

# TRANSVERSE FEEDBACK DAMPER AT THE KEK-PS MR

Takeshi Toyama<sup>1A)</sup>, Susumu Igarashi<sup>A)</sup>, Takashi Obina<sup>A)</sup>, Takako Miura<sup>A)</sup>,  
Takeshi Nakamura<sup>B)</sup>, Kazuo Kobayashi<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

<sup>B)</sup>JASRI / Spring 8, 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

## Abstract

Transverse feedback damper has been studied at the KEK-PS Main Ring (MR) with an analog or a digital processing system. Head-tail instability at the injection period was successfully damped with both systems.

## KEK-PS MRでの横方向フィードバック・ダンパー実験

### 1. はじめに

J-PARCではMain Ringシンクロトロン (MR) の入射期間 (3 GeV) における壁抵抗による横方向不安定性が最も厳しく、増大率はクロマティシティー $\sim 0$ で1000  $s^{-1}$ と見積もられている[1]。この不安定性は $\sim$ MHz以下の低い周波数と考えられる。また現在の見積りでは、電子雲によるe-p不安定性は発生しないという結果である[2]が、計算の前提条件の違いなどで、もしも発生した場合には、 $\sim$ 100MHzの広帯域周波数のフィードバックによる減衰が必要になる。

今回は、低周波数における水平方向フィードバック・ダンパーに関する実験を行なった。KEK-PS主リングに設置されているチューンメーター用のストリップライン・キッカーと、その下流のBPMを流用し、ビーム周回の1ターン以内のフィードバック・ループをアナログ、あるいはデジタル (最後のデータキックまでが1ターン以内) で構成した。

### 2. 構成

KEK-PSの入射期間のパラメータをTable 1 に示す。クロマティシティー $\xi_x$  および $\nu$ は、実験のために通常の値から変更した。フィードバック系の構成をFigure 1 に、BPM、ストリップライン・キッカー、パワー・アンプのパラメータはTable 2 にまとめる。

Table 1 Parameters during injection period of the KEK-PS MR.

Item		Unit (comment)
Energy	0.5	GeV
Beam intensity	$6.5 \times 10^{11}$	protons per bunch
Circumference	340	m
$\nu_x$	7.129	
$\nu_y$	5.217	
$\xi_x$	2.1	( = $\Delta\nu / (\Delta p/p)$ )
$\nu_s$	0.008	
bunch length	$\sim 20$	m
$\eta$	-0.4	( = $\alpha - 1 / \gamma^2$ )
$f_{rev}$	667	kHz

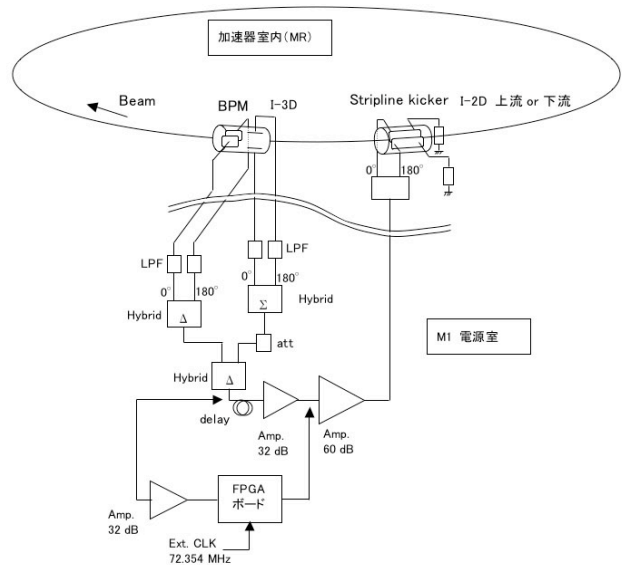


Figure 1. Setup of the feedback system at the KEK-PS MR. Analog delay and 32 dB amplifier was replaced by the digital processing system, indicated with arrows.

Table 2 Parameters of the BPM, kicker and power amplifier.

