

SACLA における 2 色レーザー発振

独立行政法人理化学研究所 放射光科学総合研究センター
XFEL 研究開発部門 原 徹

Abstract

XFEL は波長可変性と横方向のコヒーレンスに加え、フェムト秒の短パルス性、100 GW レベルの高ピークパワーを兼ね備えており、超高速現象や反応過程を動的に精度よく観察するには最適な X 線光源である。2色 XFEL では、シケインを挟んでアンジュレータを2つのセクションに分割し、各セクションで異なる波長でレーザーを発振させ、2つの X 線パルスを生産する。各セクションの K 値を調整することで2波長とも可変であり、2パルス間の時間差はシケインで電子ビームを遅延させることにより高精度で調整することができる。同じ電子ビームから2つのパルスを生産するため、2パルス間の時間ジッターはほとんどなく、X 線ポンプ X 線プローブ実験など2色 XFEL を用いた新しい実験手法の開拓が期待される。

1. はじめに

X 線自由電子レーザー (X-ray Free-Electron Laser, XFEL) は、X 線波長領域では誘導放射を利用した唯一の実用光源で、放射光に比べピークパワーで10桁近く強い光が得られる。XFEL は、電子ビームを長いアンジュレータに1回通すことにより、ランダムな電子分布から放射されるノイズ(放射光)を誘導放射によって増幅する。この増幅プロセスは SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission)^[1,2] と呼ばれ、増幅後の光パルスのスペクトルや時間波形は、初期ノイズに起因したパルス毎にランダムに変化するスパイク構造をもつことが知られている。SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free-electron LAsEr)^[3] は、アメリカの LCLS^[4] に次いで、世界で2番目に完成した XFEL 施設であり、2012年3月よりユーザー利用実験への供用を開始した。SASE-XFEL は、光源として既に技術的には確立しており、日米2施設のほか、ド

イツやスイス、韓国などでも XFEL 施設を現在建設中である。

XFEL の光源性能を高める高度化の手法については、既に様々なアイデアが提案され、世界中で研究開発が進んでいる。高度化の一つの方向性は、SASE の光パルスがもつスパイク構造の解消、即ち時間コヒーレンスの改善である。時間コヒーレンスを改善する手法として、外部コヒーレントシード光を利用した HGHG (High-Gain Harmonic Generation)^[5] や EEHG (Echo-Enabled Harmonic Generation)^[6]、単色化した SASE を増幅する self-seeding^[7] などの手法が提案され、いずれも実験的に実証されている。特に HGHG-FEL では、イタリアの FERMI^[8] が軟 X 線領域での発振に成功しており、ユーザー実験が既に行われている。結晶を利用した分光が可能な X 線領域の self-seeding では、アンジュレータ途中に置いた1枚のダイヤモンド結晶を用いて上流側アンジュレータ

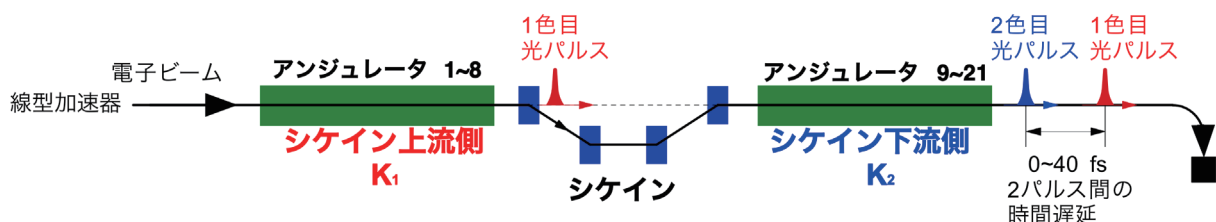


図1 2色 XFEL 運転時のアンジュレータ部の概要

からの SASE を単色化し、下流側アンジュレータでそれを増幅することに LCLS が成功しており^[9]、SACLA でも self-seeding 導入の準備を進めている。

一方、時間コヒーレンスの改善とは別の高度化の方向には、XFEL を使ったアト秒 X 線パルスの発生^[10]や、異なる波長で同時にレーザー発振させる 2 色 XFEL などがあり、新たな利用実験の開拓につながるものが期待されている。もちろん複数の高度化手法を組み合わせて、時間コヒーレントなアト秒パルスや 2 色レーザー光を得ることも将来可能になるであろう。本稿では、SACLA で行われている 2 色 XFEL について紹介する^[11]。

