

## Bunch-by-bunch Feedback System for J-PARC Main Ring

Y. Kurimoto <sup>#,A)</sup>, M. Tobiyama<sup>A)</sup>, T. Obina<sup>A)</sup>, Y. Shobuda<sup>B)</sup>, Y. Chin<sup>A)</sup> and T. Toyama<sup>A)</sup>

A) High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

B) Japan Atomic Energy Agency

Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

### Abstract

Transverse bunch-by-bunch feedback system for J-PARC MR accelerator has been designed and tested. Such feedback system will be needed to suppress beam instabilities for the operation with higher beam intensity. We performed the beam test with the 3 GeV DC operation in June 2010. The result indicates that our feedback system can suppress the instabilities and significantly reduce the beam loss. The details of the feedback system and the beam test are reported in this article.

## J-PARC メインリングにおけるバンチ毎フィードバックシステム

### 1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Complex) のメインリング (以下 MR) では、RCS (Rapid Cycle Synchrotron) から取り出された 3 GeV 陽子ビームを 30 GeV まで加速器し、速い取り出し運転時はニュートリノビームラインに、遅い取り出し運転時はハドロンビームラインにそれぞれ陽子ビームを供給している。表 1 に MR の基本パラメーターを示す。現在、達成出来ているビーム強度(100kW)はデザイン値の 1/7 程度であり、今後さらに安定かつ大強度のビームを実現させなければならない。

大強度化の為にはビーム損失を減らす事が必要不可欠であるが、そのビーム損失の原因の一つとしてビーム不安定性が挙げられる。これが起こると、時間とともにベータトロン振動の振幅が増大し、大きなビーム損失を引き起こしてしまう可能性がある。

我々は、このようなビーム不安定性 (特に結合バンチ不安定性) を抑制するための横方向フィードバックシステムをデザインし、MR に設置した。本論文では、そのフィードバックシステムの詳細及び、2010 年 6 月に行ったビーム試験の結果について報告する。

### 2. バンチ毎フィードバックシステム

バンチ毎フィードバックシステムは主に、ビーム位置検出部、シグナル処理回路、フィードバック出力部の三つの要素に分けられる。ブロックダイアグラムを図 1 に示した。ここでは、それぞれ順番に詳細を述べる[1]。

#### 2.1 ビーム位置検出部

ビーム位置検出には J-PARC MR で通常使用されている対角線カット電極モニター[2]を使用し、左右の差信号をビーム位置として、シグナル処理回路

の入力に使用した。

表 1 : J-PARC MR の基本パラメーター

周長	1568m
入射エネルギー	3 GeV
取り出しエネルギー	30 GeV
繰り返し周波数	0.3 Hz
RF 周波数	1.67-1.72 MHz
ハーモニクス数	9
バンチ数	6 (8)
シンクロトロンチューン	0.0025-0.0001
ベータトロンチューン	22.40, 20.75

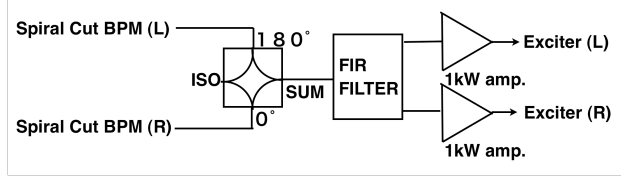
#### 2.2 シグナル処理回路

シグナル処理回路には LLRF4 ボード[3]と呼ばれるデジタル低レベル RF 信号処理用のプロトタイプとして開発されたボードを 2 枚(水平、鉛直方向用)使用し、個別バンチフィードバック用に最適化し、EPICS IOC まで組み込んだ 1U サイズシステムを使用した[4]。LLRF4 ボードは最大サンプリング速度 125MSPS の 14 ビット ADC、260MSPS の 14 ビット DAC、Spartan3 FPGA、USB インターフェイス等を搭載している。FPGA チップでは、AD 変換されたビーム位置信号をバンチ毎にサンプリングし、それを最大 16 タップの FIR フィルターを用いて、リングを 1 周回った同じバンチを蹴り戻すタイミング合わせを行い、フィードバックに必要な周波数 (ベータトロン周波数) の取り出し及び位相シフトを行って、バンチ毎のフィードバック値を計算している。得られたフィードバック値は DAC によりアナログ電圧に変換され出力部に送られる。

### 2.3 フィードバック出力部

シグナル処理されたフィードバック信号は、1kWのパワーアンプで増幅された後、長さ 1.4m の水平方向ストリップラインキッカーに送られ、ビームを

図 1: J-PARC MR のフィードバックシステム



蹴る。なお、次章で紹介するテスト実験に用いられたパワーアンプの帯域は 100kHz から 8MHz であり、低い方のカットオフ周波数が水平方向最低次のベータトロン振動の 74kHz よりも大きい。これは、バンチ結合不安定性が 0 モードで起こった場合、この不安定性は抑制できない事を意味する。このため、我々は秋以降のテストではより低周波まで帯域を持つアンプを使用する予定である。また、キッカーのシャントインピーダンスは 29kΩ である。

