

BEAM BASED ALIGNMENT (BBA) OF SACLA UNDULATOR BEAMLINE

Ryo Yamamoto ^{#,A)}, Shinichiro Tanaka ^{A)}, Taichi Hasegawa ^{A)}, Yasuyuki Tajiri ^{A)}, Takuya Morinaga ^{A)}, Yutaka Kano ^{A)},
Takashi Tanaka ^{B)}, Kazuaki Togawa ^{B)}, Toru Hara ^{B)}, Hitoshi Tanaka ^{B)}

^{A)} Spring-8 Service Co., Ltd, 1-20-5 Kouto, Sayo, Hyogo, 671-5165, Japan

^{B)} RIKEN/Spring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 671-5148, Japan

Abstract

Construction of the X-ray free electron laser facility, SACLA was completed in March 2011. Elaborate efforts on the beam commissioning successfully achieved laser power amplification at a wavelength of 1.2 Angstrom in 7th June. The developed Beam Based Alignment (BBA) method for a undulator beamline, even though the method changes much from the original idea, certainly contributed to this smooth beam commissioning. In this paper, we report the outline of our BBA method together with what difficulties we met in the beam commissioning period, how we overcame these difficulties, and what the remaining problems are.

SACLA アンジュレータビームラインの Beam Based Alignment (BBA)

1. はじめに

2011年2月21日から開始された SACLA のビームコミッショニングは、入射部から主加速器の調整、アンジュレータビームライン (18 台のアンジュレータセグメントから構成されるもの) のアライメントと各種パラメータ調整を経て、同年6月に XFEL のレーザー増幅を達成した。

SASE のレーザー出力飽和を実現するには、アンジュレータビームラインを $\pm 4 \mu\text{m}$ の精度で直線にアライメントする必要があった。このため、我々は煩雑な収束操作を必要としない独自の Beam Based Alignment (BBA) アルゴリズムとビーム制御システムを開発した。本報告では、今回実施した BBA 法の詳細と、それを SACLA のアンジュレータビームラインのアライメントに適用した結果と問題点について詳細に報告する。

2. 入射軌道変動による BPM 計測誤差の補正

BBA には、BPM で高精度に軌道を計測する事が必須要件である。1 台目のアンジュレータ上流に位置し、アンジュレータの入射条件を規定する 2 つの BPM は、電子ビームエネルギーによらず、入射条件を正確に定義する必要があった。このために 2 つの BPM を約 7m の間隔に配置し、磁気シールドにより地磁気を $\sim 1/100$ まで減衰させ、ほぼ理想的なドリフト空間を作った。入射条件を規定する 2 つの BPM のショット毎の変位を計測し、それを各アンジュレータの下流に設置されている BPM まで伝搬させ、基準の入射条件での計測結果となるよう各測定値から 1Shot 毎の入射軌道誤差を差し引くことで BPM の測定精度を改善するのが狙いである。

図 1 に、測定データから入射軌道の変動を差し引いて得られた各 BPM の読み値の標準偏差を示す。図には、全 BPM の計測精度が $1 \mu\text{m}$ (r.m.s.) で無相関誤差を仮定した場合に、誤差伝搬から得られる BPM

の読み値の変動幅の計算値も併せて示してある。水平、垂直共に実測結果は計算と良い一致を示した。この結果は、BPM が、1 つのビームエネルギーにおいて、期待された精度をほぼ満足していること、入射軌道変動の差し引きも正しく行われていることを示している。

広いエネルギー範囲で BPM の精度を高く保つためさらに以下のような工夫を行った。各 BPM に対し、BBA で使用する 6 つのエネルギー条件毎に、BPM の測定値と入射軌道誤差をモデルにより伝搬させた値の相互相関を求め、これによる補正を施した。図 2 に各 BPM における 4.0 GeV と 7.1 GeV の水平、垂直の補正係数を示す。転送行列を用いたモデルの計算値に補正係数を掛け合わせて差し引きを行い高い精度を実現した。

