

# CHARACTERIZATION OF LIGHT SOURCE PERFORMANCE AND UPGRADE OPTION AT SACLA

Takashi Tanaka<sup>†</sup>, Toru Hara, Kazuaki Togawa, Makina Yabashi, Hitoshi Tanaka  
RIKEN SPring-8 Center, XFEL Research and Development Division  
1-1-1 Koto, Sayo, Hyogo, 679-5148

## Abstract

The quality of the electron beam in the X-ray free electron laser facility is more critical to the performance of the light source than in the conventional synchrotron radiation facility and thus should be precisely evaluated. However, it is difficult to measure the sliced beam quality that is related to the laser performance only based on the conventional measurement scheme. In SACLA, the beam quality has been deduced by means of the characterization of the laser performance, which are presented in this paper, together with the future upgrade option in SACLA

## SACLA における光源性能評価と光源高度化

### 1. はじめに

X線自由電子レーザー(XFEL)施設における光源性能は電子ビームの品質に大きく依存する。即ち、電子ビームの品質が劣化し、SASEの発振条件を満たさなくなった場合、自発放射が主たる放射過程となるため、光強度は大幅に低下する。この意味において、光と電子のコンビリユーションによって光源性能が規定される従来型放射光施設とは、根本的に電子ビーム品質の重要性が異なる。従って、電子ビームの特性を実験的に把握しておくことは重要である。

従来型放射光施設では、全ての電子が同等に光の放出に寄与するため、電子バンチ全体に渡って時間的に平均化された、いわゆる投影エミッタンスやエネルギー幅が重要なビームパラメータである。一方XFELにおいてレーザー発振と相関があるのは投影されたビーム特性ではなく、Cooperation Lengthと呼ばれる狭い時間領域で平均された、いわゆるスライスされたビーム特性であり、通常の方法で精度良く測定することは容易ではない。このためSACLAでは、RFディフレクタによってバンチの時間構造を測定し、その情報を元に、実測されたゲインカーブやスペクトルなどの光源性能を再現するようにスライスエミッタンス等のビーム特性を推定している。本論文ではそれらの結果について報告するとともに、真空封止型アンジュレータを使用するSACLAに特有のウェイクフィールドの間接的な評価とその手法、並びに今後予定される光源に関する高度化について展望する。

### 2. 光源性能の測定とビーム特性の推定

#### 2.1 ゲインカーブ

ゲインカーブとは、アンジュレータの長さに関数として測定されたレーザー強度（パルスエネルギー

や放射パワー）を意味する。SACLAでは、周期長18 mm、全長5 mのアンジュレータセグメントが6.15 mの間隔で18台設置され、通常運転時にはレーザーゲインが最大になるように各アンジュレータのギャップが最適化されているが、ゲインカーブを測定する際にはギャップを10 mmまで開けることによって当該セグメントを無効化し、有効なアンジュレータ台数、即ちアンジュレータ長を制御している。表1に、2012年6月にゲインカーブを測定した時のビーム条件を、また図1に測定結果を示す。

表1：ゲインカーブ測定条件

電子エネルギー	7.8 GeV
バンチ電荷	~0.15 nC
アンジュレータ K 値 (最上流部)	2.1
アンジュレータギャップ	~3.7 mm
発振波長	0.124 nm

