

話 題

J-PARC シンクロトロンにおける マルチハーモニックビームローディング補償

田村 文彦* for J-PARC ring RF group

Multiharmonic Beam Loading Compensation in The J-PARC Synchrotrons

Fumihiko TAMURA * for J-PARC ring RF group

Abstract

Beam loading compensation is a key for acceleration of a high intensity proton beam in the synchrotrons, the RCS and MR, of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). Magnetic alloy loaded rf cavities are used to achieve high accelerating voltages without a tuning bias loop. The frequency response of the RCS cavity covers the fundamental accelerating harmonic ($h = 2$) and higher harmonics up to the third ($h = 6$) harmonic. In case of the MR, the accelerating harmonic ($h = 9$) and the neighbors ($h = 8, 10$) are covered. Thus, wake voltages in the MA cavities are multiharmonic, and multiharmonic beam loading compensation is necessary for both of the RCS and MR. We developed the multiharmonic feedforward systems for the J-PARC synchrotrons. A commissioning methodology of the feedforward patterns has been established. We describe the system architecture and the commissioning methodology of the feedforward patterns. The commissioning of the feedforward using high intensity proton beams was successfully performed in the RCS and MR. We report the commissioning results. The multiharmonic beam loading compensation is necessary for the high intensity user operation.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex, 図1)の加速器¹⁾は、リニアック、3 GeV シンクロトロン²⁾ (RCS, rapid cycling synchrotron), および主リングシンクロトロン³⁾ (MR, main ring synchrotron) から構成される。リニアックのエネルギーは運転開始から 181 MeV であったが、2013 年に ACS 空洞のインストールが行われ、本来の設計エネルギーである 400 MeV となった。RCS で 3 GeV まで加速された陽子ビームパルスは、物質生命科学実験施設 (MLF) に導かれ、中性子、ミュオン⁴⁾の発生に利用されるほか、一部のパルスは MR へ入射される。MR へ入射された陽子ビームは 30 GeV まで加速され、ニュートリノ実験施設およびハドロン実験施設へ供給される。表1に、RCS および MR の主要なパラメータを示した。RCS および MR のハーモニックナンバーはそれぞれ 2, 9 となっている。RCS では high γ_t ラティス、MR で

は、imaginary γ_t ラティスの採用により、加速中にトランジションエネルギーを通過することがないため、安定な加速が可能になっている。

J-PARC のシンクロトロン (RCS, MR) の特徴は、まず第一に大強度であることである。RCS の設計ビームパワーは 1 MW, MR は 750 kW である。RCS では現在 300 kW のビームパワーで



図1 J-PARC 全景.

* 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター加速器ディビジョン
(E-mail: fumihiko.tamura@j-parc.jp)

の利用運転を行っているほか、大強度加速試験では 550 kW 相当のビームの加速に成功している。MR では 200 kW 超のパワーでニュートリノ実験へのビーム供給を行い、T2K 実験のこれまでの成果に貢献してきた。

もうひとつの特徴は、金属磁性体 (MA, magnetic alloy) を装荷した加速空洞を大規模に使用する、世界で初めての大強度シンクロトロンであることである⁴⁾。MA 空洞により、フェライトでは実現不可能な高い加速電圧を発生することができる。RCS では 12 台、MR では 9 台 (うち 2 倍高調波用 1 台) の MA 空洞がインストールされている。また、MA 空洞は広い周波数帯域を持つため、同調回路なしに、陽子の速度変化に対応する周波数変化をカバーすることができる。空洞の Q 値は、RCS では 2 に、MR では 22 に調整

表 1 J-PARC シンクロトロンおよび RF システムの主なパラメータ

RCS	
circumference	348.333 m
energy	(until 2013) 0.181–3 GeV (from 2014) 0.400–3 GeV
γ_t	9.17
beam intensity	(design) 8.3×10^{13} ppp (achieved) 4.5×10^{13} ppp
accelerating frequency	(until 2013) 0.938–1.671 MHz (from 2014) 1.227–1.671 MHz
harmonic number	2
maximum rf voltage	440 kV
repetition	25 Hz
No. of cavities	12
Q-value of rf cavity	2
MR	
circumference	1567.5 m
energy	3–30 GeV
γ_t	$31.6i$ (imaginary)
beam intensity	(achieved) 1.15×10^{14} ppp
repetition period	(FX) 2.48 s (SX) 6.00 s
accelerating frequency	1.671–1.721 MHz
harmonic number	9
number of bunches	8
maximum rf voltage	280 kV
No. of cavities	8 (+1 for second harmonic)
cavity resonant frequency	1.72 MHz
Q-value of rf cavity	22

されている。RCS では、2 倍高調波を重畳したデュアルハーモニック運転⁵⁾を行うことが可能であり、RCS の入射での縦方向ペインティングによりバンチングファクターを改善し、大強度ビームによる空間電荷効果の低減に成功している⁶⁾。一方 MR では、空洞はシングルハーモニックの RF 信号で駆動されている。

大強度陽子ビームにおける重要な問題のひとつとして、空洞に発生するウェーク電圧によるビームローディングの効果が挙げられる。MA 空洞の持つ広い周波数帯域は利点である一方、ウェーク電圧が複数のハーモニックを含むものとなるため、これらを含めたマルチハーモニックビームローディング補償が必要となる。本稿では、J-PARC シンクロトロンでの RF フィードフォワード法を用いたマルチハーモニックビームローディング補償の概要、調整手法、調整結果^{7,8)}を紹介する。

2. 空洞に発生するウェーク電圧

RCS でのウェーク電圧波形の例を図 2 に示した。波形は、加速中に 1 台の空洞をオフにすることで測定される。RCS 空洞の周波数帯域は広い ($Q=2$) ため、ウェーク電圧は高調波を含み、単純なサイン波とは違う、歪んだ波形であることがわかる。高調波は RF バケツの歪みを生ずるために、ビームローディング補償は高調波まで含んだマルチハーモニックなものでなければならない。縦方向のトラッキングシミュレーションによれば、3 倍高調波 ($h=6$) までのビームローディング補償を行うことで、ビームを安定に加速できることが示されている。

