

放射光ビームラインにおけるパルス・モード計測型光位置モニタの評価

EVALUATION OF A PULSE-MODE X-RAY BEAM POSITION MONITOR FOR A SYNCHROTRON RADIATION BEAMLINE

青柳秀樹#, 大沢仁志, 小林和生, 藤田貴弘, 高橋直

Hideki Aoyagi #, Hitoshi Osawa, Kazuo Kobayashi, Takahiro Fujita, Sunao Takahashi

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

We have improved the heat resistance of the pulse-mode X-ray beam position monitor, which enables pulse-by-pulse observation of photon beam fluctuation at the undulator beamline. This monitor is characterized by reducing the stray electric capacitance of the blade-shaped detection elements using a diamond heat sink and impedance matching using a micro-stripline transmission line to improve high-frequency performances. Evaluation tests were conducted at the undulator beamline. In this paper, the evaluation of the sensitivity and resolution of this monitor, and the observation of pulse-by-pulse beam oscillation immediately after beam injection during user operation are presented.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 の放射光ビームラインにおいてパルス毎の位置計測を可能とするパルス・モード計測型光ビーム位置モニタ (pulse-mode X-ray beam position monitor, PM-XBPM) の実用化に取り組んでいる。本モニタは、高周波特性を向上させるために、ダイヤモンド・ヒートシンクを用いたブレード型検出素子の浮遊電気容量を低減させ、かつ、マイクロ・ストリップライン伝送路を用いてインピーダンスを整合させていることを特長とする。試作機を偏向電磁石ビームラインの基幹チャンネル部に設置して実施した評価試験では、パルス長 0.7 ns FWHM の単極性パルス信号を生成し、放射光ビームの光軸の変動をパルス毎に観測できることを実証した[1]。放射光の出力が格段に高い挿入光源ビームラインでの安定動作をより確かなものとするために、ダイヤモンド・ヒートシンクと水冷素子ホルダを改良して耐熱性の向上を目指した。予備実験として、偏向電磁石ビームラインでの基本動作を確認したことを既に報告している[2]。

パルス・モード計測型光位置モニタは従来の光位置モニタと同じく、4枚のブレード形状の検出素子を光軸近傍の上下左右に配置させ、各検出素子の信号比を位置情報として読み出すものである。検出素子は光軸に対して約 1/20 の傾きを持たせた配置となっており、安定した光電子の放出が得られる構造となっている。耐熱性の更なる向上のために、次のような改良を施した。検出素子の光軸方向のサイズを初期型に比べて2倍の 16 mm へと改良し、徐冷効果を増大させた (Fig. 1 (a))。また、くさび型押え金具を採用して接触面の熱伝達係数を向上させている (Fig. 1 (b))。

改良された PM-XBPM は、偏向電磁石ビームライン (最大パワー密度 1.5 kW/mrad²、実際に受ける照射パワー密度 ~0.1 W/mm²) にて基本動作の確認をした後に、挿入光源ビームライン (最大パワー密度 ~500 kW/mrad²、実際に受ける照射パワー密度 < ~25 W/mm²) に移設し

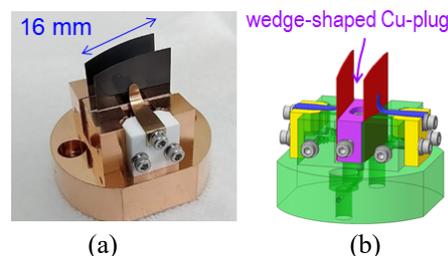


Figure 1: Modification of mounting method of the detecting elements. (a) Doubling the size of the diamond heatsink. (b) Adopting a wedge-shaped copper plug.