Item		Unit
BPM @ I-3D		
position sensitivity	0.79	V/m
$\beta_x$	6.62	m
$\alpha_x$	-1.03	
$\Delta\psi$ [kicker $\rightarrow$ BPM]	2.5 / 1.9	rad
Kicker (up- / down- stream of I-2D)		
efficiency	$1.7 \times 10^{-8} / 1.4 \times 10^{-8}$	rad/V
$\beta_x$	7.1 / 4.3	m
$\alpha_x$	1.1 / -0.572	
$\Delta\psi$ [BPM $\rightarrow$ kicker]	42.2 / 42.9	rad
Power amp.		
band width	0.3 - 35	MHz
power	1000	W
gain	60	dB

<sup>1</sup> E-mail: takeshi.toyama@kek.jp

2.1 アナログ系によるフィードバック

2 回のビーム実験の結果を示す。タイミングはケーブル・ディレーにより調整した。数nsの違いは大きく影響しなかった。これはバンチ長が100ns程度と長いためであると考えられる (Figure 2)。

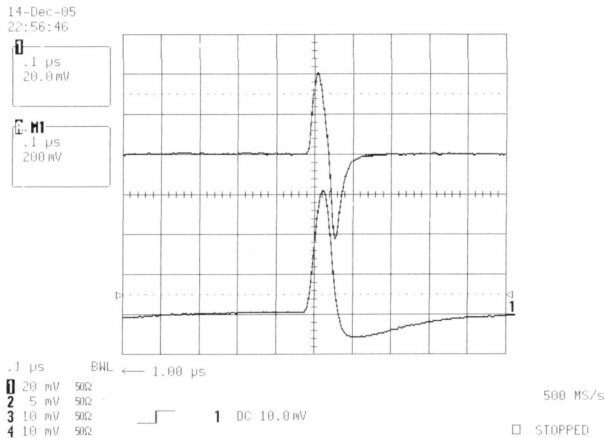


Figure 2. Signal from the BPM electrode.  
Upper trace: direct signal.  
Lower trace: output of LPF.

1 回目は、キッカーとしてI-2D上流のものを使用した。フィードバックON/OFFでの水平方向の $\Delta$ 信号をFigure 3に示した。フィードバックOFFでは、Figure 3 (a)でわかるように、入射から 40 - 50 msで水平方向ヘッドテール不安定性 (モード:  $\ell = 0$ ) が発生し、振幅が時定数 8.2 ms (5500 turns) で増大している。これは、安定性が失われるように  $\xi_x$  を正に選んだためである。発生タイミングはバラついた。フィードバックON にするとこの不安定性は抑制された (Figure 3 (b))。さらに、入射エラーによるベータトロン振動も半分程度に抑えられた。

2 回目の実験では、アナログとデジタルの両方を試みた。キッカーとしてI-2D下流のものを使用した。Figure 4に結果を示す。残っている信号はCODによるもので、今回のアナログ処理系の問題である。

2.2 デジタル系によるフィードバック

2 回目のビーム実験ではデジタル処理系も試みた。Figure 5に示す周波数特性の10-tap FIRフィルタを使用した[3]。ADC, FPGA, DACのクロックはRF周波数の12倍の72.036 MHzを独立の信号発生器で作った。従って、ビームとは非同期である。しかし、ターゲットにしている時間スケール 29 ns ( $1/35\text{MHz}$ ) に対して、クロックの誤差

$$\Delta T = (M+L) T_{rev} \Delta f / f$$

が十分小さければ実用上問題無い[4]。M = 10ターン、L = 1ターン、 $T_{rev} = 1.5 \mu\text{s}$ を考慮すると、 $\Delta f / f \ll 1.7 \times 10^{-3}$  となり、問題ないことがわかる。phase slippage factor  $\eta$ により、11ターン前のデータは27ns程度拡散するため、効率がやや低下すると考えられる。デジタル処理による抑制結果をFigure 6に示す。

