

# SACLA 軟 X 線自由電子レーザービームラインのビーム特性

## BEAM CHARACTERISTICS OF THE SOFT X-RAY FREE-ELECTRON LASER BEAMLINE OF SACLA

渡川和晃<sup>#,A)</sup>, 安積隆夫<sup>A)</sup>, 原徹<sup>A)</sup>, 長谷川照晃<sup>A)</sup>, 細田直康<sup>A)</sup>, 稲垣隆宏<sup>A)</sup>, 金城良太<sup>A)</sup>, 近藤力<sup>A)</sup>, 前坂比呂和<sup>A)</sup>, 松井佐久夫<sup>A)</sup>, 大島隆<sup>A)</sup>, 大竹雄次<sup>A)</sup>, 大和田成起<sup>A)</sup>, 田中隆次<sup>A)</sup>, 矢橋牧名<sup>A)</sup>, 田中均<sup>A)</sup>, 石川哲也<sup>A)</sup>, 安積則義<sup>B)</sup>, 備前輝彦<sup>B)</sup>, 木村洋昭<sup>B)</sup>, 松原伸一<sup>B)</sup>, 中嶋享<sup>B)</sup>, 櫻井辰幸<sup>B)</sup>, 富樫格<sup>B)</sup>, 登野健介<sup>B)</sup>, 田尻泰之<sup>C)</sup>, 田中信一郎<sup>C)</sup>

Kazuaki Togawa<sup>#,A)</sup>, Takao Asaka<sup>A)</sup>, Toru Hara<sup>A)</sup>, Teruaki Hasegawa<sup>A)</sup>, Naoyasu Hosoda<sup>A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Ryota Kinjo<sup>A)</sup>, Chikara Kondo<sup>A)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>A)</sup>, Sakuo Matsui<sup>A)</sup>, Takashi Ohshima<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>, Shigeki Owada<sup>A)</sup>, Takashi Tanaka<sup>A)</sup>, Makina Yabashi<sup>A)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>A)</sup>, Tetsuya Ishikawa<sup>A)</sup>, Noriyoshi Adumi<sup>B)</sup>, Teruhiko Bizen<sup>B)</sup>, Hiroaki Kimura<sup>B)</sup>, Shinichi Matsubara<sup>B)</sup>, Kyo Nakajima<sup>B)</sup>, Tatsuyuki Sakurai<sup>B)</sup>, Tadashi Togashi<sup>B)</sup>, Kensuke Tono<sup>B)</sup>, Yasuyuki Tajiri<sup>C)</sup>, Shinichiro Tanaka<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute

<sup>C)</sup> SPring-8 Service Co., Ltd.

### Abstract

At the x-ray free-electron laser (FEL) facility, SACLA, a spontaneous beamline-1 (BL1) has been upgraded to a soft x-ray FEL beamline. A dedicated electron-beam accelerator, which is a refinement of the SCSS test accelerator, was installed beside the hard XFEL beamlines in the SACLA undulator hall. In the 2016 summer shutdown period, the electron beam energy was upgraded from 500 MeV to 800 MeV by adding two C-band rf units. The maximum K-value of the undulator magnet is 2.1. The available wavelengths of the FEL lights were extended to the range from 8 to 60 nm with the pulse energies between several to one hundred microjoules at a pulse repetition rate of 60 Hz. In this paper, we report an overview of the upgraded SACLA-BL1 and characteristics of the electron beam and the FEL light beam.

