

# ピコ秒バンチのピッチ・ヨーモニタの NewSUBARU を用いた実証実験 BUNCH PITCH YAW MONITOR TEST USING NewSUBARU RING BEAM

中村 剛<sup>#, A)</sup>, 照井 真司<sup>A)</sup>, 橋本 智<sup>B)</sup>, 庄司 善彦<sup>B)</sup>  
Takeshi Nakamura<sup>#, A)</sup>, Shinji Terui<sup>A)</sup>, Satoshi Hashimoto<sup>B)</sup>, Yoshihiko Shoji<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>B)</sup> University of Hyogo

## Abstract

We performed a proof-of-principle test of a new monitor that real-timely measures the pitch of pico second length bunch using a simple electrical circuit, at the NewSUBARU electron storage ring of the university of Hyogo. With a signal from a usual button-type beam position electrodes, the monitor distinguishes the signals of the center-of-mass motion and the pitch of a bunch using their phase difference. In the experiment, the pitch is produced by the conversion of the center-of-mass motion to the pitch motion with the chromaticity and the synchrotron motion of a bunch. The result was compared with the simulation and the measurement with a streak camera system and their results are consistent with the pitch monitor.

## 1. はじめに

電子や陽電子のピコ秒長のバンチの、その前後半での水平や垂直方向への傾斜、すなわち Fig. 1 に示すような、船舶や航空機で言うところのピッチ (pitch: 垂直方向の傾斜、進行方向に垂直な水平軸の周りの運動) やヨー (yaw: 水平方向の傾斜、垂直軸周りの運動) のリアルタイム測定は、これまで困難とされてきた。そこで我々は、通常のビーム位置モニタ (以下 BPM) からの信号から、それに含まれるピッチ・ヨーが生成する信号 (以下、ピッチ・ヨー信号) とバンチが前後半そろって一様に位置を変化させた際の信号 (以下、重心信号) とを BPM 信号処理ではよく使われる 1 から 2 GHz の周波数帯域の簡単な回路により区別する手法を提案・構築し[1, 2]、兵庫県立大学の NewSUBARU リング[3]のビームを用いてその動作の検証を行ったので報告する。

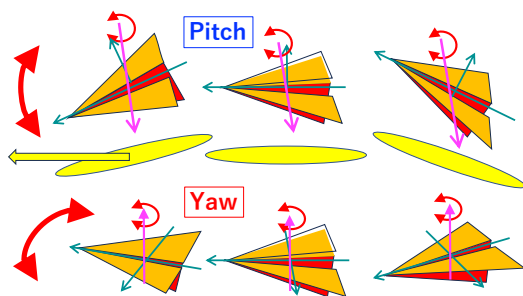


Figure 1: Pitch and yaw of bunch.

ハドロンのような数ナノから数十ナノ秒の長いバンチでは BPM 信号をもちいてこれらのリアルタイムでの測定が実際に行われており、フィードバック補正などに適用されている。しかし、電子や陽電子のバンチでは、バンチ長が数ピコから数十ピコ秒と短く、これまで通常の BPM での測定は困難とされ、その代わりとしてストリークカメラ[4]や高周波空洞モニタ[5]などでの測定が行なわれてきた。しかし、ストリークカメラではイメージの取得や画像処理を

伴うことからリアルタイム性が劣るため任意の時間での高レートでの継続的測定が困難であり、またイメージ処理にともないビームサイズより微小なピッチ・ヨーを抽出することも困難と考えられる。また、高周波空洞モニタでは、別途に空洞モニタを設置する必要があり、また、空洞の信号の時定数からマルチバンチ運転のような高レートでは隣り合うバンチを区別が困難である。

このような状況に対して我々は、バンチが通常のボタン型やストリップライン型のビーム位置モニタ(BPM)の電極に生成する信号波形において、重心信号と、ピッチ・ヨー信号の波形の違い、具体的にはバンチ中心に対する波形の偶奇性が異なることから、どの周波数帯域においても互いに 90 度程度の位相差を持つことに着目し、BPM の信号処理でよく用いられている 1-2 GHz の周波数帯域の回路を用いて重心とピッチ・ヨーを区別し測定可能なモニタ回路を提案している。この回路は、フィードバック等で用いられてきた BPM 信号の処理回路技術を用いており特別な素子・機器は不要で、また、周波数帯域もバンチ長にもよるが十数ピコ秒であれば 2 GHz 以下で良いので、非常に簡便である。

