

VARIABILITY ANALYSIS OF A BEAM AT SACLA

Takao Asaka, Takahiro Inagaki, Takashi Ohshima, Teruaki Hasegawa,
Kazuaki Togawa, Hirokazu Maesaka and Yuji Otake
RIKEN SPring-8 Center
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

Abstract

To realize the stable lasing at the SACLA, it is necessary to obtain stabilities of 100ppm and 50fs in the amplitude and timing of accelerating rf field, respectively. The achievement of the rf stabilities were almost satisfactory for the target values. Consequently, an 8-GeV beam energy stability was 0.02% (std.) or less. However, there is mainly XFEL power variation affected from two components. The first one is the long-term component over several hours, which are in agreement with the rf phase drift of the 238-MHz SHB. From this fact, we figured out the low level rf system of SHB is affected by slight change of environment temperature. The other one was XFEL power fluctuation caused by a variation of a beam position in a 30-MeV injector section. A periodically changed beam position of 0.03mm (std.) was found out at a cycle of 0.5Hz by the Fourier transform method using BPM data. The temperatures of all the injector rf cavities are kept within $28 \pm 0.04^\circ\text{C}$ by controlling the cooling water temperature. The AC power supplies of the controller to heat the cooling water are operated at 0.5Hz by pulse width modulation control with alternatively turning on and off. The strong correlation between laser intensity fluctuation and the modulation frequency of the AC power supplies was found out. We are planning to improve the cavity temperature variation in the order of less than 0.01K with DC power supplies to establish continuously regulated cavity temperature. This report presents the detail of the above-mentioned method and improved laser performance.

SACLA 加速器のビーム変動解析

1. はじめに

SACLA は、1 年間のビームコミッショニングを経て、本年 3 月より供用運転を開始した^[1]。ビームコミッショニング期間中は、レーザー強度の高出力化を目指した線形加速器・アンジュレータの精密調整と並行して、高水準なビーム安定化を実現するための調査・分析を実施した^[2,3,4]。

本来、X 線自由電子レーザーを実現するためには、電子ビームの高品質化とともに従来の加速器技術で得られる安定度より 1 桁から 2 桁上回る性能が要求される^[5]。本加速器の機器設計・製作では、環境温度変化、電源変動、機械的振動などの変動要因に対して、徹底した安定化対策を講じている。その結果、各高周波空洞では、ギャップ電圧・位相の安定度は 100ppm 以下、50fs (時間換算) 以下を達成しており、線形加速器から出力される 8GeV の電子ビームは 0.02% のエネルギー安定度を実現している^[6,7]。

しかしながら、加速器パラメータ最適化後のレーザー強度は、数時間経過後には減少してしまい、レーザー強度の回復には、数十分を要する加速器の再調整が余儀なくされていた。効率的な利用実験を実現する上で、この長期変動の支配的要因の特定とその対策・改善が急務の課題であった。この変動調査の結果、加速器各部に配置された BPM から取得されるビーム到達時間変化^[8]とレーザー強度の相関測定から、速度変調による電子集群用高周波空洞 (SHB) の高周波電力・位相変化が主要原因であることを特定した。これは SHB の低電力高周波系を

実装している 19 インチラック内のわずかな温度変化によるものと判明した。

さらに、SHB、ブースター空洞、初段加速部、補正空洞で構成される 30MeV 入射部において、0.5Hz 周期で $30\mu\text{m}$ (std.) のビーム位置変動が確認され、これがレーザー強度に影響を与えていた。各高周波空洞の冷却水用ヒーターは PWM (Pulse Width Modulation) を伴う 0.5Hz の on/off 制御により 0.08K 以下で保持されているが、上述した周期的なビーム位置変動は、この精密温度制御方法に同期していることが変動周波数分析、相関測定により明らかになった。

現在、レーザー強度の長期変動については、SHB の位相を主たる調整項目とすることで、簡易にレーザー強度回復が可能となり、利用実験では、図 1 に示すような安定したレーザー供給を実現している。

