

STABILITY IMPROVEMENTS OF THE XFEL INTENSITY AT SACLA

Hirokazu Maesaka^{#,A)}, Takao Asaka^{A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Yutaka Kano^{C)}, Yasuyuki Tajiri^{C)}, Shin'ichiro Tanaka^{C)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Taichi Hasegawa^{C)}, Teruaki Hasegawa^{A)}, Toru Hara^{A)}, Shin'ichi Matsubara^{B)}, Takuya Morinaga^{C)}, Ryo Yamamoto^{C)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Yuji Otake^{A)}

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

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

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

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

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

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

Abstract

For stable user operation of SACLA, an XFEL intensity is necessary to be stable within 10% RMS for a short term jitter and 10 % pk-pk for long term drift. In the early stage of XFEL lasing at SACLA, however, the XFEL intensity decreased to about half of the demand, if we did not adjust the accelerator condition. The XFEL intensity is mainly affected by the peak current fluctuation and drift of an electron beam and the demanded peak current is achieved by multi-stage bunch compression system. From a simulation study, the acceleration rf phase stability for the bunch compression stage is 50 fs RMS for short term jitter and a few 100 fs pk-pk for long term drift. However, we found that the rf phase of an injector part had a large drift of 10 ps. Therefore, we improved the temperature stability of the acceleration cavity in the injector from 0.08 K pk-pk to less than 0.01K pk-pk by using a further precise temperature regulation system. In addition, the temperature coefficient of low-level rf electronics was reduced. As a result, the long term XFEL intensity drift was reduced to 10 % pk-pk level, if an operator sometimes finely adjusted some rf parameters of the injector.

SACLA の XFEL 強度安定化

1. はじめに

X 線自由電子レーザー(XFEL) 光を様々な実験で有効に利用するには、XFEL の強度安定性が非常に重要である。SACLA^[1,2]では、XFEL 発振当初は何もしないと XFEL 強度が徐々に下がり、1 時間程度で半分くらいに下がってしまうような状況であった。その強度変動のトレンドグラフを図 1 に示す。また、短期安定度についても 10% RMS 以上の変動があり、これは、SACLA の XFEL 発振過程である自己増幅型(SASE) FEL の原理的な変動量である 10% RMS 弱より大きいことがわかっている。利用実験にて不満なく XFEL を使用できるようにするには、XFEL 強度の長期安定度を 10% pk-pk 以下、短期安定度を 10% RMS 以下にすることが求められる。

XFEL 強度変動の主な要因として、ピーク電流の変動が知られている。SACLA では、図 2 のレイアウト図に示すように、加速器の前半部分において速度変調バンチングと 3 段の磁気シケイン(BC1 ~ BC3)を用いたバンチ圧縮をおこない、XFEL 発振に必要な 3 kA という高いピーク電流を実現する。この各圧縮段階で変動が起こると圧縮率が悪くなることによってピーク電流が低下し、XFEL 強度の低下につながる。バンチ圧縮をする部分では電子ビームにエネルギー変調を与える必要があるため、電子ビームは加速 RF 電圧に傾きがあるオフクレスト位相で加

