

SPring-8 分割型 8 の字アンジュレータ用光位置モニタの最適化

OPTIMIZATION OF X-RAY BEAM POSITION MONITOR FOR A SEGMENTED FIGURE-8 UNDULATOR BEAMLINE AT SPring-8

青柳秀樹^{#,A)}, 大石真也^{A)}, 小路正純^{A)}, 高雄勝^{A)}, 早乙女光一^{A)}, 下崎義人^{A)},
山本達^{B,C)}, 宮脇淳^{B,C)}, 松田巖^{B,C)}, 原田慈久^{B,C)}, 和達大樹^{B,C)}, 高橋直^{A)}, 田中隆次^{D)}
Hideki Aoyagi^{#,A)}, Masaya Oishi^{A)}, Masazumi Shoji^{A)}, Masaru Takao^{A)}, Kouichi Soutome^{A)}, Yoshito Shimosaki^{A)},
Susumu Yamamoto^{B,C)}, Jun Miyawaki^{B,C)}, Iwao Matsuda^{B,C)}, Yoshihisa Harada^{B,C)}, Hiroki Wadati^{B,C)},
Sunao Takahashi^{A)}, Takashi Tanaka^{D)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

^{B)} The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo (ISSP, The Univ. of Tokyo)

^{C)} Synchrotron Radiation Research Organization, The University of Tokyo (SRRO, The Univ. of Tokyo)

^{D)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

Abstract

A soft X-ray undulator beamline BL07LSU has been constructed in the 27m long straight section of the SPring-8 storage ring for researching on advanced soft X-ray spectroscopy material science. The light source consists of eight figure-8 undulator segments (four horizontal and four vertical polarization segments) and seven phase shifters. In BL07LSU the four-blade-drive style, which can drive each detector head independently, has been introduced as a X-ray beam position monitor (XBPM), because the light source of BL07LSU produces various synchrotron radiation beam profiles. But then, the water-cooled absorber chamber has been installed in the storage ring in order to prevent irradiating components of the storage ring by skirt of synchrotron radiation beam profile, and temperature rising. The beam profile in a vertical direction has been restricted by an aperture of the absorber chamber. The XBPM, which is placed under such special condition, has been optimized in consideration of observation and calculation results of the beam profile.

1. はじめに

周長 1,436m の SPring-8 蓄積リングは、4 か所に 27m の長直線部を備えている。BL07LSU (東京大学放射光アウトステーション物質科学ビームライン)^[1]は、その内の 1 箇所に建設された水平及び垂直 8 の字アンジュレータ計 8 台から成る高輝度軟 X 線アンジュレータ・ビームラインである。単一のアンジュレータを有する標準的なビームラインでは、4 枚のブレード型検出素子の間隔を固定した光位置モニタ(X-ray Beam Position Monitor, XBPM)がフロントエンドに設置されている。それに対し BL07LSU では、各検出素子を独立に駆動できる四象限型 XBPM^[2]を導入することにより、様々なアンジュレータの使用条件に適応できるようにした。一方で、8 台のセグメントのうち特に上流側のものから広がる放射光ビームの裾が蓄積リングの機器温度を上昇させることから、水冷アブソーバー・チェンバを蓄積リング内に設置し、鉛直方向のビーム・プロファイルをカットしている。このような特殊な環境下に置かれた BL07LSU の XBPM について、放射光のプロファイルの実測と計算値を考慮し、最適化の検討を行なった。

2. BL07LSU 光源の構成

[#] aoyagi@spring8.or.jp

BL07LSU の挿入光源は、全長 2.6m の水平偏光の 8 の字アンジュレータ・セグメント (水平セグメント) 4 台と全長 2.0m の垂直偏光 8 の字アンジュレータ・セグメント (垂直セグメント) 4 台が交互に並べられている分割型 8 の字アンジュレータである (Figure 1)。8 の字アンジュレータの特徴は、その名の通り電子ビーム軌道をビーム軸に垂直な面に投影した時に“8”の字の軌跡を描くように磁場回路を形成し、発生させた直線偏光の放射光軸中心付近には熱成分を集中させないことができる。水平セグメント内での軌跡は“8”の字に対し、垂直セグメントは 90° 回転させた“∞”の字である。各セグメントの磁石列間隔(Gap)の組み合わせを変えることにより、水平偏光モード、垂直偏光モード、及び、円(楕円)偏光モードの 3 種類の高輝度軟 X 線を生