本稿では、上述したレーザー強度の長期、短期変動について、変動要因調査方法とその測定結果、変動要因の特定とその対応策について報告する。

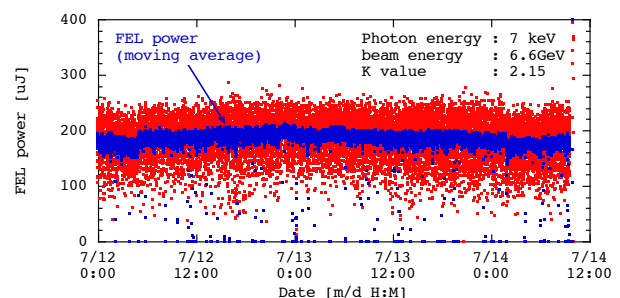


図 1 : 利用実験におけるレーザー強度安定性

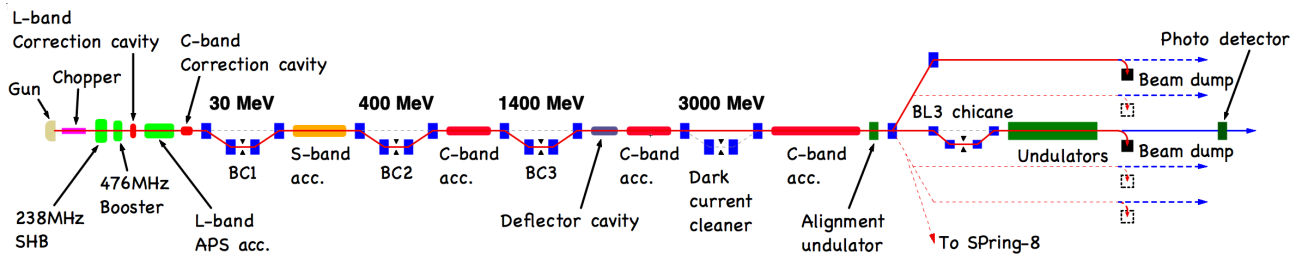


図 2 : SACLA 加速器部、アンジュレータ部の主要機器配置

2. ビームパラメータの長期変動

2.1 レーザー強度変動測定

ビーム・加速器構成機器パラメータの変動周期、ならびにレーザー強度変動の原因特定のために、3日間の連続運転を実施した。このときのレーザー発振条件は、ビームエネルギーを 7GeV、X 線レーザーのエネルギーは 10keV とし、加速器最適化直後のレーザー強度は 0.13mJ であった。通常の運転時に導入されるビームエネルギーフィードバック制御は停止し、加速空洞の高周波電力・位相フィードバック制御（クライストロン部は位相のみ）とアンジュレータ部のビーム軌道フィードバック制御を動作させた。レーザー強度は、図 2 の主要機器配置図に示したアンジュレータ部下流にある光検出器で測定された。最初に加速器の調整・最適化した後は、全ての構成機器パラメータを変更せずにレーザー強度変化の時間推移を観測した。

図 3 に本測定で取得されたレーザー強度変化を示す。測定中、機器制御システムの一部機能停止による著しいレーザー強度低下が発生したが、システムの機能修正、加速器パラメータ再設定の後、レーザー強度測定を継続した。

2.2 ビーム到達時間、エネルギー、環境温度測定

図 3 に示したレーザー強度の数時間におよぶ長期変動要因を特定するために、ビームエネルギー、ビーム電流、ビーム位置、ビーム到達時間の同時測定をおこない、各時系列データの比較、一次相関解析、周波数分析をおこなった。加速器各部のビームエネルギーは各磁気バンチ圧縮装置（BC1、BC2、BC3）のエネルギー分散部に設置してあるマルチストリップライン型 BPM により観測される。また、各高周波空洞へのビーム誘起電圧、BPM の位相情報がビーム到達時間測定に用いられた。

図 4 には、BC1 直後のビーム到達時間（4760MHz の位相）、エネルギー変化（BC2 のエネルギー分散部）

を示す。0.91 の高い相関係数をもつことから、この

レーザー強度変化の原因は、入射部の電子速度の変調・加速領域で生じていると考えられる。さらに図 6 には、SHB、ブースター空洞、L バンド補正空洞へのビーム誘起電圧の位相情報から得られたビーム到達時間変化の様子をまとめて示す。これらの時系列データの比較から、ブースター空洞以降は類似した変化傾向であることが分かる。以上の結果から、長期変動の支配的要因は SHB の高周波電力・位相変動によるものと推定し、その周辺機器に対する調査をおこなった。

238MHz SHB の低電力高周波系は 0.1°C 以内で温度制御された 19 インチラック内に実装されているものの、図 7 に示すように、ラック内部が環境温度変化からわずかに影響を受けている。この低電力高周波系の構成機器である基準高周波信号 O/E 変換・分配器で使用している -10.6ps/K の温度特性をもつバンドパスフィルタが原因として考えられる。このため 2ps/K のバンドパスフィルタへの交換とともに、19 インチラック内温度の精密制御を計画している。