速される。そのため、加速 RF 位相のわずかな変動がエネルギー変調に影響を与え、ピーク電流の変動となる。SACLA では、位相安定度の時間換算値

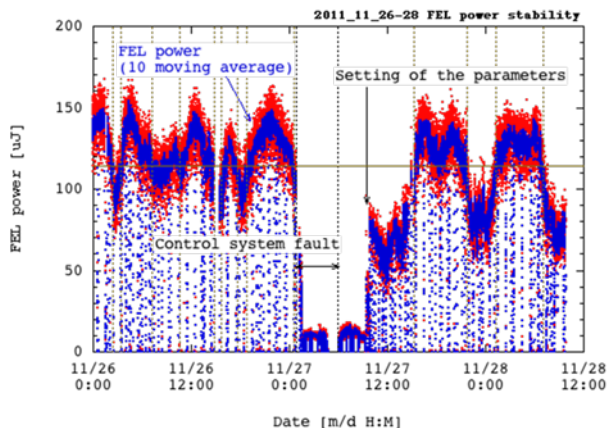


図 1: XFEL 発振当初の XFEL 強度のトレンドグラフ。赤の点が各ショットの強度で、青の点が 10 ショットの移動平均である。横軸は日時でフルスケール 60 時間、縦軸は XFEL のパルスあたりの強度を μJ で表したものである。なお、途中で 10 時間ほど強度が低い部分があるのは機器のトラブルのためで、安定度からきているものではない。なお、このデータの取得時は個々の RF 源のフィードバック制御とアンジュレータ入射軌道のフィードバック制御のみをおこなった。

[#] maesaka@spring8.or.jp

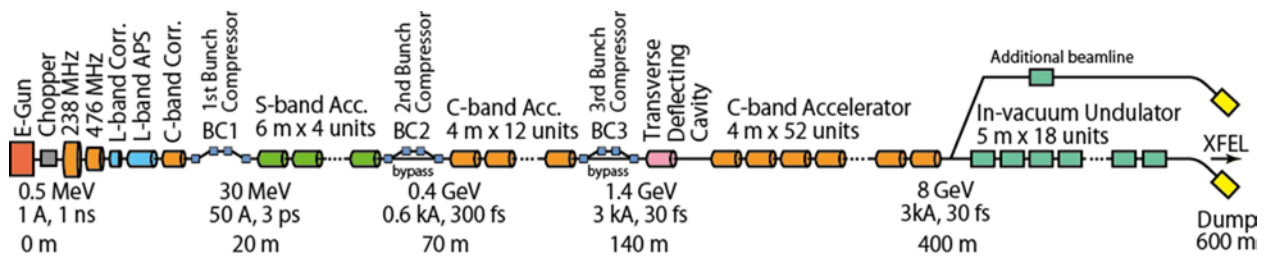


図 2 : SACLA のレイアウト。

で 50 fs RMS の短期安定度と数 100 fs pk-pk の長期安定度が必要であると見積もられている^[3,4]。

このような厳しい位相安定度が必要なことは設計当初から想定されていたため、SACLA では低ノイズ・高精度、かつ、安定な RF 源・低電力 RF 制御装置・加速空胴の精密温度調整装置などを備えた加速器システムを構築した^[5]。たとえば、クライストロンにカソード電圧を与えるための高電圧パルスモジュレータの充電用電源は 1×10^{-5} RMS の安定度をもつものを使用している^[6]。また、低電力 RF 制御装置では、C-band 加速空胴の RF 位相を 0.03 度 RMS (時間換算で 16fs RMS) の精度で測定し、フィードバック制御することが可能である^[7]。精密温度調整装置^[8]においても、加速空胴の温度を 0.1 K pk-pk を十分下回る安定度で制御できることがわかっている。それでもなお、図 1 に示すような変動が依然として存在しているので、各加速器構成要素の安定度を改めて精査し、安定度向上に向けた対策をおこなった。

本稿では、XFEL 強度の変動要因について調査した結果を示し、目標とする XFEL 強度安定度を達成するための対策とその結果について報告する。

2. 安定化の指針

安定化の指針を考えるうえで、まず、加速器の各部の変動は下流に進むにつれて蓄積されていくことを考慮する必要がある。たとえば、238MHz 空胴で RF 位相変動が起こると、その影響でビームの速度が変わり、476MHz 空胴でビームが感じる加速位相がずれる。それがさらに下流へと伝搬し、すべての加速空胴においてビームの乗る加速 RF 位相がずれる。そのため、上流でおこった変動は雪だるま式に蓄積されることとなる。これを防ぐには、各加速空胴の変動を最小限に抑える以外にない。

