

PERFORMANCE OF THE RF-BPM AT XFEL/SPRING-8 “SACLA”

Hirokazu Maesaka ^{#, A), B)}, Hiroyasu Ego ^{A), B)}, Shinobu Inoue ^{C)}, Shin'ichi Matsubara ^{B)}, Takashi Ohshima ^{A), B)},
Tsumoru Shintake ^{A)}, Yuji Otake ^{A), B)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd.

1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo, 679-5165

Abstract

In the x-ray FEL facility “SACLA”, an electron beam and radiated x-rays must be overlapped within 4 μm in an undulator section. Therefore, a C-band rf cavity beam position monitor (RF-BPM) is employed to measure a beam position with sub- μm resolution. In total, fifty seven RF-BPMs and their readout electronics were installed into SACLA. Specifications of each component, such as resonant frequencies, quality factors etc., were confirmed to be satisfactory before installation. We measured the position resolution of RF-BPMs in an undulator section and the resolution was obtained to be less than 0.6 μm , which was sufficient for SACLA. The alignment accuracy was also investigated by using electron beams and the position offset of the RF-BPM with respect to an ideal orbit was less than 100 μm . The RF-BPM system was utilized for the beam commissioning and finally the x-ray FEL with the wavelength of 0.12 nm was obtained.

XFEL/SPring-8 “SACLA”における RF-BPM の性能評価

1. はじめに

SPring-8 に建設された X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) では、長いアンジュレータ区間にわたって電子ビームと X 線とが重なり合っていないなければならない。その要求精度は、電子ビームと X 線の重心位置の差を 4 μm 以下にすべきだとされている^[1]。この精度を実現するにはビーム位置検出器 (BPM) に 1 μm 未満の位置分解能が必要である。SACLA ではこのような分解能をもつ BPM として C バンド高周波空洞型ビーム位置検出器 (RF-BPM) を採用した。SCSS 試験加速器ではすでに 0.2 μm の分解能を達成している^[2]、SACLA の要求が十分に満たされることが期待できる。

RF-BPM は分解能が出ればよいだけでなく、機械的な精度も高いものが要求される。アンジュレータ部分の電子ビーム軌道を 4 μm 以下に追い込む際には電子ビームを使った Beam-based Alignment^[3]をおこなう。その Beam-based Alignment をおこなう前には 100 μm 以内で RF-BPM や四極電磁石がアライメントされていることが要求される。そのため、RF-BPM 空洞が十分な精度で加工されていること、RF-BPM の電気中心と四極電磁石の磁場中心が合っていること、アンジュレータ部分の RF-BPM が一直線に並んでいること、が必要となる。これらのことを RF-BPM 空洞の設計や据付時の位置測定などに反映しなければならない。

SACLA では図 1 に示すように合計 57 台の RF-BPM を製作・設置し、使用している。これらの RF-BPM とその周辺回路は 2010 年 9 月までに製作・設置され、2011 年 2 月のビーム運転開始からビーム位置を測定しつづけている。2011 年 6 月に XFEL が初めて発振したころには、アンジュレータ部の RF-BPM を用いた Beam-based Alignment^[3]がおこなわれるなど XFEL の運転・調整に活用されている。

本稿では、SACLA の RF-BPM の設計・製作・単体性能などについて述べたあと、ビームを使った調整と性能評価について報告する。

2. RF-BPM の概要

SACLA で使用する RF-BPM について、動作原理を簡単に示したあと、RF-BPM 空洞、信号処理回路、アライメント基準について述べる。

2.1 RF-BPM の動作原理

RF-BPM では円筒空洞にビームが誘起する TM₁₁₀ ダイポールモードを使ってビーム位置を測定する。その TM₁₁₀ の空洞から出力される電圧の振幅は

$$V = V_1 qx + jV_2 qx' + jV_3 q + V_n, \quad (1)$$

と書くことができる。ここに、 q , x , x' はそれぞれ電荷量、ビーム位置、ビームの傾きである。右辺第 1 項の $V_1 qx$ は位置に比例する成分で位置を検出するのに使う成分である。第 2 項の $jV_2 qx'$ は傾きからくる成分、第 3 項の $jV_3 q$ は TM₀₁₀ などの周波数の近いモノポールモードのテールからくる成分で、いずれも第 1 項と位相が 90 度異なる。第 4 項の V_n