た。移設後、約一年の間、耐熱性の問題がないことが確認できている。本稿では、挿入光源ビームラインにおいて、位置感度の評価 (2 章)、分解能の評価 (3 章)、及び、ユーザー運転中の Top-up 入射時のビーム振動の観測 (4 章) について報告する。

2. 位置感度

2.1 シェーカによる摂動と SP-BPM による振幅測定

蓄積リングのビームシェーカを用いて水平/垂直方向にベータatron振動を励起することにより、挿入光源ビームラインに設置された PM-XBPM の位置感度の評価を実施した (Fig. 2)。蓄積リングのフィリングは単一の孤立バンチとし、蓄積電流値 (バンチ電流値) は 0.95 mA とした。水平方向は Cell 04 の BBF 水平キッカー、垂直方向は Cell 30 の 0.9 m キッカーを用いて、水平/垂直方向

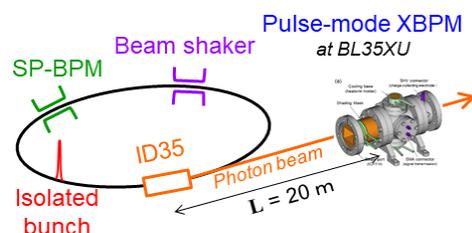


Figure 2: Setup of position sensitivity measurement.

aoyagi@spring8.or.jp

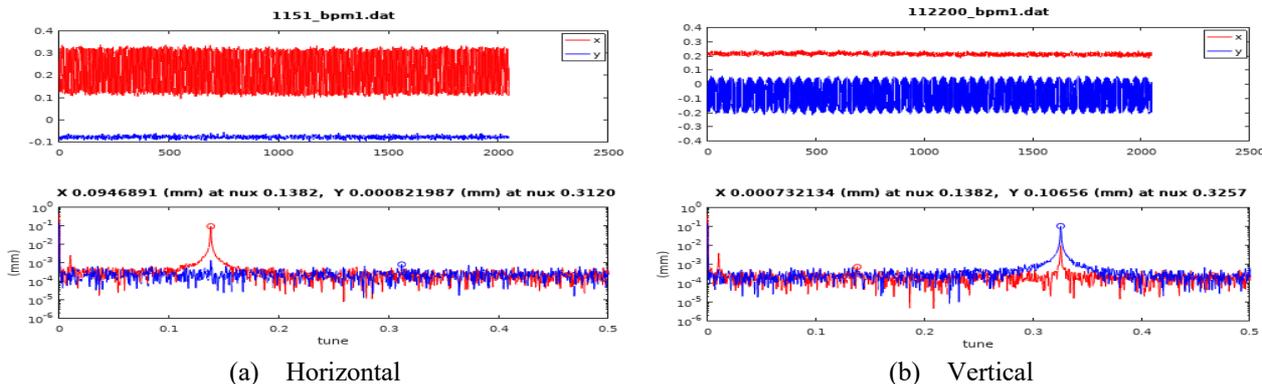


Figure 3: Amplitude measured by SP-BPM (top: amplitude in real space, bottom: FFT analysis).

にベータatron振動を励起した。摂動周波数は、水平方向 28.9 kHz ($v_x = 41.1382$)、垂直方向 60.0 kHz ($v_y = 19.3257$)とした。ベータatron振動の励起は、ID gap の開閉やバンチ電流によるチューンの変動に自動で追従させるため、PLL (phase-locked loop) でロックした。摂動振幅は Dimtel 社 iGp12 の DAC 出力で調整し、cell 21 の直線部の Single pass (SP)-BPM で 100 μm の振幅になった時の DAC 出力を名目上“100%”とした。この条件での DAC 出力は DAC=0.05 (水平)/0.03 (垂直)であり、キック量は $\theta_x=0.033 \mu\text{rad}$, $\theta_y=0.047 \mu\text{rad}$ に相当する。Figure 3 に、例として、DAC 出力“100%”の時の蓄積リングの single pass beam position monitor (SP-BPM)で観測されたビーム振幅を示す。

RFKO (Radio Frequency Knockout)により励起される定常的な摂動振幅を任意の SP-BPM で観測することにより、PM-XBPM の地点での振幅に変換することができる。Figure 4 に、SP-BPM (cell 21)で観測された振幅を用いて、光源から 20.3m 離れた PM-XBPM (BL35XU)の位置で推定される振幅を示す。変換係数として次の値を用いた[2]。

$$\frac{|y_{\text{XBPM}}|}{|y_{\text{BPM}}|} = \frac{\sqrt{\left(\sqrt{\beta_{ID}} - \frac{\alpha_{ID}L}{\sqrt{\beta_{ID}}}\right)^2 + \frac{L^2}{\beta_{ID}}}}{\sqrt{\beta_{BPM}}}$$