### 1. はじめに

理化学研究所は、SPring-8 キャンパスにおいて X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA を建設し、2012 年より大強度超短パルス X 線レーザーを用いたユーザー利用実験を行っている [1]。挿入光源等を納めるアンジュレータホールは、軟 X 線領域から硬 X 線領域にわたる幅広い波長領域をカバーするために、合計 5 本のビームラインが設置できるように設計されている。線形加速器はエネルギーが 5 GeV から 8 GeV の電子ビームを供給し、中央の 3 本のビームラインで波長が 0.08 nm から 0.3 nm の硬 X 線レーザーを提供することを想定している。パルス毎の電子ビーム振り分けシステムは既に完成しており、2 本の硬 X 線ビームラインにおける同時振り分けユーザー運転が本年度の 9 月より開始される [2-4]。一方、両端の 2 本のビームラインは軟 X 線の利用を想定しており、そのうちの 1 本は短パルスの自発光を発生する広帯域ビームラインとしてスタートした。その後、このビームラインを極端紫外から軟 X 線領域をカバーする FEL 装置として働かせるために、2013 年にシャットダウンした SCSS 試験加速器 [5] を SACLA アンジュレータホール内に移設し、電子ビームエネルギーの増強 (250 MeV から 500 MeV) やアンジュレータの増設 (2 台から 3 台) 等のアップグレードを行なった。2016 年には電子ビームのエネルギーをさらに 800 MeV にま

で増強し、波長が 8 nm から 60 nm の範囲の軟 X 線 FEL パルスビームを提供するユーザー利用マシンとして完成した。

本論文では、SACLA の軟 X 線 FEL 用ビームライン (SACLA-BL1) の概要と、電子ビーム及び FEL ビームの特性に関して述べる。

### 2. 装置の概要

SACLA-BL1 の概略図を Figure 1 に示す。入射器は SCSS 試験加速器から特に大きな変更を加えずに移設した。ピーク電流 1 A のマイクロ秒パルス電子ビームが繰り返し 60 Hz で CeB<sub>6</sub> 熱電子銃から生成され [6]、チョッパーにより 1 ns 幅の短パルスビームが切り出される。切り出された短パルスビームは、238 MHz バンチャー空洞と 476 MHz ブースター空洞により約 10 ps にまで縦方向に圧縮され、S バンド加速管に入射される。S バンド加速管では、エネルギーチャープを与えながら電子ビームを 49 MeV にまで加速し、その次の第一バンチ圧縮器 (BC1) で 2 ps に圧縮する [7]。

SCSS 試験加速器や SACLA と同様に、主加速部には C バンド加速システムを使用している [8]。1 ユニットあたり 2 本の進行波管で構成されており、合計で 5 ユニットが使用されている。SACLA-BL1 では、加速勾配を高めるために、ディスクロード型  $2\pi/3$  モードの進行波管を新たに開発した [9]。通常運転における加速勾配は 42 MV/m である。最初の 3 ユニットは、入射器の S バ

<sup>#</sup> togawa@spring8.or.jp

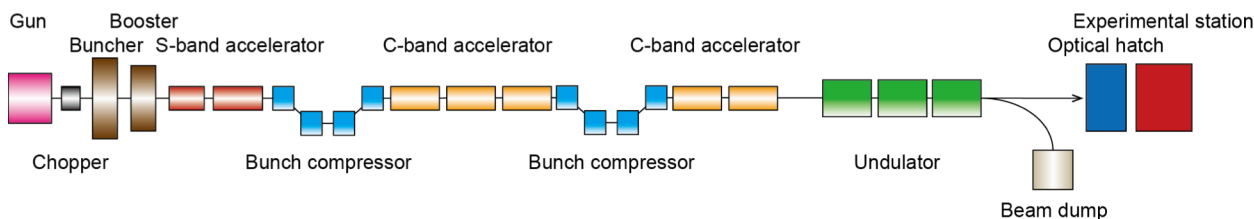


Figure 1: Schematic of the soft XFEL beamline of SACLA.