[#] maesaka@spring8.or.jp

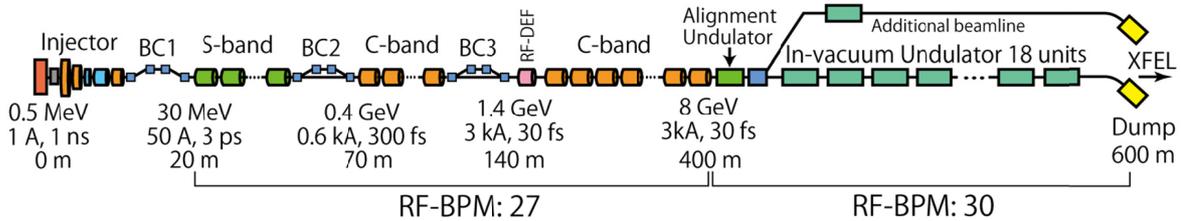


図 1: SACLA の概略図と RF-BPM の設置台数。

はノイズである。位置情報を得るには信号から第 1 項の位相にあう成分を取り出し、ビームの電荷量の依存性を規格化すればよい。そのためには、位相の原点と電荷量を求めるための TM010 のモノポールモードの空腔を併設する必要がある。

2.2 RF-BPM 空腔

前節の動作原理に基づき、図 2 のような空腔を設計した。TM010 のモノポールモード空腔と TM110 のダイポールモード空腔が一体となっている。共振周波数はいずれも 4.760 GHz である。周波数帯は C バンドではあるものの、あえて加速周波数である 5.712 GHz からずらすことで、加速管からの暗電流の寄与を抑制している。位置検出空腔には電界分布の対称性が保たれるよう、X, Y それぞれ 2 個ずつ、計 4 個の RF ポートが取り付けられている。そのポートは空腔に設けたカップリングスロットに取り付けられている。このスロットはモノポールモードにカップルしない形状としてあるので、ダイポールモードを選択的に取り出すことができる。

RF-BPM 空腔の Q 値や信号強度などの各種設計値を表 1 にまとめた。空腔の材質に SUS316L を使用したので、無負荷 Q 値 (Q_0) は銅製の空腔に比べて 1 桁くらい低い 600 程度となっている。もともと負荷 Q 値 (Q_L) が 45 と小さいので Q_0 が 600 程度でも問題にはならない。各空腔の RF ポートから得られる信号の電圧振幅のピーク値は、TM110 が 14 mV/ $\mu\text{m}/\text{nC}$ で、TM010 空腔が 200 V/nC である。なお、これらの値は HFSS^[4]による 3 次元 RF シミュレーションから算出した。

RF-BPM 空腔の製作手順としては、空腔の各部品を切削加工したあとろう付けにて接合し、最後に N 型コネクタを溶接にて取り付けることとした。ろう付け前に何度か空腔を仮組みして共振周波数を測定し、修正加工することで周波数の誤差を低減するようにした。このようにして完成した RF-BPM 空腔の写真を図 3 に示す。

2.3 信号処理回路

信号処理回路のブロック図を図 4 に示す。RF-BPM 空腔からの信号は切替可能な減衰器でレベル調整された後、IQ (In-phase and Quadrature) 復調器にて検波され、波形記憶 AD 変換器にて記録される。初段の減衰器では 0 dB から 60 dB まで切り替え可能である。これにより、電荷量の範囲として 0.1 nC から 1 nC まで 20 dB 相当変わったとしても、位置の測定レンジが 100 μm から 10 mm 程度までの 40 dB 相当の切り替えができるようになっている。この切