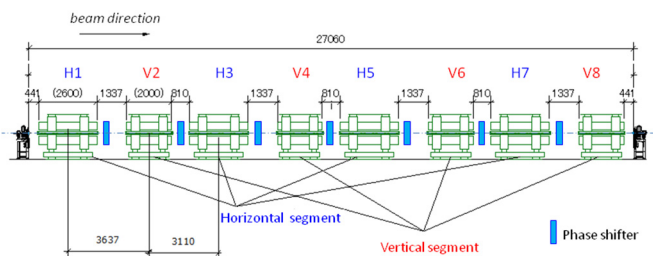


Figure 1: Configuration of undulator segments at a long straight section of SPring8 BL07LSU.

成することが出来る。各セグメントの間には、周期数 1 の挿入光源と等価な機能を有する移相器が 7 台設置されており、その Gap を変更すると電子ビーム軌道の経路長が変化し、セグメント間の位相差を制御することが出来る。BL07LSU の挿入光源が設置される長直線部には、合計 15 台のセグメントと移相器が組み込まれており、最上流に位置する水平セグメントと最下流の垂直セグメントは、その中心間距離で 23.9m に亘る。

3. XBPM の構造と調整方法

XBPM は 4 枚のタングステン板 (ブレード 0.2t) を光電子放出型検出素子とし、光軸中心から数ミリ程度離れたビーム・プロファイル裾部分の左上、右上、左下、右下の 4 か所に配置させ、各ブレードからの光電子放出に因る電流信号の配分比から位置情報を得る。BL07LSU では、各検出素子を 45° 方向に独立に駆動できる四象限型 XBPM を導入することにより、多彩なセグメントの組み合わせに適應できるようにした。

各ブレードの信号配分比から位置情報を得るためには、光源のプロファイル毎に配分比から位置 (単位 mm) を導き出す補正係数を決定しなければならない。そのためには、測定中に放射光ビームが変動していないことを仮定し、各ビームラインに設置されている XBPM の筐体をビームに対して水平・鉛直方向に移動させ、電流信号の配分比の変化を計測することにより補正係数を算出する方法が一般的である。通常は、この方法により決定された補正係数を用いることで実際の放射光ビームの位置変動を正しく測定することが出来る。挿入光源の Gap が変わると XBPM が出力する見かけのビーム位置が変化する Gap 依存性が存在するために、XBPM でビーム位置を記録する際にはある一定の Gap 値に設定して観測 (定点観測) している。BL07LSU ではアブソーバー・チェンバが蓄積リング内に設置されるまで、定点観測 Gap 値として 4 台の水平セグメントのすべてを 50mm に設定していた。

4. アブソーバー・チェンバの導入

8 つのセグメントのうち特に上流側の垂直セグメントを最小 Gap 付近まで閉じると、ビーム・プロファイルの裾が蓄積リングの真空容器に照射され温度の上昇とともに真空度を悪化させる。その影響を抑えるために、2013 年夏期停止期間に蓄積リング内の BL07LSU の挿入光源中心から 23.3m 下流の位置に水冷アブソーバー・チェンバを設置した³⁾。アブソーバー・チェンバの鉛直方向のスリット開口サイズは上下方向に 9.8mm (± 4.9 mm) に設定された。これにより、水平セグメントに加えて垂直セグメントも設計最小 Gap まで閉めて利用実験を行なうことが可能となった。しかしながら、鉛直方向のプロファイルが制限されることにより、これまで XBPM でビーム位置を計測する際に用いていたプロファイルの裾部分にアブソーバー・チェンバの開口が影を作る状況となった。

Table 1: Distance from Each Segment

	H1	V2	H3	V4	H5	V6	H7	V8
Distance to XBPM (m)	47.3	43.7	40.5	36.9	33.8	30.2	27.0	23.4
Distance to Absorber Chamber (m)	35.1	31.5	28.3	24.7	21.6	18.0	14.8	11.2
Actual aperture at XBPM (mm)	± 6.60	± 6.79	± 7.01	± 7.32	± 7.66	± 8.22	± 8.93	± 10.23

