

## SPring-8 蓄積リングにおける光位置モニタの性能と光軸変動の観測

### PERFORMANCE OF THE X-RAY BEAM POSITION MONITORS AND OBSERVATION OF BEAM DRIFTS IN THE SPring-8 STORAGE RING

青柳秀樹\*, 古川行人, 高橋 直

Hideki Aoyagi, Yukito Furukawa, Sunao Takahashi

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

#### Abstract

In the SPring-8 Storage Ring, X-ray Beam Position Monitors (XBPM) are installed in the front ends of all insertion beamlines (ID-BL) and most bending magnet beamlines (BM-BL). The XBPMs are equipped with detector heads of blade type, which work in photoemission mode. In the case of XBPMs for ID-BLs, four blades of detector heads are placed in top/bottom and right/left near the beam axes to measure the beam position in the horizontal and vertical directions. In the case of XBPMs for BM-BLs, two blades are placed in top/bottom to measure in vertical direction. The performance of the XBPMs has been evaluated from the viewpoint of long-term stability, resolution, time constant, based on the operational results of the pulse-mode XBPM, which has been newly introduced since last year. The fixed point observation with XBPMs, influence of filling pattern of the storage ring, and ID gap dependence of XBPMs are also discussed.

#### 1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 では、すべての挿入光源ビームライン (ID-BL)、及び、大半の偏向電磁石ビームライン (BM-BL) のフロントエンドに光位置モニタ (X-ray Beam Position Monitor, XBPM) を設置している。性能を十分に評価された XBPM で光軸を観測することは、ユーザーに対するビームの安定供給を担保するだけでなく、蓄積リング電子ビーム軌道の診断にも有効性を持っている。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。

XBPM は、光電子放出型でタングステン (一部はダイヤモンド) を母材とするブレード型検出素子を備えたタイプを採用している [1]。ID-BL 用の XBPM は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、BM-BL 用では上下に2枚を配置して鉛直方向の放射光ビーム位置を常時測定している。検出素子から放出される光電子を収集するために、検出素子の近傍に光電子収集電極を設けて正電圧を印加することにより、安定した電流信号を得ている。

#### 2. 安定性、分解能の評価

XBPM の長期安定性を評価するための理想的条件は、複数の独立した XBPM を同じ場所に設置して、同時に計測した結果を比較することである。そこで、これと同等な条件を成立させるために、BM-BL BL02B1 に設置されているパルス・モード計測型 XBPM [2-4] を用いて検証を試みた。この XBPM はパルス毎のビーム位置の計測を目的に高周波特性を向上させているが、通常は従来型 XBPM と同じ IV 変換器を用いて運用している。検出素子の配置も従来型と同じく4枚を上下左右に配しており、上下2枚の検出素子を備える同型の鉛直方向測定

用 XBPM が左右に一对あると見立てることが出来る。偏向電磁石からの放射光は水平方向に広がっているの、原理的に左右の XBPM で同じ振る舞い (鉛直方向の出力) を表示するはずである。Figure 1 に、左右それぞれの検出素子の対より算出した鉛直方向の位置とその差の経時変化を示す。測定点 (データベース) は1点/6秒のサンプリングで、ADC の時定数は1秒程度に設定されている。両者の読み値の差は数日間の停止期間の後に  $0.2\mu\text{m}$  相当のドリフトが観測されたが、XBPM モニタとしての安定性は2ヶ月間に亘り非常に良好であることが分かった。

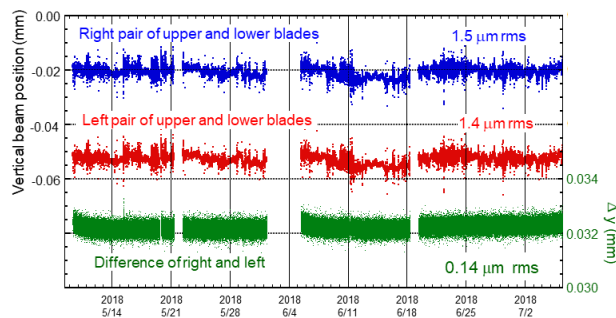


Figure 1: Stability in three months.

