

# SPring-8 におけるフィリング・パターンの影響を軽減する光位置モニタ

## X-RAY BEAM POSITION MONITOR TO MITIGATE INFLUENCE OF FILLING PATTERN AT SPring-8

青柳秀樹<sup>#</sup>, 高橋 直

Hideki Aoyagi<sup>#</sup>, Sunao Takahashi

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

### Abstract

X-ray Beam Position Monitor (XBPM) for SPring-8 works in a photoemission mode with blade-type detector heads. SPring-8 constantly provides various several-bunch mode operations, which combine single bunches and train bunches, to perform time-resolve experiments. In order to meet the needs of users, the ring current per bunch, in other words, the peak brilliance of photon beam has been increased year by year. In such a situation, as the peak current from the blade-type detector heads of the XBPMs exceeded the initial expectation, it has become apparent that the readouts of XBPM changed depending on the filling pattern. We report on the quantitative evaluation of the effects of filling patterns, the search for causes, and the measures to reduce the effects. We will also describe the design and fabrication of a new XBPM detector head that can fundamentally solve the problem of space charge effects on the detector heads.

### 1. はじめに

SPring-8 の挿入光源ビームライン用光位置モニタ (X-ray Beam Position Monitor, XBPM) は、タングステン (一部のビームラインではダイヤモンド薄板) を母材とするブレード型検出素子を光電陰極として用いる光電子放出型である[1]。光軸近傍に上下左右に4枚の検出素子を配して水平・鉛直方向の放射光ビーム位置を常時観測している。外部環境に左右されずに安定した電流信号を得るために、正電圧を印加した光電子収集電極を検出素子の近傍に設けて、検出素子から放出される光電子を収集している。

性能を正しく評価した XBPM は、ユーザーに対するビームの安定供給に寄与すると共に、蓄積リング電子ビーム軌道の診断にも効果的である。蓄積リングの rf-BPM は電子ビームの閉軌道をグローバルに診断することに優れているのに対し、XBPM は個別のビームラインの放射光ビーム軸を正確に診断することに適しているからである。SPring-8 で定常的に運用されている XBPM は、時定数 1s の観測では位置分解能 0.13  $\mu\text{m}$  RMS、長期安定性 (3 ヶ月のドリフト) 0.2  $\mu\text{m}$  程度、また、時定数 1ms では位置分解能 1.8  $\mu\text{m}$  RMS であることが実験的に確かめられている[2]。

SPring-8 では、時分割実験を行うためにセベラルバンチ・モードを日常的に運用している。ユーザーのニーズに合わせるために、1バンチあたりの蓄積電流値、放射光に言い換えればピーク輝度を増加させてきた。この恩恵は、8GeV 低エミッタンス・リング (不安定性の問題の克服) と真空封止アンジュレータ (短波長・高輝度光源) の組み合わせによってもたらされた。一方で、XBPM のブレード型検出素子からのピーク電流値は、当初の予想をはるかに上回るものとなった。(シングルのバンチの電流

値は最大 5 mA/bunch、バンチト・レイン部では最大 0.38 mA/bunch に達している[3]。バンチ電流値 1 mA/bunch は蓄積リングの電子数  $3.0 \times 10^9$  electron に相当し、挿入光源ビームラインの XBPM の各検出素子の典型的な出力 DC 電流値約 70  $\mu\text{A}$  は、1 パルスあたりの放出光電子数約  $2 \times 10^6$  electron に相当する。) その結果、蓄積リングのフィリング・パターンを変更した時に XBPM の出力値が変化する現象が次第に顕在化するに至った。本報告では、フィリング・パターンによる影響の定量的評価、原因の探求、影響を軽減する方策について報告する。

### 2. フィリング変更による影響

SPring-8 は各サイクル (1 サイクルは 3~6 週間) の開始時に XBPM を用いて定点観測を行い、観測された光軸が許容値と設定した値 ( $\Delta H < \pm 150 \mu\text{m}$ ,  $\Delta V < \pm 100 \mu\text{m}$ ) を越えた場合に限り、蓄積リングの電子ビーム軌道を補正することにより光軸調整を実施している。今後さらに精度を高め光軸調整の許容値を  $\pm 50 \mu\text{m}$  に設定するためには、フィリング・パターン変更により XBPM が受ける影響が十分に抑えられている必要がある。