ンド加速器と同様にエネルギーチャープを与えながら電子ビームを 500 MeV まで加速する。電子ビームは第二バンチ圧縮器 (BC2) においてサブ ps にまで圧縮され、残りの 2 ユニットの最大エネルギーの 800 MeV まで加速される。

軟 X 線 FEL ビームを発生する真空封止アンジュレータは、5 m 長のユニットが 3 台使用されている [10]。永久磁石のギャップは 3.8 mm から 20 mm まで可変で、最大の K 値は 2.1、周期長は SACLA と同じ 18 mm、総周期数は 777 である。FEL ビームの波長は 8 nm から 60 nm まで可変なのであるが、波長変更の際に電子ビームのエネルギーを変更するかアンジュレータの K 値を変更するかは、実験計画に応じて判断してビーム調整を行っている。

### 3. 電子ビームの特性

FEL 用加速器のビーム調整で最も重要なポイントの一つが、エミッタンスを悪化することなく適切にバンチ圧縮を行うことである。これを確認するために、BC1 の出口におけるビームの各特性を測定した。

まず、Q スキャン法により射影エミッタンスの測定を行った。ビームサイズの二乗が四極電磁石の磁場強度に対して二次関数で綺麗にフィットしていることを確認した。このフィッティングから求めた規格化射影エミッタンスは、水平垂直ともに 3 mm mrad であり、SCSS 試験加速器の測定結果や粒子シミュレーションの計算結果と矛盾していないことを確認した。以上の結果から、バンチ内のスライスエミッタンスは 1 mm mrad 以下の値が達成できているものと推定できる。

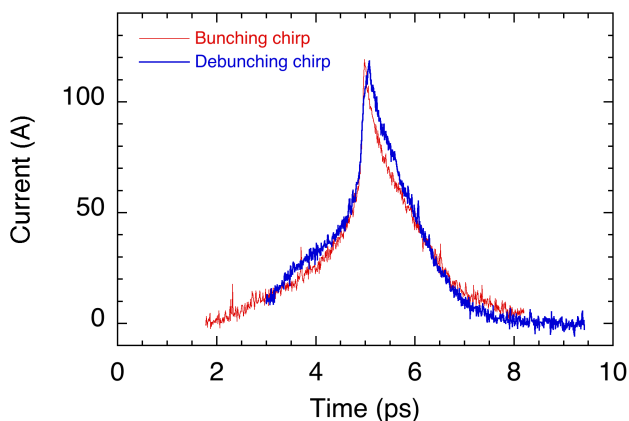


Figure 2: Longitudinal current profiles at the exit of the first bunch compressor measured by means of the rf zero-phasing method.

次に、縦方向のバンチプロファイルを rf zero-phasing 法で測定した。C バンド加速器の 3 番目のユニットで電子バンチをゼロ位相に乗せて線形のエネルギーチャープを与え、BC2 の偏向電磁石とスクリーンを用いてエネルギープロファイルを測定することで、間接的に縦方向バンチプロファイルを求めた [11]。測定結果を Figure 2 に示す。BC1 において電子バンチが半値幅 0.8 ps に圧縮され、120 A のピーク電流が達成できていることを確認できた。BC2 出口の最終バンチプロファイルについては、次章で議論する。

### 4. 軟 X 線 FEL ビームの特性

発生した FEL ビームは、アンジュレータホールから光学ハッチに輸送され、その基本特性が評価される。Figure 3 に Ce:YAG スクリーンで測定した FEL ビームの空間プロファイルを示す。波長は 12 nm である。空間強度が軸対象の Gaussian で分布しており、このことから、アンジュレータにおいて SASE 光の適切な飽和が達成できていると考えられる。また、ユーザー運転中の FEL ビーム強度 (波長 13 nm) のトレンドグラフを Figure 4 に示す。加速器をアップグレードする際に、低レベル rf 系の電子回路、モジュレータのインバータ電源、精密温調システムなどを高精度化したおかげで、SACLA と同レベルの強度ジッター、長期安定化が達成できていることが分かる [12, 8, 13]。

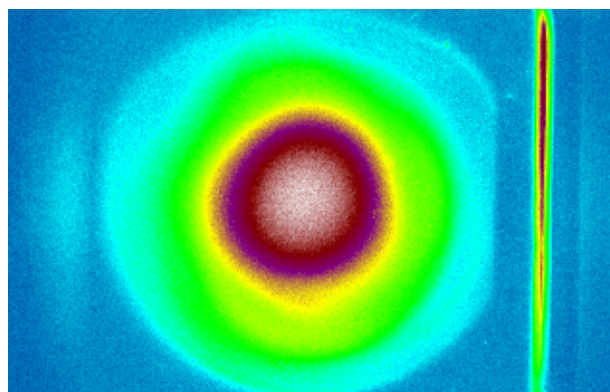


Figure 3: Spatial profile of the 12-nm soft XFEL beam. The horizontal full screen size is 17 mm.