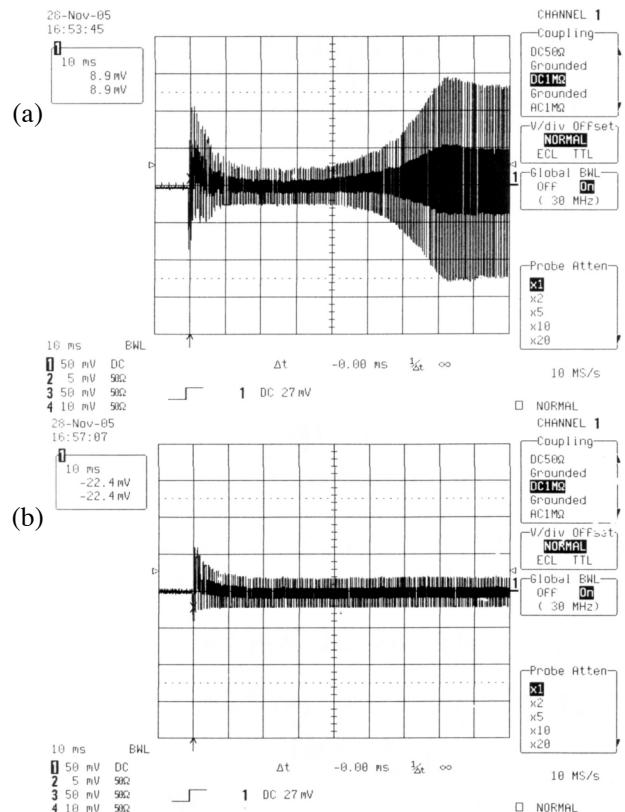


Figure 3. Horizontal  $\Delta$ -signal. (a) Feedback OFF. (b) Feedback ON.

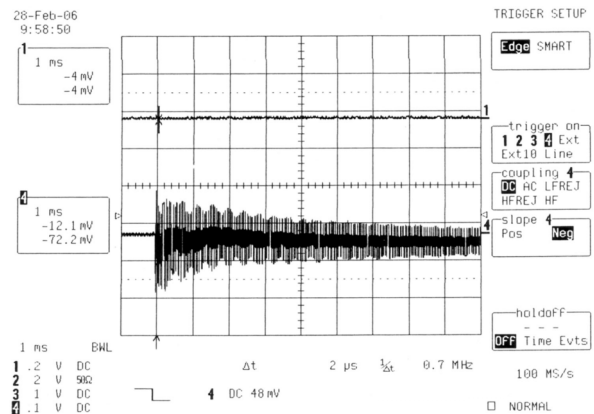


Figure 4. Horizontal  $\Delta$ -signal. Lower trace: input of RF power amplifier. Feedback is ON.

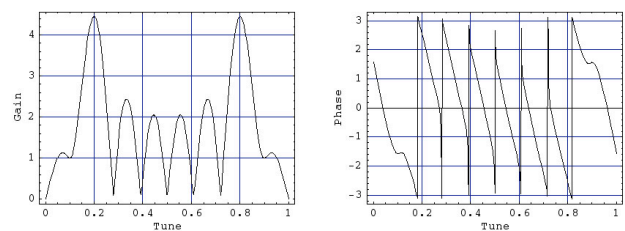


Figure 5. Frequency response of the 10-tap FIR filter.

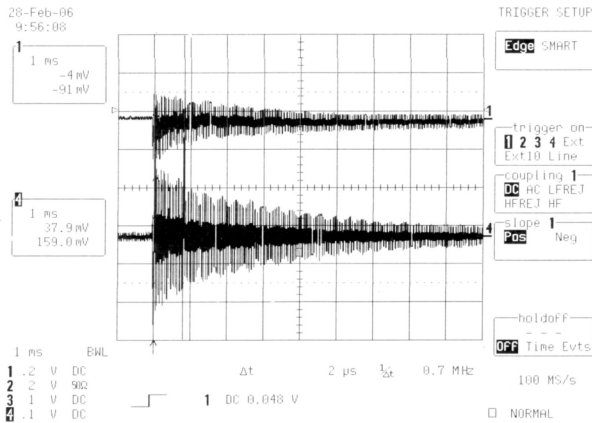


Figure 6. Horizontal  $\Delta$ -signal. Feedback is ON.