5. プロファイル観測と計算

放射光ビームのプロファイルを把握するために、フロントエンド最上流部 (XBPM の約 60cm 上流) に設置されるスクリーンモニタによるプロファイル観測と放射光計算プログラム SPECTRA^[4,5]によるパワー密度計算の結果を比較した。スクリーンモニタはアルミナ蛍光板 ($t=1$ mm, $W=30$ mm) を光軸から水平方向に 45° 傾け、ビームパイプの側方 (光軸の直角方向) から CCD カメラで観察するものである。従って、スクリーンモニタの有効幅は、2 の平方根で除した 21.2mm である。明るさに応じてアルミナ蛍光板の直上流に 2 種類のフィルター (Al 1mm、Cu 1mm) 挿入した。CCD カメラを自動絞りの設定としているので、互いの画像を輝度で比較する際には注意が必要である。蓄積電流値 1.1 μ A で観察を行なった。SPECTRA によるパワー密度計算の結果は、光源中心から 35.5m の XBPM の位置における、水平/垂直方向ともに ± 20 mm の範囲を示している。蓄積電流値は利用運転と同条件の 100mA とした。蓄積リングに設置されたアブソーバー・チェンバの開口により、各セグメントからのプロファイルが制限されることを考慮しているが、セグメントはそれぞれ光軸方向の奥行き (2.6m または 2.0m) があるので、実際に到達する放射光のプロファイル上下の端は計算結果以上に不鮮明となる。Table 1 に各セグメントから XBPM とアブソーバー・チェンバまでの距離、及び、各セグメントからの放射光が通過する XBPM の地点での実効開口サイズを示す。

5.1 水平セグメントのビーム・プロファイル

Figure 2 に、水平セグメント H1, H3, H5, H7 を 1 台ずつ Gap = 50mm (ϵ_{1st} = 約 860eV に相当) に閉めた時のプロファイル観測と計算結果を示す。H1, H5 では右側が二股に分かれているのに対して、H3, H7 ではその逆となっている。プロファイル観測結果の画面に見える各セグメントからの水平光軸面内の左側にスポットが見えるが、これは ID07 が設置されている長直線部の直下流にある偏向電磁石のフリッジフィールドによる放射光である。直上流にある偏向電磁石による放射光は、距離が離れているので右側には観測されていない。

下流側のセグメントほどスクリーンまでの距離が短くなるので、プロファイルのサイズが小さくなっている。上流側のセグメントのプロファイルは開口に遮られていることが分かる。最下流の H7 については、ほぼ全容のプロファイルを見ることが出来る。H7 の計算結果の図 (Fig. 2 (b) H7) の点線は、後述する XBPM ブレード位置関係 (光軸中心までの距離 5mm) を模式的に示している。