## 3. 3 GeV-DC 運転でのビーム試験

我々は、設置したフィードバックシステムの性能や問題点を明らかにするため、2010 年 6 月 15 日に加速なしの 3GeV-DC 運転でビームテストを行った。

### 3.1 シングルバンチでの Excite/Damp 試験

ビーム位置モニターとキッカーの位相差から負帰還及び正帰還となるデジタルフィルターでの位相シフト量(FIR フィルターの係数)を決め、それらの動作をシングルバンチビームで確認した。具体的には、フィードバックの設定を負帰還にしておき、ビーム入射から 350 ms たった時間から、ある時間幅 (7.2 ms, 3.6 ms, 1.8 ms) だけ正帰還のフィードバックに切り替えるという試験を行った。ビーム入射から 350 ms を選んだ理由は、入射キッカー、セプタムの漏れ磁場で作られたビーム振動の影響を十分小さくする為である。なお、この試験時のクロマティシティは $\sim 0$ 、バンチあたりの粒子数は  $8.0 \times 10^{11}$  に設定した。図 2 に正帰還フィードバックの時間幅 7.2ms の時のビーム位置モニター信号及びその高速フーリエ変換を示した。正帰還でベータトロン振動を励起して、負帰還の時にビーム振動が減衰している事がわかる。また、周波数 200Hz から 400Hz の遅い成分も観測されているがこれはシンクロトロン振動に起因するものもしくはノイズの可能性が高い。このような遅い成分は FIR フィルターで取り除かれるのでフィードバックには影響しない。図 3 にベータトロン振動数部分の振幅の時間変化を示した。左から正帰還の時間幅が 7.2 ms と 3.6 ms の測定を示しており、各測定 5 ショットずつデータを取得した。全てのショットに於いて、正帰還フィードバックの時は振幅は増大しており、負帰還の時には振幅

図 2: Excite/Damp 試験のビーム位置モニター信号とその高速フーリエ変換

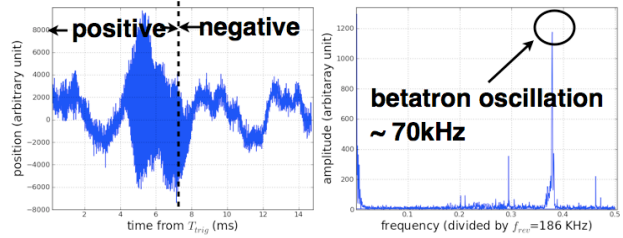
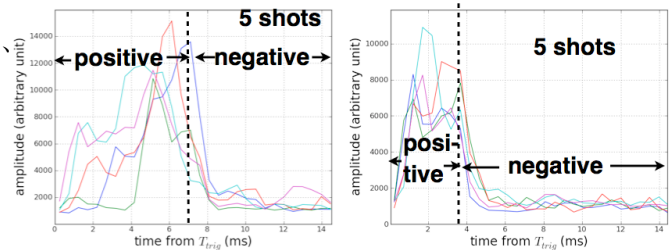


図 3: ベータトロン振動の振幅の時間変化。左が正帰還の時間幅 7.2ms 右が 3.6 ms。

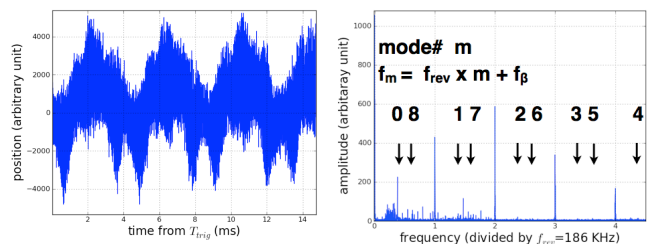


は減衰している。この測定によりフィードバックの動作は確認できた。

### 3.2 多バンチビームの振動モード

次に 6 バンチビームでの振動モード測定を行った。この測定でもクロマティシティは $\sim 0$ 、バンチあたりの粒子数  $8.0 \times 10^{11}$  に設定した。また、この測定の際はフィードバックを OFF にしている。図 4 にビーム位置モニターの信号及びその高速フーリエ変換をしめた。データはビーム入射から 350 ms の所から 2730 ターン分(約 15 ms)のバンチ毎の位置を取得した。モードはハーモニクス数と同じあり、各モード  $m$  (0~8)の周波数  $f_m$  は周回周波数  $f_{rev}(=186\text{kHz})$  とベータトロン周波数  $f_\beta(=74\text{kHz})$  を使って  $f_m = m \times f_{rev} + f_\beta$  と書け、その周波数に対応する部分を矢印で示してある。図 4 のフーリエ変換を見ると 0 モードが支配的である事がわかる。クロマティシティが 0 に近い場合、resistive wall によるバンチ結合不安定が 0 モード付近で起こりうるという理論的に予想されている[5]。0 モードの周波数は上の式より 74kHz であるため、現在使用しているパワーアンプの帯域下限 100kHz を低い。よってより低い周波数をもつパワーアンプに交換する事は必要不可欠である。

