整を行う。フィードフォワード信号を加えた時は、空洞電圧はドライブ成分、wake 電圧、フィードフォワード成分 ($V_{cav,FF}(h, t)$) の重畳となり、以下の関係がある。

$$V_{cav}(h, t) = V_{cav,dr}(h, t) + V_{cav,wake}(h, t) + V_{cav,FF}(h, t) = H_{dr}^{cav}(h, t) \cdot V_{dr}(h, t) + Z'_{cav}(h, t) \cdot I_{beam}(h, t) + Z_{FF}(h, t) \cdot I_{beam}(h, t). \quad (6)$$

ここに、 $Z_{FF}(h, t)$ 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。測定されたハーモニック成分 ($V_{cav}(h, t)$, $V_{dr}(h, t)$, $I_{beam}(h, t)$) および step 1, 2 で得られた伝達関数およびインピーダンス ($H_{dr}^{cav}(h, t)$, $Z'_{cav}(h, t)$) から、 $Z_{FF}(h, t)$ を求めることができる。

実際にビームが見るインピーダンスは $Z'_{cav}(h, t) + Z_{FF}(h, t)$ であり、これが最小となるようにパターンを調整する。ビーム条件が決まっている場合、ビームの見るインピーダンスを 1/10 程度に抑えるには、1, 2 回 step 3 を実行すればよく、加速全域にわたり 25Ω 以下に抑えるためには、さらに 1, 2 回の繰り返しが必要であった。

3.4 調整結果

フィードフォワードなしの場合と、step 3 を繰り返し実行した後のフィードフォワードありの場合での空洞

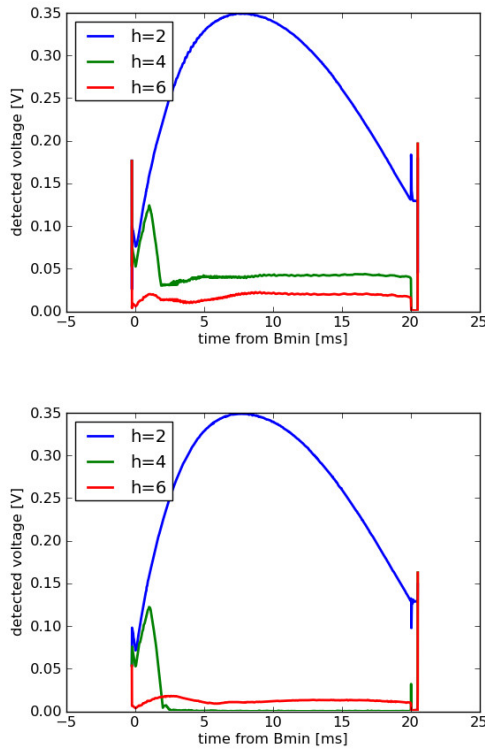


図 6: 空胴 #1 の空胴電圧信号のハーモニック成分。(上) フィードフォワードなし(下) step 3 による調整後、フィードフォワードあり。

#1 の電圧モニタ信号のハーモニック成分を図 6 に示す。加速基本波 ($h = 2$) および、2 ms までの 2 倍高調波 ($h = 4$) では、フィードフォワードの有無にかかわらず、電圧制御により振幅は同じである。2 倍高調波 ($h = 4$) では、プログラムがゼロになる 2 ms 以降、顕著なハーモニック成分の減少が見られる。先述したように、3 倍高調波 ($h = 6$) ではパターンの最適化が行われていないために、wake 電圧の抑制は限定的である。

ビームの見るインピーダンス及びフィードフォワード伝達関数の比較を図 7 に示した。図中、“wake” はフィードフォワードなしの時のビームの見るインピーダンス、“FF component” はビーム電流から空胴電圧のフィードフォワード成分への伝達関数、“imp. seen by the beam” は step 3 による調整後のビームの見るインピーダンスを示している。