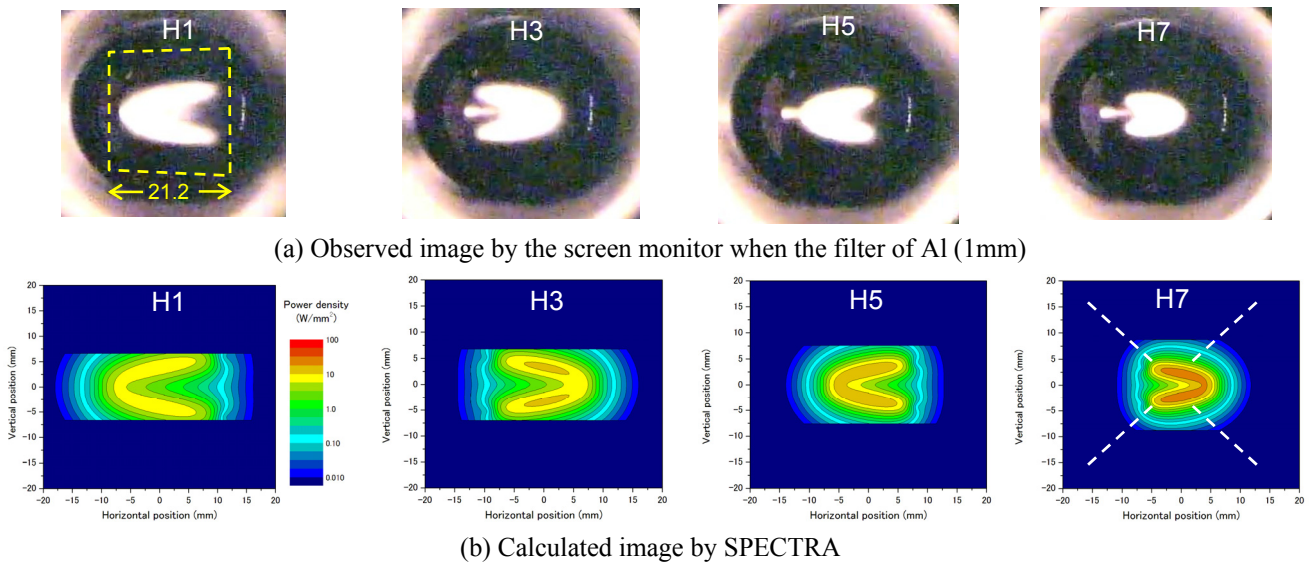


Figure 2: Images of each horizontal segment (H1, H3, H5, H7) with the gap is 50mm.

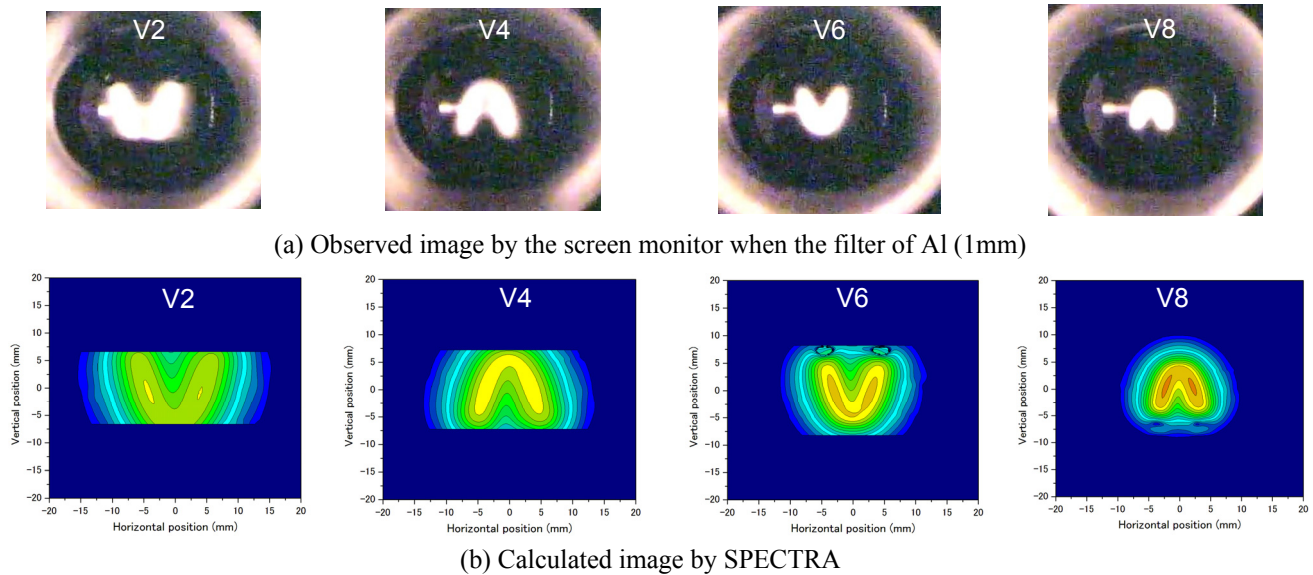


Figure 3: Images of each vertical segment (V2, V4, V6, V8) with the gap is 40mm.

