

MEASUREMENT OF ELECTRON BEAM ARRIVAL TIMING AT SACLA

Takashi Ohshima^{#,A,B)}, Hirokazu Maesaka^{A,B)}, Shin-ichi Matsubara^{B)} and Yuji Otake^{A,B)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center, XFEL Division

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

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Institute, XFEL Division

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

Abstract

The user operation of SACLA was started on March 2012. In this machine, it is a key issue to deliver stable timing reference signals to the accelerator components, the beam monitor units and apparatus of XFEL users with a precision less than 100fs rms. Since the arrival timing change of the X-ray at an experimental station depends on that of the electron beam, we measured the arrival timing of the electron beam by comparing an rf reference signal and a beam induced signal from an rf beam position monitor (RF BPM). A jitter of the arrival timing from an electrical circuit was estimated to be 41 fs rms by using correlation plot of two adjacent BPMs data. The arrival timing also changes by a drift of the rf reference signal, and this change leads to the measurement error. To evaluate this contribution, we measured difference of the arrival timings between two BPMs located at the entrance and the exit of the bl3 undulator section which has eighteen undulator units having the rf bpm, each. The difference of the arrival timings corresponding to the reference time drift was about 180 fs pk-pk for two days measurement. This drift will be improved by introducing the optical fiber length control system.

SACLA におけるビーム到達時間測定

1. はじめに

Spring-8 Angstrom Compact LAsER (SACLA)は X 線領域での SASE 発振を実現し、高輝度短パルス X 線を用いて原子の非線形過程の観測、非結晶タンパク質の構造解析など様々な実験を行うための施設である。ビーム運転が 2011 年 2 月から開始され、SASE の確認が 6 月になされた。その後も短波長での発振、光強度の安定化などが進められ、2012 年 3 月にユーザーへの光供用を開始した[1]。

安定したレーザー発振のためには各加速空洞に励振される加速電場の位相とビームが通過するタイミングとを 100fs 以下の精度で同期させる必要がある。そのためには、安定な基準高周波信号の伝送[2]、およびビーム到達時間の測定が重要である。SACLA で使用している BPM [3,4]は、ビームの到達時間の測定も行うことが可能であり、SCSS 試験加速器 SCSS での試験では 25fs の分解能が確認されている[5]。この BPM を用いて測定したビーム到達時間には、加速器入射部の運転パラメータのドリフトに起因する変動がみられている。ここに基準高周波伝送系の安定度がどの程度寄与しているかについて確認することは重要である。ほぼ光速に達している電子ビームの到達時間は、シケインを含まない直線部分においては、距離に応じた遅延がみられるのみで一定となるはずである。もし、直線部の BPM で測定したビーム位相の差に時間変化があれば、それは基準信号伝送系のドリフトを示していると考えられる。我々は、まず SACLA 加速器の bl3 アンジュレータ直線部において、近接して設置された 2 台の BPM で測定したビーム到達時間の相関データから BPM

信号処理回路のノイズによるジッタを見積もった。次に直線部の両端に離れて設置された BPM で計測したビーム到達時間の差を測定することにより、2 つの BPM 信号処理回路に供給される基準高周波信号の時間精度について測定を行った。本論文では上記の測定の結果について報告する。

2. 電子ビーム到達時間の測定方法

SACLA で使用されている空洞型 BPM は水平、垂直方向のビーム位置信号を検出するための TM110 ダイポールモード空洞と、位置算出時の規格化に使用するビーム電荷測定用の TM010 モノポールモード空洞の 2 つの空洞で構成されている。共振周波数は 4760MHz である。信号の振幅、位相検出には IQ (In-phase Quadrature) 検出器を使用している。IQ 検出器の出力は VME の 16bit 238Ms/s ADC でデジタル信号に変換され、ビーム位置信号、ビーム電荷量、基準信号に対する位相信号に換算され、データベ