次に、この手法を用いて10分程度のスケールでのXBPMの分解能を評価する。Figure 2は、全ID gapを同時に駆動した時にBL02B1で観測される光軸変動を示す (ID gap 駆動開始時刻は  $t = 0$  min)。ID gap 駆動中は、蓄積リングの自動軌道補正で抑えられていない成分として、 $\pm 10\mu\text{m}$  程度の軌道の変動が左右の検出素子の対で同時に観測されており、その差分、つまりはXBPMとしての分解能は  $0.13\mu\text{m rms}$  と評価することが出来る。なお、全ID gap 駆動はユーザー運転の終了後に操作されるので、この時の軌道変動はユーザー実験に支障を与えるものではない。

\* aoyagi@spring8.or.jp

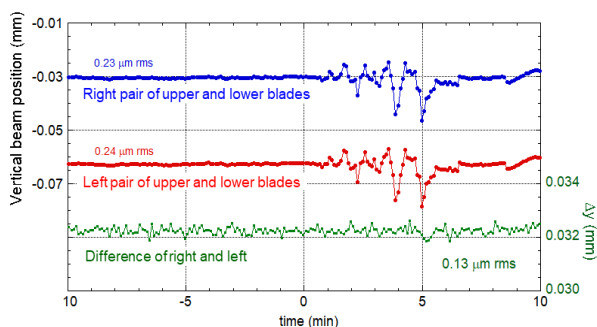


Figure 2: Consistency during ID gap operation.

さらに短い時間間隔の数 10ms のスケールで評価するために、オシロスコープ(25kS/s、25 点移動平均)で観測した。Figure 3 に示すように、左右の検出素子の対で観測される鉛直方向の位置は概ね同じ変化をしており、XBPM としての分解能は  $1.8 \mu\text{m rms}$  と評価することができる。前者に比べ大きな値になった理由は、IV 変換器の前段増幅器における熱雑音の影響と考えられる。

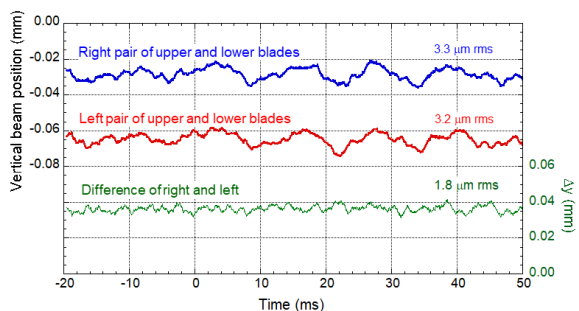


Figure 3: Consistency test with oscilloscope.

最後に、異なるビームラインに設置された ID-BL 用 XBPM を比較することで、XBPM の分解能を評価する。8 台の ID-BL 用 XBPM は、IV 変換器のアナログ出力信号が光ケーブルで伝送されており、同時に計測することが出来る[5]。Figure 4 に、ID25 の位相駆動キッカー・マグネットの調整作業中にデータロガー(1kS/sec)を用いた観測データ(ここでは 6 台の XBPM を使用)を示す。横軸  $t = 0$  において ID 25 の位相駆動用キッカー・マグネットの励磁が開始されている。Figure 5 に示すように、BL20XU の XBPM で観測される XY プロットでは、キッカー・マグネットの励磁中は水平方向の分布の広がりが大きくなるのが分かる。しかし、このビームの振動は、BL20XU と異なるビームラインでも同位相、若しくは、逆位相で観測される場合がある。Figure 6(a)に示すように、キッカー・マグネットが励磁されていなくても、BL20XU の XBPM の水平出力に対して、BL35XU(同位相)、及び、BL10XU(逆位相)は相関関係があることが分かる。Figure 6(b)では、キッカー・マグネットが励磁されていると、より強い相関関係が見られることが分かる。ビームライン間で同期した成分を差し引いた分布の広がりは、この手法で評価できる分解能の上限値でもあるが、 $2\sim 3 \mu\text{m}$  程度と見積もることができる。なお、キッカー・マグネットの調整終了後は、光軸の振動はユーザー実験に支障を与えないとされる範囲に抑制されている。