基本波 ($h = 2$) の場合、フィードフォワード伝達関数の絶対値は、加速全域にわたりフィードフォワードなしの時のビームの見るインピーダンスに非常に近いことがわかる。フィードフォワードありでのインピーダンスは空胴のシャントインピーダンスが 800Ω であるのに対し、 25Ω 以下と大幅な抑制が得られた。2 倍高調波 ($h = 4$) の場合、2.5 ms まではエラーが大きい、2.5 ms 以降は基本波同様 25Ω 以下に抑制ができています。

ビームなし、300 kW 相当加速でフィードフォワードなし、フィードフォワードありでの空胴 #1 電圧モニタ波形の比較を図 8 に示した。加速中盤 (10 ms) および取り出し直前 (20 ms) のいずれの場合も 2 倍高調波の電圧

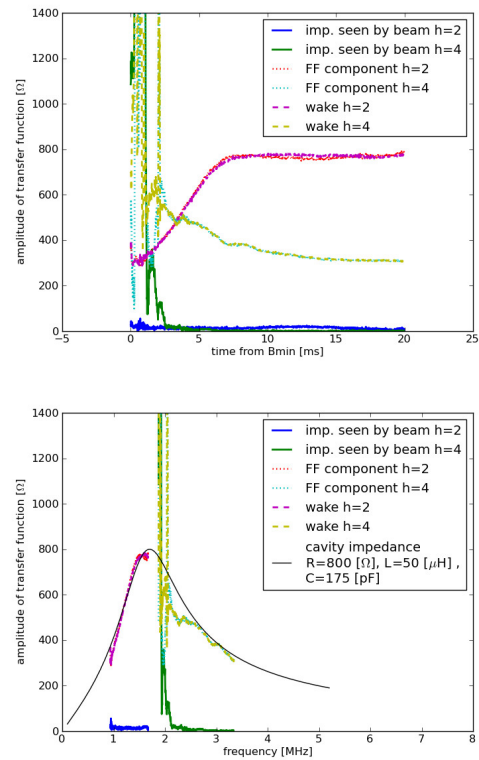


図 7: フィードフォワード伝達関数とインピーダンスの比較。(上) 時間変化、(下) 周波数応答への翻訳。

プログラムはゼロである。フィードフォワードなしでの加速の場合、電圧波形が高調波により大きく歪められ、またローディング角に対応し位相が遅れているのがわかる。フィードフォワードにより高調波による歪みおよび位相の遅れが小さくなり、ビームなしの場合の波形と非常に近いことがわかる。

以上のように、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の補償方法を確立した。11 台の空胴全てについてパターンの調整が行われ、通常のビーム運転でフィードフォワードが使用されている。

4. フィードフォワードによるロスの低減

Wake 電圧の高調波成分による空胴電圧波形の歪みにより、シンクロナス位相 ϕ_s が変化する。これは、エネルギー増分は歪みのない場合とある場合で等しくなければならないためである。図 9 に、300 kW 相当のビームでのフィードフォワードなし、色々なビームパワーでフィードフォワードありの場合での加速中の ϕ_s をプロットした。フィードフォワードなしの場合に比べ、ありの場合は ϕ_s が小さく、最大の ϕ_s は 55 deg から 49 deg へ減少している。またフィードフォワードありの場合、ビーム強度依存性がほとんどないことがわかる。

ϕ_s が大きくなると RF バケツが小さくなるため、バケツからこぼれた粒子がディスパーションが高いアーク部でのロスの原因となる可能性がある。300 kW 相当のビーム加速時の、アーク部でのビームロスモニターの信号を図 10 に示す。このビーム強度では、加速中盤では