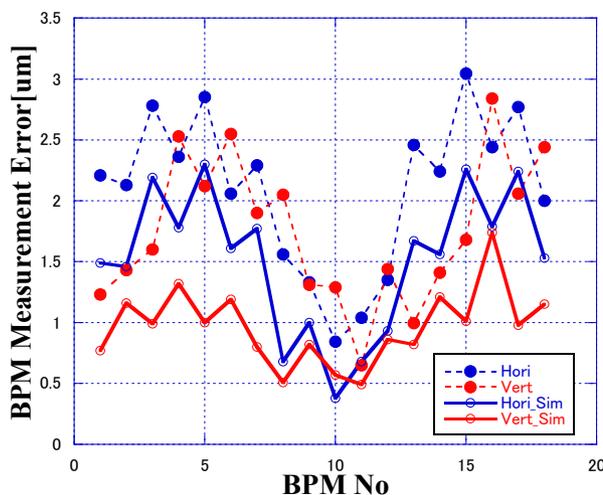


図 1: 入射軌道誤差を差し引く場合の各 BPM の測定精度 (各データは 1000 点の標準偏差)。横軸の BPM No は 1 台目のアンジュレータ下流の BPM から付番したもの。

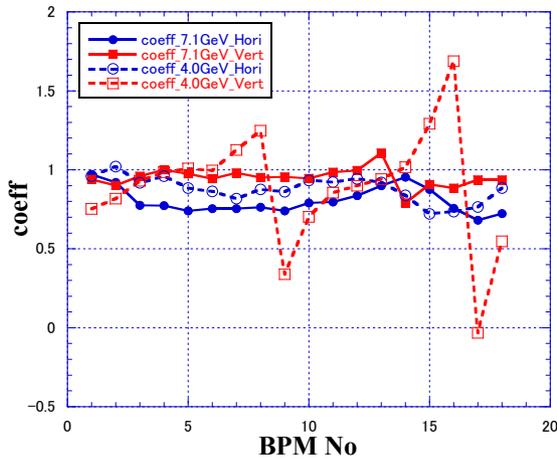


図2: 各 BPM の水平、垂直補正係数。

3. 計画していた BBA^[1]によるアライメント結果とその問題点

電子ビームの角度変位補正を行う一重積分値の計算では、アンジュレータ出口のステアリングを $-10\mu\text{rad}$ から $+10\mu\text{rad}$ まで数ステップで変化させ、直下流の四極電磁石の電流値を変調させ、その変調振幅のエネルギー依存性が最小となるステアリングの値を求める。この変調振幅は数 μm 程度のものを測定する予定であったが、実際に測定した結果、その変調振幅のエネルギー依存性をクリアに観測できず、1重積分値を閉じるステアリングの値を正確に算出することが困難であった。

そこで、まず1台目のアンジュレータに対し、誤差磁場の2重積分が閉じるように上流のステアリングの値を決定した。次に、1台目のアンジュレータのギャップを閉め、このアンジュレータ放射を用いて、アンジュレータビームライン先頭から約200m下流の光学ハッチ内に置かれた2次元検出器(MPCCD)で自発光の重心位置を測定する。レーザーの光軸位置との水平、垂直各偏差を求め、これらを補正するように入射軌道を規定する2台のBPM位置での変位を算出し、参照軌道軸自体の角度を目標光軸に合わせる。これにより1台目のアンジュレータの2重積分が閉じた状態で、その直線が目標光軸と一致した状態となる。

次に、BPM下流の4極電磁石をビームの設計エネルギーにて軸出しを行う。2台目以降のアンジュレータについては、(1)上流のステアリング補正量を2重積分がゼロとなるように決定、(2)直下流の4極電磁石の軸出しを繰り返す。この方法で18台目のアンジュレータまでアライメントを行った後、7.1 GeVと4.0 GeVの電子ビームをアンジュレータビームラインに通し、各BPMで軌道を計測した値の偏差を図3に示す。

水平、垂直共に、2つのエネルギー間での偏差はおおよそ $\pm 4\mu\text{m}$ に抑えられ、BPM位置においてはビーム軌道を目標精度で直線にアライメントすることができたように見えた。図中の黒破線で囲った部分、14台目のBPM位置で垂直の偏差が顕著に大き

くなっている。これは14台目のアンジュレータの上下流のステアリングの配線が反対に繋がれていたことが原因であることが後から判明した。

このアライメント状態で1台目のアンジュレータからギャップを順番に閉め、目標光軸との偏差を測定したところ、大きいところで角度に換算し約 $5\mu\text{rad}$ もの偏差のあることが分かった。BPMで観測するビーム軌道は、エネルギーにほぼ依存しない準直線とみなせるが、X線を用いた観測では電子ビームが直線から大きくずれているという結果になった。