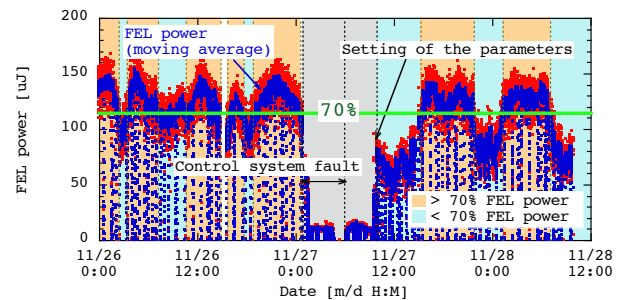


図 3 : レーザー強度の時間変化（ビームエネルギーフィードバック機能停止、アンジュレータ部の軌道フィードバック機能動作）

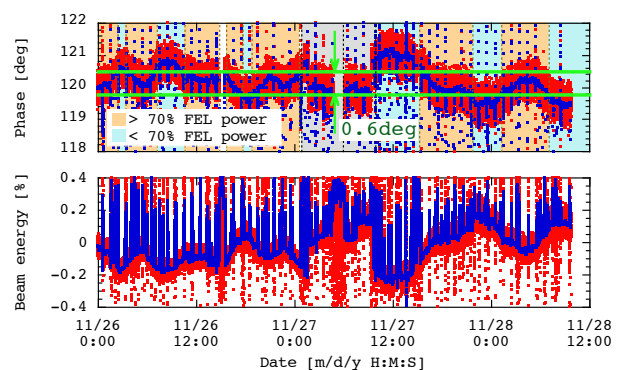


図 4 : BC1 直後のビーム到達時間（4760MHz の位相）、エネルギー変化（BC2 のエネルギー分散部）

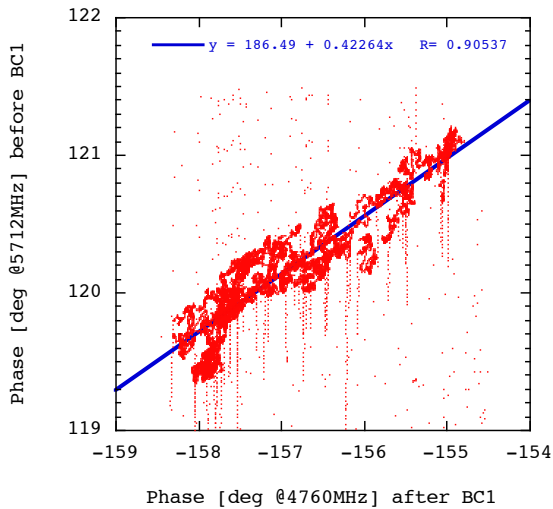


図 5 : BC1 前後におけるビーム到達時間の相関図 (相関係数 : 0.91)

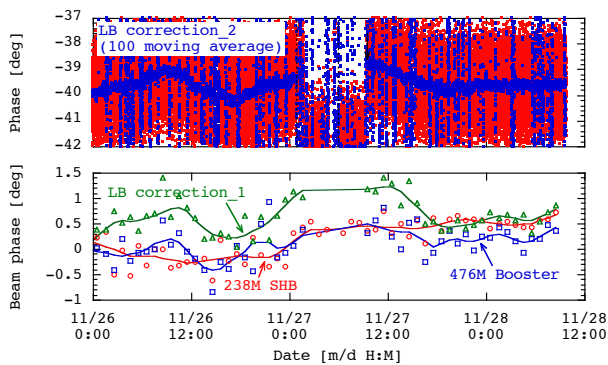


図 6 : 入射部各部分におけるビーム到達時間変化 (238MHz SHB、476MHz ブースター空洞、Lバンド補正空洞へのビーム誘起電圧より得られる位相と 5712MHz 基準信号との比較)

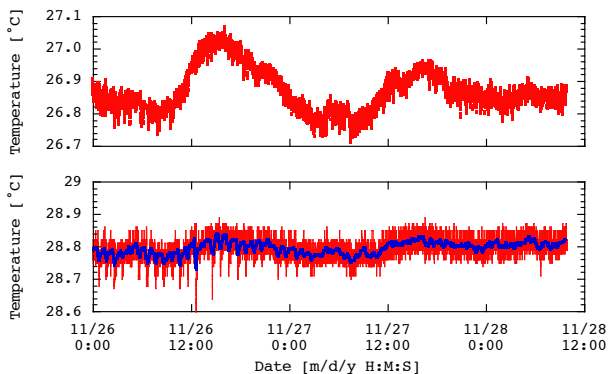


図 7 : クライストロンギャラリー温度 (上図)、19 インチラック内温度 (下図)