2. 2 色 XFEL

図 1 に、2 色 XFEL 運転時のアンジュレータ部の概要を示す。SACLA BL3 には 5 m 長の真空封止アンジュレータ (図 2) が 21 台あり、8 台目と 9 台目のアンジュレータ間に self-seeding 用シケインが設置されている。シケインの全長はアンジュレータ 1 台分の長さに等しい。2 色 XFEL では、21 台のアンジュレータをシケイン上下流 2 つのセクションに分け、各セクションで独立にレーザーを発振させる。各セクションのアンジュレータ K 値を変えることにより、2 つのレーザーパルスの波長は独立に調整可能である。

上下流のセクションから放射される 2 パルス間の時間差は、シケインで電子ビームを迂回させることで、現状 0~40 フェムト秒の範囲で変えることができ、近い将来シケイン偏向電磁石の更新により 0~200 フェムト秒まで広げる予定である。2 パルスは同じ電子ビームから放射されるため時間差のジッターが原理的になく、電子ビームとシケイン電磁石

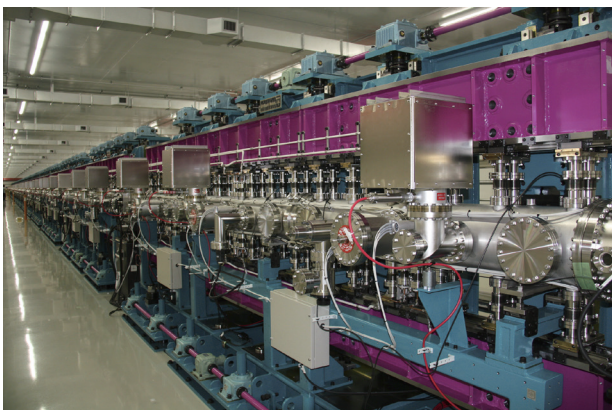


図 2 SACLA 真空封止アンジュレータ

電源のふらつきから推定される時間差の精度は、数 10 アト秒オーダーと極めて高精度である。現状の SACLA 光パルス長は、10 フェムト秒 (FWHM) 以下であることが確認されているが^[12]、将来更に短パルス化することができれば、サブフェムト秒のダイナミクスの探求も視野に入る。

2 色 XFEL のスペクトル測定例を図 3 に示す。図 3 では 7.8 GeV の電子ビームを使い、上流側アンジュレータセクションの K 値を 1.7 に、下流側セクションの K 値を 2.15 に設定して、各々 13.1 keV と 9.7 keV の 2 つのレーザーパルスを発生させている。図 3 のスペクトルは、2 結晶分光器を用いて測定した時間平均されたスペクトルで、2 色パルスのパルスエネルギーは、各々 40 μ J 程度である。

下流側 2 色目の SASE プロセスは、上流側 1 色目のレーザー発振によってエネルギーブレッドが増加した電子ビームを用いて行われるため、1 色目に比べレーザーの増幅ゲインが低くなる。特に上流側で 1 色目パルスを飽和まで増幅してしまうと、2 色目のゲインがなくなり 2 色発振させることはできない。このため 2 パルス間の出力比を見ながら、上下流のアンジュレータ台数を調整する必要がある。逆にアンジュレータ台数を調整することで、利用実験に最適な出力比を得ることができる。

図 4 (a) では上流側アンジュレータ 8 台の K 値を 1.92 に、下流側 10 台の K 値を 2.1 に設定し測定した 2 色 XFEL の時間平均スペクトルである。このときの 2 色合計の出力は約 130 μ J であるが、図から見てわかるように、下流側 2 色目のパルスエネルギーは上流側 1 色目に比べ小さい。図 4 (b) では、1