この原因として、BPMで観測される変位のエネルギー依存性のシステムティックな誤差が考えられる。図4に例として6台目のアンジュレータ直下流のBPMのデータを示す。この依存性は、理論的には直線となり、その傾きが誤差磁場分布の二重積分値を与える。しかし図4から明らかな様に、水平、垂直共に1つの直線の周りではばらついているようには見えない。図中の黒破線を境に、高エネルギー側と低エネルギー側のデータの傾きが明らかに変わっている。このデータを線形フィットし、2重積分値を算出しても精度は疑わしい。

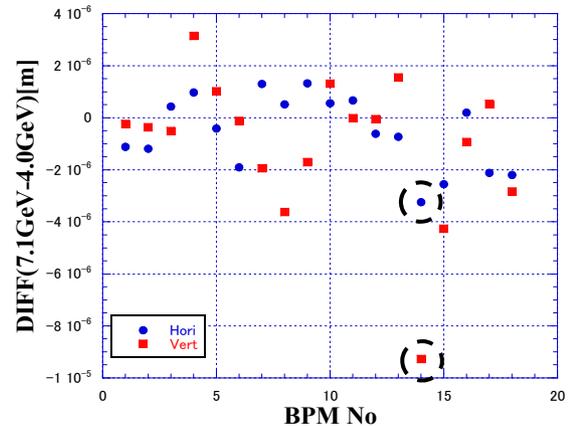


図3: BBA完了後の各BPMでのビーム軌道の偏差。(7.1 GeV-4.0 GeV)

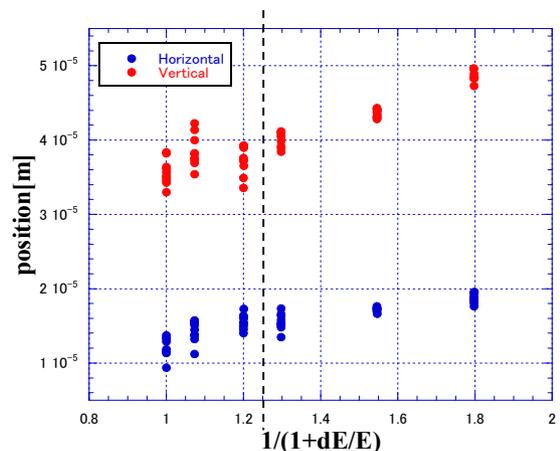


図4: 6台目のアンジュレータ直下流のBPMで観測した変位のエネルギー依存性。

4. 新たに導入した手法

当初予定していた BBA 手法では精度良くアンジュレータビームラインを直線に並べることが困難であった。そこで以下に示す電子ビームと各アンジュレータ自発光の光軸を用いる手法によりアンジュレータビームラインのアライメントを試みた。以下に具体的な手順をまとめる。

- ① 光源棟下流にある光学ハッチ内の MPCCD で目標光軸のピクセル数を確定
MPCCD (図 5 参照) のプロフィール上で自発光の重心を合わせる位置を決定する。
- ② 電子ビームの基準軌道の決定
1 台目のアンジュレータで 2 重積分補正を行った後、ビームライン入口より上流のステアリングを用い、①で決められた CCD 上のターゲットに自発光の重心が重なるように調整し、基準軌道を規定する 2 台の BPM の値を決定する。
- ③ アンジュレータ出口の四極電磁石の中心軸出し
アンジュレータ出口の四極電磁石に変調をかけ、電子ビームの変動をさらに下流の BPM で測定する。各アンジュレータ出口に設置されている BPM、四極電磁石は同一の XY ステージに設置されており、このステージの水平、垂直位置をスキャンして変調が最小となる位置へ固定する。
- ④ アンジュレータの光軸調整
アンジュレータ入口のステアリングで光軸を目標に合わせるよう電子ビームの軌道角度を調整する。
- ⑤ ③～④を 18 台目のアンジュレータまで繰り返す。

以上、①～⑤を行ってアライメントした後、アンジュレータのパラメータ最適化等を経てレーザー増幅の初観測が実現できた。

5. 電子ビームと光によるアライメントを整合させる試み

電子ビームを用いる BBA と X 線で主に方向をガイドするアンジュレータビームラインのアライメントは、正しく行えば両者は矛盾しないはずである。現状の不一致の最大の要因は、BPM 信号が異なるビームエネルギーにおいて滑らかに繋がらない事と考えられる。この原因として電子ビームの空間分布が異なる条件において一致していない事が考えられた。