今回、このモニタ回路の動作を NewSUBARU リングのバンチを用いて検証した。これまで bunch-by-bunch 測定にも応用可能な微分回路による方式[1]および若干時定数が長くなるが band pass filter (BPF) を用いた方式[2]を提案してきたが、今回は簡便な後者を用いた。

NewSUBARU リングを選択した理由として、このリングはシンクロトロンチューンが非常に小さく[3]クロマチシティによるバンチの一様振動からピッチへの変換が容易であること、その励起のための垂直キッカーが設置されていること[6]、そして、ストリークカメラによるピッチの測定システムが整備されていること[4] が挙げられる。

ただし、残念ながらこの報告までの実験ではピッチ情報の抽出に専念したため処理過程途中での波形の取得や、リングパラメータを確定させる余裕がなく、本報告では暫定的な結果のみとなっている。詳細については次回に報告することとする。

<sup>#</sup> nkmr@post.kek.jp

## 2. バンチのピッチ・ヨーの生成

今回の試験では、バンチのピッチを生成し、それに対するピッチモニタの応答を観測した。ピッチとしたのは、データの比較のために用いたストリークカメラによる測定において傾斜の方向のビームサイズが小さい必要があったためである。

バンチのピッチの生成には、垂直キッカーによりバンチを前後半一様にベータatron振動させ、その振動がクロマチシティとシンクロtron振動によりピッチに変換される現象を用いた[7]。これを Fig. 2 で説明する。クロマチシティを  $\xi$ 、シンクロtronチューンを  $\nu_s$ 、周回各周波数を  $\omega_0$  とおく。エネルギー振幅  $\delta_0$ 、時間振幅はこれに対応して  $\tau_0 = (\alpha/\omega_s)\delta_0$  をもつ粒子 1 を考える。このシンクロtron振動によるエネルギーの変化:

$$\delta(t) = \delta_0 \sin \omega_0 \nu_s t \quad (1)$$

は、クロマチシティによりベータatron振動の周波数の変化:

$$\Delta\omega_\beta(t) = \omega_0 \xi \delta(t) \quad (2)$$

をもたらす。そして、シンクロtron半周期後には位相差

$$\Delta\psi_\xi(\tau_0) = \int_0^{\tau_0} \Delta\omega_\beta(t) dt = 2 \frac{\xi}{\nu_s} \delta_0 = 2 \frac{\xi \omega_0}{\alpha} \tau_0 \quad (3)$$

が発生する。また粒子 2 は逆の位相差を持つ。このため、たとえば重心が 0 となるタイミングで観測するとバンチは Fig. 2 の右下のように波打ち、ピッチやヨーが生成される。ところで電子リングのエネルギー広がり、どのリングも 0.1% 程度の値となっているので、この位相差はほぼ  $\xi/\nu_s$  に関連する。すなわち NewSUBARU リングのような  $\nu_s$  が小さいリングほど小さいクロマチシティで位相差が作りやすい。NewSUBARU リングでは、逆バンド磁石をもつ特殊なラティスにより小さいモーメントコンパクションファクターをもち[1]、それによりシンクロtronチューンも 0.002 と小さいため、利用運転時のクロマチシティで十分なピッチが生成できるという特徴をもっている。NewSUBARU リングのパラメータを Table 1 に示す。

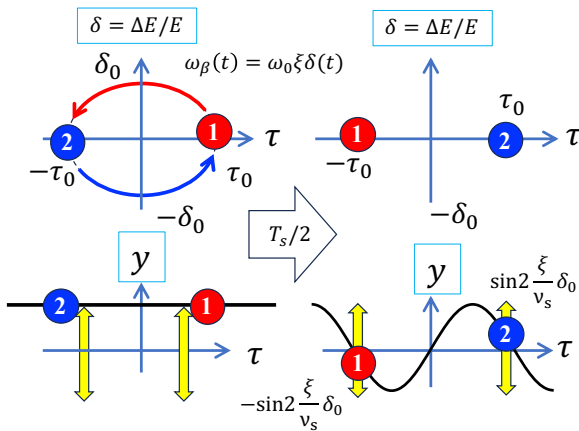


Figure 2: Conversion of uniform motion of bunch to pitch motion by chromaticity and energy oscillation. left: just after kick, right: after half synchrotron period.