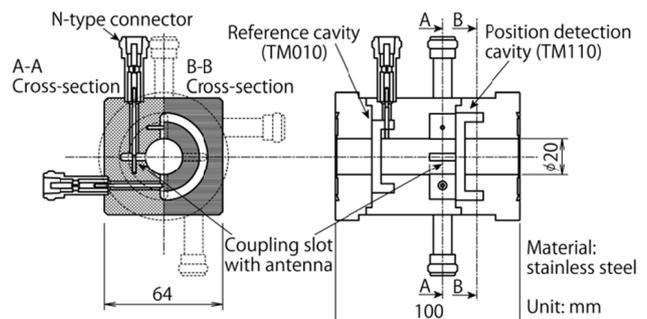


図 2: RF-BPM 空腔の概略図。

表 1: RF-BPM 空腔の設計値

	TM110 空腔	TM010 空腔
共振周波数	4.760 GHz	4.760 GHz
無負荷 Q 値 (Q_0)	600	570
負荷 Q 値 (Q_L)	45	45
ポート数	4 (X: 2, Y: 2)	1
電圧振幅 (50 Ω ポートにて)	14 mV/ $\mu\text{m}/\text{nC}$ (peak)	200 V/nC (peak)

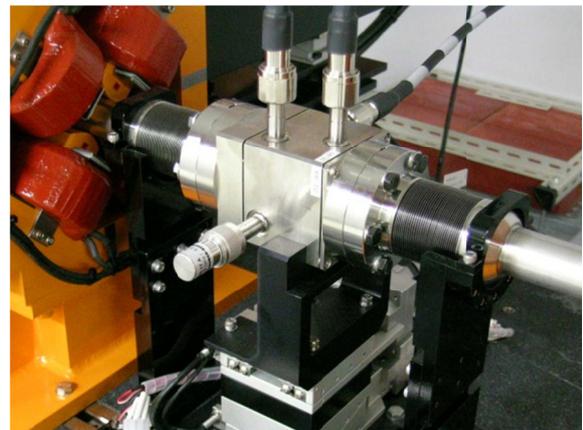


図 3: RF-BPM 空腔の写真（据付後）。

替式減衰器は切り替えても位相変化が数度以内となるように調整されている。IQ 復調器から出てくるベースバンド信号は 238MHz サンプリングの 12 ビット AD ボード^[5]、または、16 ビット AD ボードにて記録される。とくに分解能の必要なアンジュレータ部分の RF-BPM には 16 ビット AD ボードが使用されている。

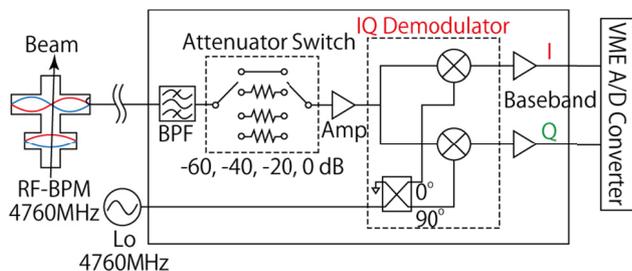


図 4: RF-BPM の信号処理回路のブロック図。

2.4 アライメント基準

RF-BPM 空胴の側面はアライメントの基準となるよう精密に加工することとし、製造時に空胴の中心軸との位置関係を $10 \mu\text{m}$ の精度で測定することとしている。据付時のアライメントのときには側面の基準面を所定の位置に合わせることにした。