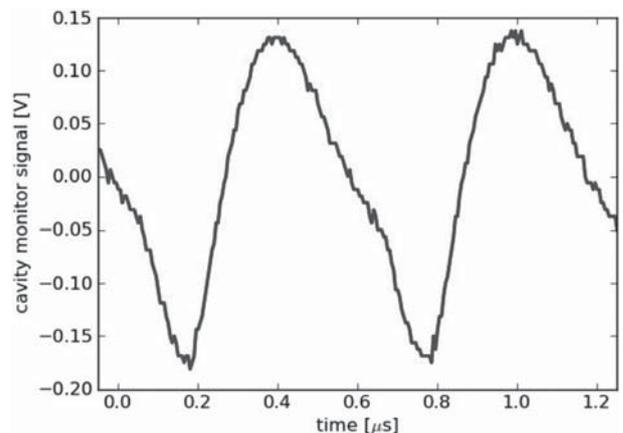


図 2 RCS での取り出し直前のウェーク電圧波形の例⁷⁾。

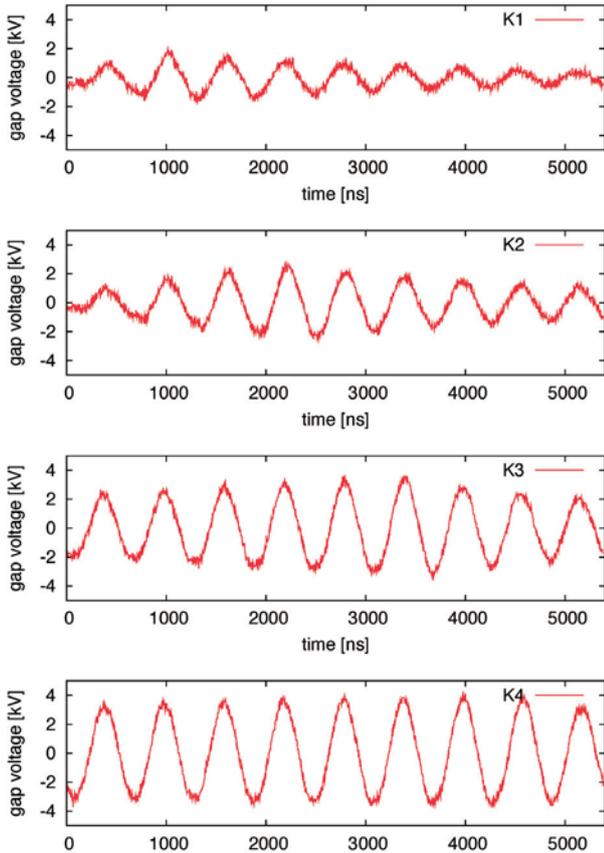


図3 K1-K4 入射直後のウェーク電圧の例⁸⁾. 上から, K1, K2, K3, K4 の順.

MR への入射では, RCS から 2 バンチずつ 4 回の入射により, 合計 8 個のバンチを蓄積した後に加える. 入射の間隔は 40 ms であり, 4 回の入射はそれぞれ “K1”, “K2”, “K3”, および “K4” と呼ばれる. K1-K4 入射直後の典型的な 1 ターン分 (5.38 μ s) のウェーク電圧波形を, 図 3 に示す. 波形は, RCS 同様に 1 台の空胴をオフにすることで測定された. この時, RCS から MR へは 1 回の入射毎に 2.5×10^{13} 個の陽子が入射されており, K4 タイミングでは 1.0×10^{14} 個の陽子が蓄積されている. バンチは, 先頭から 598 ns の間隔で蓄積される.

MR 空胴の Q 値は 22 と比較的低いため, 2 バンチのみが蓄積されている K1 直後では, ウェーク電圧が時間とともに減少する様子が見取れる. K2 タイミングでは 4 バンチが蓄積されているため, ウェーク電圧は周回周期の中盤にかけ増加し, その後減少に転ずる.

電圧のモジュレーションは, 6 バンチおよび 8 バンチが蓄積されている K3 および K4 タイミン

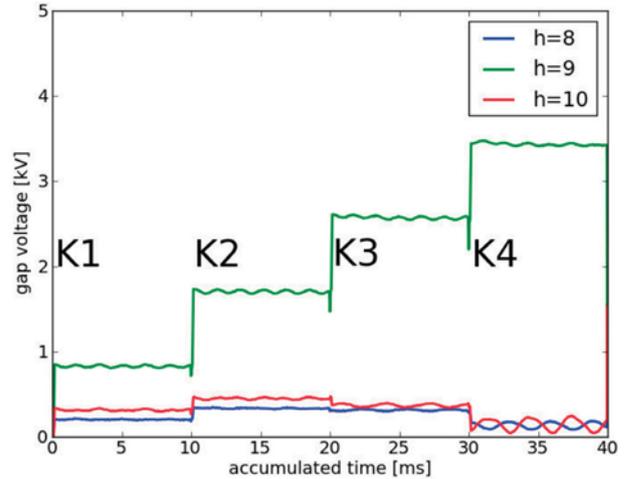


図4 ウェーク電圧のハーモニック成分⁸⁾.

グでは小さくなる. これは, 1 周回の 9 バケツのうち多数にバンチが入射されているためであると考えられる.

入射期間中のウェーク電圧のハーモニック成分を 図 4 に示す. 空胴電圧は, オシロスコープにより各入射から 10 ms の間捕捉されており, 従って横軸の時間はオシロスコープに蓄積された時間を示している. 加速ハーモニック ($h = 9$) は, K1-K4 にかけて蓄積されたバンチ数に比例して増加する. 周回周期中のウェーク電圧のモジュレーションの原因となる隣接ハーモニクス ($h = 8, 10$) は, K2 では増加するが, 多数のバケツにバンチが入射されている K3, K4 タイミングでは減少に転ずる. K4 タイミングでは, これら隣接ハーモニクス成分 ($h = 8, 10$) は加速ハーモニック成分 ($h = 9$) に比べ十分小さいものになっている.