3. ビーム位置の短期変動

3.1 レーザー強度とビーム位置の相関測定

レーザー強度の短期的変動分析は、加速器各部に配置されたビームモニターから、ビームショット毎に同期計測した取得データを用いている。本測定は、

10Hz の繰返し周波数で出力されるビームについて実施した。測定の間、加速空洞の高周波電力・位相フィードバック制御 (クライストロン部は位相のみ)、主加速部のビームエネルギーフィードバック制御、およびアンジュレータ部における軌道フィードバック制御は動作している。以下に示す測定結果は、5 分間 (3000 ショット) の取得データを使用している。図 8 に示すように、アンジュレータ部のビーム位置変動がレーザー強度へ有意な相関をもつことが分かる。その変動起源を特定するべく、加速器各部のビーム位置変動について同様の相関解析をおこない、その変動要因箇所を特定する。図 9 に示す BC1 直後とアンジュレータ部のビーム位置変動との相関図から、明らかに BC1 より上流部、すなわち入射部におけるビーム位置変動がレーザー強度へ影響していることが理解できる。ここで得られる BC1 直後のビーム位置変動量は $30\mu\text{m}$ (std.) であった。

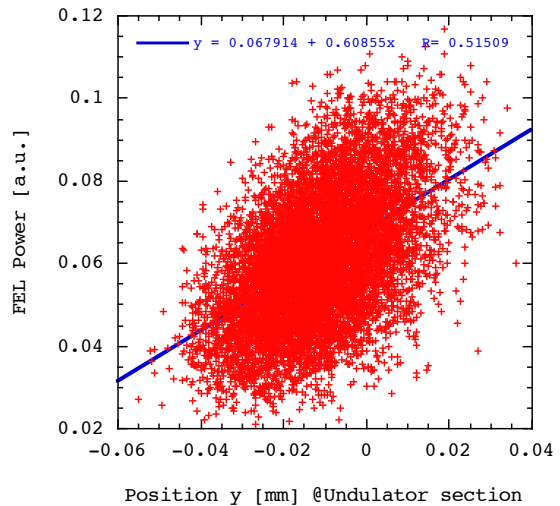


図 8 : アンジュレータ部のビーム位置変動とレーザー強度変動の相関図 (相関係数 : 0.52)

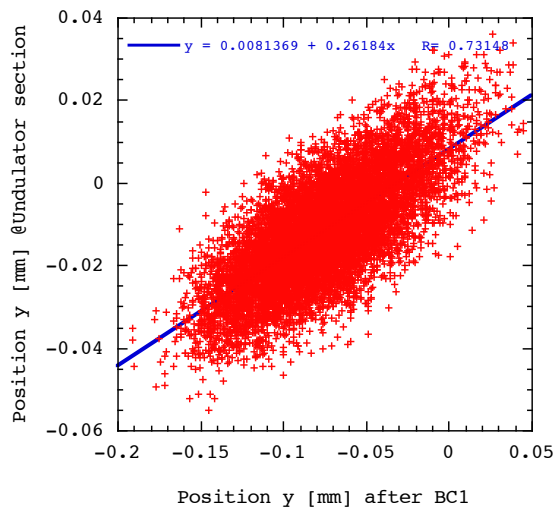


図 9 : BC1 直後とアンジュレータ部のビーム位置変動の相関図 (相関係数 : 0.73)

3.2 ビーム位置変動の周波数分析

BC1 直後のビーム位置変動に対する周波数分析の結果を図 10 に示す。0.5Hz 付近に変動周波数のピークをもつが、これは入射部の全高周波空洞用の冷却水精密温度調整装置によるヒーター電流 on/off 制御周波数と一致している。この精密温度調整装置は PWM (Pulse Width Modulation) とヒーター電流 on/off 制御を組み合わせ高周波空洞温度を 0.08°C 以下で保持している。また、図 10 に示すように入射部の全高周波空洞に対して、ヒーター電流 on/off 制御を 2Hz に変更した場合、ビーム位置変動周期もそれに応答する結果を得た。