5.2 垂直セグメントのビーム・プロファイル

Figure 3 に、垂直セグメント V2, V4, V6, V8 を一台ずつ Gap= 40mm ($\varepsilon_{1st} =$ 約 820eV に相当) に閉めた時のプロファイル観測と計算結果を示す。V2, V6 では上側が二股に分かれているのに対して、V4, V8 ではその逆となっている。水平セグメントと同様に、上流側ほど開口に遮られている。

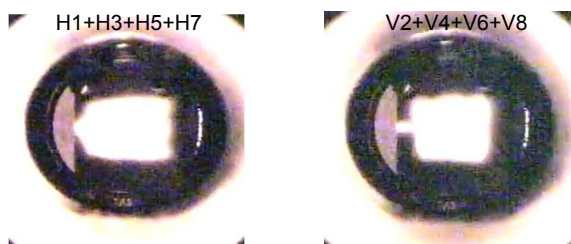
5.3 水平・垂直モードのビーム・プロファイル

Figure 4 に、水平モード (すべての水平セグメント Gap = 50mm)、右図は垂直モード (すべての垂直セグメント Gap = 40mm) のプロファイル観測と計算結果を示す。このように、各モードですべてのセグメントを閉めると、上流側のセグメントほど開

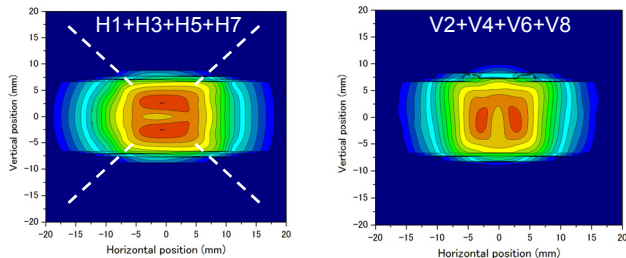
口に遮られているので XBPM の感度を得られない。水平モードの計算結果の図 (Fig. 4 (b) 左図) の点線は、XBPM ブレード位置関係 (光軸中心までの距離 8mm) を模式的に示している。この条件でアブソーバー・チェンバを設置するまでは XBPM は機能していたが、現在ではブレード全体が開口に遮られていることが分かる。

5.4 最小 Gap のビーム・プロファイル

Figure 5 の左図に水平セグメント H1 の最小 Gap 28mm、右図に垂直セグメント V2 の最小 Gap 22 mm の時のプロファイル観測と計算結果を示す。H1 (V2) の場合、水平 (鉛直) に広がり XBPM の水平 (鉛直) 方向の感度が得られないが、原理的には鉛直 (水平) 方向の感度は得られる。しかしながら、



(a) Observed image by the screen monitor when the filter of Al (1mm)



(b) Calculated image by SPECTRA

Figure 4: Images of all horizontal/vertical segments with the gap is 50/40mm.

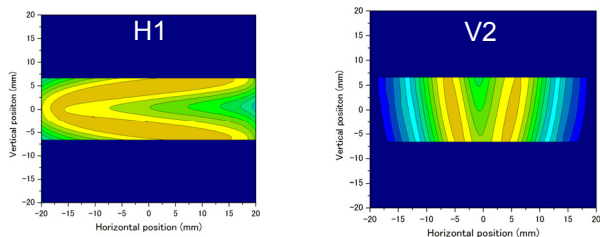
両プロファイルともにアブソーバー・チェンバの開口により大幅に遮られているので、XBPMでの測定には不向きである。

5.5 移相器のビーム・プロファイル

Figure 6 に、(a) 7 台の移相器 (Phase Shifter, PS1-7) の Gap を 40mm にした時のプロファイル観測結果と、(b) 光源中心部の移相器 1 台 (PS4) を 40mm にした時の計算結果を示す。移相器が発生するプロファイルは水平に扁平なので、ビームの水平方向の動きに対して XBPM は感度を持ち得ない。XBPM を用いた定点観測の際は、7 台すべての移相器の Gap を



(a) Observed image by the screen monitor with the filter of Cu (1mm)



(b) Calculated image by SPECTRA

Figure 5: Images of H1/V2 segments when the gaps are 28/22mm.