Table 1: NewSUBARU Ring Parameters

Energy	1 GeV
Momentum compaction factor ( $\alpha$ )	$1 \times 10^{-3}$
Energy spread ( $\sigma_\delta$ )	0.04 %
Revolution Frequency	396 nsec
Vertical tune	2.22
Nominal vertical chromaticity ( $\xi$ )	5

今回の試験は、シングルバンチ運転、かつ、ウェーク場の影響を避けるため、できるだけ低電流とするため、1mA/bunch での測定とした。

## 3. バンチの位置分布と電荷分布

BPM のビームを挟む 2 電極の差の信号(以下、差信号)は、BPM を時刻  $t$  に通過するバンチの部位の平均位置  $\bar{x}(t)$  およびその電荷分布  $\rho(t)$  の積  $\bar{x}(t)\rho(t)$  に対する応答となる。電荷分布  $\rho(t)$  がガウス形状の場合、ピッチやヨーがなく重心位置(バンチの様な位置シフト)のみの場合、および重心位置が 0 でピッチやヨーのみを持つ場合の  $\bar{x}(t)\rho(t)$  を Fig. 3 に示す。ここでピッチやヨーの角度は重心位置を  $x_{CM}$ 、バンチ長を  $\sigma_t$  として、 $\theta_p = x_{CM}/c\sigma_t$  としている。

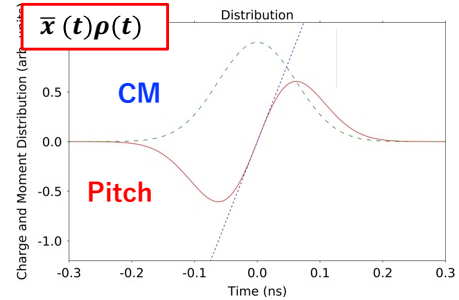


Figure 3:  $\bar{x}(t)\rho(t)$  with slice-averaged position  $\bar{x}(t)$  and charge density  $\rho(t)$ . “CM”: zero pitch, with the center of mass position  $x_{CM}$ . “Pitch”: zero bunch center of mass position, with pitch/yaw angle of  $x_{CM}/c\sigma_t$  where  $\sigma_t$  is the bunch length.

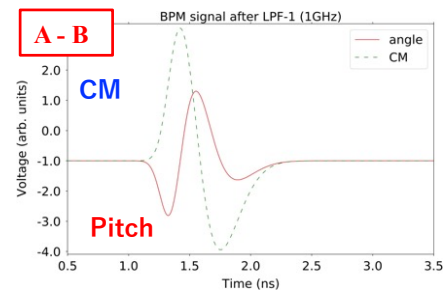


Figure 4: Simulated difference signal of button type BPM for “CM” and “Pitch” shown in Fig. 2.

この試験では NewSUBARU リングのボタン型電極の差信号を用いているが、この電極に構造に近い SPring-8 のボタン型電極のシミュレーションでの応答から求めた

差信号を Fig. 4 に示す。これからピッチやヨーの信号(以下、ピッチ・ヨー信号)と重心の信号(以下、重心信号)はバンチ中心に対して偶奇性が異なる、あるいは、ピッチ・ヨー信号は重心信号の微分に近い。すなわち、あらゆる周波数帯域において、また線形素子を適用してもピッチ・ヨー信号と重心信号は位相が互いに 90 度程度異なる。提案した回路はこの位相差を用いて、両者を分離している。

#### 4. ピッチの検出回路

本研究の核となる、ピッチ・ヨーの検出回路を Fig. 5 に示す。今回は電極の選択として skew 位置に置かれた電極のうち、左右片側のビームを挟んだ上下の電極としピッチにのみ応答する設定としているので、ヨーの言葉は使わないこととする。ビームを挟む 2 電極の信号を 180 度ハイブリッドに導入し差信号(“A-B”)と和信号(“A+B”)を生成する。差信号中には重心信号とピッチ信号が含まれ、重心信号とピッチ信号とはほぼ 90 度の位相差を持つ。また、和信号はバンチの電荷分布にのみ応答し位置情報は持たないが、その波形は重心信号に相似であり、かつ、差信号に同期している。そこで、和、差、それぞれをバンドパスフィルタ(BPF)に通して、その中心周波数をもつ波束を生成し、それらの位相差を調整してミキサーでかけ合わせ、低周波成分だけを取り出す。ミキサーは掛け算回路であり、低域通過フィルタ(LPF)により低周波成分を抽出する。このときミキサーでの和信号と重心信号の位相差を 90 度とすれば重心信号からの出力を 0 とすることができ、ピッチ信号からの出力だけを取り出すことができる。一方、和信号とピッチ信号の位相差を 90 度とすればピッチ信号からの出力を 0 とでき、重心信号からの出力を取り出すことができる。