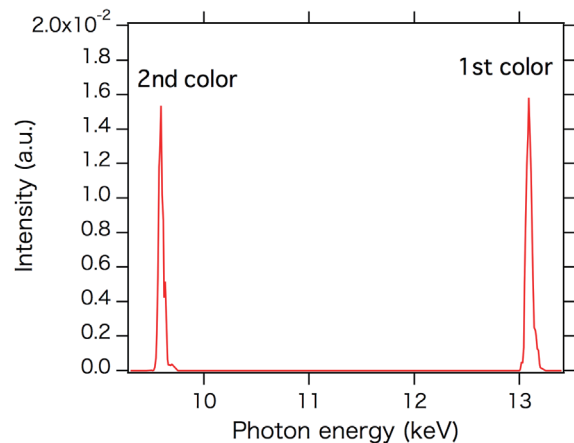


図 3 2 色 XFEL の時間平均スペクトル。スペクトルは 2 結晶分光器を用いて測定。上流側アンジュレータ K 値は $K_1=1.7$ 、下流側は $K_2=2.15$ 。

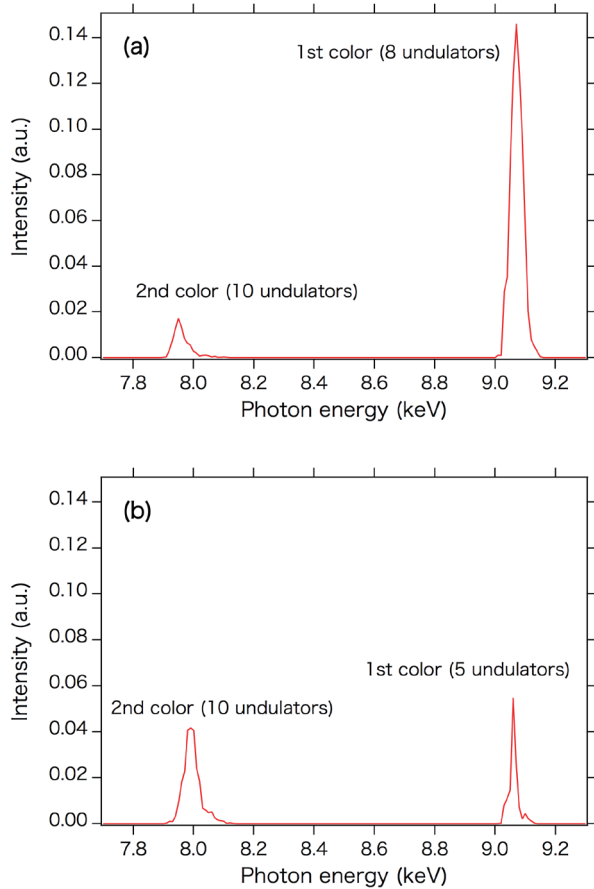


図4 2色パルスの出力比。(a) 上流側アンジュレータ ($K_1=1.92$) 8台、下流側 ($K_2=2.1$) 10台使用した場合の時間平均スペクトル、(b) 上流側 ($K_1=1.92$) 5台、下流側 ($K_2=2.1$) 10台の場合の時間平均スペクトル。

色目の出力を下げるため、上流側アンジュレータ台数を5台に減らした時のスペクトルである。上流側1色目の出力を下げるにより、電子ビームエネルギー Spredd の増加が抑えられるため、2色目パルスの出力が上がっていることがわかる。しかしながら2色XFELでは、SASEプロセスをノイズか

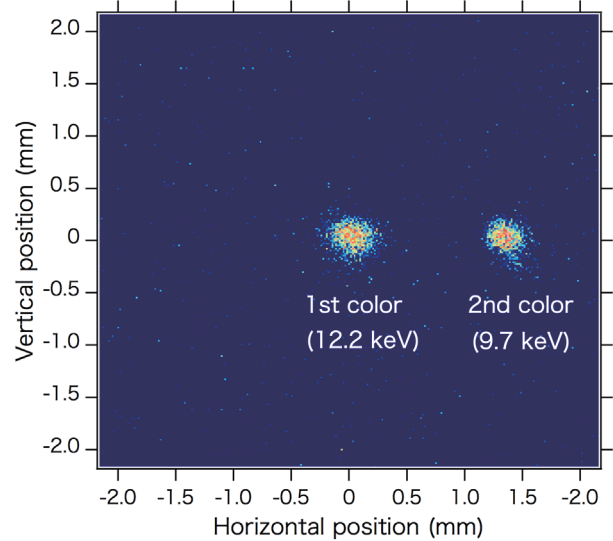


図6 シケインから約130 m 下流にあるビームラインのスクリーンで測定した2色パルスの空間プロフィール。電子ビーム軌道は、シケインにおいて水平方向 $10 \mu\text{rad}$ の角度を付けている。 $K_1=1.8$ 、 $K_2=2.15$ 。