このように, 周期的過渡ビームローディングの影響は, 2 バンチおよび 4 バンチが入射されている K1, K2 タイミングで最も強く, K4 タイミングではその影響は小さくなる. MR においては, 加速ハーモニックおよび隣接ハーモニクス ($h = 8, 9, 10$) のビームローディング補償が必要である.

3. マルチハーモニックフィード 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 5 に示す. ビーム電流 (i_{beam}) をウォールカレントモニター (WCM) 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, 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。

J-PARC シンクロトロンのデジタル LLRF 制御システムの一部としてマルチハーモニックフィードフォワードシステムを開発した。最も重要な 3 つのハーモニクスを補償できるよう設計されており，対象とするハーモニクスは RCS では基本波および 2 倍，3 倍高調波 ($h = 2, 4, 6$)，MR では加速ハーモニックおよび隣接ハーモニクス ($h = 8, 9, 10$) である。

MR 用のフィードフォワードシステムのブロック図を図 6 に示す。システムは WCM のビーム信号を入力とし，マルチハーモニックのフィードフォワード補償信号を出力するものである。

WCM 信号は A/D 変換された後に，各ハーモニックの I/Q 検波部に入力される。選択されたハーモニクス (h) について，ビーム信号の I/Q

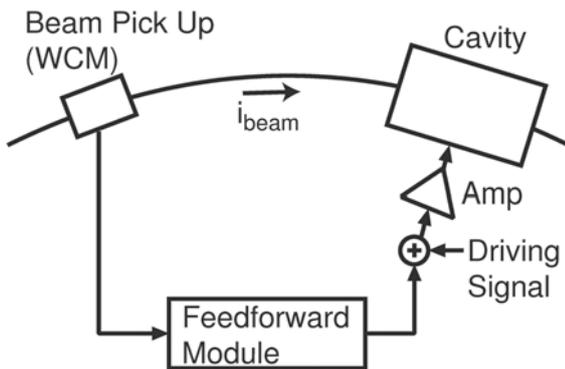


図 5 RF フィードフォワード法の概念図⁷⁾。

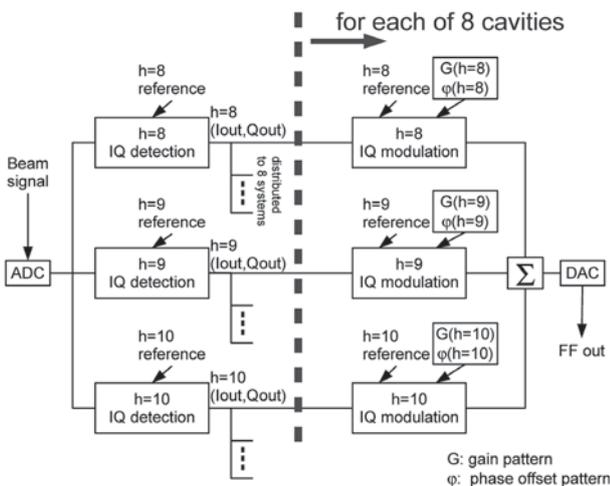


図 6 MR 用マルチハーモニックフィードフォワードシステムのブロック図⁸⁾。RCS 用も選択するハーモニクスが異なる他は同様。

ベクトル (I_{out}, Q_{out}) は

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

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

と表わされる。ここに， t は時間であり， $A(h, t)$ および $\phi(h, t)$ は選択されたハーモニクスの振幅および位相である。I/Q 検波部では DDS (direct digital synthesis) により生成された位相基準信号を元にして，検波に必要なサインおよびコサイン波形を生成している。DDS を用いることで，加速 RF 信号の周波数スイープへの完璧な追従を実現している。ビーム信号の I/Q ベクトルは，各空洞用のモジュールに分配される。

各空洞用のモジュールでは，ゲインおよび位相パターンを用い，I/Q モジュレーションにより各ハーモニックの補償信号が生成される。I/Q モジュレーション部の出力は，

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

である。ここに， G および ψ はゲインおよび位相パターンである。 ω_h は選択したハーモニックの角周波数であり， $\omega_h = h \times \omega_{rev}$ (周回の各周波数) である。

各ハーモニックの補償信号は足し合わされ，D/A 変換されてマルチハーモニック補償信号が出力される。補償信号はサムアンプにより LLRF ドライブ信号と合成され，空洞はドライブ信号とフィードフォワード補償信号の重畳により駆動される。

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 (RCS では $h = 2, 4, 6$ ，MR では $h = 8, 9, 10$) は加速周波数スイープに追従し，また，各ハーモニック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手法

フィードフォワードの調整とは，各空洞，各ハーモニッ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。フィードフォワードの調整手法は、これまで定式化された手法が確立していなかったため、J-PARC シンクロトロンにおいては、入射から取り出しまでのビーム波形、空洞電圧波形、LLRF ドライブ信号の測定に基づく調整手法を開発した。以下に概要を示す。

J-PARC シンクロトロンの周波数スイープは空洞の周波数帯域に対して十分遅いため、各時間での周波数ドメインでの解析がビームの見るインピーダンスやフィードフォワード伝達関数の計算に有効である。

フィードフォワード補償が行われている場合、空洞電圧は、ドライブ RF 信号、ウェーク電圧、フィードフォワード信号の重畳である。これらの電圧の各ハーモニック h の時刻 t におけるハーモニック成分 (複素振幅) を $V_{\text{cav, dr}}(h, t)$, $V_{\text{cav, wake}}(h, t)$, $V_{\text{cav, FF}}(h, t)$ とすると、重畳は

$$\begin{aligned} V_{\text{cav}}(h, t) = & V_{\text{cav, dr}}(h, t) + V_{\text{cav, wake}}(h, t) + V_{\text{cav, FF}}(h, t) \\ = & H_{\text{dr}}^{\text{cav}}(h, t) \cdot V_{\text{dr}}(h, t) + Z'_{\text{cav}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t) \\ & + Z_{\text{FF}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t), \end{aligned} \quad (4)$$