しかし、このピッチ検出回路の出力信号には種々の信号が混入し、その大きさはピッチ信号に比べて遥かに大きく、回路の出力自体ではピッチの情報は目視では確認が困難である。これは従来からの bunch-by-bunch フィードバックで用いられているような高速でのバンチ位置モニタが抱える問題と同様である。そこで SPring-8 bunch-by-bunch フィードバック用信号処理装置[8] (Fig. 5 の“Digital Signal Processor”)を用いてデジタル処理し

ベータatron振動をもつ信号を抽出しピッチの目視観測を容易とした。

#### 5. ベータatron振動成分の抽出

上述の混入信号には周回周波数の成分が多く、一方、ピッチ信号は周回ごとに垂直ベータatron振動の周期で振動する、という違いがあるので、バンチの各部のターン毎の位置を入力とした 10-tap の FIR フィルタを用いてベータatron振動の成分を分離している[9]。そのチューンに対するゲインの応答を Fig. 6 にしめす。垂直チューン 0.22 のところでゲインを最大とし、ターン毎に変化しない成分(fractional tune = 0)に対するゲインは 0 に設定されている。またチューン 0.22 での位相は 0 度としている。

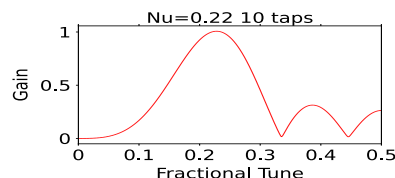


Figure 6: Gain response of FIR filter.

#### 6. 測定結果

この回路によりえられたピッチ信号(Pitch)および、別途に用意した重心の運動とみなせる信号(CM)を、対応するシミュレーションコード[10]の結果とともに Fig. 7, 8 に示す。ここでCMとしているものは Fig. 5 の“CM”信号ではなく、別途の BPM の A-B 信号に対してカットオフ周波数 1 GHz の low pass filter を作用させ、かつ各バンチの範囲で一回積分を行うことによりピッチ成分を大きく抑制したものである。原理的にはもう一度積分すればピッチ成分は消せるが積分は低周波ノイズを大きくするので観測が困難であった。シミュレーションでは得られた粒子の分布を  $x_{CM} + \theta ct$  にフィットして center of mass の位置:  $x_{CM}$  およびピッチ角度:  $\theta$  を求めている。測定とシミュレーションでクロマティシティや加速電圧の値が異なっているのは、実験の値は実測値ではなく設定値のため、ある程度の誤差があることから、シミュレーションではクロマティシティや加速電圧をある程度変えて計算し測定結果に似た波形を得た結果を示している。

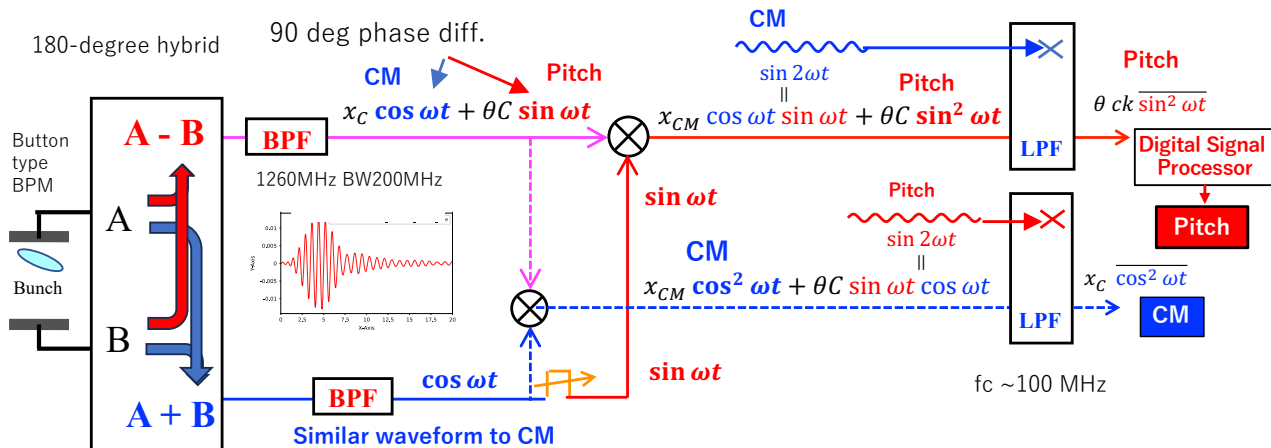


Figure 5: Bunch pitch/yaw monitor circuits. “A-B” in Fig.3 is produced with 180deg hybrid.