#### 2.1 系統的評価実験

フィリング・パターンを変更した時の XBPM 出力値に対する影響を定量化するために、マルチバンチ・モード (160 bunch train x 12) での光軸を基準軌道として、5 種類のセベラルバンチ・モードでの光軸を系統的に観測した[4]。マルチバンチ・モードは、最も加速器に負荷を掛けられないフィリング・パターンである。Figure 1 に、その結果を示す。すべての ID-BL 用 XBPM を調査し、その台数は 33 台である。なお、その内 1 台の XBPM はアライメント・ミスの影響で大きく影響を受けていた (詳細は後述) ことが判明したので、グラフには示していない。したがって、グラフ中には 160 点の測定点が示されている。

<sup>#</sup> aoyagi@spring8.or.jp

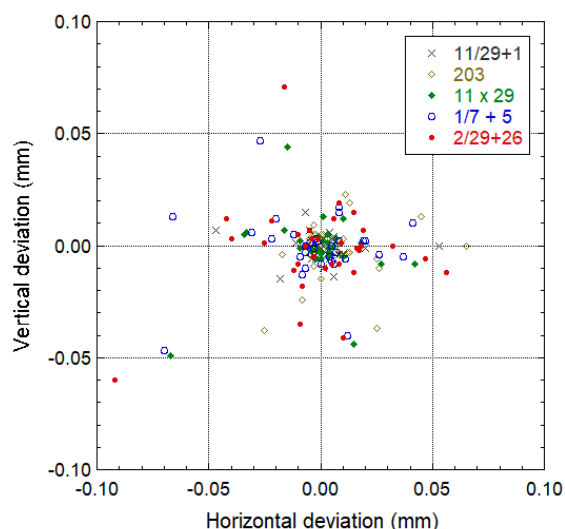


Figure 1: Deviations of XBPM readouts from the reference positions (multi-bunch) due to variations of five different filling patterns of the storage ring.

Table 1 に、フィリング・パターン毎のバンチ電流値と ID-BL 用 XBPM (全 33 台) への影響の程度を RMS 値として表記した。両者に一定の相関関係があることが分かる。BM-BL 用 XBPM (全 10 台) は XBPM の検出素子からの出力が小さいため、フィリング・パターンの影響は受けにくい。したがって、ここで偏差が見られることは蓄積リングの軌道もフィリング・パターンの影響を受けていることを示唆している。ID-BL 用 XBPM の光源からの距離は 20.3 m (典型値)、BM-BL 用は 16 m (典型値) である。

## 2.2 原因とその軽減

影響がみられた主な原因として、検出素子受光部での光電子放出の際の空間電荷効果の影響が考えられる。Figure 2 において、XBPM 検出素子に放射光が照射されて発生する放出光電子と収集電極の役割を 4 つのケースに分けて模式的に示す [4]。Case 1 では弱い放射光のもとでは空間電荷効果の影響は小さいが、Case 2 に示すように収集電極にプラス電位あたえることで更にその影響を抑え、安定した信号を得ることが出来る。通常の運用中では、Case 3 に示すように適度な放射光が照

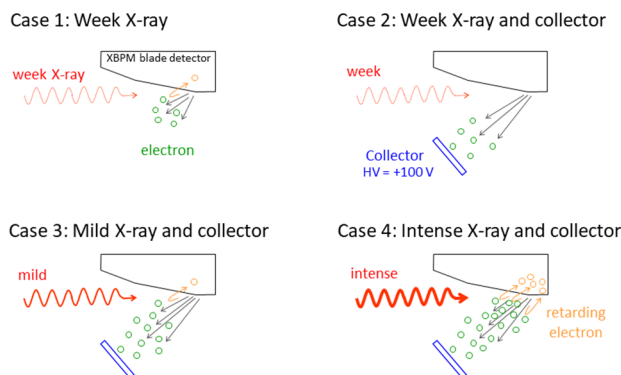


Figure 2: Role of the collecting electrodes. Positive voltage (HV = +100 V) is applied to the collecting electrodes (collector) during user operation.