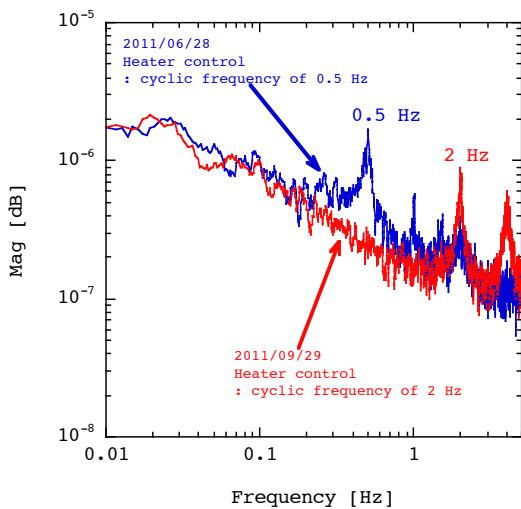


図 10 : BC1 直後のビーム位置変動の周波数分析 (入射部における高周波空洞冷却水温度のヒーター電流 on/off 制御を 0.5Hz、2Hz にした場合)

3.3 高精度温度制御システム

高周波空洞用冷却水の温度調節用ヒーター電流 on/off 制御がビーム位置変動、そしてレーザー強度へ影響していることから、ヒーター用 AC 電源を DC 電源に置換え、さらに連続的にヒーター電流を可変制御する方式に切り換えることで、短周期変動の抑制を図る。これと同時に、従来使用している温度検出器がもつ 0.1°C のドリフトを抑制するために高分解能温度調節装置 (理化工業社製 F9000) を導入予定である。現在、この冷却水温度の新制御システムによる動作試験をおこなっており、数日にわたって 0.01°C 以下の安定性を達成していることを確認している⁹⁾。

4. まとめ

昨年 6 月に X 線自由電子レーザー発振が初めて観測されて以降、利用実験に向けて高水準なビーム安定化を目指した調査、対策を実施してきた。レーザー強度の変動周期を分類し、その主要原因の予測、またそれを踏まえた応答測定を実施することにより、問題の早期解決を目指した。

長期変動については、その支配的要因と変動のメカニズムを把握することが、安定したレーザー供給を実現する上で必要不可欠であった。この変動調査の一つとして、3 日間の加速器運転、レーザー強度測定を実施し、各ビームパラメータ、機器パラメータとの相関分析をおこなった。取得データ解析の結果、変動の主要原因が SHB の高周波位相変化によるものと判明した。SHB のわずかな位相変化が BC1 前のビーム到達時間に伝達し、磁気バンチ圧縮装置を経るにしたがって、さらにビーム位相、エネルギー変化が増大していく。これがバンチ圧縮に影響するものと考えられる。現在、これらの結果を踏まえ、BC1 前のビーム到達時間変化に対応した SHB の位相調整を加速器運転員が手動でおこなうことで、簡易、かつ迅速なレーザー強度回復が可能となっている。今後、温度に敏感な低電力高周波機器の特定と改善、ならびに温度の精密制御を導入することによる長期的な安定化を実現する。

レーザー発振当初、アンジュレータ部におけるビーム位置の短期変動がレーザー強度へ影響し、またレーザー位置変動として現れていた。変動成分の周波数分析、また応答測定により、この変動原因が入射部の高周波空洞の温度制御にしたがうものと判明した。現状では、加速器、アンジュレータの精密調整、機器パラメータの最適化からビーム性能が向上し、レーザー強度が増したためにその変動の影響は低減している。不安定要素の除去のために、入射部の高周波空洞に対して 0.01K 以下の温度制御が可能となる新システム開発をおこないさらなる安定化を図る。新制御システム導入の際、短周期変動は抑制され、従来、BC1 後方で生じていた 30 μ m のビーム位置変動は 1/5 以下の抑制を見込んでいる。この効果によるレーザー強度、ならびにレーザー位置変動の更なる安定化を目指す。

参考文献

- [1] H. Tanaka, "X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況と今後の高度化", in these proceedings.
- [2] T. Hara, et al., "SACLA 電子ビーム性能向上に向けての取り組み", in these proceedings.
- [3] T. Tanaka, "SACLA における光源性能評価と光源高度化", in these proceedings.
- [4] H. Maesaka, "SACLA XFEL 強度安定化", in these proceedings.
- [5] H. Tanaka, et al., "XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能に及ぼす RF 機器変動の影響評価", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, (2007).
- [6] T. Asaka, et al., "X 線自由電子レーザー施設 SACLA 入射部の RF システム性能", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, (2011).
- [7] Y. Otake, "XFEL/SPring-8 の加速器構成機器の試運転と性能", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, (2011).
- [8] T. Ohshima, et al., "SACLA における電子ビーム到達時間測定", in these proceedings.
- [9] T. Hasegawa, et al., "SACLA 入射部の精密温度調整装置高度化", in these proceedings.