ピッチが発生しないと考えられるクロマチシティが 0 の近くでの測定を行おうとしたが、ビーム不安定性が発生しビームが失われたため今回は困難であった。

また、測定値は、シミュレーション(放射減衰・励起を含む)に比べて早く振動が減衰しているが、これはビームサイズや、垂直振動の励起が 1mm 程度と大きいことによるベータatron振動数の振幅依存性による広がりやデコヒーレンスを起こしている可能性が考えられる。これについては後述のストリークカメラのデータでも考察する。

さて、波形について、キック後に CM が低減していくとともにピッチが生成されているのが測定およびシミュレーションのどちらにも見られている。キックから 1 シンクロtron周期を経過するとクロマチシティによる位相変化が再び 0 となるので CM の振動が再び現れている。大きなクロマチシティや加速電圧が低い場合には半周期後ではピッチが逆に一旦小さくなっているが、これは Table 2, 3 に示すように Eq. (3)で表される位相差が 90 度を越えて大きくなりすぎているためと考えられる。

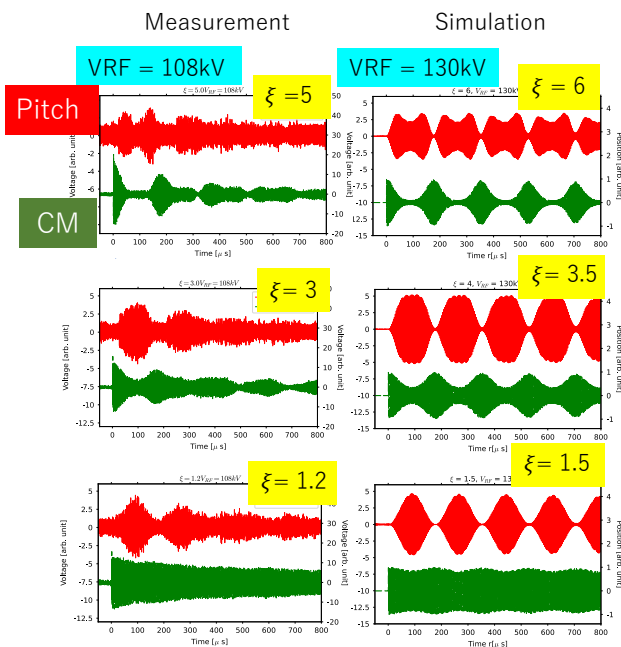


Figure 7: Measured (left) and simulation data (right) with several chromaticity (“ $\xi$ ”) and fixed RF voltage (“VRF”). In each plot, upper lines are pitch monitor signal and lower lines are the center of mass data derived from another BPM’s A-B signal, not the “CM” signal in Fig. 5. Horizontal full scale is 850  $\mu$ s, with kick at 0  $\mu$ s.

Table 2: Betatron Chromatic Phase for Fig. 7

RF Voltage ( $V_{RF}$ )	Synchrotron tune ( $\nu_s$ )	Bunch length ( $\sigma_\tau$ )	$\Delta\psi_\xi(\sigma_\tau)$ , $\xi = 4$
60 kV	0.0014	22.9 ps	128 deg.
130 kV	0.0023	14.4 ps	81 deg.
220 kV	0.0030	11.0 ps	61 deg.