$$= 3.90 / 1.90 \text{ (hor./ver.)}$$

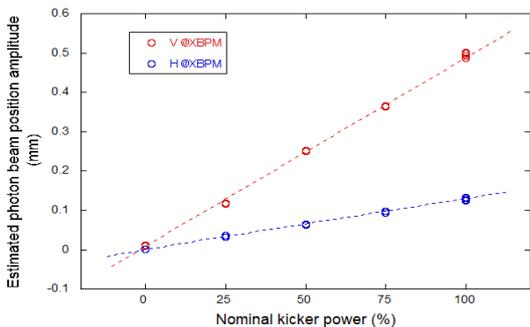


Figure 4: Photon beam position amplitude at PM-XBPM estimated from SP-BPM.

ここで、水平方向において $\alpha_{ID} = -1.195 \times 10^{-5}$, $\beta_{ID} = 31.16 \text{ m}$, $\beta_{BPM} = 31.21 \text{ m}$ 、垂直方向において $\alpha_{ID} = +4.61 \times 10^{-6}$, $\beta_{ID} = 5.04 \text{ m}$, $\beta_{BPM} = 5.73 \text{ m}$ である。摂動振幅は iGp12 の DAC 出力で調整し、“100%”，“75%”，“50%”，“25%”，“0%”を名目上のキッカー強度(横軸)とした。DAC 出力値と振幅は線形性が保たれていることが分かる。

2.2 PM-XBPM による振幅測定

PM-XBPM の検出素子 4 枚(UL, UR, LL, LR)からの各パルス信号をオシロスコープ (4 GHz b.w., 50GS/s, High Res. Mode, 12 bit)で測定し、10ns の領域で積分した値から水平/垂直の変位を計算した。Figure 5

に測定の実験図を示す。オシロスコープに直接接続するのではなく、分配器(divider)を接続して一端を 50 Ω で終端している。これにより、チャージアップしているケーブル芯線が放電されるのでオシロスコープを保護することができる。

Figure 6 に、キッカー強度を変化させた時の、本モニターによって観測された連続する 40 ターン分の変位と正弦波フィッティングの結果を示す。垂直方向、水平方向ともに、線形性が保たれていることが分かる (Fig. 7)。

2.3 SP-BPM と PM-XBPM の比較

Figure 8 に SP-BPM と PM-XBPM で測定された値の相関を示す。このグラフは、SP-BPM で観測される摂動振幅から PM-XBPM の位置で推定される振幅 (Fig. 4)

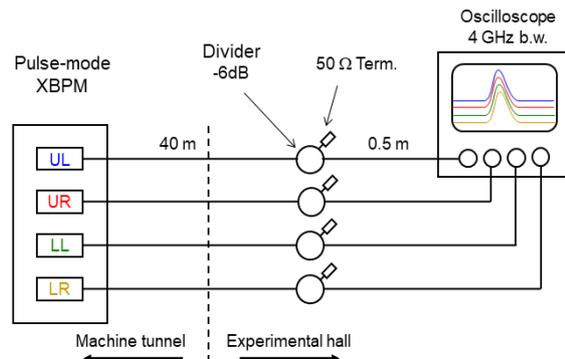
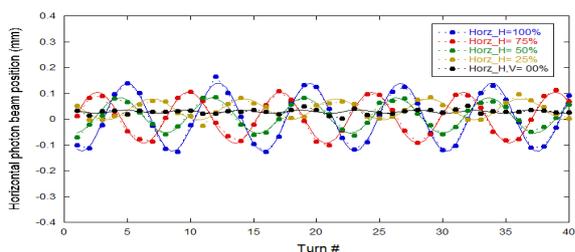
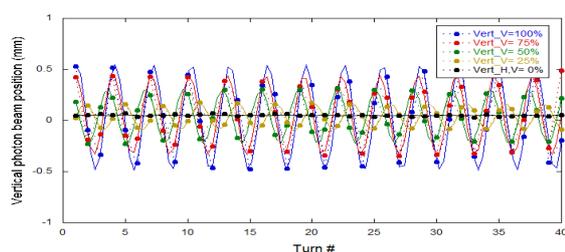


Figure 5: Connecting diagram of PM-XBPM.