と表わされる。ここに、 $V_{\text{dr}}(h, t)$, $I_{\text{beam}}(h, t)$ は LLRF ドライブ信号とビーム電流のハーモニック成分である。 $H_{\text{dr}}^{\text{cav}}(h, t)$ は LLRF ドライブ信号から空洞電圧への伝達関数であり、ビームを加速せずに波形を測定、解析することで求められる。 $Z'_{\text{cav}}(h, t)$ はフィードフォワードなしでビームを加速することで求めることができる。

フィードフォワードをある初期パターンに設定し、ビームを加速することで(4)からフィードフォワード伝達関数 $Z_{\text{FF}}(h, t)$ を求めることができる。 $Z_{\text{FF}}(h, t)$ は、ビーム電流から空洞に発生するフィードフォワード電圧への伝達関数である。

フィードフォワードありの場合、ビームの見るインピーダンスは

$$Z'_{\text{cav}}(h, t) + Z_{\text{FF}}(h, t) \quad (5)$$

であることがわかる。この測定から、線形応答を仮定してフィードフォワードのゲインおよび位相パターンを

$$Z_{\text{FF}}(h, t) = -Z'_{\text{cav}}(h, t). \quad (6)$$

となるように変更を行う。数回のイタレーションにより、ビームの見るインピーダンスを十分に小さくすることができる。

ドライブ成分がない場合、例えば MR における隣接ハーモックス ($h = 8, 10$) では、空洞電圧の重畳は以下の関係となる。

$$\begin{aligned} V_{\text{cav}}(h, t) = & V_{\text{cav, wake}}(h, t) + V_{\text{cav, FF}}(h, t) \\ = & Z'_{\text{cav}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t) + Z_{\text{FF}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t). \end{aligned} \quad (7)$$

ドライブ成分がある場合と同様に、ゲインおよび位相パターンは $Z_{\text{FF}}(h, t) = -Z'_{\text{cav}}(h, t)$ となるようにパターンを変更し、やはり数回のイタレーションによりビームの見るインピーダンスを非常に小さくすることができる。

5. RCS での調整結果

RCS では、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が行われた。

フィードフォワードなしの場合とフィードフォワード調整後の空洞電圧モニターのハーモニック成分を図 7 に示した。基本波成分 ($h = 2$) はどちらの場合も同じであるが、これは電圧制御 (AVC) により振幅が強力に制御されているためである。2 倍高調波成分 ($h = 4$) について、プログラム電圧が 0 になる 2 ms 以降での減少は明らかである。3 倍高調波については抑制はやや限定的である。

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を、図 8 に示す。図中、“wake” はフィードフォワードなしの時にビームの見るインピーダンス、“FF component” はフィードフォワード伝達関数、“imp. seen by the beam” はフィードフォワードありの時にビームの見るインピーダンスを示している。

基本波成分については、加速全域にわたり、フィードフォワード伝達関数振幅はフィードフォワードなしの時にビームの見るインピーダンスに非常に近く、プロットはほぼ重なっている。フィードフォワードありの場合にビームの見るインピーダンスは、加速全域にわたり 25 Ω 以下に抑制できている。2 倍高調波 ($h = 4$) についても、プログラム電圧が 0 になって以降、同様にビーム

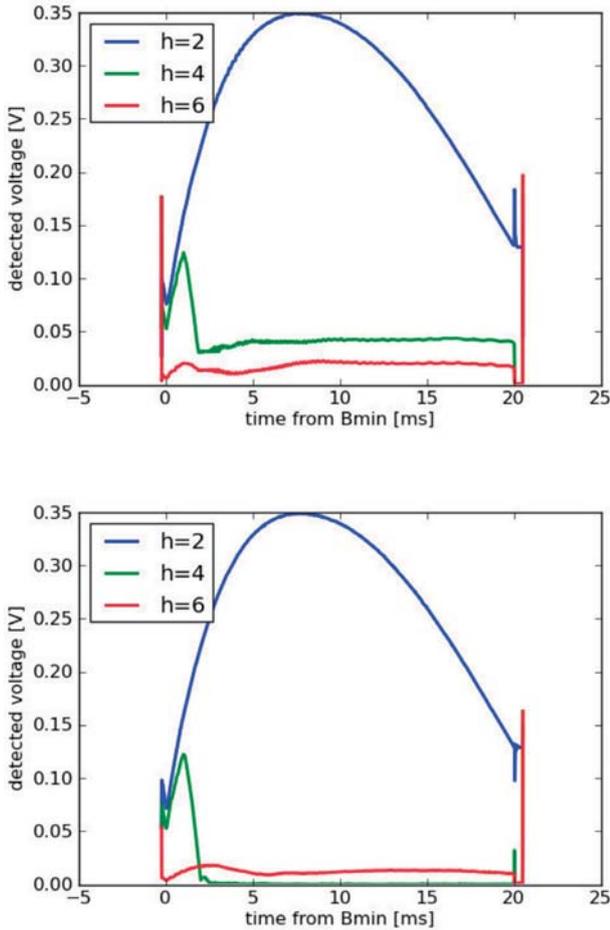


図7 RCSにおける空胴電圧モニタのハーモニック成分⁷⁾. (上) フィードフォワードなし, (下) フィードフォワード調整後.

の見るインピーダンスを 25Ω 以下に抑制できていることがわかる. ショットインピーダンスは 800Ω 程度であり, ビームの見るインピーダンスを $1/30$ 以下に抑制することに成功した.