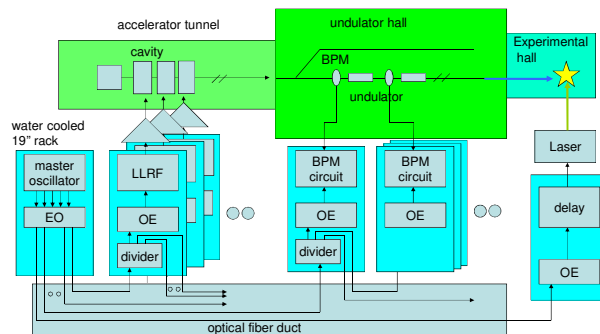


図 1 : 基準信号伝送系、BPM 信号処理系の概念図。

ohshima@spring8.or.jp

スに保存される。各信号にはタグ番号が付けられ、ショットごとに他の信号と比較することが可能となっている。BPM 信号処理回路の環境温度変動による位相変化を抑制するために、処理回路は断熱恒温措置の施された 19 インチラックに納められている。このラックは、密閉断熱構造となっており、0.1K 以内の温度変動に安定化された冷却水を通水した熱交換機を通して内部空気を循環させ、ラック内部の温度を一定に保つ構造となっている。マスターオシレータの基準高周波信号は電気信号に変換され、冷却水で温度安定化を図った恒温ダクト内に設置された光ファイバケーブルを通して BPM 信号処理回路まで伝送される。基準信号伝送系と BPM 信号処理系の概念図を図 1 に示す。

3. 電子ビーム到達時間の測定結果

3.1 BPM 信号処理回路のノイズ

BPM 信号処理回路のノイズを、b13 アンジュレータ部上流のアンジュレータの 1 台 (#1-2) の両端に設置された 2 つの BPM を用いて測定したビーム到達時間の相関データから評価した。2 つの BPM の

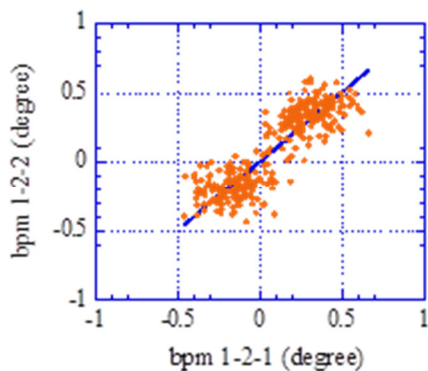


図 2 : アンジュレータ部に近接して設置された 2 台の BPM で測定したビーム位相の相関図。

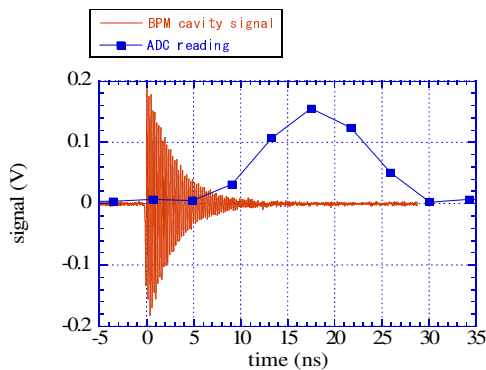


図 3 : BPM 基準空洞(b13-0-1)からの信号波形と ADC で測定したベースバンド信号波形。ビーム電流 0.2nC。

距離は約 6m である。図 2 に結果を示す。測定時間は約 30 秒で、約 300 点のデータを図示した。最小二乗法で求めた直線からの位相のずれは 0.10 度 (58fs) RMS であった。2 つの BPM の分解能が等しいとすると、1 つの BPM の分解能は $58\text{fs}/\sqrt{2} \sim 41\text{fs}$ となる。この値は文献 5 に示された時間測定分解能 25fs RMS よりも大きな値となっている。その理由としては、BPM 信号処理回路への入力信号振幅が小さいことがあげられる。信号処理回路および ADC のフルスケールは 1V であり、文献 5 の測定時にはベースバンド信号の振幅は 700mV 程度であった。一方、SACLA で使用されている BPM 信号処理回路への入力信号、およびベースバンド出力信号の一例を図 3 に示すが、このときのベースバンド信号のピーク電圧は 0.15V であった。ビーム電荷量一定の運転を想定した RF 減衰器の最適化を行えば到達時間の測定精度は向上できるが、現状では広い範囲の運転パラメータに対応することを優先している。信号処理系のノイズは近接した場所に設置された BPM でのビーム位相の平均を取ることで抑制することが可能である。