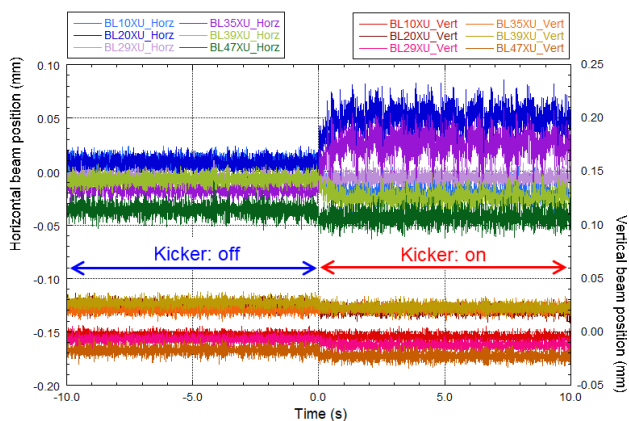


Figure 4: Observation with data logger for ID-BL.

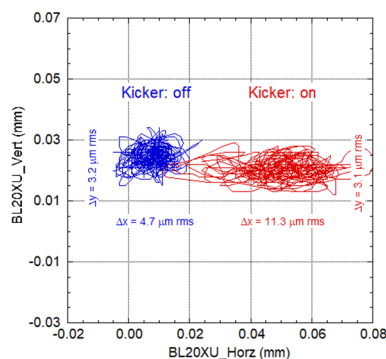


Figure 5: XY plots for BL20XU.

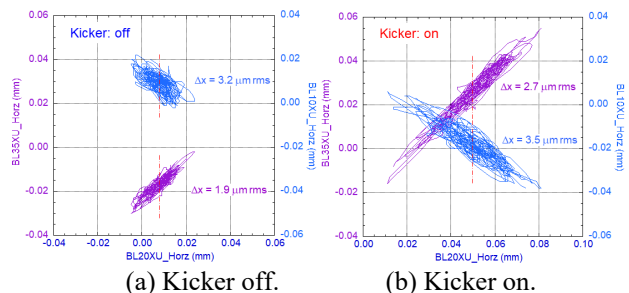
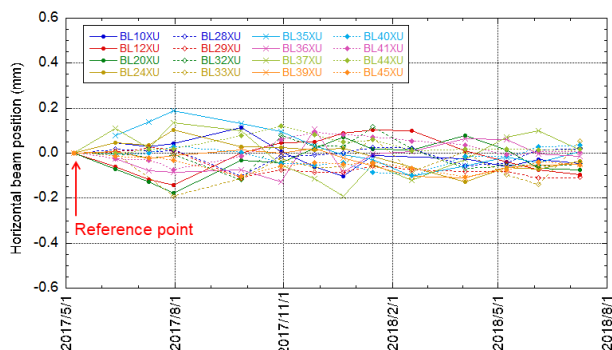


Figure 6: Correlation of BL33XU/BL10XU and BL20XU.