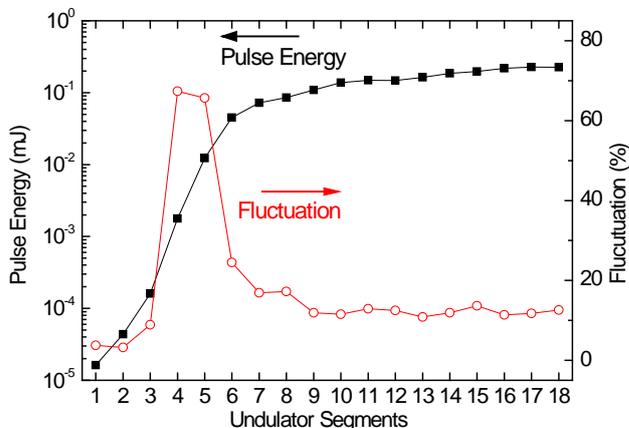


図1：ゲインカーブ測定結果

<sup>†</sup> ztanaka@spring8.or.jp

パルスエネルギー（パルスあたりの光エネルギー）は、光ビームラインに設置された、複数の方法で較正済みの散乱型光強度モニター<sup>[1]</sup>によって測定され、各測定条件（有効セグメント台数）において 100 ショット分の平均値として求められている。その標準偏差が出力変動として同図にプロットされているが、これを指標としてレーザー発振状態を、(i)自発放射過程、(ii)指数増幅過程、(iii)出力飽和過程、という 3 つの過程に分類することができる。自発放射過程では出力変動は小さく 3% 以下であるが、指数増幅過程に至ると一気に増加して 70% 近くまで達する。これを過ぎると飽和過程に到達し、出力変動は 10% 程度にまで抑制される。また全 18 セグメントを有効化したときのパルスエネルギーは 250  $\mu\text{J}$  であった。

このゲインカーブにおいて特筆すべきことは、ゲイン長が非常に短いということである。前述した増幅過程に属するセグメント 3~5 において求めたゲイン長  $L_g$  は 2.3 m であるが、これは図 2 に示した、RF ディフレクタによる電子バンチ形状測定から算出されたピーク電流値 3.2 kA と、SACLA で用いられているパルス熱電子銃における最小エミッタンス  $0.4 \pi \text{ mm.mrad}$  を仮定して得られるゲイン長 4.4 m の半分程度であり、実際のビーム特性がこれらの仮定よりも良好であることを示唆している。電子銃から放出された後にエミッタンスが改善することはあり得ないから、バンチ内に局所的にピーク電流が高い領域が存在すると推定できる。

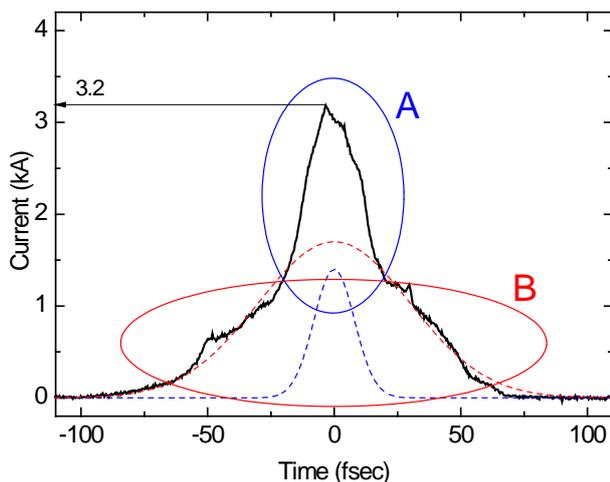


図 2 : バンチ形状測定例（実線）とダブルガウシアンによるフィッティング（破線）

実際、RF ディフレクタ<sup>[2]</sup>によるバンチ形状測定の時間分解能は 10 fsec よりも大きい場合、これよりも狭い時間構造が電子ビームに存在する場合は、ピーク電流値を過小評価する可能性がある。図 2 における青線で図示した領域の時間幅は、測定の時間分解能 10 fsec と同程度であり、この領域のピーク電流は 3.2 kA よりもずっと高い可能性がある。

## 2.2 スペクトル

後述する電子ビーム特性の推定には、ゲインカーブと同じく SASE 光のスペクトルの情報が有用である。そこでゲインカーブ測定と同様に、有効なアンジュレータセグメントの台数を変化させてスペクトルを測定した。今回の測定では単一ショット測定ではなく、分光器によって単色化した光強度の 10 ショット分の平均として当該光子エネルギーにおけるフラックスを測定し、結晶のブラッグ角を掃引することによってスペクトルを求めた。測定結果を図 2 に示す。尚、フラックスは最大値で規格化してあることに注意されたい。