ビームモニタでビームのエネルギーやバンチ長を測定して上流の加速空胴にフィードバックをかけることも考えられるが、SACLA の BC1 より上流ではそれは難しい。BC1 にはビームのエネルギーを測るためのエネルギー分散部用ビーム位置検出器^[9]、バンチ長を測定するための CSR 検出器^[10]や、BC1 入口でのビーム到達時間モニタがあるが、それらの情報だけでは不十分である。というのは、BC1 より上流には加速空胴だけでも 5 種類あり、それぞれに位相と振幅の自由度があるため、それだけで 10 個の自由度が存在するからである。これらの変動要素をすべて分離できるだけのビームモニタを設置するのは、その方法・設置スペース・コストのいずれの面

においても困難である。したがって、BC1 の上流では、それぞれの加速空胴で個々に変動を抑えるしかない。

BC1 より上流の変動が抑えられれば、BC2 と BC3 については、ビームエネルギーやバンチ長の情報をそれぞれ上流の S-band 加速器、C-band 加速器の位相や振幅にフィードバックをかけることが可能である。しかし、BC1 で変動がある場合は、BC2 や BC3 で観測される変動が BC1 より上流から来ているのか、下流から来ているのかの切り分けができない。このことから、BC1 より上流の安定度が重要であることがわかる。

以上のことから、BC1 より上流の加速空胴の安定度を向上させることを最優先に進めることとした。具体的には、BC1 より上流の加速空胴の温度安定度を向上させたり、加速 RF の位相安定度を改善したりすることによって XFEL の強度を安定させることを目指した。

3. 変動要素とその対策

3.1 XFEL 強度変動の周波数特性

XFEL 強度の変動要素を推定するため、まず、強度変動の周波数特性を FFT により解析した。その結果を図 3 に示す。この図から、0.5 Hz と 1.0 Hz に鋭いピークがあり、1 Hz 以下では低周波にいくにつれて徐々に変動が大きくなっていることがわかる。このことから、長期変動についてはこのデータからは特定することができないものの、短期変動は 0.5 Hz の変動が主に影響していることが推定される。

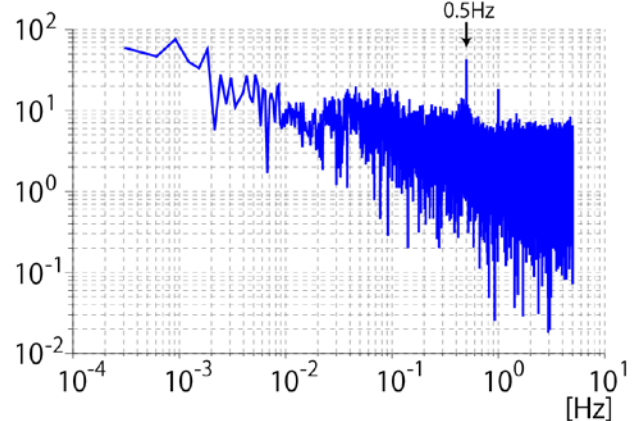


図 3 : XFEL 強度変動の周波数特性。

3.2 短期変動要素

短期変動の原因として 0.5 Hz の成分が何と相関が

あるかを調べたところ、BC1 直後のビーム位置変動に顕著に現れていることがわかった^[11]。ビーム位置変動の周波数解析をすると図 3 と同じ 0.5Hz のピークが見られた。そして、図 4 に示すように XFEL 強度とも強い相関があった。おそらく、BC1 より上流の加速 RF に 0.5 Hz の変動があり、それがビーム位置の変動を引き起こしていると考えられる。そして、その位置変動がアンジュレータ部に伝播し、電子ビームと X 線の軌道がずれて FEL 相互作用が弱まることにより XFEL 強度変動が起こったものと思われる。また、ビーム位置が変わるほどの RF 位相変動があるということは、バンチ圧縮率にも影響があることは容易に想像できる。XFEL 強度変動はそういった原因の重ね合わせで引き起こされているのではないかと考えられる。