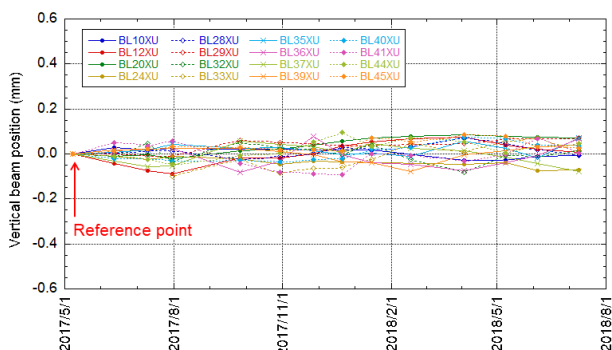
### 3. 定点観測による光軸変動の観測

ユーザー運転中は、放射光の波長を変更するためにユーザーによって挿入光源の Gap 値が自由に変更されており、ID-BL 用 XBPM は Gap 依存性の特性から、常時使用することには適していない。しかし、光軸の長期的な変動のモニタリングや、サイクル開始時の光軸調整には優れた役割を果たす。定点観測は、全挿入光源の Gap 値を常に一致させることで、加速器への負荷を同じ条件とし、かつ、XBPM の Gap 依存性を事実上回避することが出来るため、長期的な軌道の変動をモニタするのに適切な方法である。Figure 7 に、2017 年 5 月から 2018 年 7 月までの定点観測の結果(a)水平方向、(b)鉛直方向)を示す。2017 年 5 月を基準点(原点)とした。

毎サイクルの開始時の光軸調整では、同 2017 年 5 月の光軸を基準に許容値 (水平 $\pm 150 \mu\text{m}$ 、鉛直 $\pm 100 \mu\text{m}$ ) を超えた場合に電子ビームの軌道に局所補正を施し、正常なビーム位置に回復させている。



(a) Horizontal beam drifts.



(b) Vertical beam drifts.

Figure 7: Fix point observation with XBPMs from 2017/5 to 2018/7.

#### 4. フィリング・パターンの影響

サイクル開始時の光軸調整の許容値をさらに狭めた $\pm 50 \mu\text{m}$ に設定することの妥当性を検討するために、フィリング・パターンを変えた時の XBPM 出力値に対する影響を評価したところ、特定の ID-BL 用 XBPM では大きく影響されていることが分かった。Figure 8 は、その結果を示す。基準軌道は、最も加速器に負担を掛けないマルチ・バンチ (160 bunch train x 12) を基準としている。Table 1 に、フィリング・パターン毎のバンチ電流値と XBPM 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。

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強く疑われた。そこで、光電子収集電極の印加電圧 (常用印加電圧  $HV = +100 \text{ V}$ ) を変化させその影響の原因を検証した。Figure 9 (a) に示すように、フィリング・パターンの影響をほとんど受けていないと思われる BL20XU では、multi bunch から 2/29-filling+26 bunches に変更しても  $HV = +100 \text{ V}$  における各ブレード型検出素子の出力信号は同じ値でフラットである。一方、Fig. 9 (b) に示すように、顕著な影響を受けた BL16XU では減衰が激しく、印加電圧

の変化にも敏感になっている。この不具合を修復するためには、以下の手段が考えられる。

- 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) 定点観測時の ID gap を広げて、出力電流値を下げる。
- 3) ブレード先端の距離を広げて、出力電流値を下げる。
- 4) 光電子収集電極の印加電圧を高く設定し、フラットな領域で使用する。
- 5) ブレードが光軸に平行になるように XBPM 本体をアライメント調整する。(ブレードの内側の側面からの光電子放出を防止する。)
- 6) ブレードをハの字型配置とする。(ブレード外側の側面と収集電極面がコンデンサーの形状となり、空間電荷効果の緩和に効率的な電界を形成する。)

今回は、容易に実施できる(1)と(2)の手段で修復を試みた。その結果、Fig. 10 に示すように、 $HV = +100 \text{ V}$  での各ブレード型検出素子の出力信号はフラットにすることができた。

一方で、BM-BL 用 XBPM においては、Fig. 11 に示すように、 $HV = +100 \text{ V}$  で十分に平坦になっている。その理由は、BM-BL 用 XBPM ではブレード型検出素子の出力信号が ID-BL 用に対して約 1/10 の値で、空間電荷効果の程度が小さいことと、光電子収集電極の配置が各ブレードの両面に効果的に電界を印加できる構造になっているからである。また、パルス・モード計測型 XBPM は、上述項目 6) の設計も取り入れているので、更にフィリング依存性の影響を受けにくいと考えられる。Table 1 に示すように、今回影響が顕著に表れた 9 本の ID-BL を除いた RMS 値 (ID-BL, thinning) の鉛直方向は、BM-BL の RMS 値とほぼ同等である。これは、上述の対策を施すことによって、XBPM に対するフィリングの影響を取り除くことが可能であることを示唆している。