アンジュレータ部分の RF-BPM の 23 台については、X 線を使った精密アライメントのための直径 0.1 mm のアイリスを備えることとした^[6,7]。アライメント用の X 線は、図 1 に示すように振り分け用偏向電磁石の上流にあるアライメント専用のアンジュレータで発生させる。アライメント時にはアイリスをビーム軸上に挿入して X 線を当て、下流の X 線検出器で検出する。アイリス中心と RF-BPM 空胴の軸を製作時に精密に合わせておけば、X 線に沿って RF-BPM を一直線上に並べることができる。

3. RF-BPM の調整と性能評価

まず、RF-BPM の量産・据付時に測定した、空胴の RF 測定や電気中心位置測定の結果と信号処理回路の性能などについてまとめる。そのあと、電子ビームを用いておこなった位置換算係数の較正、位置分解能測定と RF-BPM 空胴のオフセット測定の結果について述べる。

3.1 量産・据付時の調整・測定

3.1.1 RF-BPM 空胴の RF 測定

空胴の完成後、ネットワークアナライザを用いて共振周波数と Q 値を測定した^[6]。共振周波数は TM110 空胴については $4.760 +0.006 -0.008 \text{ GHz}$ 、TM010 空胴については $4.760 +0.010 -0.015 \text{ GHz}$ の範囲にすべて入っていることを確認した。この範囲であれば信号処理回路の帯域 ($\pm 0.03 \text{ GHz}$) に十分入っているので問題なく動作させることができる。 Q_0 はすべて設計値の 80 % 以上出ており、 Q_L は設計値の 45 の $\pm 10 \%$ 以内の値が得られていることを確認した。

3.1.2 機械精度の確認とアライメント

RF-BPM を据え付ける前に電気中心位置が機械中心と合っているかどうかを確かめた。直径 0.3 mm のアンテナを空胴に挿入して電気中心と機械中心のずれを測定した。その結果、すべての空胴の電気中心と機械中心のずれが $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内に入っているこ

とを確認した。

アライメント用アイリス付きの RF-BPM は、3 台の RF-BPM を並べて 1 台目と 3 台目の RF-BPM で作った直線上に 2 台目の RF-BPM のアイリス中心や電気中心があるかどうかを確認した。アイリス中心は HeNe レーザーをアイリスに当ててその像の重心を CCD カメラで測定することによって求めた。電気中心を測定する際には $\phi 50 \mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤを張り、ワイヤの位置を 3 台の各 RF-BPM で測定することで電気中心のずれを測定した。この測定の結果、すべての RF-BPM について機械中心と電気中心・アイリス中心のずれはすべて $50 \mu\text{m}$ 以下となっていることを確認した。

RF-BPM の据え付けの際には、隣接する四極電磁石の磁場中心と RF-BPM の電気中心が合っていることを $\phi 50 \mu\text{m}$ の金メッキタングステンワイヤを使って確認した^[6]。四極電磁石を 2 台の RF-BPM で挟み、その 2 台で作った直線と四極電磁石の磁場中心のずれを測定する。四極電磁石の磁場中心を測定するときは、電磁石を励磁し、ワイヤに交流電流を流して RF-BPM でワイヤの揺れを測定する。揺れがなくなる位置が磁場中心である。この測定の結果、四極電磁石と RF-BPM の位置のずれは一部を除いて $\pm 0.10 \text{ mm}$ 以内に入っている。

3.1.3 信号処理回路の精度

信号処理回路には IQ 復調器を使用するが、その IQ 分離能力と振幅の直線性が RF-BPM にとって重要である。そこで、IQ 復調器を入力した際の位相測定の誤差が、 0.5 度以下となるようにした。こうすることで、IQ 分離の誤差が $\sin 0.5^\circ \sim 0.009$ と 1 % 以下にできる。また、振幅を変えた際の線形性誤差が 1 % 以下となるようにしている。例としてあるチャンネルの位相誤差の測定結果を図 5 に示す。このように、信号処理回路も十分な精度で製作・調整されている。