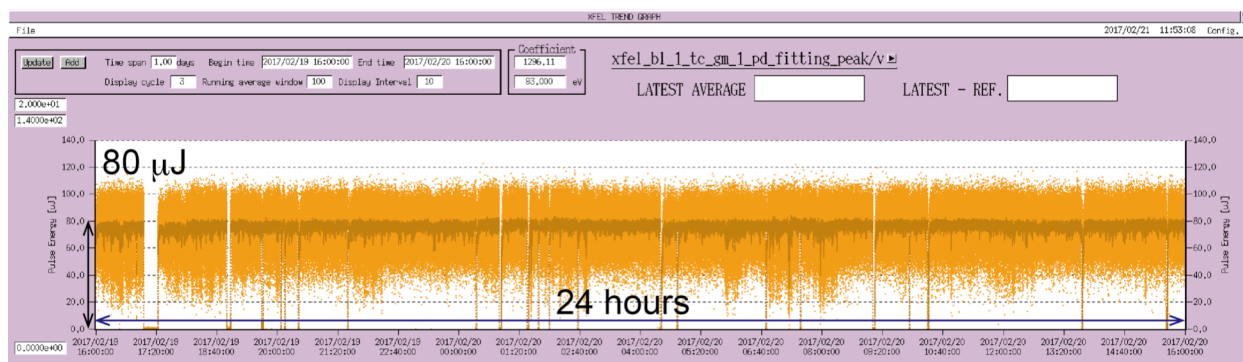


Figure 4: Trend graph of laser pulse energy at a 13-nm wavelength in 24 hours. The orange and brown dots indicate single shots and 100-shot-averaged, respectively. Stable laser pulses are delivered to experimental users for a long time.

軟 X 線 FEL ビームと電子ビームの特性は、FEL ゲインカーブを測定することにより評価することができる。SACLA-BL1 は 3 台のアンジュレータユニットしか使用していないため、一般の FEL 装置で測定される相互作用距離に対するレーザー出力の増加を表すゲインカーブが測定できない。そこで、SCSS 試験加速器で行った実験と同様に [5]、アンジュレータの磁石ギャップを変化させた時のレーザー出力の変化を測定するといった手法でゲインカーブを測定した。K 値のスキャン量は 0.5 から 2.1、電子ビームのエネルギーは 780 MeV、電荷量は 0.23 nC である。自発光から SASE の飽和までのパルスエネルギーのダイナミックレンジが 5 桁に渡るため、種類の測定器では全てを測定することができない。そこで 1 μJ を境に、大きい領域はカロリメータ(絶対強度計測、

破壊型)と Ar ガスモニタ(相対強度計測、非破壊型)を使用し、小さい領域はフォトダイオードと N<sub>2</sub> ガスアッテネータを使用した。K 値に対する光のパルスエネルギーの変化を Figure 5 に示す。FEL 増幅が始まっていない波長 4.4 nm 付近では、光は自発光であり、ショット毎のパルスエネルギーの変動は電子ビームの電荷量と同じで小さい。K 値を高めると SASE の増幅が始まり、まずはパルスエネルギーが指数関数的に増加して、波長 7.1 nm で強度変動が最大になる。K 値を更に高めていくと、増加率は緩まるもののパルスエネルギーは徐々に増え続け、波長 12 nm では 110 μJ に達し、強度変動は 10% のレベルにまで減少する。これは SASE の飽和が達成されている証拠である。