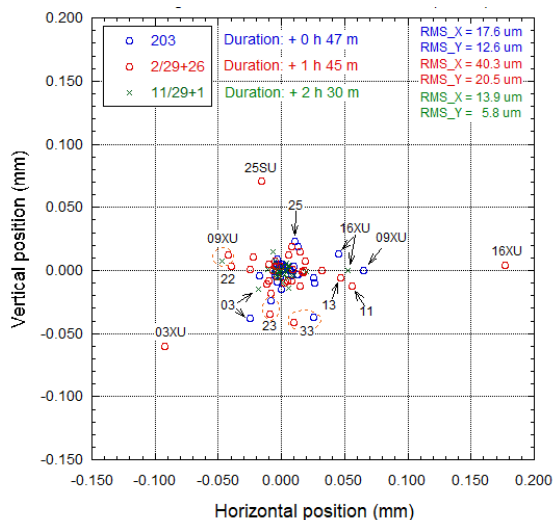
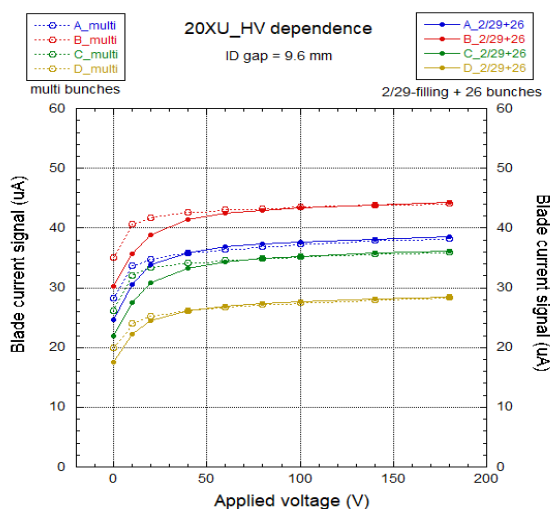


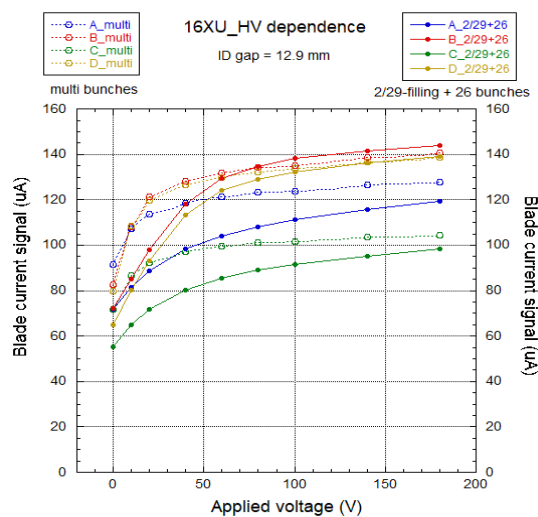
Figure 8: Influence on XBPMs by the filling patterns of the storage ring.