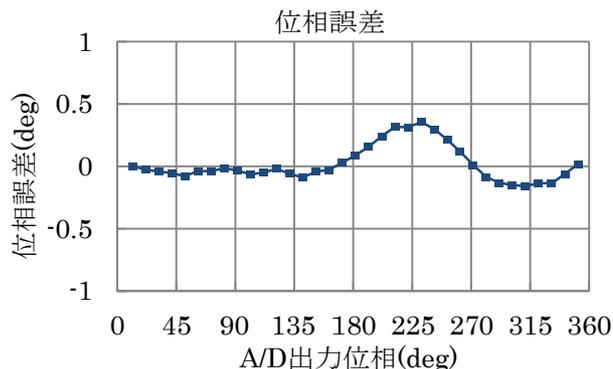


図 5: IQ 復調器の位相測定精度の例。入力振幅を一定にして位相を変えたときの、復調後の位相と設定位相の差をプロットしたものである。

3.2 ビームを使った調整・測定

本節では、最も高い位置分解能が要求されるアンジュレータ部分の 20 台の RF-BPM について、電子ビームを使って得られた結果をまとめる。加速器の運転状態はとくに断らない限り、エネルギーが 7 GeV、電荷量が 0.1 nC、繰り返しが 10 pps である。また、信号処理回路の減衰器の設定は 0 dB として感度が最大となるようにしている。

3.2.1 位置換算係数の較正

アンジュレータ部分の RF-BPM は自動ステージに載せてあるので、電子ビーム位置を一定にしてステージ位置を動かすことで RF-BPM の応答を測定した。測定結果の例を図 6 に示す。ステージ位置に比例した信号が得られており、この比例係数をもとに位置換算係数を決定した。また、ステージを ±0.2 mm の範囲で動かしたときの RF-BPM からの出力電圧の変化量が ±0.7 V 程度 (フルスケール ±1 V) であるので、±0.3 mm 程度のダイナミックレンジがあることがわかる。

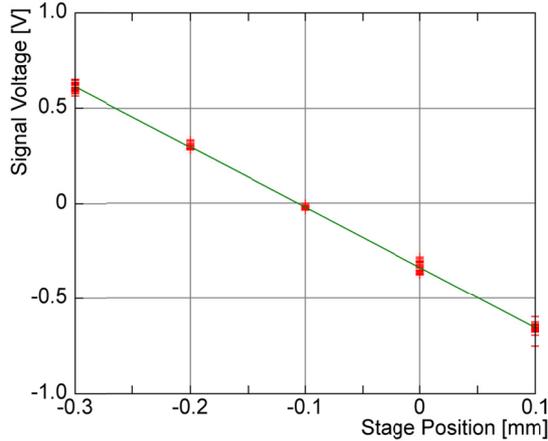


図 6: 自動ステージを動かしてとった RF-BPM の応答の例。赤の+がショットごとのデータで、緑線が直線フィット結果である。横軸はステージ位置で、縦軸は位置に比例する信号成分の電圧である。

3.2.2 位置分解能測定

RF-BPM の位置分解能は隣接する 2 台以上の RF-BPM で該当 RF-BPM でのビーム位置を推定し、推定値と測定値の差をとることで求めることができる。ここでは、アンジュレータ区間の 20 台の RF-BPM のうち、測定対象の RF-BPM を除く、残り 19 台でビーム位置を推定することとする。

位置の推定には各 RF-BPM 間のビームの転送行列を既知として用い、測定対象の RF-BPM でのビームの位置と傾きを未知パラメータとして最小二乗法にて決定するという方法をとる。測定対象を i 番目の RF-BPM とし、そこから j 番目の RF-BPM への転送行列を $F(j, i)$ とすると、 i 番目でのビームの位置と傾き (x_i, x'_i) と j 番目でのそれら (x_j, x'_j) との関係は

$$\begin{pmatrix} x_j \\ x'_j \end{pmatrix} = F(j, i) \begin{pmatrix} x_i \\ x'_i \end{pmatrix}$$