この 0.5 Hz の変動と同期しているのは、加速空洞の精密温度調節装置^[8]のヒータの PWM (Pulse Width Modulation) であることがわかった。この温度調節装置は 10 l/min 程度の流量の冷却水に対して 5kW 程度のヒータを 0.5Hz で ON/OFF して温度制御しているので、単純計算で水温自体は 0.5 Hz で 1 K 程度の幅で上下していることとなる。これが加速空洞に温度変動を与え、共振周波数が変動することにより加速 RF の位相にわずかな変動を与えているものと考えられる。また、ヒータケーブルからの漏れ磁場によるキックも捨て切れない。この変動を抑えるには PWM 制御ではなく、DC でヒータを動作させ、そのパワーを連続的に変化させる必要がある。そのため新しい精密温度調節装置^[12]を現在準備中である。

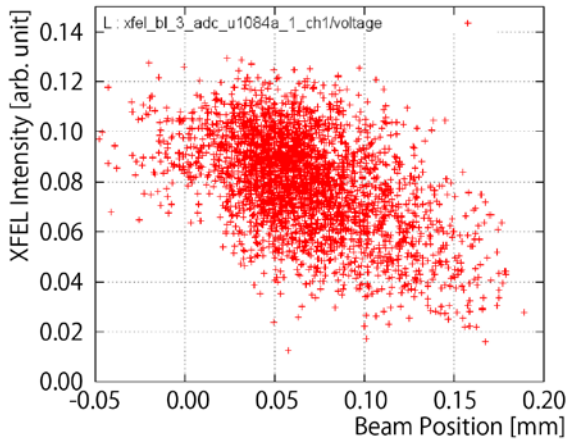


図 4：XFEL 強度と BC1 出口のビーム位置の相関プロット。横軸は BC1 出口での鉛直方向ビーム位置で縦軸は XFEL 強度を表している。

3.3 長期変動要素 1：加速空洞温度

すでに述べたように各加速空洞は精密温度調節装置にて 0.08 K pk-pk 以内に安定化されている。しかし、それでも空洞温度変動に起因すると思われる加速 RF の変動が見られることがわかった。たとえば、L-band APS 空洞は 1 本のクライストロンから 2 本の APS 空洞を励振している。各 APS 空洞はそれぞれ独立の温度調節計で温度制御されている。本来はその 2 本の空洞の加速 RF 位相は変動しないはずであ

るが、空洞間の加速 RF 位相に変動が見られたのである。調査の結果、温度調節に用いている PLC モジュールに変動があることがわかった^[12]。温度測定に用いている白金測温抵抗体の代わりに高精度の標準抵抗を接続し、モジュールのドリフトが見えるようにしたときの測定温度のトレンドグラフを図 5 に示す。0.08 K pk-pk を満たしているが、その中に数時間周期の変動が見られることがわかる。以上のことから、一般の PLC モジュールでは安定度が不十分で、さらに高精度な温度調節計を使用する必要があることが判明した。

新しい高精度な温度調節計として、理化学工業社の F9000 を試験的に導入した^[12]。この調節計は 0.001 K の分解能を持ち、標準抵抗を用いて測定した精度は 0.004 K pk-pk であることを確認している。それを示すデータを図 6 に示す。これにより加速空洞の温度

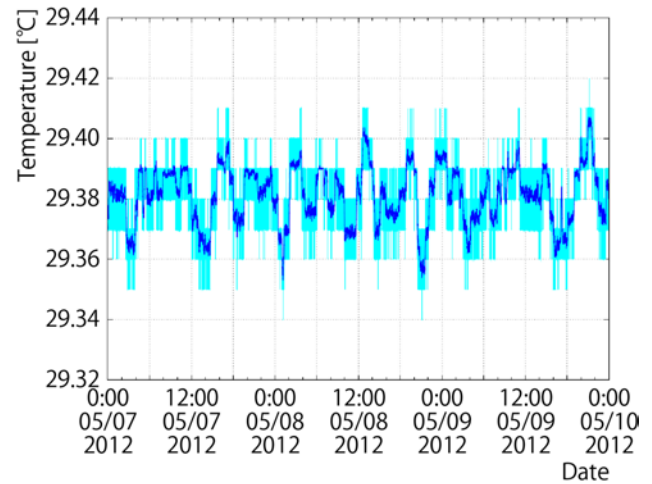


図 5：PLC の温度調節モジュールに高精度標準抵抗を接続したときの温度指示値のトレンドグラフ。横軸はフルスケール 72 時間で、縦軸は 0.02 K/div である。水色の線が生データで、濃い青の線は 10 点の移動平均を示す。