(a) Horizontal



(b) Vertical

Figure 6: Amplitude measured by SP-BPM.

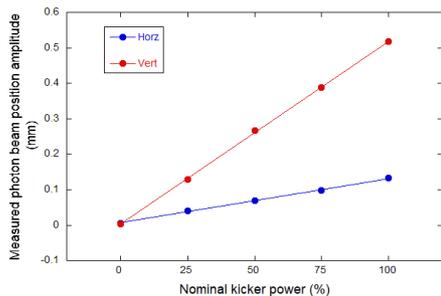


Figure 7: Amplitude of PM-XBPM readouts.

を横軸、PM-XBPM で測定された振幅 (Fig. 7) を縦軸にプロットしたものである。垂直方向、水平方向ともに良い線形性を確認した。但し、SP-BPM から推定される摂動振幅に対して、水平方向で 1% 低く、垂直方向で 7% 大きな値であった。若干の相違の原因は、本測定で用いた PM-XBPM の補正係数は暫定的な値を用いていたことや、SP-BPM で測定した電子ビームの振幅に変換する係数を算出する際の誤差が影響していると思われる。

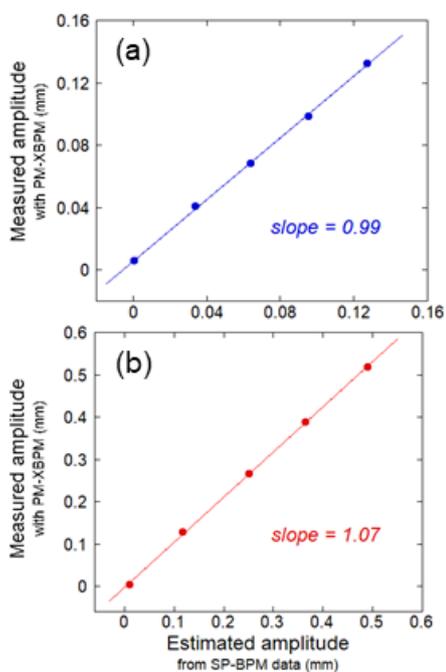


Figure 8: Correlation between XBPM and SP-BPM. (a) Horizontal, (b) Vertical.

3. 分解能

3.1 フィリングと波形の観察

前述の配線 (Fig. 5) を用いて、バンチ電流値に依存する分解能を評価することを試みた。フィリングパターンは、バンチ間隔を 24 バケツ (47.2 ns) とし、各バンチの電流値は 0.5 mA, 1 mA, 2 mA, 3 mA, 4 mA, 5 mA /bunch の順で入射した (Fig. 9)。低い電流値のバンチを先方から並べることで、パルスのテール部が次のパルスに与える影響を相対的に小さくすることができる。測定中、各バケツのバンチ電流値は Top-up 入射により一定に保たれた。挿入光源 (ID35) の gap 値は 6.7 mm, 9.6 mm, 12.0mm で測定した。Figure 10 は、各バンチの波形を重ねたものである。Figure 10 (a) の最小 ID gap 値 (ID gap = 6.7mm) では、バンチ電流値が高くなるとパルスの立ち下り部 ($t=2\sim 3$ ns) で肩が見られる。空間電荷効果が影響し、エネルギーの低い光電子 (散乱 2 次電子) の放出が抑制されていると考えられる。Figure 10 (b) では、その様子を見るためにバンチ電流値 1 mA を基準に規格化した。Figure 10 (c), (d) では、ID gap 値を広げ (ID gap = 9.6/12.0 mm)、放射光のパワーを低くした時の波形を示す。パルスの形状は空間電荷効果によって影響を受けることはない。

3.2 パルス毎のビームのふらつきと分解能

分解能を評価するために、各バンチの位置の変化を蓄積リングの連続する周回毎に測定した。Figure 11 は、PM-XBPM の 4 枚の検出素子から出力されるパルス波形の波高の Diff/Sum の周回毎の変化を時系列で示している。Figure 12 に、縦軸にバンチ電流値毎の波高の

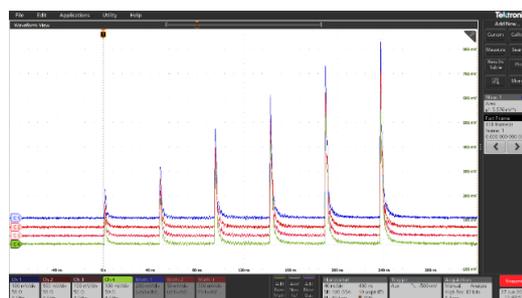


Figure 9: Screen capture of the oscilloscope. Applied voltage of the charge collecting electrodes is +300 V. ID gap = 6.7 mm.