3.2 ビーム到達時間の推移

ビーム到達時間の推移について、2 日間の測定データの一例を図 4 に示す。測定箇所として、長さ約 110m のアンジュレータ部の上下流の 2 か所 (それぞれ 1-2-2 および 5-1-2) を選んだ。この測定の間、2 か所でのビーム位相には、最大で 1 度 (0.6ps) 変化がみられた。信号処理回路のノイズを抑制してドリフトの状況を見やすくするため、それぞれの bpm について 16 点の位相データの平均を取った値を実線で図中に示す。ここに見られるゆっくりとしたビーム位相の推移は主に入射部の加速器パラメータのドリフトに起因していると考えられている[6,7,8]。

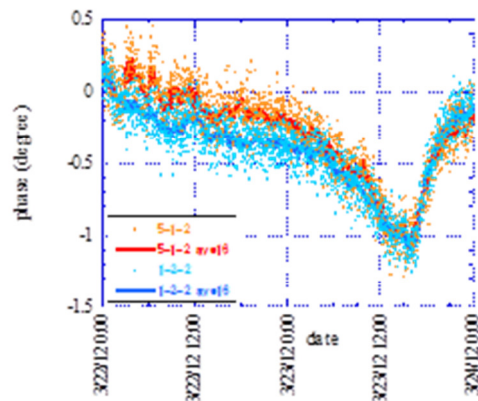


図 4 : アンジュレータ部の上流(1-2-2) と下流 (5-1-2) で測定したビーム位相 2 日間での推移。

3.3 基準高周波信号のタイミング変動

第 1 章で示したように直線部での到達時間の差は基準信号伝送系のドリフトの情報を持っていると考

えられる。図 4 に示した bl3 アンジュレータ直線部の両端で測定したビーム位相の差を図 5 に示す。図 4 と同様にドリフトの影響を見やすくするため 16 点の位相差データの平均値も黒線で図中に示した。位相差の平均値の変化量は約 0.3 度 (180fs) であった。このとき、16 点のビーム位相差平均値に対する各ショットでの位相差のばらつきは 0.14 度 (82fs) RMS であり、前節で求めた 1 ユニットでの分解能 41fs の $\sqrt{2}$ 倍に比べると若干大きい値となっている。

この測定を行ったときの環境温度の動きを調べた。図 5 には BPM 信号処理回路を収めた 19 インチラック、および基準振動伝送用光ファイバをおさめた断熱恒温ダクトが設置されているアンジュレータギャラリの温度を合わせて示した。この温度は 3/22 の 0 時から 12 時の間に約 2 時間の周期で 0.8K pk-pk の変動がみられた。この変動と同期して 2 つのビーム位相の差にも 0.2 度 (120fs) の変動がみられた。断熱恒温ダクトによる温度変動の抑制効果が 1/6 だとすると、位相安定光ファイバの長さの変化は $5\text{ps/km/K} * 0.15\text{km} * 0.8\text{K}/6 \sim 100\text{fs}$ となり観測された位相変化と矛盾しない。

図 6 にはアンジュレータの設置されている光源棟で使用している冷却水の温度変動と、BPM 信号処理回路を収めた 19 インチラック内部の温度変動を示す。冷却水温度は 0.05 K pk-pk に安定化されていた。19 インチラックの内部温度は 48 時間で、1-1 用では +0.06K、5-1 用では +0.04K 程度の変動がみられた。BPM 処理回路で使用されている RF ケーブルの温度係数がおよそ -0.1 度/m/K であるとする、長さが 2m、温度変動が 0.06K の場合ビーム位相は -0.012 度 (~7fs) の変化となる。図 5 に見られるビーム位相変化に対する寄与は小さいと考えられる。

4. まとめ

BPM の基準空洞からの信号を用いてビーム位相を測定した。信号処理回路のノイズに起因する到達時間のジッタは、近接した 2 台の BPM で測定したビーム位相の 30 秒間の相関をとることにより、およそ 41fs rms と求められた。アンジュレータ部の上下流に 110m の距離だけ離れて設置された BPM を用いてビーム到達時間の測定を 2 日間行った。2 つのビーム到達時間の測定結果には加速器のパラメータドリフトに起因する約 0.6ps pk-pk の到達時間変動がみられた。2 つの BPM のビーム到達時間の差は 2 日の測定で 180fs pk-pk であった。この変動量は加速器に対する要求値 100fs RMS を若干超過する値となっている。この変動の要因としては、基準信号を伝送している光ファイバの環境温度変化と信号処理回路系の環境温度の変化が考えられる。それぞれの位相温度係数から前者は 100fs 程度、後者は 7fs 程度の寄与と見積もられた。