となる。 j 番目の RF-BPM でのビーム位置の測定値を \tilde{x}_j とすると、測定値と推定値の 2 乗和

$$J = \sum_{j(j \neq i)} (\tilde{x}_j - x_j)^2$$

が最小となるような (x_i, x'_i) を決めればそれが i 番目の RF-BPM での推定値となる。

このようにして求めたビーム位置の推定値と測定値の散布図を図 7 に示す。推定値と測定値にきれいな比例関係があることがわかる。その比例係数はほぼ 1 となっており、推定がうまくできていることがわかる。推定値と測定値の差の RMS を位置分解能と定義すると、全 20 台の RF-BPM の分解能は図 8 のように得られた。すべて 0.6 μm 以下となっており、要求値の 1 μm 以下を達成することができた。

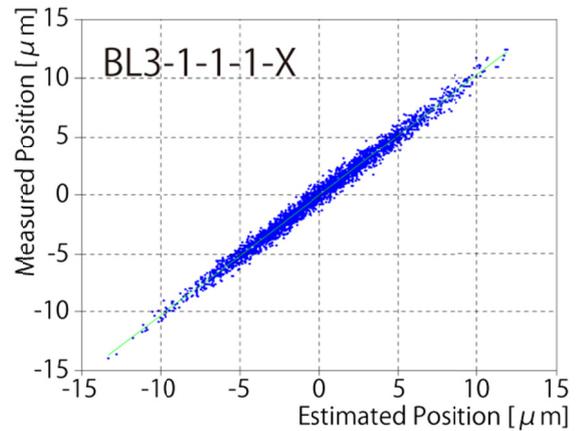


図 7: ある RF-BPM でのビーム位置の推定値 (横軸) と測定値 (縦軸) の散布図。青点がショットごとのデータで、緑線が直線でフィットしたものである。

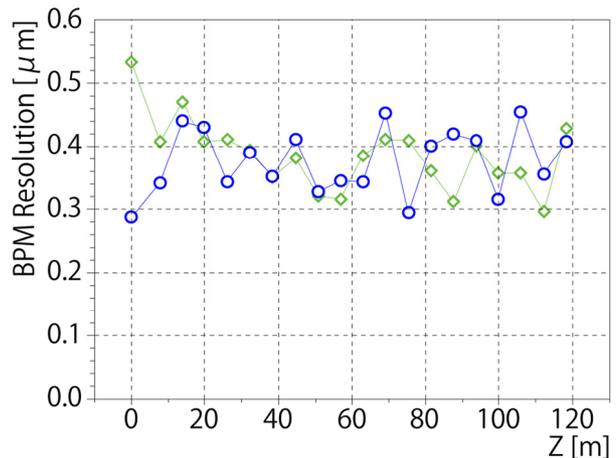


図 8: RF-BPM の位置分解能。アンジュレータ部分の 20 台の RF-BPM のデータで、青が X、緑が Y の分解能である。横軸は RF-BPM のビームの進行方向の位置を表している。

3.2.3 RF-BPM 空洞の位置オフセット測定

XFEL を発振させる際にはアンジュレータ部分の電子ビーム軌道が直線となるように調整され、四極電磁石の磁場中心もその直線軌道上に合うように自動ステージで位置が調整される。RF-BPM は四極電磁石と同じステージ上に載っているため、RF-BPM の測定値には四極電磁石との位置のずれによるオフセットが乗ることとなる。このオフセットを調べることで、据付時におこなった四極電磁石の磁場中心と RF-BPM の電気中心のずれの測定の評価をすることができる。