射されているが、収集電極により空間電荷効果は無視できる程度に抑えられている。しかしながら、Case 4 に示すように、バンチ電流値の高いフィリング・パターンでは、空間電荷効果を十分に抑制できない。

フィリング・パターンの影響を軽減するために、主に以下の 3 つの方法により検出素子から放出された光電子の空間電荷効果を抑えることを試みた。

- 1) XBPM の原点合わせを実施し、検出素子毎に偏った出力電流値を平均化する。
- 2) 定点観測の条件とする ID gap を広げて、出力電流値を下げる。
- 3) 光電子収集電極の印加電圧を高く設定し、出力電流値を安定化させる。

なお、調査したうちの 1 台は XBPM 本体のミスアライメントが原因で、フィリング・パターンの影響が顕著に現れた。ブレード型検出素子の内側の側面からの光電子放出により光電子収集電極の印加電圧が正常に作用しなかった。本 XBPM については、ブレードが光軸に平行になるように、アライメントを修正した (後述の Table 2 では、4) に分類)。また、ブレード先端の間隔を変えられる構造を持つ XBPM は複数存在するが、出力電流値を下げる目的でブレード先端の間隔を変更する方法は今回採用しなかった。

Table 1: Bunch Current and the Deviation of the XBPM Readouts

Filling pattern	Bunch current (mA/bunch)		Deviation of XBPM readouts ( $\mu\text{m RMS}$ )		
	Train	Isolated	ID-BL		BM-BL
			Horizontal	Vertical	Vertical
Multi	0.05	—	3.6	2.0	1.3
11/29 + 1	0.10	5.0	13.9	5.8	3.0
203	—	0.52	17.6	12.6	6.0
11 x 29	0.31	—	27.7 $\rightarrow$ 11.2* $\rightarrow$ 4.9 $\uparrow$	14.6 $\rightarrow$ 6.7* $\rightarrow$ 5.9 $\uparrow$	4.3
1/7 + 5	0.24	3.0	33.5	15.2	5.4
2/29 + 26	0.38	1.4	40.3 $\rightarrow$ 17.6* $\rightarrow$ 8.2 $\uparrow$	20.5 $\rightarrow$ 10.6* $\rightarrow$ 9.5 $\uparrow$	8.0

\*: after 1<sup>st</sup> treatment (2018/10/26),  $\uparrow$ : after 2<sup>nd</sup> treatment (2019/7/10)

Table 2: Number of Beamlines Addressed to Reduce Space Charge Effects

Method	Number of beamlines	
	as of 2018/11/26	as of 2019/7/10
1) Offset tuning	2	—
2) ID Gap	7	9
3) High voltage	—	7
4) Re-alignment	1	—
total	10	16

### 2.3 調整の結果

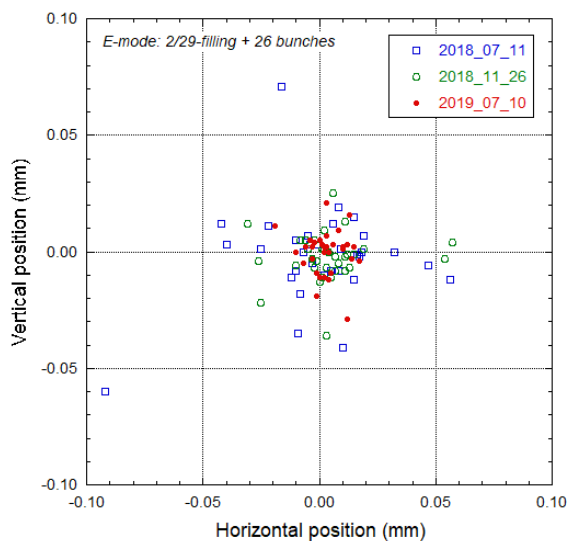
フリリング・パターンの影響が軽減されていることの結果は2段階に分けて確認した。一回目(2018/11/26)は影響が顕著であった10本のビームラインのXBPMにおいてフリリング依存性を軽減するための対処を実施し、目標値を±50 μm以内に納めることとした。また、二回目(2019/7/10)は、対処する範囲を更に広げて(16本)、目標値を±20 μm以内に設定した。Table 2は、空間電荷効果を抑えるための対処を施したビームラインの本数を方法毎に整理したものである。1) XBPMの原点合わせはすべてのビームラインで実施しているが、原点合わせのみ実施したビームラインの本数を記載している。