Table 1: Bunch Current and Influence on XBPMs

| Filling pattern | Bunch train<br>(mA/bunch) | Isolated bunch<br>(mA/bunch) | ID-BL (all data)<br>( $\mu\text{m rms}$ ) |          | ID-BL (thinning)<br>( $\mu\text{m rms}$ ) |     | BM-BL (all data)<br>( $\mu\text{m rms}$ ) |
|-----------------|---------------------------|------------------------------|---|----------|---|-----|---|
|                 |                           |                              | Horizontal                                | Vertical | H   | V   | Vertical                                  |
| Multi           | 0.05                      | —                            | 3.6                                       | 2.0      | 3.2                                       | 1.7 | 1.3                                       |
| 11/29 + 1       | 0.10                      | 5.0                          | 13.9                                      | 5.8      | 6.0                                       | 4.7 | 3.0                                       |
| 203             | —                         | 0.52                         | 17.6                                      | 12.6     | 6.5                                       | 6.4 | 6.0                                       |
| 11 x 29         | 0.31                      | —                            | 27.7                                      | 14.6     | 7.0                                       | 5.0 | 4.3                                       |
| 1/7 + 5         | 0.24                      | 3.0                          | 33.5                                      | 15.2     | 13.2                                      | 7.3 | 5.4                                       |
| 2/29 + 26       | 0.38                      | 1.4                          | 40.3                                      | 20.5     | 13.8                                      | 8.9 | 8.0                                       |



(a) B20XU: no influence.



(b) BL16XU: large influence.

Figure 9: Applied voltage dependence of blade current signals for ID-BLs.

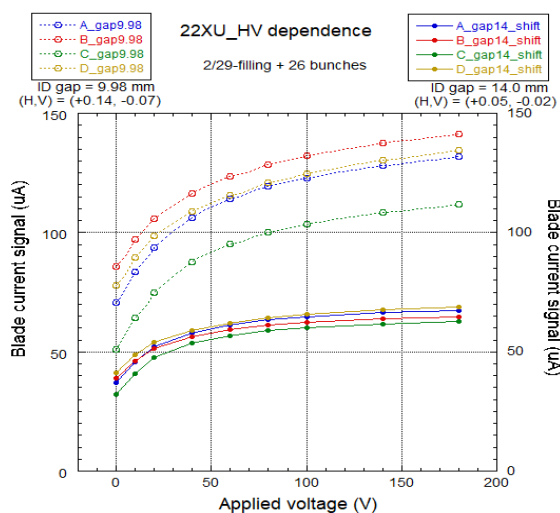


Figure 10: Reforming the curve of the applied voltage dependence of blade current signal.

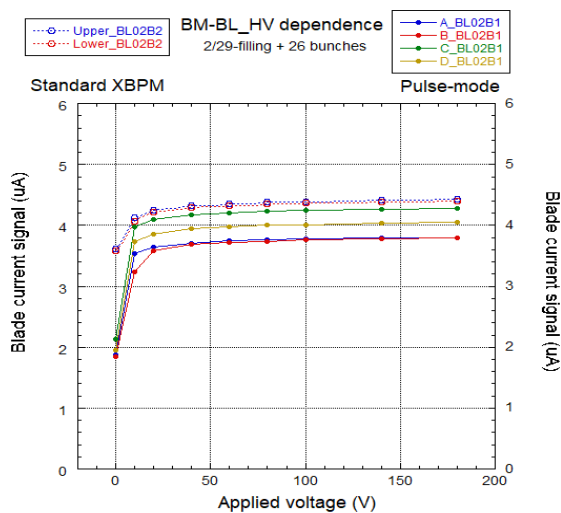


Figure 11: Applied voltage dependence of blade current signal for BM-BLs.



## 5. Gap 依存性の補正

挿入光源で生成される放射光は、Gap 値によってそのプロファイル分布を大きく変える。また、挿入光源の上下流の偏向電磁石の端部から混入する放射光も複雑に重畳する。光電子放出型 XBPM は、プロファイルの裾野部分に配置させた 4 枚のブレード型検出素子で位置を算出するので、Gap 値によりその読み値が大きく影響を受けてしまう。Figure 12 に ID gap を変化させた時の XBPM の出力値の変化の例を示す。しかし、この影響は再現性があると期待できるので、事前に影響を受ける度合いを計測することで、フィード・フォワード制御により、この問題を回避することが可能である。Figure 13 に示すように、ユーザー運転中に ID gap が随時変更されるのに伴い、XBPM の直読値(raw data)はステップ状に影響を受けているが、事前に計測した補正係数(この時は 2 次関数でフィッティング)で打ち消すことができる。補正された出力値(calibrated)は十分実用的である。