5.1 電子ビームの空間分布を広いエネルギー範囲でできる限り同じにする

電磁石をエネルギースケリングしない条件でエネルギーの異なる電子ビームをアンジュレータビームラインへ通すと、ビームエンベロープは設計エネルギーからずれるに従い大きく歪むようになる。上流から 4 極電磁石の軸だしを随時行っていく我々の方法では、4 極電磁石のミスアライメントの情報が

失われることよりも、BPM の信号からシステムティックな誤差を除くことが先ず、精度を上げる上で重要であると考えた。そこで、4 章に述べた方法でアンジュレータ部のビームアライメントを終えた状態で、各エネルギーに対するビーム軌道データの測定を 4 極電磁石をビームエネルギーにスケールさせて行った。

図 6、7 に水平、垂直の測定データを示す。横軸に各 BPM 位置、縦軸に各エネルギーによる BPM の測定値 (入射軌道の変動を差し引いたもの) を 100 回平均したものを示している。また、アンジュレータは 1 台目から 18 台目まで K 値 1.8 となるようにギャップが閉められた状態での測定結果である。水平、垂直共にアンジュレータ前半部 (9 台目付近) までは、エネルギーによる軌道の偏差が抑えられているが、後半部では、徐々にその偏差が大きくなっていることが分かる。この測定結果より、前半部においては、電子ビームの軸と光軸がおおよそ一致するようアライメントを実施することができたと考えられる。しかし、後半部において偏差が徐々に増加しており、両者の軸は徐々にずれていくことが分かる。この原因としては、前半部での誤差が徐々に蓄積され、後半部になるほど偏差が大きくなっている可能性が考えられる。

5.2 電子ビームを用いる BBA の有効範囲

前節の測定結果より、アンジュレータ後半部になるほど誤差が蓄積され、エネルギーによる偏差が大きくなることが分かった。そこで、9 台目までのアンジュレータギャップは開けた状態で、10 台目以降の再アライメントを行った。これは、10 台目のアンジュレータを起点として、各アンジュレータに対する誤差の蓄積を軽減する狙いがある。

再アライメント実施後の状態で、各エネルギーに対するビーム軌道データの測定を行った。図 8、9 に水平、垂直の測定データを示す。9 台目までのアンジュレータギャップは開けられた状態、また、エネルギー毎に 4 極電磁石のスケリングを行った状態での測定結果である。

垂直方向に対しては、エネルギーによる偏差が非常に小さく、最も偏差の大きいもので約 $7\mu\text{m}$ にまで抑えることができた。BBA の起点を 10 台目のアンジュレータに移すことで、電子ビームの軸と自発光の光軸の一致性が改善され、電子ビーム軌道を直線に近づけることができた。

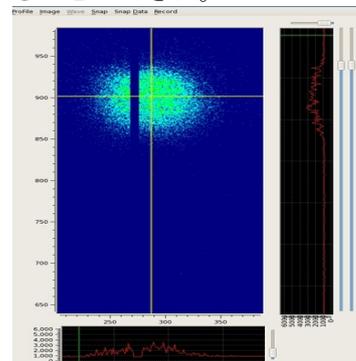


図 5: MPCCD 上のプロフィール

一方で、水平方向は、垂直方向と同じ手法で再アライメントを実施したのにも関わらず、エネルギーによる偏差は依然抑えられておらず、電子ビーム軌道の直線性が改善されていない。

6. 考察と今後の予定

図 6, 8 を見ると、どちらもアンジュレータの 10 台目付近からディスページョンの傾きが反転していることが分かる。また、一定方向に向かってビームポジションが系統的なエラーを含んだ形で推移している。このことから、アンジュレータ 10 台目付近からの機器自体の水平方向アライメントに問題がある可能性がある。また、入射軌道の変動を差し引く際に用いたモデル（転送行列）で表現できてない効果なども考えられる。

今後は、現在 $60 \mu\text{J/pulse}$ のレーザー強度をさらに強めるべく、水平方向の光軸と電子ビームの軸が一致しない原因について追及し、エネルギーに依存しない準直線電子ビーム軌道をアンジュレータビームラインで早期に実現することを目指す。

参考文献

- [1] H.Tanaka, et al., "A NEW BEAM-BASED ALIGNMENT OF UNDULATOR SEGMENTS FOR X-RAY FREE-ELECTRON LASERS (XFEL)", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010