ビームなしの場合, フィードフォワードなしで 300 kW 相当のビームを加速した場合, およびフィードフォワードありの場合の空胴電圧波形の比較を図9に示す. 加速中盤 (10 ms 付近) および取り出し直前 (20 ms 付近) の波形をプロットした. この時間帯では2倍高調波の電圧は0であり, ビームなしの場合には波形はきれいなサイン波となっている. フィードフォワードなしでビームを加速した場合, 高調波により電圧波形は大きく歪んでいる. また, ビームなしの場合に対してディレイを持っていることがわかるが, これはビームローディング角に相当するディレイである. フィードフォワードによって, 歪みおよびディ

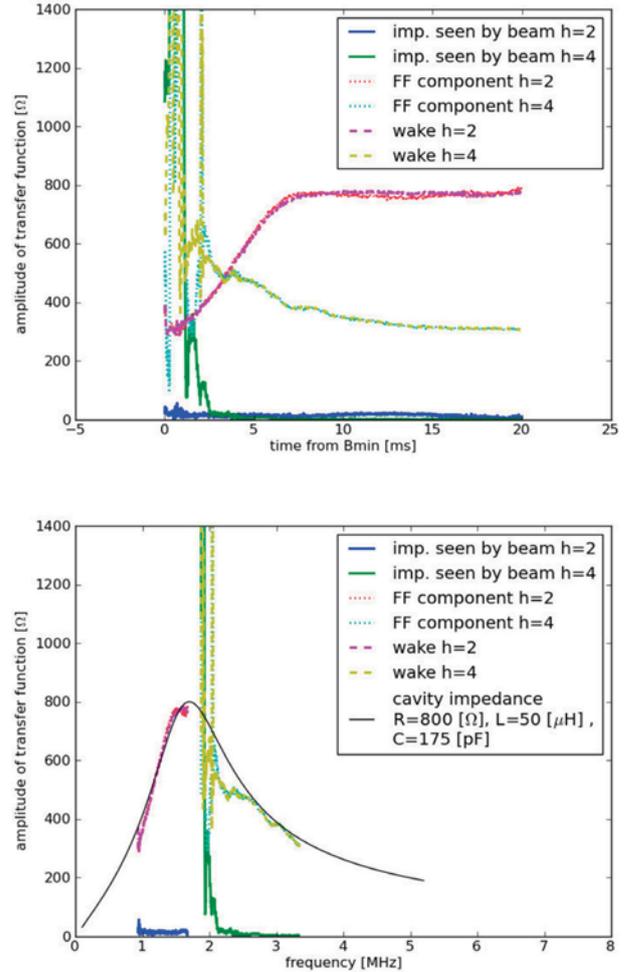


図8 インピーダンスおよびフィードフォワード伝達関数の振幅の比較⁷⁾. (上) 入射から取り出しまでの時間変化, (下) 周波数応答としてプロットしたもの. 周波数応答の場合, LCR 共振回路のインピーダンスもプロットした.

レイを大幅に減少させることができています.

フィードフォワードありの場合に空胴に流れ込む電流, 空胴電圧の関係を示すフェーザーダイアグラムを図10に示す. 図中, I_b はビーム電流, $I_g(\text{total})$ はアンプの発生する全電流を表わしている. $I_g(\text{total})$ はドライブ成分 $I_g(\text{drive})$ およびフィードフォワード成分 $I_g(\text{FF})$ をベクトル合成したものであり, I_T は空胴に流れ込む全電流である. 位相角 ϕ_b , ϕ_z , および ϕ_g はそれぞれビーム位相, 空胴のデチューニング角, およびビームローディング角である. フィードフォワードが完璧にビームローディングを補償している場合には, $I_g(\text{drive})$ は, ビームがない場合に電圧 V_c^0 を発生するための電流 $I_g(\text{drive})$ と一致することが理解できる.

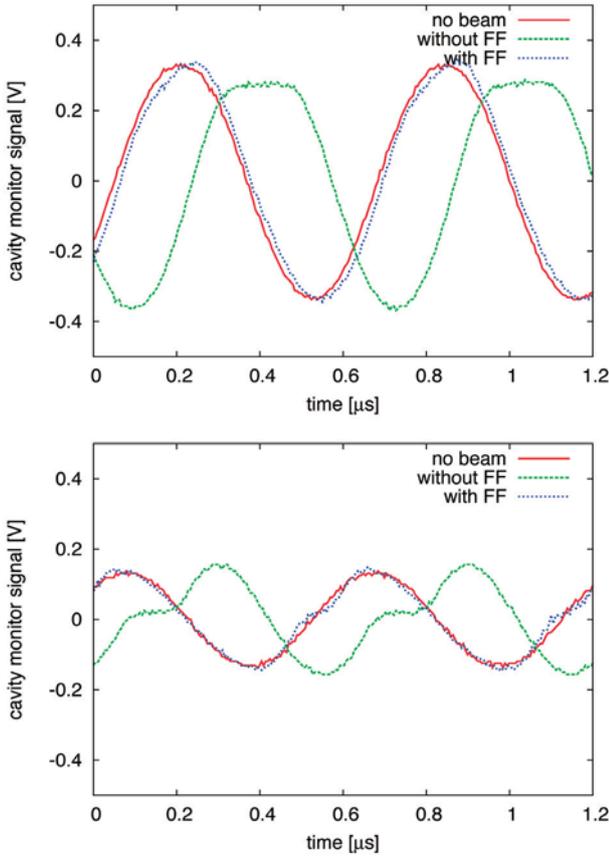


図9 ビームなし、300 kW相当ビームをフィードフォワードなしで加速した場合、フィードフォワードありの場合での空胴電圧モニタ波形の比較⁷⁾。(上)加速中盤、(下) 取り出し直前、フィードフォワードにより波形歪みおよび遅れを減少させた。