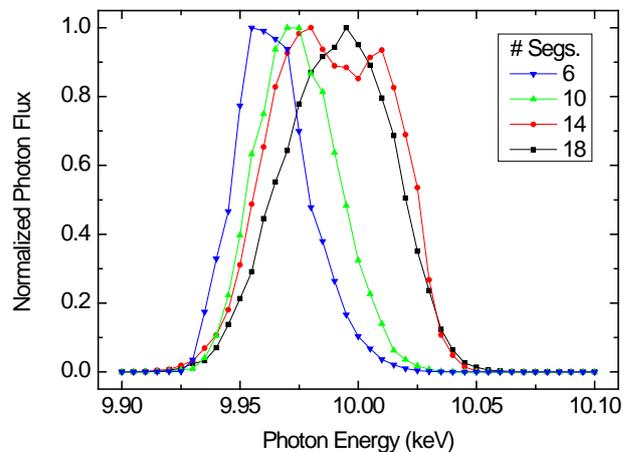


図 3 : スペクトル測定結果

この測定結果で注目すべきことは、セグメント数の増加に伴って中心波長が高エネルギー側にシフトするとともにバンド幅が増加するという点である。これは、電子バンチにエネルギーとゲイン長が異なる複数の領域が存在すること、また低エネルギー領域におけるゲイン長が高エネルギー領域のそれよりも短いこと、を意味する。

## 2.3 電子ビーム特性の推定

上記の議論から、SACLA において実測された光源特性を説明するため、以下のような電子ビームモデルを仮定した。

- 1) 電子バンチはエネルギー及びゲイン長の異なる 2 つの領域 A 及び B（図 2 参照）で構成される。
- 2) 領域 A の時間幅はバンチ形状測定の時間分解能 10 fsec よりも短く、従ってピーク電流は実測値 3.2 kA よりも高い。
- 3) 領域 B のエネルギーは A よりも高く、その時間幅は実測値 (FWHM 70fsec) と同等である。

また、バンチ形状の測定結果をピーク位置が同一の 2 つのガウス関数でフィッティングし（図 2 の破線）、その面積を求めることにより、領域 A の電荷を 0.023 nC、領域 B の電荷を 0.13 nC と求めた。ただし先に述べたように、領域 A のバンチ形状は

測定系の応答関数でコンボリューションされており、実際のピーク電流はこれよりもずっと高いと推測される。これらの仮定の下で決定すべきパラメータは、領域 A のエミッタンスとピーク電流（時間幅）、及び領域 B のエミッタンスということになる。これらを、ゲイン長 2.3 m 及びパルスエネルギー 250  $\mu\text{J}$  という実測値を再現するように推定する。

領域 A のビーム特性は  $L_g = 2.3$  m という束縛条件から推定できるが、 $L_g$  はエミッタンス  $\epsilon_n$  とピーク電流  $I_p$  の両方に依存するため、これらを一意に決定することはできない。そこで、上記束縛条件を満足する  $\epsilon_n$  と  $I_p$  の関係を計算により求めた。結果を図 3 に示す。

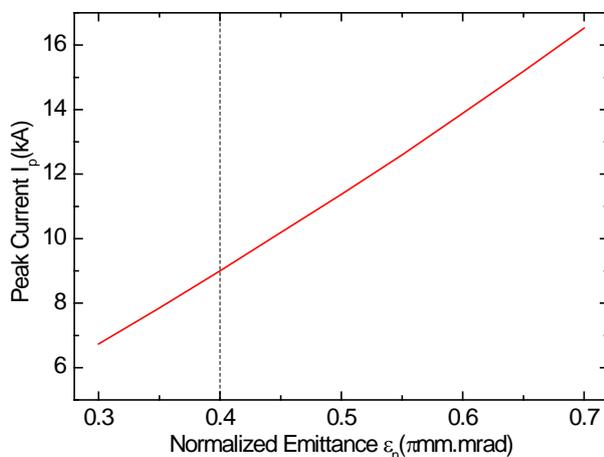


図 3 :  $L_g=2.3\text{m}$  を束縛条件としたピーク電流とエミッタンスの関係

破線で示した  $\epsilon_n = 0.4$   $\pi\text{mm.mrad}$  は前述した、取り得るエミッタンスの下限値であり、このときピーク電流  $I_p$  は 9.0 kA となる。以後、領域 A のビーム特性としてこれらの値を仮定するが、いずれも下限値であることに注意されたい。即ち、真のエミッタンスがこれよりも大きく、例えば 0.5  $\pi\text{mm.mrad}$  であるときには、ピーク電流は 11 kA と修正される。