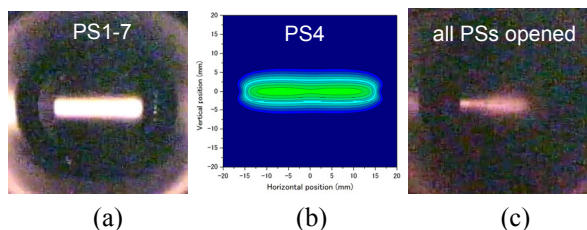


Figure 6: Images of phase shifters (PSs). (a) Observed image by the screen monitor with the filter of Al (1mm), when the gaps of all PSs are 40mm. (b) Calculated image by SPECTRA when the gap of PS4 is 40mm. (c) Observed image by the screen monitor with the filter of Al (1mm) when the gaps of all PSs are 80mm.

40mm (基準値) としている。参考までに、Fig. 6 (c) に 7 台の移相器の Gap を全開条件の 80mm とした時のプロファイル観測結果を示す。中心部に僅か見える光は、全開条件(150mm)の水平・垂直のセグメントによるプロファイルも含むが、実質的には無視できるほどである。

6. XBPM の調整

放射光ビームのプロファイルを観測及び計算することによって、アブソーバー・チェンバ開口が XBPM の出力信号に影響を与えることが明らかとなった。XBPM 補正係数を正確に算出するためには、従来の XBPM 筐体をビームに対して水平・鉛直方向に移動させる方法では、その影響を完全に消すことはできない。したがって、蓄積リングの電子ビーム軌道にローカル・バンパを与えて実際に放射光ビーム軸を変位させることにより、XBPM の応答を計測する方法⁶⁾を実施した。

6.1 電子軌道のローカル・バンパと XBPM の応答

Figure 7 の実線は加速器ステアリング電磁石のキック量を $+5 \mu \text{ rad}$ とした時の理想的な電子ビーム軌道を示す。点線でつなげたポイントは $\pm 5, \pm 3, 0 \mu \text{ rad}$ のキック量に相当するローカル・バンパを与えた時の蓄積リング COD-BPM の測定値を示す。4 台のステアリング電磁石を用いて 8 台の挿入光源が並ぶ長直線部に対して、角度のみを与えたローカル・バンパを立てられることが分かる。実際の電子ビーム軌道は、ローカル・バンパを与えた際に蓄積リング全体に亘って発生する COD に対して補正を掛けるために、僅かに理想の値からずれることがある。したがって、XBPM の応答確認のための光軸変位量は、COD-BPM の測定値に基づいて確定させた。

XBPM の応答を測定するための効果的な Gap として、最下流の水平セグメント H7 のみを 50mm、他のセグメントの Gap は全開条件の 150mm を選択した。また、移相器は従来の定点観測 Gap と同じ値の 40mm を選択した。次のセクションで詳細を述べるが、XBPM ブレードの先端から仮想光軸中心までの距離を 5mm に設定した。Figure 8 に、COD-BPM の

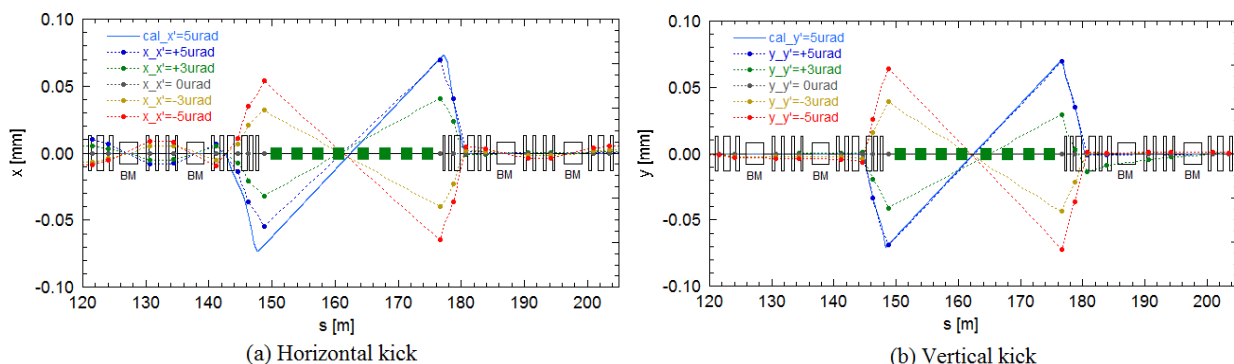


Figure 7: Local bumps in (a) horizontal and (b) vertical plane. Solid lines are calculated orbits. Points linked with dashed lines are beam positions measured with COD-BPMs.