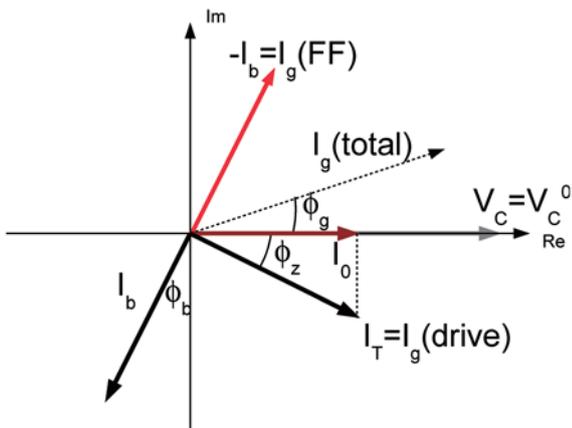


図10 フィードフォワードがある時のフェーザダイアグラム⁷⁾。

図11に、ビームなしの場合、フィードフォワードなしで300 kW相当のビームを加速した場合、およびフィードフォワードありの場合のLLRFドライブ信号の振幅を示す。フィードフォワードなしの場合には、電圧制御ループは、ビームローディ

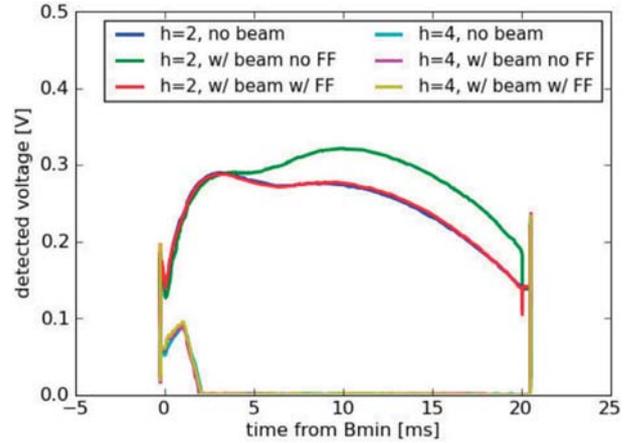


図11 フィードフォワードなし、ありの場合のLLRFドライブ信号の振幅の比較⁷⁾。フィードフォワードありの場合はビームなしの場合に非常に近い。

ング下で電圧を保つために、ビームなしの場合より大きな振幅の信号を出力する。一方、フィードフォワードありの場合には、ドライブ信号の振幅はビームなしの場合に非常に近い。これはフィードフォワードによるビームローディング補償が適切に働いており、 $I_T = I_g$ (drive) という関係が満たされていることを示している。

以上の測定結果により、RF フィードフォワード法によりビームローディング補償が正しく行われていることが確認できる。RCSの全ての空胴について、前節に述べた調整が行われた。

図9に示した高調波のウェーク電圧による空胴電圧波形の歪みは、同期位相 (ϕ_s) の変化の原因となる。これは、歪みのありなしにかかわらず、1ターンあたりのエネルギー増加は同じであるためである。300 kW相当のビームの入射から取り出しまでの ϕ_s の推移を、フィードフォワードなし、ありの場合についてプロットしたものを図12に示す。フィードフォワードありの場合については、ビームパワーを変化させた時についてもプロットした。フィードフォワードありの場合には、電圧波形の歪みが少ないために同期位相が小さくなっていることがわかる。最大の ϕ_s は、フィードフォワードなしの55度から49度に減少している。また、同期位相のビーム強度依存性は極めて少ない。 ϕ_s が増加することによりRFバケツは縮小し、バケツから陽子がこぼれるビームロスの原因となる。フィードフォワードの有無による、アーク部のディスパージョンピーク付近

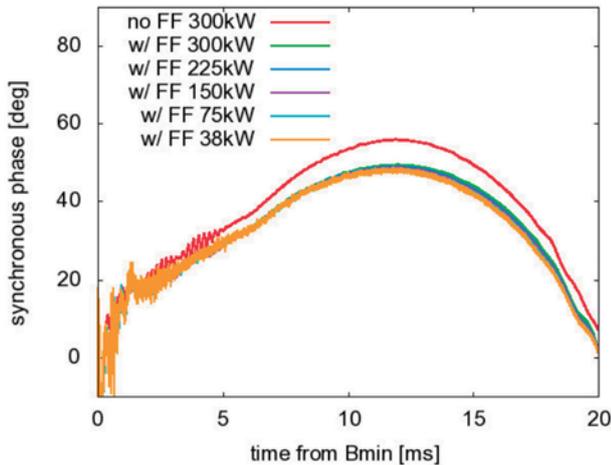


図 12 同期位相 (ϕ_s) の比較⁷⁾.

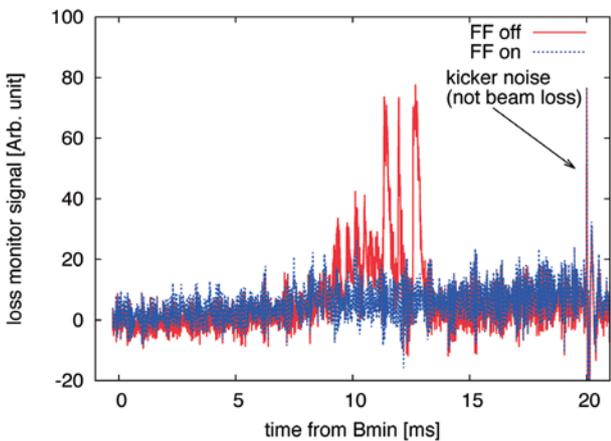


図 13 300 kW 相当のビームを加速した時のアーク部ビームロスモニタ信号の比較. フィードフォワードにより, 加速中盤のロスが消滅した⁷⁾.

のロスモニター信号の比較を図 13 に示す. DCCT で観測されるようなインテンシティロスは発生しないものの, フィードフォワードなしの場合にはアーク部でのロスが, 加速中盤で発生していた. このロスはアーク部の放射化の原因となる. フィードフォワードありの場合, RF バケツに余裕が出るため, このロスは消失した.

RCS の 300 kW でのビーム利用運転にはフィードフォワードは不可欠のものとなっている. 大強度加速試験では, 550 kW 相当のビームの加速にも成功している.