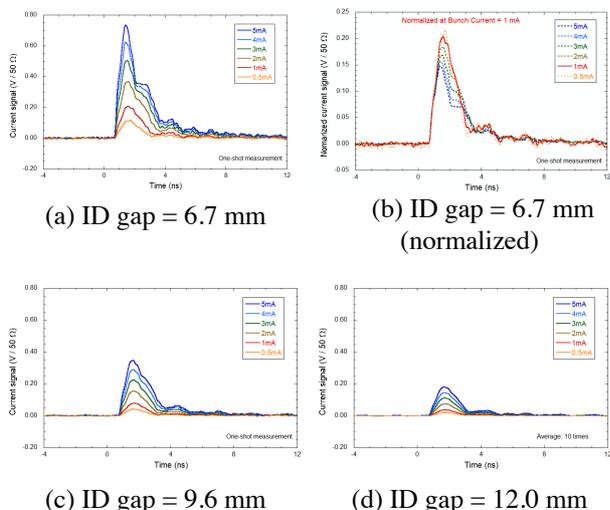


Figure 10: Waveforms of PM-XBPM. Applied voltage of the charge collecting electrodes is +300 V.

Diff/Sum の標準偏差に補正係数を乗じた値(単位:mm)を示す。水平・垂直方向ともに、バンチ電流値が高い程、変動が小さい、つまりは、分解能が高い傾向が見られる。分解能の最小値はバンチ電流値が 5 mA/bunch で得られ、水平 4.5 μm std/垂直 4.5 μm stdであった。オシロスコープ内蔵の機能を利用して帯域をデジタル的に 200MHz に狭めた時の値も示している。分解能の最小値は同じくバンチ電流値が 5mA/bunch で得られ、水平 1.7 μm std/垂直 1.2 μm stdであった。Low Pass Filter を用いるとハルス長が伸びるが、バンチ間隔が広い場合には、高速 ADC でパルス波高を読み出しやすくなることが期待できる。

4. 入射時のビーム振動の観測

SPring-8 では、安定した利用実験を可能とするために、ユーザータイム中はトップアップ運転が実施されている。しかし、入射頻度は概ね 20~40 秒に 1 ショットであるが、入射の僅かな間、ビームは揺さぶられる。ユーザー運転中(“203 bunches mode”)の放射光ビームのパルス毎の振る舞いを PM-XBPM を用いて観測することを試みた。Figure 13 に測定の実験配線図を示す。各ブレード検出器からの信号は、減衰器(-10 dB)を介して結合器(図中では“Divider”と表記)に接続した。これにより、反射波の影響

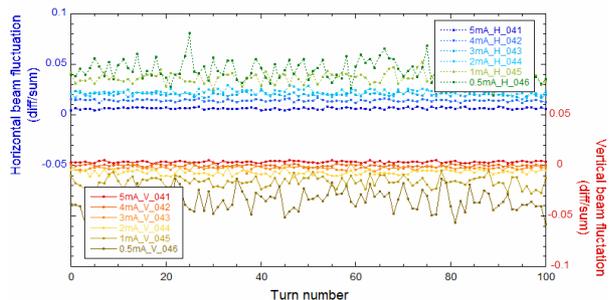


Figure 11: Fluctuation in diff/sum of the PM-XBPM data.