図 4: 6 バンチビームでのビーム位置モニター信号とその高速フーリエ変換



### 3.3 負帰還フィードバックによる不安定の抑制

次に、バンチあたりの粒子数を  $3.2 \times 10^{12}$  まで増やし負帰還フィードバックとフィードバックなしとの比較を DCCT を用いて粒子数の時間変化を見る事で行った。図 5 にフィードバックなしの、図 6 に負帰還フィードバックを使った時の DCCT 信号の

図 5: フィードバックなしの時の DCCT 信号 (同じビーム条件でとった 3 ショット)。

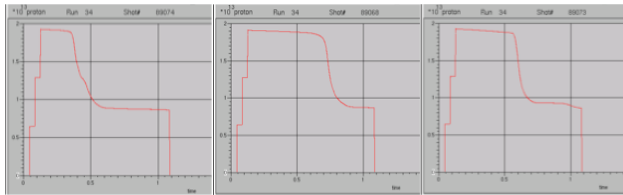
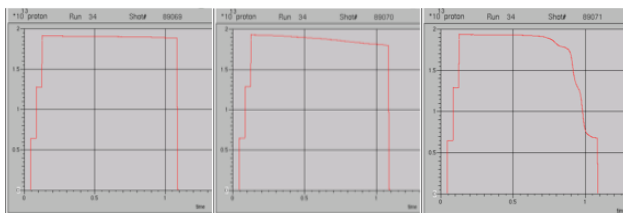


図 6: 負帰還フィードバックの時の DCCT 信号 (同じビーム条件でとった 3 ショット)。



時間変化をそれぞれ示した。なおこの時のバンチ数は 6 で、クロマティシティは $\sim 0$  である。フィードバック無しの時は早い時間で大きくビームロスをするのに対して、負帰還フィードバックの時は、ビームロスを大幅に抑制出来ているか、或は大きくビームロスした場合でも長い時間ビームをリング内に保つ事が出来ている。この事から、負帰還フィードバックを用いて不安定をある程度抑制できている事が分かった。

## 4. 30GeV 加速運転への導入にむけて

今回の 30GeV-DC 運転でのビーム試験で負帰還フィードバックでビーム不安定性を抑制出来る事が分かった。次のステップは 30 GeV 加速運転でシステムを使える用にする事である。その為に解決すべき問題点と解決案を以下にまとめた。

- 加速に伴うタイミング信号のずれの補正

加速モードでは、加速中の RF 周波数スイープやシンクロトロン位相の変化により、ある時刻で ADC ゲートやキッカーの出力とビームのタイミングが合うように調整しても、加速に伴ってタイミングがずれてしまう。現状では加速中のタイミングは固定だが、LLRF4 ボードの firmware を改良して、タイミングのずれに追従するようにディレイをフィードフォワードで変更する事を考えている。

- フィードバックゲインの最適化

加速するに従ってバンチ長が縮むため、ビーム位置モニターの出力が大きくなる。このため同じビーム位置のずれでも加速後半のフィードバック出力の方が前半のそれより大きい。逆にビームのエネルギーが上昇すると、より大きなキック電圧が必要になる効果もある。これら二つの効果を考慮したフィードバックゲインの調整が必要である。現状では、4 種類のフィルターを外部タイミングで切り替えできるファームウェアになっているが、この切り替えで十分なのか検討を行う予定である。

- パワーアンプ交換

(加速モードとは直接関係ないが) 3.2 章で前述したように、モード 0 の振動が主であるので、より低周波に感度があるアンプの調達が必要である。

以上の対策を 2010 年 9 月末までに済ませて、10 月に 30 GeV 加速モードでのビーム試験を予定している。

## 5. まとめ

我々は J-PARC MR のビーム不安定性を抑制する為のバンチ毎フィードバックシステムを設計、設置し、2010 年の 6 月に 3 GeV DC 運転に於けるビーム試験を実施した。ビーム試験では、負帰還フィードバックである程度ビーム不安定性を抑制してビームロスを減らす事に成功した。また、6 バンチ運転でのビームの振動モードは 0 モードが主である事も分かった。今後は、フィードバックシステムを少し改良し、2010 年 10 月に 30 GeV 加速モードで試験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] M. Tobiyama et. al., in proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, 2010
- [2] T. Toyama et. al., in proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada, 2009
- [3] L. Doolittle, et al., in proceedings of LINAC2006, Knoxville, U.S.A. p.568-570 (2006)
- [4] <http://www.dimtel.com>
- [5] Y. Chin et. al., in proceedings of HB2008, p40, (2008) "Impedance and Beam Instability Issues at J-PARC Rings"