6. MR での調整結果

MR では, 1.0×10^{14} ppp の大強度ビームを用いて全 8 台の空洞のフィードフォワードの調整が行われた. RCS 同様に, ビームの見るインピー

ダンスを大幅に低減することに成功している. ここでは, フィードフォワードのありなしがビームに与える影響について紹介する.

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なるように微調整を行った.

フィードフォワードなし, ありの場合の入射期間中の WCM ビーム信号のマウンテンプロットを図 14 に示す. 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. 縦軸はスライス番号であり, 捕捉された信号の積算ターン数に相当する. ビームは 10 ms の間に 1857 ターン周回する.

フィードフォワードなしの場合では, 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の変化分だけジャンプするために, 入射バンチにダイポール振動が生じる. ビームを積み上げていった K3, K4 タイミングでは振動は特に大きくなる. また, 入射ビームだけでなく, 周回ビームにも振動を生じる. フィードフォワードありの場合には, この振動を抑えることができていることが, 図 14 から明らかである. フィードフォワードありの場合には, ビームローディング角はほぼ一定に保たれ, RF 電圧の位相のジャンプが非常に少なくなるために, ダイポール振動を抑制できている. このことから, 加速ハーモニック ($h = 9$) のビームローディング補償が適切に行われていると言える.

隣接ハーモニクス ($h = 8, 10$) による周期的過渡ビームローディングの効果は, 2 または 4 バンチが入射された K1, K2 タイミングで特に強い. 図 14 の下段に K1 入射直後のマウンテンプロットを拡大したものを示す. フィードフォワードなしの場合には, 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. これは周期的過渡ビームローディングの効果によるものである. フィードフォワードありの場合には, 前後のバンチの挙動は近いものとなり, また振動の振幅そのものも小さくなっている. こ

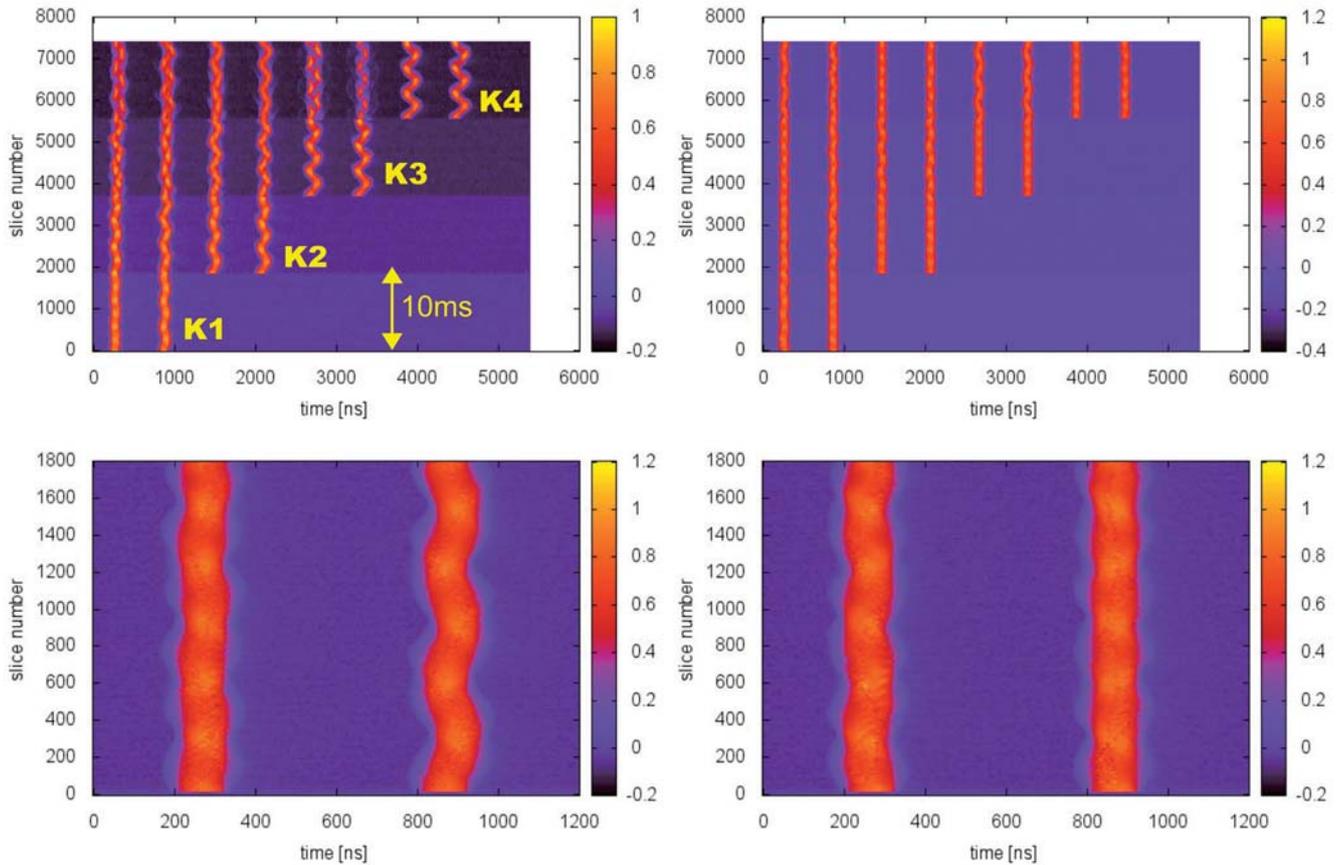


図 14 入射期間中の WCM ビーム信号のマウンテンプロット⁸⁾。(左) フィードフォワードなし, (右) フィードフォワードあり. 下のプロットは K1 タイミングで入射されたバンチの拡大.

のことから, 隣接ハーモニクス ($h = 8, 10$) の補償も十分に実現できていることがわかる.

このようにマルチハーモニックビームローディング補償により, 入射期間中のバンチの振動を大幅に減少させることに成功した.