アンジュレータ部の到達時間の情報はデータベースに保存されており、SASE ユーザーが利用することも可能となっている。これは加速のパラメータ変動の確認、ユーザーへの大まかな到達時間情報の提

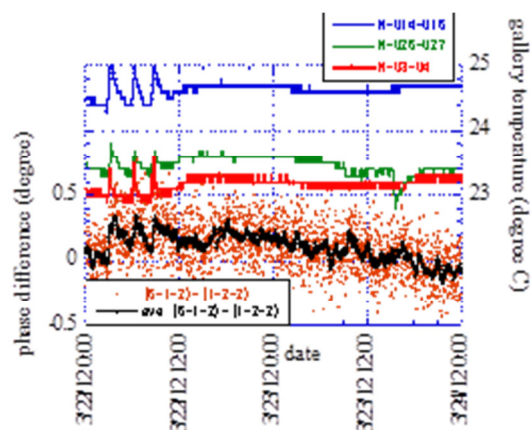


図 5 : アンジュレータの上下流で測定したビーム到達時間の差(黒線)とアンジュレータギャラリの室温の時間変化。

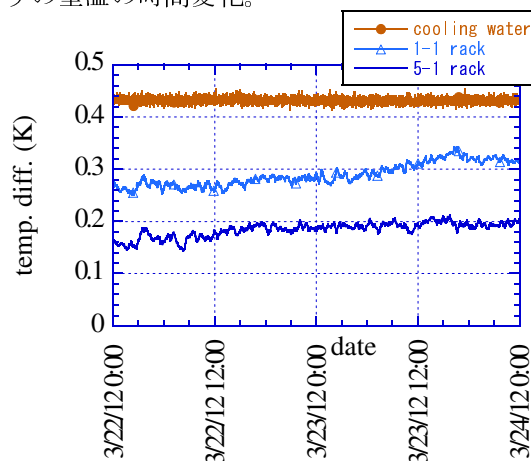


図 6 : 光源棟で使用している冷却水の温度変化と BPM 信号処理回路の収められている 19 インチラックの温度変化。

供として役立っている。

今後の展望としては、基準信号の伝送において光ファイバの光路長を測定し補正を行う安定化装置[9]の導入を 2012 年度冬期停止期間に予定している。これにより、基準信号の数 100fs オーダーのドリフトが数 10fs に抑制されることが期待される。光源棟ギャラリ温度の 2 時間周期の変動は空調機の制御パラメータの調整で改善されることが本年 7 月に確認されており、9 月からのビーム運転では状況が改善されることが予想される。また、実験棟において、試料に近い場所でクロスコレクタを用いて 10fs 程度の分解能をもつ到達時間の測定が試みられており、光ユーザーへのより精度の高い情報提供のための開発が進められている[10]。光ファイバの温度分布の情報を高めるため、温度測定点を増やす工事も 8 月の加速器停止期間中に実施する予定である。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region", Nature Photonics (2012) doi:10.1038/nphoton.2012.141

- [2] Y. Otake, et al., "State of the art RF distribution and Synchronization techniques", Proc. of FEL2011, Shanghai
- [3] H. Maesaka, et al., "Sub-micron resolution rf cavity beam position monitor system at the SACLA XFEL facility", submitted to Nucl. Instr. Meth. A
- [4] H. Maesaka, et al., "Performance of the RF BPM at XFEL/SPRING-8 "SACLA"", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011)
- [5] H. Maesaka, et al., "Development of the RF Cavity BPM of XFEL/Spring-8", Proceedings of DIPAC09, Basel, Switzerland (2009) p. 56-58
- [6] H. Maesaka, et al., "Stability improvements of the XFEL intensity at SACLA", in these proceedings
- [7] T. Asaka, et al., "Variability analysis of a beam at SACLA", in these proceedings
- [8] T. Hasegawa et al., "Upgrade of a precise temperature regulation system for the injector at SACLA", in these proceedings
- [9] H. Maesaka, *et al.*, "Fiber Length Stabilization for the Optical Timing and RF Distribution System of XFEL/SPRING-8", Proceedings of the 4th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan, (2007).
- [10] K. Tono, et al., "Photon Beam Diagnostics for X-ray, VUV, XFEL", Proceedings of Beam Instrumentation Workshop, Newport News, USA (2012) TUB01