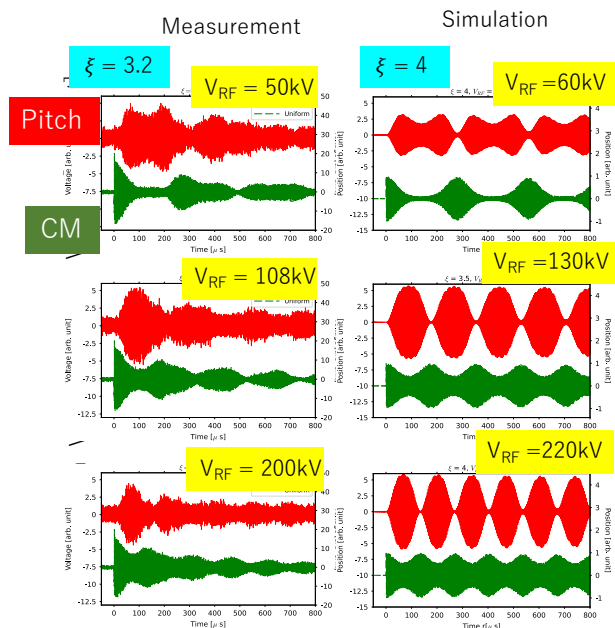


Figure 8: Same as Fig. 7, with fixed chromaticity and different RF voltages.

Table 3: Betatron Chromatic Phase Shift for Fig. 8

Chromaticity	$\Delta\psi_\xi(\sigma_\tau)$
$V_{RF} = 130$ kV $\nu_s = 0.0023$ $\sigma_\tau = 14.4$ ps	6 121 deg.
	3.5 71 deg.
	1.5 30 deg.

## 7 ストリークカメラによる測定

NewSUBARU リングでは、バンチの電子の垂直方向の分布の時間変化をプロファイルとして測定可能なストリークカメラシステムが整備されている (Fig. 9, 10) [4]. これを用いてピッチの測定を行った。ストリークカメラは、垂直方向にはピコ秒スケールのスイープ、水平方向には数ターン分に相当するマイクロ秒スケールのスイープが行われておりターン毎のバンチのイメージを水平方向にずらして重ね書きを行っている。また、ストリークカメラには Fig. 9 の光学系によりバンチの垂直方向の分布が Fig. 10 に示す“X”方向に結像されており、垂直方向分布の時間構造を眺めることが可能となっている。結果を Fig. 11 に示す。上半分が Fig. 7 の中段のプロットであり下半分がストリークカメラで取得したイメージである。ストリークカメラではキックごとに撮影のタイミングを変えて測定している。さて、時刻 0  $\mu$ s でのキックにより一様な振動が始まった時点ではピッチの信号にもストリークカメラのイメージにもバンチのピッチは現れていないが、ピッチ信号が最大となっている 80  $\mu$ s 付近ではストリークカメラでもピッチが増大していることがわかる。また、220  $\mu$ s 付近ではピッチの信号およびストリークカメラの両方でピッチが小さくなっている。さらに 240  $\mu$ s では、ピッチ信号が増大となり、かつ、ストリークカメラでもピッチが増大している。

ところで、220  $\mu$ s では 0  $\mu$ s に比べて垂直方向のサイ

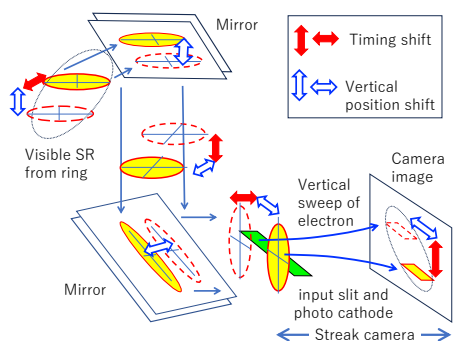


Figure 9: Pitch measurement optics for streak camera. Two ellipses are two slices of a bunch with different timing and different vertical position.

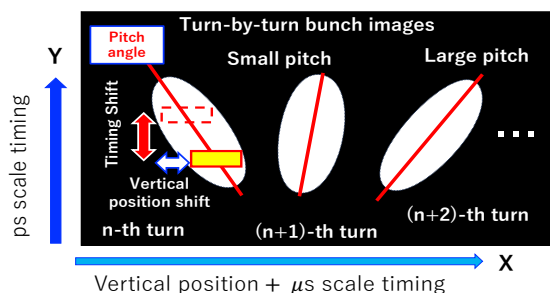


Figure 10: Bunch images taken by streak camera. Each image is turn-by-turn bunch profile in vertical (“X”) and pico second timing (“Y”) space.