対処後の影響について評価した結果をFig. 3. に示す。(a) 2/29-filling+26 bunches は影響が最大のフリリング・パターンで、(b) 11 bunch train x 29 は影響の程度が中であつたフリリング・パターンである。Table 1 に、対処後に得られた各条件での偏差(RMS 値)を太字で示す。2回にわたる対処によって、フリリング・パターンによる影響を10 μm RMS以下に軽減することができた。光源からの距離を考慮すると、ID用XBPMはフリリング・パターンの影響を受けていないBM用XBPMと同程度になったことが分かる。

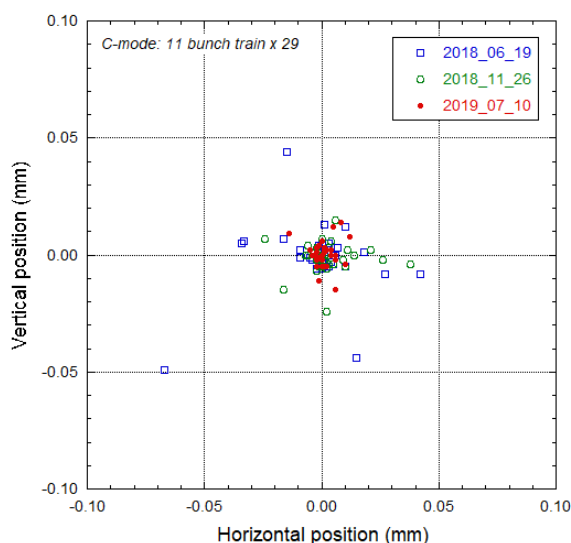
### 3. 新しい検出素子の設計と製作

フリリング・パターンの影響を軽減させるために、収集電極の印加電圧を高くするだけでなく、ID gapを広げることが必要である。つまり、現状のXBPM検出部の設計を用いる限りに置いては、XBPMの適用範囲が狭められたままとなる。そこで、新しくXBPM検出部を設計・製作することで、検出素子の光電面における空間電荷効果の問題を解決することを試みた。空間電荷効果を軽減するためには、ブレード検出素子と収集電極との間に高い電界を生じさせる必要がある。従来の検出素子は光軸と平行に配置させていたので、実際の受光面はブレードの端部(t = 0.2 mm)に集中していた。そのために実効的な電界は印加されていなかった。新しい設計では、光軸方向に対して1/60の傾きで配置させる“ハの字型”とすることにより、ブレード側面の広い範囲が光電面となるように工夫した。これにより、ブレード検出素子と収集電極との間に印加された電界が直接光電子を引き出す効果、つまりは、空間電荷効果を軽減することができると期待できる。また、付加的な機能として、ブレードの成形に曲線を取り入れることにより、エッジ部による熱負荷の集中を緩和させている。更に、熱負荷の最も高くなる部位がブレード検出素子の中央部となり、冷却効果の向上も期待できる。Figure 4に、新旧のブレード配置の違い(top)、及び、形状の違い(bottom)を示す。

新設計のブレード検出素子は、Fig. 5に示すように、従来の設計に準拠したモニタ真空容器、及び、水冷の検出素子ホルダに取り付けた。検出素子の受光部は円形先端部の外側面となるので、放出された光電子は収集電極に効率よく引き出される。4枚のブレード検出素子の先端の距離は、従来の設計では水平6 mm、鉛直4 mmを標準としていたが、新しい設計では水平7 mm、鉛直6 mmを採用した。これにより、検出素子毎の出力電流値が低下し、空間電荷効果の軽減が期待できる。



(a) 2/29-filling+26 bunches



(b) 11 bunch train x 29

Figure 3: Deviation of XBPM readouts from the reference positions before and after the treatments.