領域 B では、電荷と時間幅が求められているので、決定すべき残されたパラメータはエミッタンスであるが、これは全セグメントを有効化したときのパルスエネルギー 250  $\mu\text{J}$  から、0.7  $\pi\text{mm.mrad}$  と推定できる。以上の議論をまとめたものを表 2 に、またこれらのパラメータに基づいて行った FEL シミュレーションから求めたゲインカーブを、領域 A からの寄与、領域 B からの寄与、及び両領域からの寄与に分類して、実測値と比較して図 4 に示す。レーザー発振の各過程において実測値と計算値 (A+B) がよく一致していることがわかる。

表 2 : 電子ビーム特性推定値

項目	領域 A	領域 B
バンチ電荷 (nC)	0.023	0.13
時間幅 (FWHM : fsec)	2.4	70
ピーク電流 (kA)	9.0	1.6
エミッタンス ( $\pi\text{mm.mrad}$ )	0.4	0.7

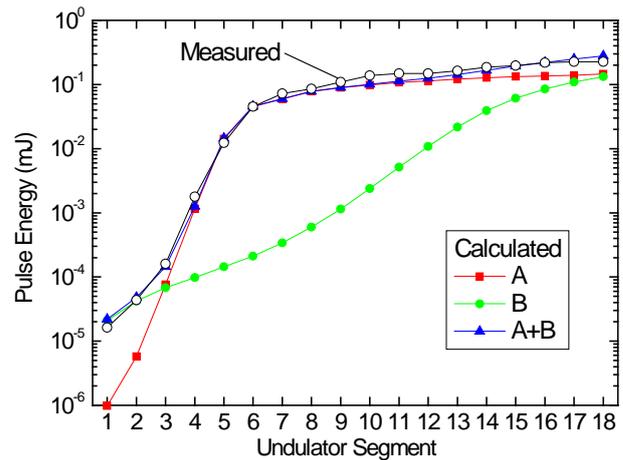


図 4 : 推定されたビームパラメータに基づくゲインカーブの計算値と実測値の比較

### 3. ウェイクフィールドの評価

SACLA では真空封止型アンジュレータを 5 mm 以下の狭いギャップで使用するため、計画当初からウェイクフィールドによるゲインへの影響が懸念事項であり、コミッショニングの初期段階から、これを補正するためのテーパリング（アンジュレータのギャップを徐々に開いて K 値を調整することによって発振波長を一定に保つ手法）が適用されている。これまでのコミッショニングの経験から、SACLA においては最小ギャップの 3.5 mm においてもウェイクフィールドによるレーザー出力の低下は深刻なものではなく、当初の懸念は払拭された感があるが、その一方次節で述べる、アンジュレータのさらなる狭ギャップ化に向けて、その影響を定量的に評価しておく必要がある。

ウェイクフィールドは、電子バンチに沿ったエネルギー損失を誘起するため、アンジュレータ通過後のエネルギー分布を測定することによってウェイクフィールドの影響を評価することができる。これは一般には強い分散部、例えばダンプ部において空間プロファイルを測定することによって可能であるが、SACLA では機器設置の優先度の関係から、ダンプ部における精密な測定系が整備されていない。そこで、アンジュレータ自発光の全光束スペクトルを測定し、これを微分することによって近似的にエネルギー分布を求める手法を導入することによってウェイクフィールドの影響を評価することを試みた。