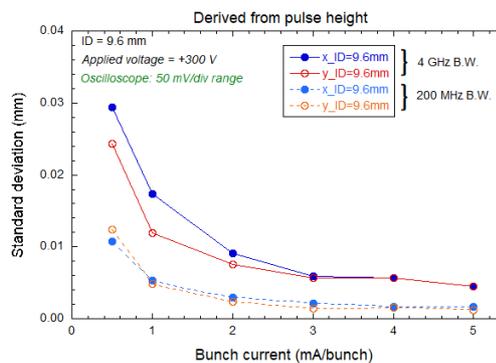


Figure 12: Bunch current dependence of resolution.

を減衰させることができる。水平方向のビームを観測するために、右上(upper right, UR)と右下(lower right, LR)を合成した信号をオシロスコープの ch 1、左上(upper left, UL)と左下(lower left, LL)を合成した信号を ch2 に接続した。トリガーは入射タイミング信号 (ch3)として、入射前後の 4 ms 間を測定した。Figure 14 (a~c)に水平方向のビーム振動、Figure 14 (d~f)に垂直方向のビーム振動を示す。バンチ間隔 23.6 ns のパルスが個別に観測できている様子が分かる。この入射時の振動は数 100 μs 後には減衰しており、ユーザー運転に影響を与えていないとされている。

次に、ユーザー運転中(“11/29-bunches + 1 bunch mode”)に、入射時における孤立バンチ(5 mA/bunch)の振る舞いを観測した。この測定の実験配線は、前述の実験配線 (Fig. 13)と同じであるが、508MHz の RF 基準信号を周回周波数に分周した矩形波信号(208 kHz, ch4)を使用している。入射タイミング信号(ch3)でゲート信号を生成して、5 mA バンチが周回する毎(トリガー: ch4)に波形を測定した。Figure 15 に示すように、水平方向と垂直方向で異なる振る舞いが観測されることから、PM-XBPM が水平/垂直方向を独立に検出していることを裏付けている。入射が開始される前のビーム変位の標準偏差は計測系の分解能と解釈することが出来る。本測定では、水平方向(6.5 μm std)、垂直方向(5.6 μm std)であり、ともに前項の分解能の評価値より低い値となっている。本測定では、分配器(divider, -6dB)を結合器として 1 段多く用いていることと、減衰器(-10 dB)を用いているために、波高が低い(信号量が少ない)ことが理由と考えられる。

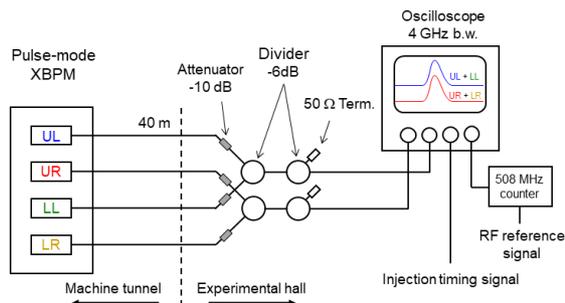


Figure 13: Connection diagram of PM-XBPM.