Figure 5 のゲインカーブのデータを FEL シミュレー

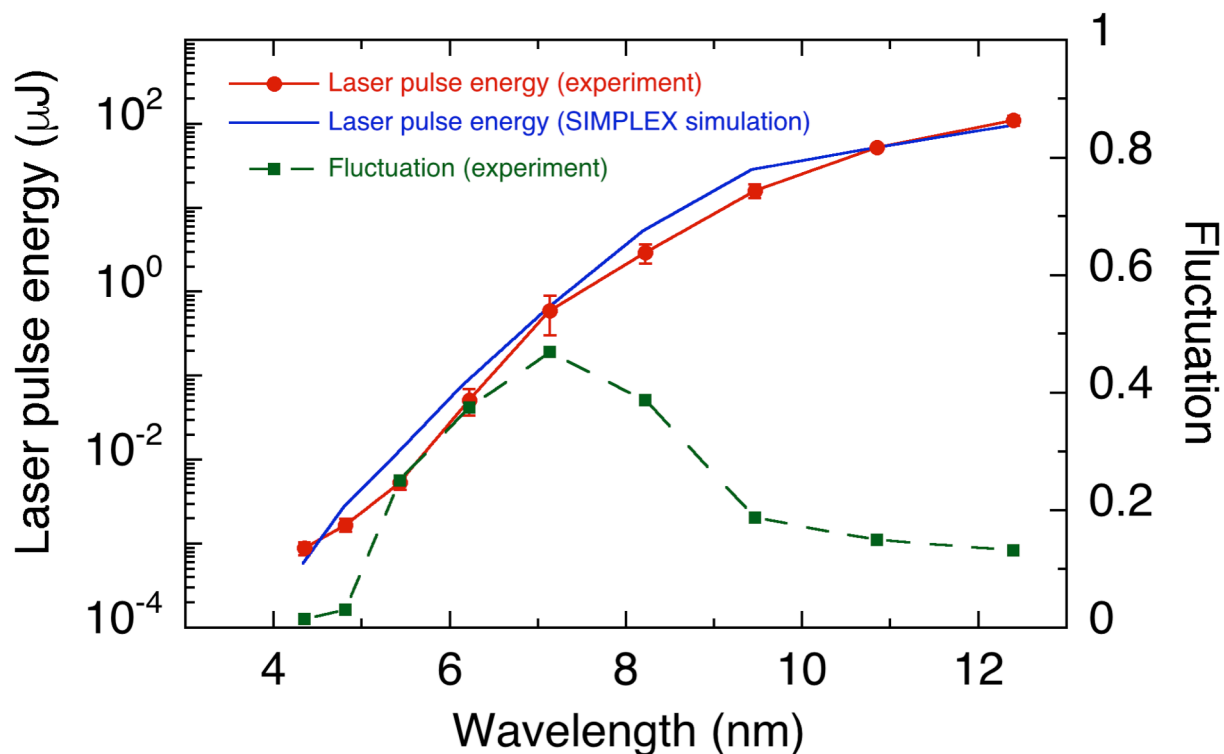


Figure 5: FEL gain curve of the SACLA-BL1. The radiation wavelength was scanned by means of changing the undulator's K-value.

シミュレーションコード SIMPLEX [14] で再現することによって、アンジュレータにおける電子ビームの輝度特性を調べることができる。Figure 5 に SIMPLEX の計算結果を重ねてプロットした。実験データを良く再現する電子ビームの条件は、時間分布がピーク電流 300 A、半値幅 0.7 ps の Gaussian で、規格化エミッタンスが 0.5 mm mrad であった。次に、SIMPLEX で仮定した電子ビームの分布と PARMELA [15] および ELEGANT [16] コードによる電子ビームのトラッキング計算の結果を Figure 6 で比較する。微細構造までは一致していないものの、ピーク電流とバンチ幅は概ね一致しており、このことから SCSS 試験加速器と同様に 300 A 程度のピーク電流と 1 mm mrad 以下のスライスエミッタンスが実現できていると考えられる。