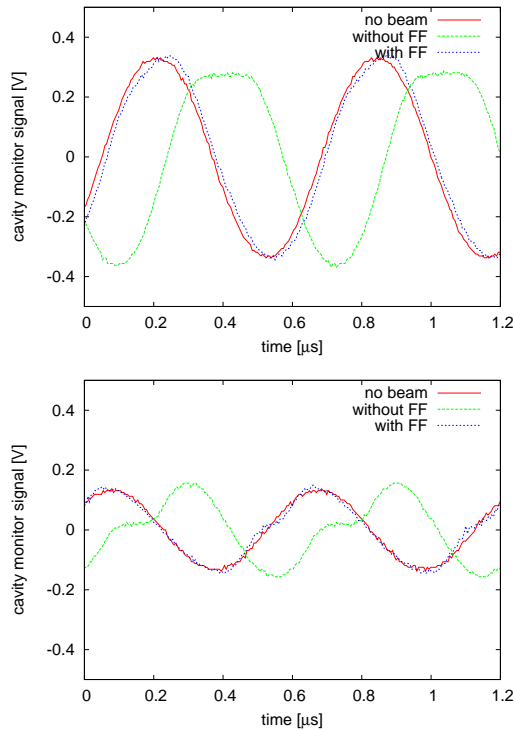


図 8: ビームなし、300 kW 相当加速でフィードフォワードなし、フィードフォワードありでの空胴 #1 電圧モニタ波形の比較。(上) 加速中盤、(下) 取り出し直前。

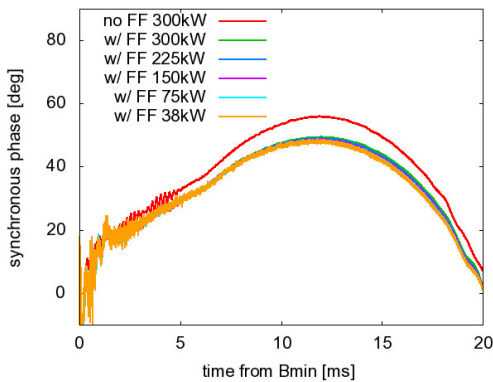


図 9: フィードフォワードの有無による ϕ_s の比較。

DCCT で観測できるようなインテンシティロスは見られないが、ビームロスモニターで検出できる小さなビームロスが、フィードフォワードなしの場合に観測されていた。フィードフォワードありの場合、このロスは大きく減少し、観測されなくなった。フィードフォワードによる高調波歪みの減少で ϕ_s が小さくなったことで、RF バケツの拡大によってロスが減少したと考えられる。

5. まとめと議論

以下に、まとめを示す。

- J-PARC RCS における大強度陽子加速のために、広帯域の MA 空胴に誘起される高調波成分を含んだ wake 電圧をキャンセルする、マルチハーモニック

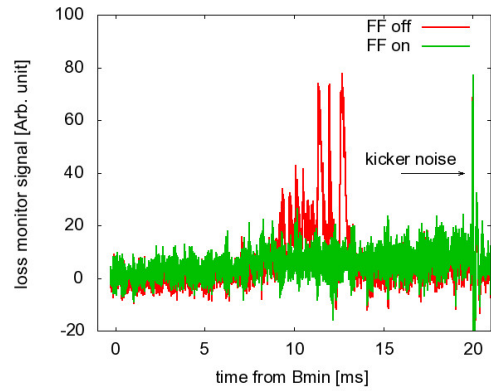


図 10: 300 kW 相当のビームを加速した時のアーク部のビームロスモニター信号。フィードフォワードありの場合、加速中盤でのロスが消滅している。

ビームローディング補償が必要である。このため、加速周波数の 3 倍高調波まで ($h = 2, 4, 6$) 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、($h = 2, 4, 6$) 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の特性を持つ。
- フィードフォワードシステムの調整方法を確立し、300 kW 相当の大強度ビームを用いて、11 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。加速全域にわたり、ビームの見るインピーダンスを大きく低下させることに成功した。
- 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、アーク部でのロスを大きく減少させることができた。

フィードフォワードの弱点として、オープンループ制御であることから加速システムのゲイン等にドリフトがあると補償に影響が出ることがあげられるが、MA 空胴による加速システムはドリフトが少なく安定であるために、少なくとも数ヶ月の運転では、パターンの再調整をする必要はなかった^[2]。

今回確立したフィードフォワードの調整方法は、ビーム電流が増強されても有効であると考えられ、デザイン値である 1 MW ビームの加速の際にも、本システムは性能を発揮することが期待される。

参考文献

- [1] 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).
- [2] F. Tamura, et al.: “Multi-harmonic rf feedforward system for beam loading compensation in wide-band cavities of a rapid cycling synchrotron”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **14**, 051004 (2011).