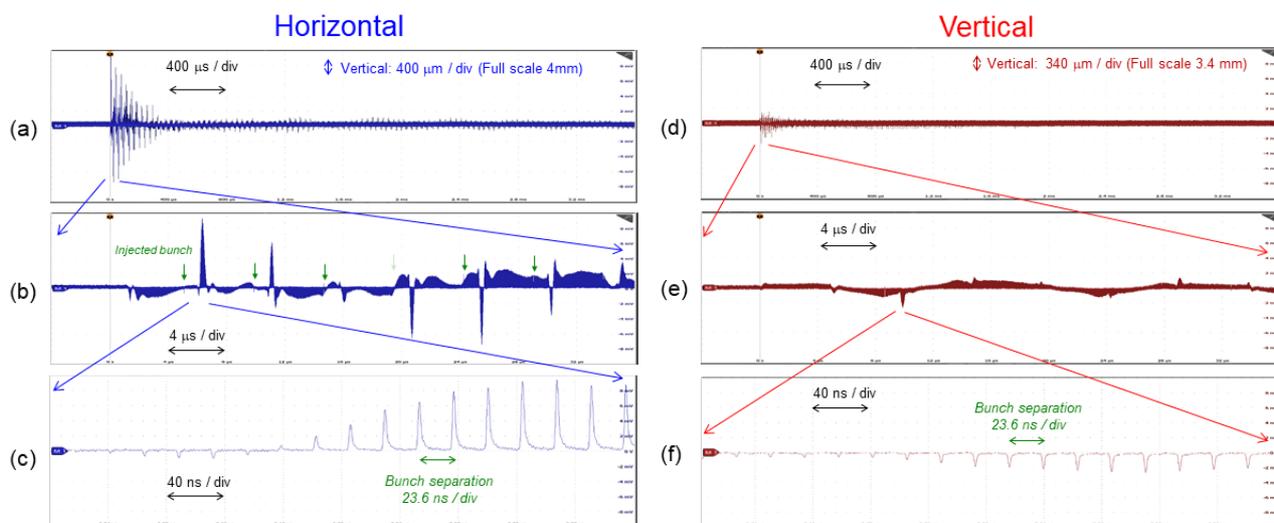


Figure 14: Screen captures of the oscilloscope observing oscillations of pulses with 23.6 ns separation. HV is +300 V. ID gap is 9.6 mm.

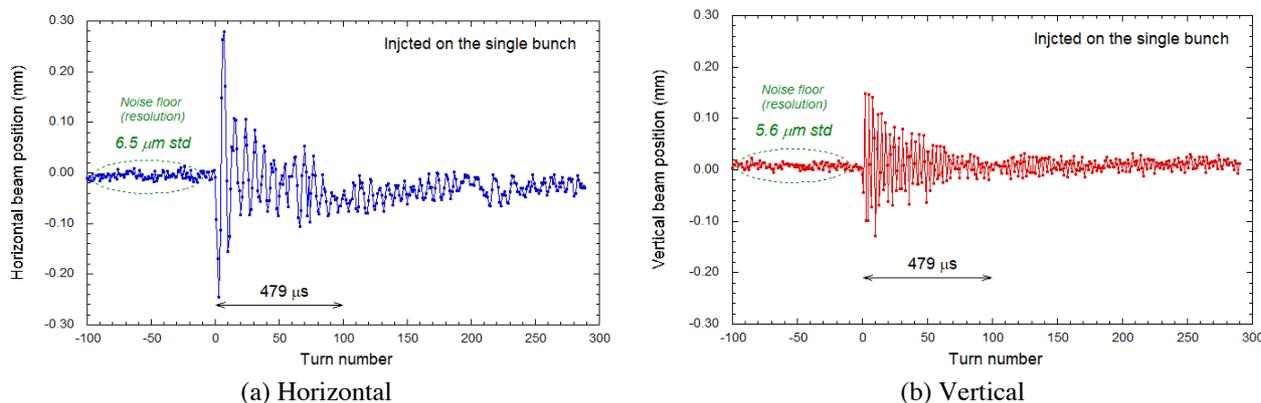


Figure 15: Turn-by-turn oscillation during beam injection. Revolution time of the storage ring is 4.79 μs. HV is +300 V. ID gap is 9.6 mm.

5. まとめ

大型放射光施設 SPring-8 の挿入光源ビームラインにおいて耐熱性を強化したパルス・モード計測型光ビーム位置モニタ (PM-XBPM) の評価実験を実施した。その結果、偏向電磁石ビームラインに比べ放射光の出力が格段に高い挿入光源ビームラインでの安定動作を確認した。位置感度については、蓄積リング電子ビームにビームシェーカによる摂動与えることにより、SP-BPM の測定から推定される摂動振幅と PM-XBPM で測定される摂動振幅は線形性が保たれていることを確かめた。分解能については、異なるバンチ電流値ごとに分解能を定量化し、設計目標値の 10 μm std を達成していることを確認した。分解能は、帯域 4 GHz では水平 4.5 μm std / 垂直 4.5 μm std、帯域 200 MHz では水平 1.7 μm std / 垂直 1.2 μm std であった。ユーザー運転中に入射時のビーム振動の観測を実施することで、実際のバンチ毎のビーム位置計測が実現可能であることを確認した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K11943, JP21K12530 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Aoyagi *et al.*, “Pulse-mode x-ray beam position monitor prototype for a synchrotron radiation beam line”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 24, 032803 (2021).
- [2] H. Aoyagi *et al.*, “Toward higher resolution in pulse-mode x-ray beam position monitor”, *Proc. of PASJ2021*, THP026.