図 5(a)にウェイクフィールドを誘起するアンジュレータを異なる条件 (K 値) に設定して、電子エネルギー分布を測定した結果を示す。また同じ条件で、表 2 に示した電子ビームパラメータを仮定して計算した結果を図 5(b)に示す。計算の際には、平行無限平板による抵抗性ウェイクフィールドの表式<sup>[3]</sup>を用いた。細かな構造の違いを除くと、K 値を増加するためにギャップを閉じることによって、エネルギー分布が全体的に負の方向へ移動するとともにその分布幅が広がるという傾向で一致しており、表 2 で示したパラメータが、ウェイクフィールドの観点からも矛盾がないことを裏付けている。

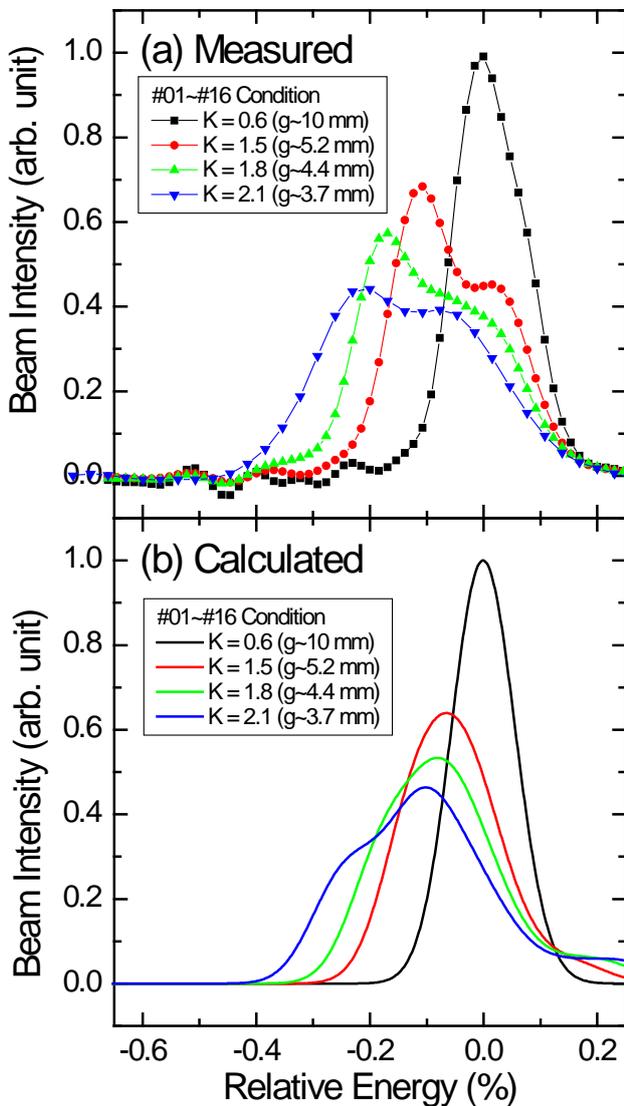


図 5： ウェイクフィールドによるエネルギー偏差の(a)実測値と(b)計算値の比較

#### 4. 光源の高度化

最後に、SACLA で今後予定されている光源関連の高度化について述べる。

#### 4.1 セルフシーディングによるシード化

シード化とは、SASE の欠点である、不十分な時間コヒーレンスを改善するための手法であり、(理想的には) シングルモードレーザーを FEL 増幅のシード光として利用することにより、いわば真のレーザーを得るための手法である。一方で X 線領域ではシード光として利用可能なレーザーが存在しないため、SASE 型 FEL における長尺アンジュレータを前半と後半に分け、前半部で得られた SASE 光を分光器によって単色化することにより、シード光として利用する、いわゆるセルフシード法が有望である。

SACLA でもこの手法によるシード化を目指して、各種の検討を行った。特に分光器種類 (配置、結晶材質、格子面) による光源特性の相違について検討を進めた。結果を、シード化によって想定されるスペクトルの改善例として図 6 に示す。