ズ(水平幅)が増大しているが、先述のデコヒーレンスによる振動の振幅のビームサイズへの変換が見えていると想定され、Fig. 7, 8 での振動の急速な減衰がデコヒーレンスによる可能性が高いと考えられる。

### 謝辞

本研究に当たっての以下の方々への協力に感謝します。回路部品や測定機器において KEKB 飛山真理氏、森

健児氏、フィードバック用信号処理装置の運用において JASRI 小林和生氏および渡部貴宏氏、垂直キッカーにおいて KEK-PF 満田史織氏、NewSUBARU の運転調整においてスプリングエイトサービス(株)の皆川康幸、平山英之、鍛冶本和幸、中田祥太郎の各氏。本研究は JSPS 科研費 23H03667 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] T. Nakamura, “Head-tail フィードバックによるモード結合不安定性抑制の検討”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, Nagaoka, Japan (2018).
- [2] T. Nakamura *et al.*, “バンチの傾きモニタの線形加速器への応用の検討”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18 - 21, Online (Kyushu University), (2022).
- [3] A. Ando *et al.*, “Isochronous storage ring of the New SUBARU project,” J. Synchrotron Rad., 5, p342-344, (1998). <https://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/facility-ring.html>.
- [4] T. Matsubara *et al.*, “Bunch-by-bunch linac beam energy profile diagnostics using storage ring phase rotation and synchrotron radiation”, Phys. Rev. ST-AB, 9, 042801 (2006).
- [5] Y. I. Kim *et al.*, “Cavity beam position monitor system for the Accelerator Test Facility 2”, Phys. Rev. ST-AB 15, 042801 (2012).
- [6] Y. Shoji *et al.*, “ニュースバルへの垂直キッカーシステム導入”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 3-5, Nagoya, Japan, SUP060 (2013).
- [7] For example, Fig. 4.13 in the textbook of A. Chao, “Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators”, Wiley (1993).
- [8] T. Nakamura, K. Kobayashi, “FPGA Based Bunch-by-bunch Feedback Processor,” Proceedings of 10th ICALEPCS, Geneva, October 10-14, PO2.022-2 (2005).
- [9] T. Nakamura, “Simulation of Beam Instabilities in SPring-8”, Workshop of SAD 2006, (2006). [https://acc-physics.kek.jp/SAD\\_legacy/SAD2006/Doc/Slide/Nakamura.pdf](https://acc-physics.kek.jp/SAD_legacy/SAD2006/Doc/Slide/Nakamura.pdf)
- [10] T. Nakamura, “Simulation of Study of the Single Bunch Instabilities in the SPring-8 Storage Ring”, Proceedings of EPAC96, WEPI04G (1996).

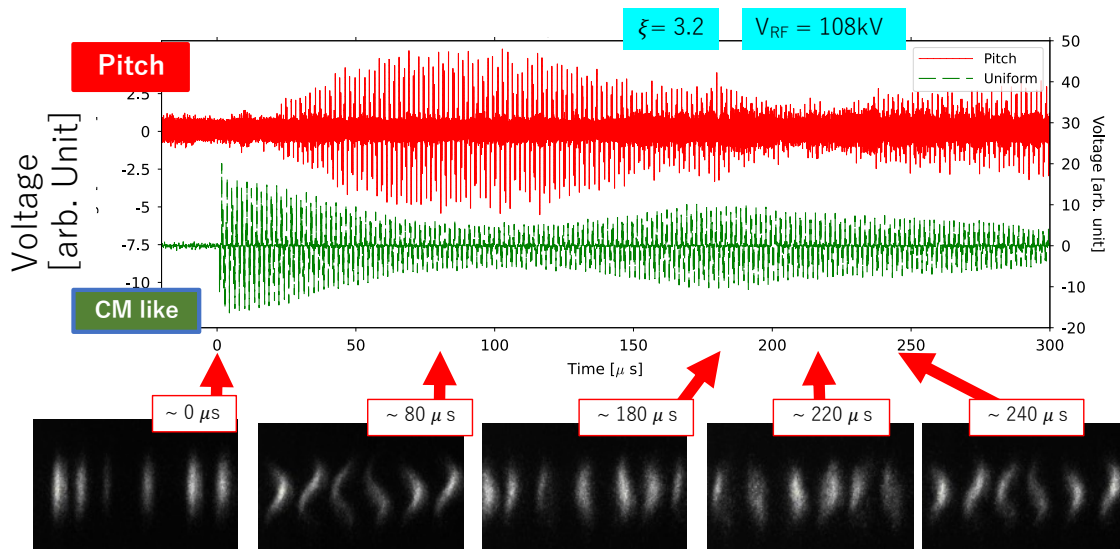


Figure 11: Pitch signal (top) and streak camera data (bottom, see Fig. 10).