測定値から推定される放射光ビームの変位量に対する XBPM の応答の関係を示す。縦軸は XBPM の読み値（この段階では見掛けの値）で、この測定で暫定的に用いた補正係数は XBPM の筐体を水平・鉛直方向に移動させる従来の方法によるものである。横軸は Figure 7 の測定で得られた各キック量における電子ビーム軌道の 2 点の COD-BPM の測定値から XBPM の地点に外挿して求めた。水平・鉛直方向ともに良い直線性を示していることが分かる。しかし、その傾きは、鉛直方向において 1 よりも小さくなっている。換言すると、実際のビームの変位に対して、XBPM の応答が鈍くなっている。これは、アブソーバー・チェンバの開口が放射光プロファイルを鉛直方向に制限していることで説明できる。したがって今後は、新しい補正係数(Ax, Ay)として本測定で求められた (3.68, 3.19)を使用することとした。

6.2 XBPM ブレードの走査測定

BL07LXU の XBPM は四象限型であるので、各ブレードを 45 度の傾きの放射状に独立に駆動できる。ブレード先端の位置と仮想光軸中心からの距離を変えてブレードの電流信号の増減を測定した。Figure 9 の縦軸は 4 枚のブレードの電流信号の平均値、横軸はブレード先端の位置と仮想光軸中心からの距離である。H1,3,5,7 の 4 台を閉めた時のプロファイルは、アブソーバー・チェンバまでの距離に応じて開口の

見込み角が異なるので、ある特定の位置で急に出力が低下する状況は見られない。一方、H7 のみを閉めた時には、ブレード・ポジションが光軸中心より 12mm の付近で急激に低下している。このサイズは、水平/鉛直成分それぞれ $\pm 8.5\text{mm}$ に相当する。実際のアブソーバー・チェンバの開口(鉛直方向 $\pm 4.9\text{mm}$)を XBPM の位置に投影すると $\pm 8.93\text{mm}$ (Table 1) であるので、この値と良い一致を示している。

XBPM の分解能を高めるためには、このグラフの傾きの大きいところを使う方が有利である。なぜなら、光軸の変動に対する XBPM の各ブレードからの出力値の変化が大きくなるからである。しかし、ブレード・ポジションが 12mm 以上の領域での大きな傾きはアブソーバー・チェンバの開口による信号低下であり、また、開口の影響を相対的に少なくするためには、ブレードを光軸中心に近付けたほうが有利である。一方で、XBPM の既存の信号処理系の仕様から各ブレードからの出力を数 $10\mu\text{A}$ 程度にするのが適している。そこで、 45° の傾きをもち独立に駆動される 4 枚の XBPM ブレードの光軸中心からの距離を 5mm に設定することとした。このサイズは、水平/鉛直方向で $\pm 3.54\text{mm}$ に相当する。H7 からのプロファイルがアブソーバー・チェンバ開口により XBPM の位置で投影されるサイズ $\pm 8.93\text{mm}$ に比べると十分小さい

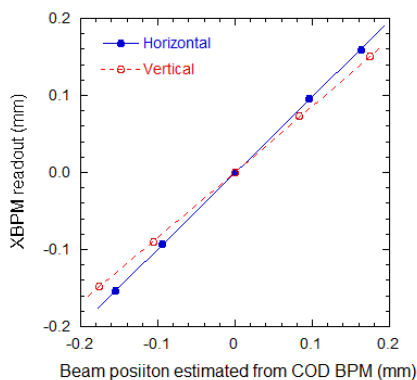


Figure 8: XBPM response against beam position estimated from COD BPM.

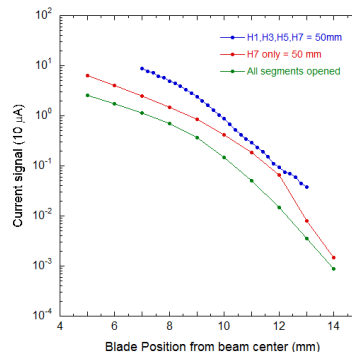


Figure 9: Current signal variation when changing blade positions. Gaps of all PSs were set at 40mm during this measurement.