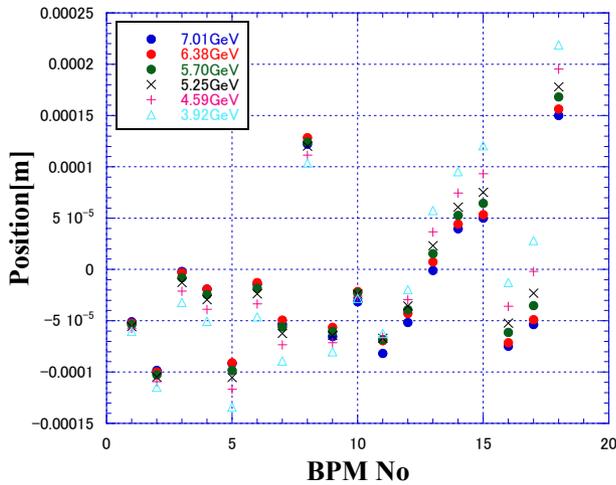


図 6: 各エネルギーによる軌道データ (水平)

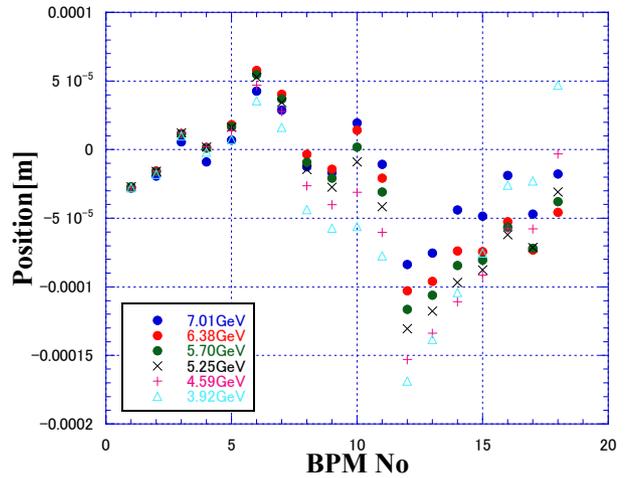


図 7: 各エネルギーによる軌道データ (垂直)

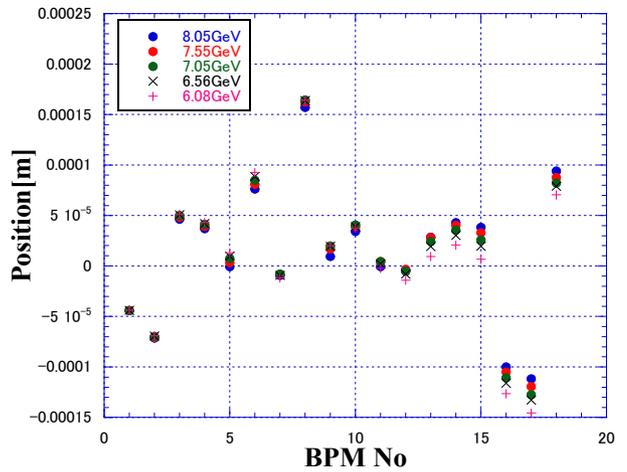


図 8: 10 台目のアンジュレータを起点としたアライメント後の軌道データ (水平)

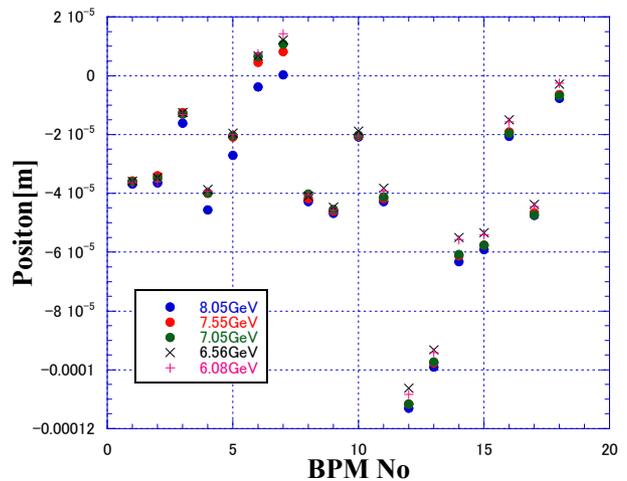


図 9: 10 台目のアンジュレータを起点としたアライメント後の軌道データ (垂直)