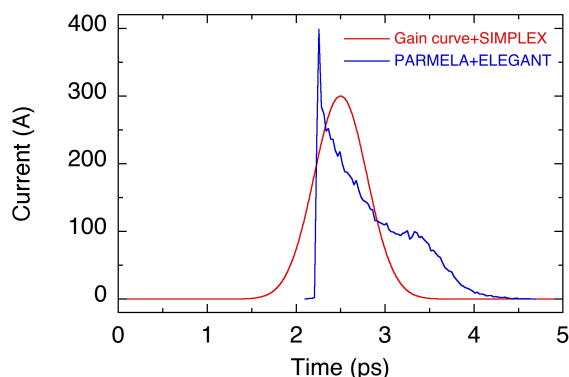


Figure 6: Electron current profiles at the undulator line obtained by the SIMPLEX and the PARMELA-ELEGANT simulations.

## 5 今後の方針

SACLA-BL1 の入射器は非線形補正空洞を備えていないため、RF 加速やバンチ圧縮の過程で生じたエネルギーチャープの二次成分が大きく、電子ビームがオーバーバンチングの状態であると考えられる。この状態ではこれ以上ピーク電流を上げられないため、レーザー出力が大幅に制限されてしまう。SACLA-BL1 では、BC1 の分散部に六極電磁石などの多極電磁石を導入し、電子ビームに非線形のキックを与えることでエネルギー

チャープの二次成分を補正しようと試みている。現在、その可能性について理論的な考察を行なっている。

SACLA-BL1 には加速器の出口からアンジュレータの入口まで十分なフリースペースがあるため、C バンド加速ユニットを追加することで最大 1.8 GeV にまで電子ビームエネルギーを増強することが可能である。この場合、レーザーの基本波長が Water Window 領域 (2-4 nm) まで到達するため、さらに FEL の発振波長領域が広がり、より幅の広い分野での利用実験が展開すると期待される。

## 6. まとめ

SACLA-BL1 のアップグレードが終了し、波長領域が 8 nm から 60 nm、出力が数  $\mu\text{J}$  から 100  $\mu\text{J}$  の軟 X 線 FEL ビームを繰返し 60 Hz で長期間安定に利用実験ユーザーへ提供することができるようになった。そして、電子ビーム及び FEL ビームの特性を調査することで、マシンの設計と建設及びビーム調整が適切に行われたことを確認した。今後、レーザー出力のさらなる向上を目指して、電子ビームのエネルギーチャープの非線形補正について検討を進めていく予定である。

## 参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, *Nat. Photon.* **6** (2012) 540.
- [2] T. Hara *et al.*, *Phys. Rev. Accel. Beams* **19** (2016) 020703.
- [3] T. Hara *et al.*, in these proceedings.
- [4] C. Kondo *et al.*, in these proceedings.
- [5] T. Shintake *et al.*, *Nat. Photon.* **2** (2008) 555.
- [6] K. Togawa *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10** (2007) 020703.
- [7] T. Shintake *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12** (2009) 070701.
- [8] T. Inagaki *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **17** (2014) 080702.
- [9] T. Sakurai *et al.*, *Phys. Rev. Accel. Beams* **20** (2017) 042003.
- [10] T. Tanaka *et al.*, *Proc. FEL2008* (2008) 371.
- [11] D. X. Wang, *et al.*, *Phys. Rev. E* **57** (1998) 2283.
- [12] Y. Otake *et al.*, *Phys. Rev. Accel. Beams* **19** (2016) 022001.
- [13] T. Asaka *et al.*, *Proc. LINAC2014* (2014) 1131.
- [14] T. Tanaka, *J. Synchrotron Rad.* **22** (2015) 1319.
- [15] L. Young *et al.*, *Proc. PAC2003* (2003) 3521.
- [16] M. Borland, *APS LS-287* (2000).