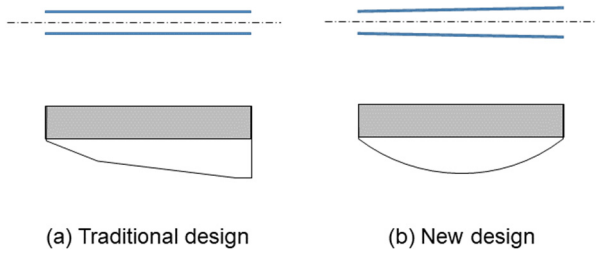


Figure 4: Blade structure (bottom) and configuration (top).

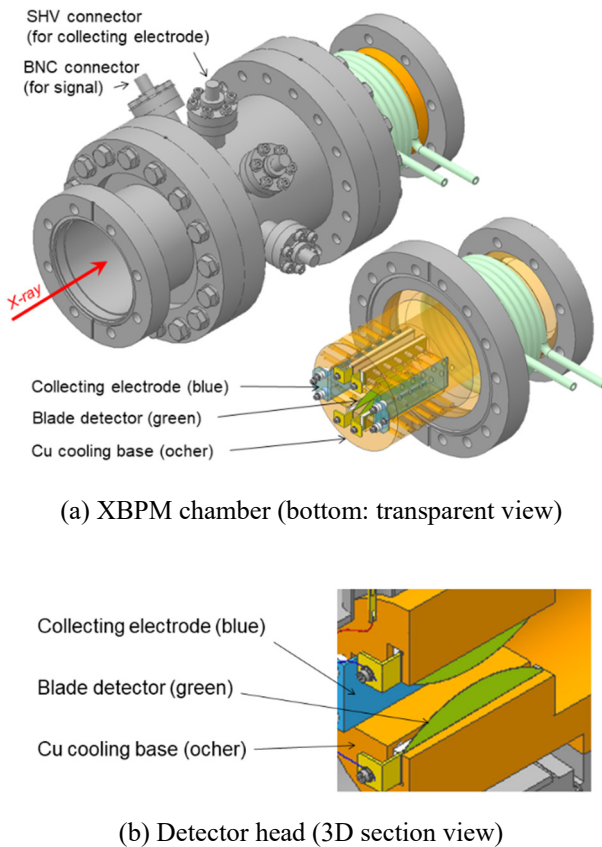


Figure 5: Structure of the XBPM chamber and detector head [5].

#### 4. まとめ

フィリング・パターンを変更した時の XBPM 出力値に対する影響を定量化するために、マルチバンチ・モードでの光軸を基準軌道として、5 種類のセベラルバンチ・モードでの光軸を系統的に評価した。その結果、最大水平方向に  $40 \mu\text{m}$  RMS、鉛直方向に  $20 \mu\text{m}$  RMS 程度の変位が観測された。そこで、光電子放出の空間電荷効果が主な原因となっているとの仮説の下に、1) XBPM の原点合わせ、2) 定点観測の ID Gap を広げる、3) 光電子収集電極の印加電圧を高くする等の対処を施すことにより、フィリング・パターン変更による影響を RMS 値で  $10 \mu\text{m}$  以下に抑えることに成功した。

新しく XBPM 検出部を設計・製作することで、検出素子の光電面における空間電荷効果の問題を解決することを試みた。ブレード検出素子の受光部先端を円形に成形したものを  $1/60$  の傾きで“ハの字型”配置とすることで、空間電荷効果を軽減させると共に、エッジ部による熱負荷の集中を緩和させる機能を持たせた。この新しい設計のモニタは、2 台製作されており今年度中に運用を開始する予定である。

#### 参考文献

- [1] H. Aoyagi *et al.*, “Blade-type X-ray beam position monitors for SPring-8 undulator beamlines”, Nucl. Instr. and Meth. A 467-468, 252-255 (2001).
- [2] H. Aoyagi *et al.*, “Performance of the X-ray beam position monitors and observation of beam drifts in the SPring-8 storage ring”, Proc. of PASJ2018, WEOL06.
- [3] [http://www.spring8.or.jp/en/users/operation\\_status/schedule/](http://www.spring8.or.jp/en/users/operation_status/schedule/)
- [4] H. Aoyagi *et al.*, “Evaluation and reduction of influence of filling pattern on x-ray beam position monitors for SPring-8”, Proc. of IPAC2019, WEPGW027.
- [5] Manufactured by Vacuum and Optical Instruments; <http://www.shinku-kogaku.co.jp/>