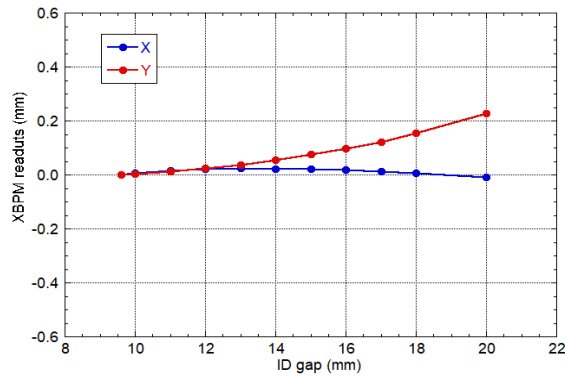


Figure 12: Gap dependence of XBPM readouts.

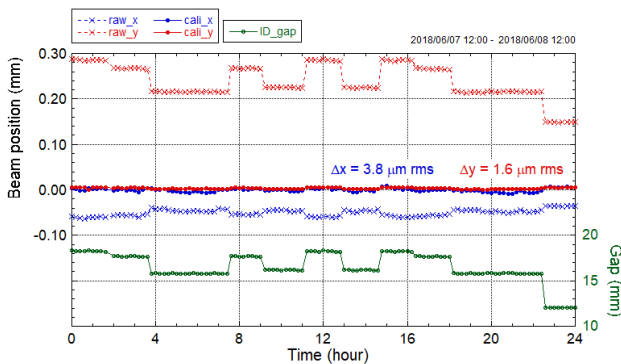


Figure 13: Compensation of the gap dependence.

## 6. まとめ

SPring-8 放射光ビームラインで使用される光電子放出型 XBPM の性能について評価を行った。BM-BL に設置したパルス・モード計測型 XBPM を用いて、データベースの値から、長期安定性(2 ヶ月のドリフト)は  $0.2 \mu\text{m}$  程度であること、10 分程度のスケールでは分解能が  $0.13 \mu\text{m rms}$  であることを示した。オシロスコープを用いた数 10ms のスケールでの観察では分解能は  $1.8 \mu\text{m rms}$  であり、IV 変換器の熱雑音の影響が支配的であることを示した。異なるビームラインに設置された ID-BL 用 XBPM を光ケーブル・システム用いてデータロガーで観察したところ、分解能は上限値として  $2\sim 3 \mu\text{m}$  程度の値が得られた。

定点観測は、光軸変動の長期的な観測に優れた役割を持ち、変動を許容値(水平  $\pm 150 \mu\text{m}$ 、鉛直  $\pm 100 \mu\text{m}$ )以内に抑えるために光軸調整の指標としている。光軸調整の精度を高めるために、フリリング・パターンの影響を定量的に評価したところ、特定の ID-BL 用 XBPM で影響を受けていることが分かった。原因である空間電荷効果の度合いを光電子収集電極の印加電圧に対する出力電流信号の応答から判定できることを見出した。また、フリリング・パターンの影響を回復する複数の手段を提案し、実際に空間電荷効果の影響を抑えられることを実証した。Gap 依存性の課題については、フィード・フォワード制御で補正することで実用レベルに解消できることを提示した。

## 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.*, "Design and prototype of pulse-by-pulse x-ray beam position monitor using diamond heat sink", Proc. of the 13th Annual Meeting of PASJ, TUP086, 1118-1121 (2016).
- [3] H. Aoyagi *et al.*, "Mechanical design of pulse-by-pulse x-ray beam position monitor using diamond heat sink", Proc. of MEDSI2016, WEPE10, 333-335.
- [4] H. Aoyagi *et al.*, "Demonstration of pulse-mode x-ray beam position monitor", Proc. of the 14th Annual Meeting of PASJ, THOM06, 192-196 (2017).
- [5] H. Aoyagi *et al.*, "High-speed and simultaneous photon beam diagnostic system using optical cables at SPring-8", AIP Conference Proceedings 705, 593 (2004).