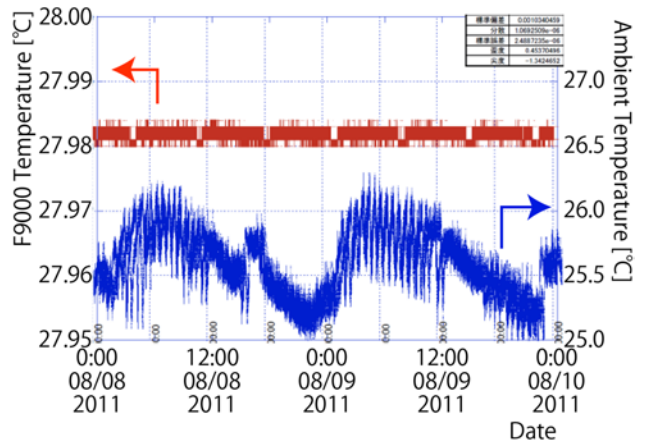


図 6：新温度調節計 F9000 に高精度標準抵抗を接続したときの温度指示値のトレンドグラフ（赤線）。青線はその時の室温の変動である。横軸はフルスケール 72 時間で、赤線の縦軸は 0.01 K/div. で、青線の縦軸は 0.5 K/div. である。

安定度が約 10 倍改善され、加速空洞の温度変動に起因する加速 RF 位相の変動はかなり小さくすることができている。新調節計の導入前後の 238MHz 空洞の RF 位相制御量のトレンドグラフを図 7 に示す。加速空洞の温度変動による位相変動が低減され、制御量の変動が小さく済んでいることがわかる。そして、この新調節計と前節で述べたヒータの DC 制御を組み合わせることで、温度変動による XFEL 強度変動を極めて小さくすることができると考えている。

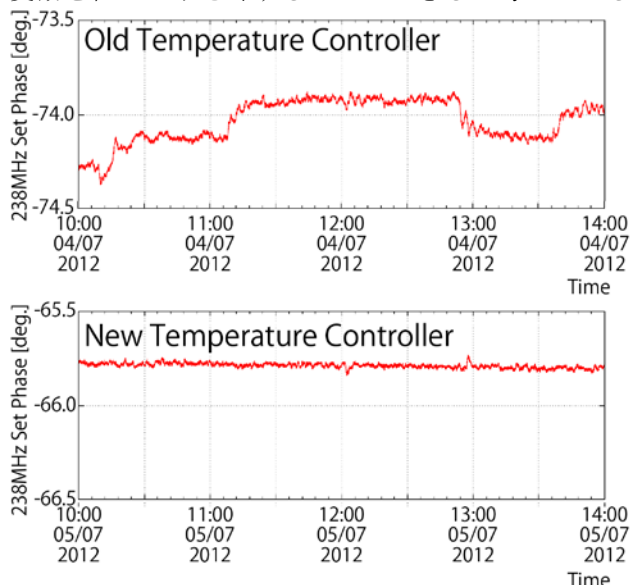


図 7：新温度調節計の導入前後の 238MHz 空洞の RF 位相制御量の比較。上図が導入前、下図が導入後である。横軸は 0.5 時間/div., 縦軸は 0.5 度/div. である。

3.4 長期変動要素 2：低電力 RF 系

加速 RF 位相の長期変動要素のひとつとして、低電力 RF 系も原因として考えられる。SACLA では、各加速空洞を同期するために、RF 信号を光信号に変換し、光ファイバにて伝送している。その光ファイバが伸び縮みすることによる変動や、光受信機のドリフトによる変動が考えられる。また、加速 RF 信号を生成したり検出したりするために IQ (In-phase and Quadrature) 変調器・復調器を使用しており、そのドリフトによる変動も考えられる。これらの低電力 RF 系は加速 RF 位相の基準信号となるものなので、ドリフトがあるとそのまま加速 RF に影響がおよぶ。そのため、水冷式筐体を用いて RF 回路や光ファイバの温度が 0.1 K pk-pk に安定化できるようにするなどの対策を講じており、数 100 fs pk-pk の安定化ができる設計をしてきた。