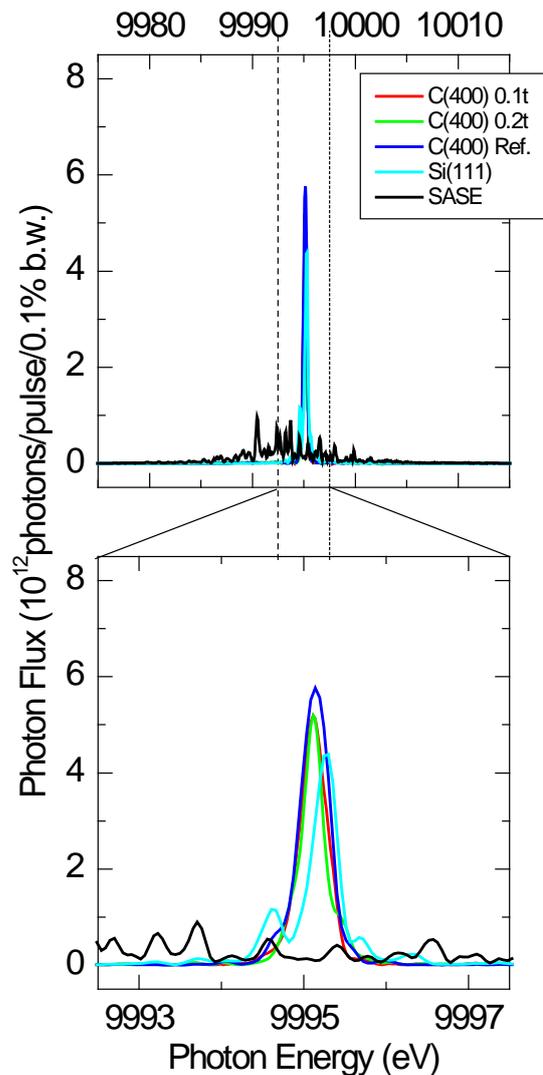


図 6：異なる結晶配置や材質に対するシード化によるエネルギースペクトルの改善

ダイヤモンド単結晶(400)を透過型で利用する場合を赤線 (0.1 mm 厚) 及び緑線 (0.2 mm 厚) で、反射型で利用する場合を青線で、Si(111)を反射型で利用する場合を水色で示し、黒線で示した SASE スペクトルと比較した。いずれの場合でもバンド幅やフラックスが顕著に改善されていることがわかる。今後、分光器の駆動方式や構造などを踏まえた上で、最終的な仕様を決定する。

#### 4.2 アンジュレータ狭ギャップ化による発振波長の広帯域化

SACLA では計画当初から真空封止型アンジュレータを狭いギャップで運転する予定であったため、ウェイクフィールドによるレーザーゲインへの悪影響が懸念されていたが、これまでの運転経験から、少なくともギャップ 3.5 mm においては大きな問題は生じていない。むしろ、さらに狭いギャップでの運転の可能性を秘めている、と言い換えることもできる。真空封止型アンジュレータでは真空槽を取り替えることなく、最小ギャップを変更することが可能である一方、駆動架台が増大する吸引力に耐えられる必要がある。現在、SACLA アンジュレータのプロトタイプ機 (実機に先駆けて 2007 年に製造) を用いた各種試験が行われており、早ければ今冬にも、より狭いギャップでの運転が可能となる。プロトタイプ機の磁場測定ではギャップ 2 mm で K 値は 3.2 に到達しており、このギャップでの運転が可能になればレーザーの高出力化と広帯域化に大きく貢献すると期待される。一方でこのような狭いギャップでの運転を可能にするためには、電子ビームのハロー部がアンジュレータの永久磁石列に照射されないように、ビームを整形する必要があり、これは今後の検討課題である。

#### 謝辞

光源特性測定や機器整備にご協力いただいた、理研 XFEL 部門ビームライン研究開発グループ及び SACLA 運転員の皆様に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] K. Tono et al. "Single-shot beam-position monitor for x-ray free electron laser", Rev. Sci. Instrum. 82 (2011) 023108.
- [2] H. Ego et al. "Transverse C-band deflecting structure for longitudinal phase space diagnostics in the XFEL/SPring-8 SACLA", Proc. IPAC 2011, 1221-1223 (2011).
- [3] K. L. F. Bane and G. Stupakov, "Resistive wall wakefield in the LCLS undulator beam pipe," SLAC-PUB-10707 (2004).