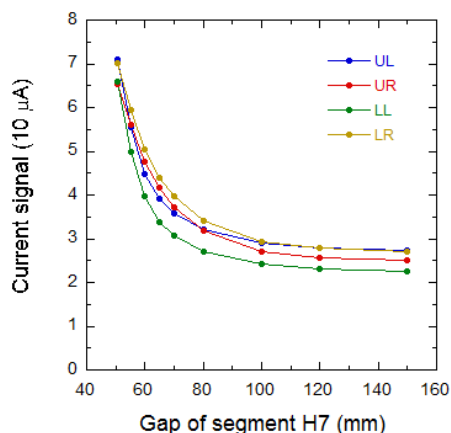


Figure 10: Current signal variation when changing the gap of segment H7. Gaps of all PSs were set at 40mm.

6.3 セグメント H7 の Gap 走査測定

セクション 5.5 によると、移相器の Gap が 40mm の条件では、移相器 7 台の合計で 800W 程度の放射光が混入し、XBPM 出力に影響を与えていることが予想される。そこで、移相器の Gap を 40mm に固定し、水平セグメント H7 の Gap を変化させながら XBPM 出力値を測定した (Figure 10)。H7 の Gap を全開(150mm)にしても、H7 の定点観測 Gap 50mm 付近の値の 30%以上の信号が出力されていることが分かる。本来は、セグメントからの放射光のみを観測するのが適するが、移相器からの放射光ビームはセグメントからのものと一体となって変位することから、H7 からの放射光の強度が優勢であれば XBPM の水平方向の感度は十分確保できると考える。

7. XBPM の調整に必要な条件

XBPM の性能を引き出すためには、以下の条件を考慮して調整する必要がある。

- i. セグメントからのプロファイルがアブソーバー・チェンバのスリット開口よりも十分小さくなるような Gap を選択する。
- ii. セグメントを最小 Gap 付近まで閉めるとプロファイルが扁平になり、水平、若しくは、鉛直方向の感度を得られない。
- iii. すべてのセグメントを全開で、PS のみを閉めると水平方向の感度が全く得られないので、ID からの放射光を PS からよりも十分強くする必要があり。
- iv. 上流側のセグメントからのプロファイルは大きく広がるので、下流側のみを閉めるのが測定に有利である。
- v. 上述の i.~iv.の条件を満たすために、H7 の Gap を 50mm 程度とし他の ID を全開とするのが XBPM の測定に適している。
- vi. XBPM の応答が有利になるように、ブレード先端と仮想光軸中心からの距離を設定する。

8. まとめ

放射光プロファイルの実測と計算値より、アブソーバー・チェンバを通過するビーム・プロファイルと XBPM ブレードとの位置関係を理解し、XBPM の使用条件を最適化した。セグメントの Gap 条件は、プロファイルのサイズが出来るだけコンパクトになるように最下流の水平セグメント H7 のみを 50mm とした。移相器の Gap (基準値 40mm) は変更なしとした。XBPM ブレード先端の仮想光軸中心からの距離は、当初の 8mm から最も効率的と考えられる 5mm へと近づけた。また、電子軌道のローカル・ランプと XBPM の応答を計測し、直線線が保たれていることを確認し、正しい補正係数として $(A_x, A_y) = (3.68, 3.19)$ を今後用いることにした。

参考文献

- [1] S. Yamamoto, et al., "New soft X-ray beamline BL07LSU at SPring-8", J. Synchrotron Rad. (2014). 21, 352-365.
- [2] H. Aoyagi, et al., "Blade-type X-ray beam position monitors for SPring-8 undulator beamlines", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 467-468 (2001) 252-255.
- [3] 小路 "ID07 アブソーバー・チェンバ"、SPring-8・SACLA 年報 2012 年度、p28.
- [4] T. Tanaka and H. Kitamura, "SPECTRA - a synchrotron radiation calculation code", J. Synchrotron Radiation, 8 (2002) 1221.
- [5] <http://radiant.harima.riken.go.jp/spectra/index.html>
- [6] H. Aoyagi, et al., "Calibration of X-ray beam position monitor for a segmented undulator beam line at SPring-8", Proc. of 10th PASJ, 1102-1105.