その安定度を確認するため、各加速空洞でのビーム到達時間を定期的に測定した。測定方法としては、加速空洞の励振 RF を OFF にした状態でビームを通し、そのときに得られる RF 信号の位相から到達時間を求める方法をとった (ビーム誘起法)^[11]。その結果、大きいもので 238MHz 空洞にて 10 ps もの長期位相変動があることがわかり、それが XFEL 強度

と相関を持っていることがわかった。また、476MHz 空洞以降の到達時間変動はほぼ相関しているのに対し、238MHz 空洞での変動はその他の空洞との相関が小さい傾向があった。このことから、238MHz 空洞周辺の位相変動の影響が大きいことが疑われる。

その原因のひとつの例として、光受信機の温度変動が大きいことによるものがあつた。それは、238MHz 空洞を励振する RF 信号を生成するための光受信機で、その回路内にある 238MHz のバンドパスフィルタが約 10ps/K の温度係数を持っていた。この光受信機は水冷式筐体内で 0.1 K に温度安定化されているが、それでも 1ps 程度の変動があることになる。そこで、バンドパスフィルタを温度係数の小さいもの (2 ps/K 以下) に交換する予定である。それに加えて、水冷式筐体にも精密温度調節装置を使うことにより、低電力 RF 回路の温度を 0.01 K に安定化するための改造をおこなっている。

ほかにも、基準 RF 信号を伝送する光ファイバの温度係数によるものが考えられる。基準 RF 信号用の光ファイバは温度係数が 2 ppm/K と小さいものを使用し、それを水冷式ダクトに敷設して温度を ±0.1K に安定化して使用している。それでも、数 100m 伝送すれば数 100fs の変動があるので、その影響も無視できない。この対策として、光ファイバの伸び縮みを抑えるためのファイバ長制御装置^[13]を導入する予定である。それにより、時間換算で 100 fs pk-pk の加速 RF 位相安定度を達成することを目指している。

このように、図 8 に示すような 10 ps もの変動は、上記の低電力 RF 系の変動に加えて、前節で述べた加速空洞の温度変動が相まって引き起こされていたと考えられる。今後も、変動要素がほかにないか調査を進めるとともに、安定度向上に向けて改善を進める予定である。

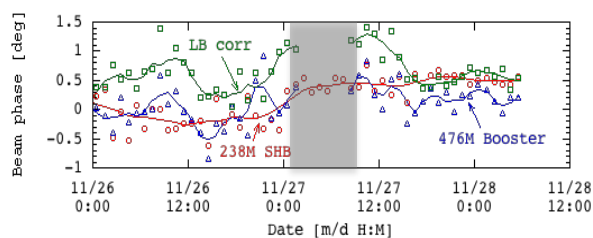


図 8：ビーム誘起法により測定した入射部の各加速空洞でのビームの到達時間の変化。横軸はフルスケール 60 時間で、縦軸は各空洞の RF 位相を示し、238MHz では 11.7 ps/度、476MHz では 5.8ps/度、L-band (1428MHz) では 1.9ps/deg に相当する。

4. 現状の安定度と今後の課題

前節までに示した安定度改善策を進めた結果、現状で図 9 に示すような XFEL 強度安定度を達成することができている。しかし、この安定度を維持するためには、何回か運転員による入射部の加速 RF 位相の微調整がおこなわれている。とはいえ、短期安