フィードフォワードにより, 加速期間中の振動も抑制される. 図 15 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なしの場合, 300 ms 付近での振動の増大が顕著である. この振動により, 図 16 の実線に示したように, ディスパージョンの大きいアーク部でバケツからこぼれた粒子のロスが発生することがあった. フィードフォワードにより, dp/p も 300 ms 以降の大きな振動が消え, 図 16 の点線に示したように, アーク部でのロスの発生の抑制にも成功した.

RCS 同様, MR においてもフィードフォワードによるマルチハーモニックビームローディング補償は, 200 kW 以上の大強度運転において必須のものとなっている.

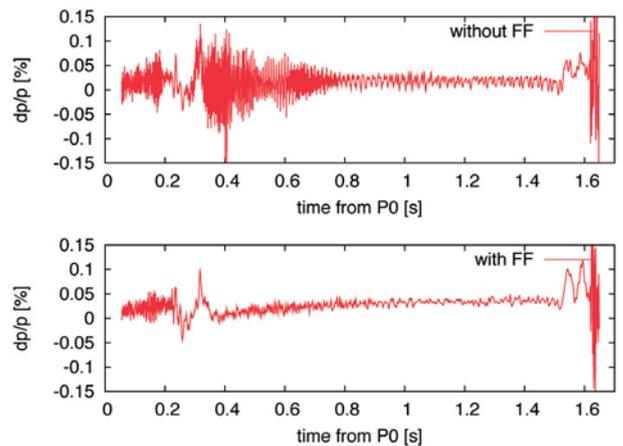


図 15 入射から取り出しまでの dp/p のプロット⁸⁾。(上) フィードフォワードなし, (下) フィードフォワードあり. 加速開始時の振動が大きく減少していることがわかる.

7. まとめと今後

以上, J-PARC シンクロトロンにおける, RF フィードフォワード法を用いたマルチハーモニックビームローディング補償について紹介した.

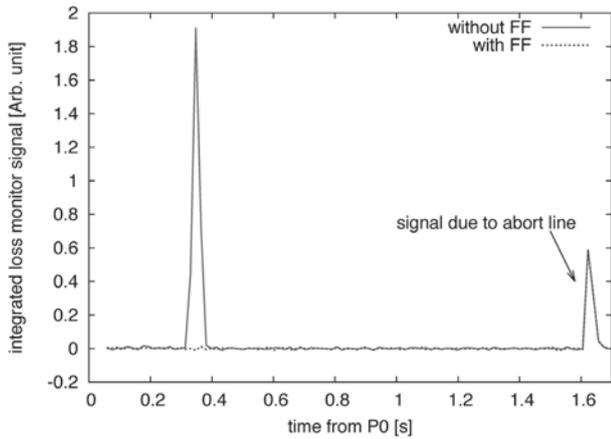


図 16 アーク部ビームロスモニタ信号の比較⁸⁾。フィードフォワードにより、加速開始直後、0.3-0.4 秒におけるロスが消滅した。

RF フィードフォワード法は、概念、構成が単純であるにもかかわらず、従来の陽子シンクロトロンではビームローディング補償の主力としては用いられてこなかった。Boussard は CERN Accelerator School の教科書の中で以下のように述べ⁹⁾、フィードフォワードより RF フィードバックが実用的であると結論づけている：

Although this solution is conceptually very simple, it maybe in practice be difficult to implement for various reasons:

- *Non linearities of the power amplifier limit the cancellation effect (at best a factor 10 can be achieved in practice), as well as phase and amplitude stability of the various elements in the compensation chain.*
- *For a varying RF frequency, all these problems are even more difficult: tolerances on gain and phase are very critical.*
- *To avoid coupled-bunch effects, the overall delay from beam monitor to cavity should be small, or exactly equal to one turn.*

J-PARC のシンクロトロンでは、これらの問題をデジタル信号処理回路によるゲイン・位相の高精度化、調整手法の新規開発により克服し、ビームの見るインピーダンスを大幅に下げること成功した。また、J-PARC の加速器は安定性、再現性が高く、ショット毎のビーム条件のばらつきが非常に少ないことも、フィードフォワードの調整

には大きな利点となった。

MR においては、従来より高いインピーダンス特性を持つ新しい MA コア (FT3L) を使い、最大加速電圧を倍増させることにより、高繰り返し周期への対応を行う計画が進められている¹⁰⁾。インピーダンスの増加により、ビームローディング補償はさらに重要な要素となる。この場合も、これまでに確立した調整手法が適用可能であると考えている。

CERN LIU (LHC injector upgrade) プロジェクトにおいては、PS booster (PSB) の加速空洞をフェライト空洞から MA 空洞に置き換えることが検討されている。最終段のトランジスタアンプに備えられた Fast feedback に加えて、フィードフォワードによるビームローディング補償を採用する方向で検討が進められている。J-PARC MR に PSB 空洞のプロトタイプをインストールし、フィードバックとフィードフォワードの協調によるビームローディング補償についてビーム試験が行われている。

筆者の見解では、同調回路を必要としない MA 空洞においては、空洞本体のインピーダンスが変化しないために、オープンループである RF フィードフォワード法が最大限その性能を発揮できるものと考えている。

参考文献

- 1) “Accelerator technical design report for J-PARC.” JAERI-TECH 2003-044, 2003.
- 2) H. Hotchi, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 02B003.
- 3) T. Koseki, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 02B004.
- 4) M. Yoshii, et al., Proceedings of the 2013 International Particle Accelerator Conference, Shanghai, pp.2537-2539 (2013).
- 5) F. Tamura, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 11, 072001 (2008).
- 6) F. Tamura, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 12, 041001 (2009).
- 7) F. Tamura, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 14, 051004 (2011).
- 8) F. Tamura, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 16, 051002 (2013).
- 9) D. Boussard, CAS - CERN Accelerator School : RF Engineering for Particle Accelerators, pp.474-500 (1991).
- 10) C. Ohmori, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 16, 112002 (2013).