ただし、単純に XFEL の発振している状況での RF-BPM の測定値をオフセットとすると誤差磁場などによる軌道の誤差も含んだ値になってしまう。そこで、Beam-based Alignment^[3]と同様にエネルギーを変えたデータを使って誤差磁場の影響を低減するような解析することとする。RF-BPM のオフセットはビームエネルギーには依らないので、RF-BPM の測定値のエネルギーに依らない成分をオフセットとする。前節の分解能解析と同様に転送行列を使ってビームの位置と傾きの推定値を、RF-BPM の実測値に合うようにショットごとに決定する。この解析を各エネルギーでおこない、推定値のエネルギー依存性からエネルギーによらない成分を求めれば RF-BPM のオフセットが得られる。

今回はビームエネルギーが 7 GeV のときと 4 GeV のときの 2 つのデータからオフセットを求めた。その結果、RF-BPM のオフセットが図 9 のように得られた。オフセットは 1 台を除き 100 μm 以下となっている。したがって、Beam-based Alignment などからの要求が満たされている。1 台だけ約 150 μm ずれているが、信号処理回路の測定範囲内なのでビーム調整の問題とはなっていない。なお、1 台目と 2 台目のオフセットが 0 としてあるのは、解析上の理想直線がある 2 点で決めてやらなければならないためである。

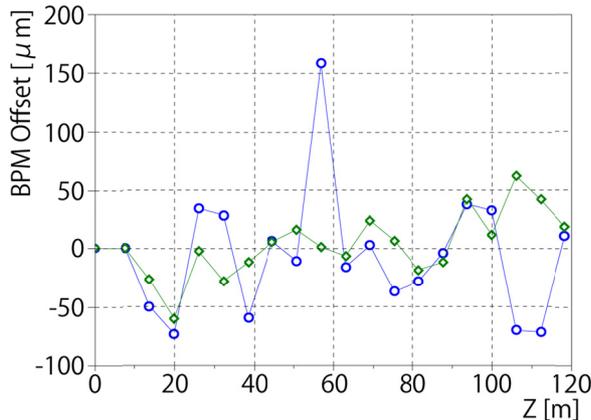


図 9: RF-BPM のオフセットの解析結果。凡例は図 8 と同様である。

4. まとめ

XFEL 施設 SACLA にて 1 μm 未満の位置分解能を持つビーム位置検出器として共振周波数 4.760 GHz の RF-BPM を設計・製作・設置した。空洞・信号処理回路とも所定の性能・精度を持っていることが確かめられた。据付時には 100 μm 以下の精度が出るようにアライメントした。実際の電子ビームを使って校正した後、位置測定の分解能を調べたところ、アンジュレータ部分の 20 台の RF-BPM 全数において 0.6 μm 以下という十分な分解能が得られた。また、エネルギーを変えたデータを使って RF-BPM の理想軌道からのオフセットを求めたところ、約 150 μm のずれがある 1 台を除き 100 μm 以下となっていることが確認された。このように、RF-BPM は空洞から信号処理回路も含めたシステム全体として 1 μm 未満の位置分解能を達成することができた。そして、アライメントにおいても 100 μm 以下の高い精度でおこなわれたことが確認された。この RF-BPM システムは XFEL の調整に活用され、波長 0.12 nm のレーザー発振の成功に貢献した。

参考文献

- [1] T. Tanaka, H. Kitamura and T. Shintake, Nucl. Instrum. Meth. A 528, 172 (2004).
- [2] H. Maesaka *et al.*, “Development of the RF Cavity BPM of XFEL/SPring-8”, Proceedings of DIPAC’09 (2009).
- [3] R. Yamamoto, *et al.*, “About the Beam Based Alignment in SACLA Undulator Section”, in these proceedings.
- [4] <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
- [5] T. Fukui *et al.*, “A Development of High-speed A/D and D/A VME Boards for a Low Level RF System of SCSS”, Proceedings of ICALEPCS’05 (2005).
- [6] H. Maesaka, *et al.*, “Construction Status of the Beam Diagnostic System for XFEL/SPring-8”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2010).
- [7] T. Morinaga, *et al.*, “Alignment of BPMs and Q-magnets using X-rays from an alignment undulator”, in these proceedings.