定度でほぼ 10% RMS, 長期安定度 (移動平均値) でほぼ 10% pk-pk の強度安定度が数日にわたって実現できる程度までに達している。

今後, 精密温度調節装置の DC 化や, 光ファイバ長制御装置を導入するなどしてさらなる安定度向上をおこなう予定としている。また, BC1 より上流の構成品の安定度が十分となった場合, BC2, BC3 のバンチ長の安定化をおこなうためのフィードバック制御を導入することを考えている。それらの対策がすべて講じられたのちには, 何も調整しなくても XFEL 強度が十分安定に供給できる状況が達成できることを目指している。

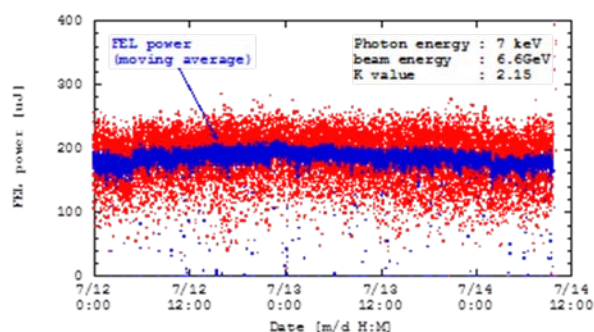


図 9: 現状の XFEL 強度のトレンドグラフ。横軸はフルスケール 60 時間で縦軸は XFEL 強度を μJ で示している。赤点は各ショットのデータで, 青点はその移動平均である。

5. まとめ

SACLA の XFEL 強度は, 初発振当初は数時間で半分に下がるほどの状況で, 安定に利用できる状態ではなかった。そのため, 強度安定化を目指して各加速器構成品の変動調査をおこない, 変動の低減をおこなってきた。その結果, 短期変動として精密温度調節装置の PWM 制御の 0.5Hz が影響していたり, 長期変動としては温度調節計の PLC モジュールのドリフトであったり, 低電力 RF 系の温度係数の問題であったりと, いくつかの変動要因が見つかった。それらの要因に対して安定化対策を講じたところ, 運転員による微調整をしさえすればユーザ供用に耐えうる安定度 (短期 10% RMS 程度, 長期 10% pk-pk) を達成することができた。今後, まだ完了していない安定化項目を遂行し, 最終的には何も微調整をしなくても十分な XFEL 強度安定度が得られるようにしていく予定である。

参考文献

- [1] T. Ishikawa, *et al.*, Nature Photonics advance online publication, 24 June 2012 (doi:10.1038/nphoton2012.141).
- [2] H. Tanaka, “Operation Status and Performance Upgrade Plan of SACLA”, in these proceedings.
- [3] H. Tanaka, *et al.*, “Basic Design of Beam Parameters for XFEL/SPRING-8”, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 610-612 (2007).
- [4] H. Tanaka, *et al.*, “Bunch Length Variation and Timing Jitter Caused by RR System Instability in XFEL/SPRING-8”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2011).
- [5] Y. Otake, “Commissioning and Performance of Instruments for XFEL/SPRING-8 Accelerator ‘SACLA’”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2011).
- [6] K. Shirasawa, *et al.*, “Operation Status of the SACLA Main Accelerator”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2011).
- [7] T. Ohshima, *et al.*, “Performance of Timing and LLRF System of XFEL/SPRING-8 ‘SACLA’”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan, (2011).
- [8] S. Takahashi *et al.*, “Precise Temperature Regulation System for C-band Accelerating Structure”, Proceedings of APAC’04, 678-680 (2004).
- [9] H. Maesaka, *et al.*, “Development of a Multi-Stripline Beam Position Monitor for a Wide Flat Beam of XFEL/SPRING-8”, Proceedings of IPAC’10 (2010).
- [10] C. Kondo, *et al.*, “Development of Bunch Length Monitors Utilizing Coherent Synchrotron Radiation at SACLA II”, in these proceedings.
- [11] T. Asaka, *et al.*, “Variability Analysis of a Beam at SACLA”, in these proceedings.
- [12] T. Hasegawa, *et al.*, “Upgrade of a Precise Temperature Regulation System for the Injector at SACLA”, in these proceedings.
- [13] 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).