Upper trace: FPGA input,  
Lower trace: FPGA output.

FPGA出力では、COD成分は除去されていることがわかる。

ゲインの粗い調整の範囲では、デジタル系とアナログ系の減衰率は同程度であった。

### 3. 考察

アナログ信号処理の場合の時定数について、1 バunchを1粒子と見なした単純なモデルに基づく概算と比較する。

モデルを次のように考える。加速器に沿って $s_1$ から $s_2$ への $(x, x')$ の変換は(加速器の $n$ 周回目)、

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix}_n = \lambda_0 M(s_2 | s_1) \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix}_n$$

$M(s_2 | s_1)$ は $s_1$ から $s_2$ へのトランスファー行列である。キッカー位置を $s_1$ 、BPM位置を $s_2$ とすると、今回のセットアップは、加速器 $n$ ターン目から $n+1$ ターン目について、

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix}_{n+1} = \lambda_0 M(s_2 | s_1) \left\{ M(s_1 | s_2) \begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix}_n - \lambda_{FB} \begin{pmatrix} 0 \\ x_2 \end{pmatrix}_n \right\}$$

とかける。 $\lambda_0$ はフィードバック無しでのコヒーレント・ベータatron振動の増大率または減衰率、 $\lambda_{FB}$ はフィードバックゲインである。 $\lambda_0=1$ として、I-2D上流および下流のキッカーによる減衰率を計算する。1ターン当りの振幅の減衰率 $\alpha_{FB}$ は、

$$M(s_2 | s_2) - \lambda_{FB} M(s_2 | s_1) R$$

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

の固有値 $\lambda_{\pm}$ から

$$\alpha_{FB} = -\frac{1}{T_{rev}} \ln |\lambda_{\pm}|$$

により求まる。Table 2のパラメータ、およびケーブルでの減衰0.8を考慮し、BPMからキッカーの効率 $\lambda_{FB} = 0.00042 / 0.00035$  rad/m (上流/下流キッカー)を得る。 $\alpha_{FB} = -1800 / -680$  s<sup>-1</sup>、減衰時定数 $\tau_{FB} = 0.6 / 1.5$  msとなり、実験と大きく矛盾しない結果が得られる。

### 4. まとめ

KEK-PS MRの入射期間で作為的にヘッドテール不安定性(増大率 $\sim 8$  ms)を引き起こして、横方向フィードバック・ダンパーの実験を行なった。アナログ、デジタル共に同程度の抑制が実現出来た。

J-PARCでの減衰率( $\tau_{FB} \sim 1$  ms)に対応するには、周回時間が大きいこと、エネルギーが大きいことのために、1ターン当りの減衰率を増やす必要がある。また、今回は入射期間の一定周回周波数で行なったが、J-PARC Ringの加速中もフィードバックを動作させるためには、周回周波数の変化に追従させる細工が必要がある。これらの検討が今後の課題である。

本研究は科学研究費補助金(基盤研究(c)(2)16540272)の補助を受けた。

### 参考文献

- [1] Y. Shobuda *et al.*, presentation in ATAC 06 (2006).
- [2] T. Toyama *et al.*, "Electron Cloud Build-up and Beam Instabilities in the KEK-PS and J-PARC", Proc. of the 1st Meeting of Accelerator Society in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004, p.625.
- [3] T. Nakamura *et al.*, Proc. of the 1st Meeting of Accelerator Society in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004, p.619.  
T. Nakamura, "High Precision Transverse Bunch-by-Bunch Feedback System with FPGA and High Resolution ADC", Journal of the Particle Acc. Soc. of Japan, Vol.1, No.3, 2004(199-210), in Japanese.
- [4] T. Nakamura *et al.*, "S-LSRでのコースティングビームのデジタルフィードバック", Proc. of the 3rd Meeting of Accelerator Society in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006.