ら2回立ち上げるため、全アンジュレータを使って単一波長でレーザー発振させた場合のパルスエネルギー $250 \mu\text{J}$ ($K=2.1$) や $200 \mu\text{J}$ ($K=1.9$) に比べると、2色XFELの出力は2色合計しても半分程度となる。

3. 2色パルスの空間分離

2色XFELの2つのSASEプロセスは互いに独立であるため、図5のようにシケインで電子ビーム軌道に角度を付け、1色目と2色目の光パルスを互いに異なる光軸で発振させることも可能である。但しアンジュレータや四極電磁石などの機器は、この角度を付けた電子ビーム軌道に対して直線上に並べる必要がある。幸いにもSACLAアンジュレータ部の機器は、コンクリートの収縮や地盤変化による床面の形状変化に追従して電子ビーム軌道のアライメン

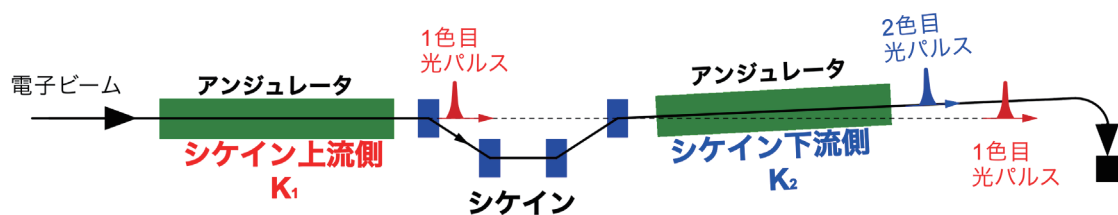


図5 2色パルスの空間分離。シケイン下流側電子ビーム軌道に角度を付け、ビームラインで2色のパルスを空間的に分離。

トが行えるよう、全てサブミクロンの高精度位置調整機構を備えており、遠隔で位置制御が可能である。

異なる光軸に放射された2つのパルスは、ビームラインでは空間的に分離される。図6は、シケインで下流側電子ビーム軌道に水平方向10 μ radの角度を付け、2色の2つの光パルスを約130 m下流のビームラインスクリーン上で空間的に分離した例である。このように2色XFELの2つの光パルスは、スペクトルだけでなく空間的にも分離することができ、例えば異なる方向から試料に異なる2波長のX線パルスを照射することも可能である。

4. まとめ

2色FELは、1990年代に光共振器型の赤外線FELで初めて実験的に確認され^[13]、その後真空紫外^[14]や軟X線の短波長領域^[15]でも報告がある。しかしながらこれらの2色FELでは、共振器や外部レーザー、固定アンジュレータギャップなどの要因により、2波長の相対的な差がいずれも数%程度に制限されていた。SACLAでは世界で初めて硬X線領域で2色FELを実現しただけでなく、磁石ギャップが変えられる真空封止アンジュレータを用いることで、2波長の差を最大30%程度まで広げることに成功している。FELの波長は、アンジュレータ放射光と同様に電子ビームエネルギーとK値で決まるが、2つの波長を同じ電子ビームを使って出す場合、大きな波長差を得るためには必然的にK値の可変性、即ち可変ギャップアンジュレータが必須となる。

これまでXFEL利用実験では現象や反応を動的に観察するための手法として、XFELのX線パルスと外部同期レーザーからの可視光パルスを組み合わせたポンププローブ測定が主に用いられてきた。しかしながら2つの光源間の時間ジッター、X線と可視光という大きなエネルギー差、物質への侵入長の違いなどがしばしば実験の制約となっていた。2色XFELでは、2つのパルスを同じ電子ビームから生成するため時間ジッターがなく、両波長ともX線領域でかつ可変性を有し、また空間的にも分離することも可能である。X線ポンプX線プローブ実験など、これまでになかった実験手法への2色XFELの利用が期待される。

参考文献

- [1] A. M. Kondratenko and E. L. Saldin: *Part. Accel.* **10** (1980) 207-216.
- [2] R. Bonifacio, C. Pellegrini and L. M. Narducci: *Opt. Commun.* **50** (1984) 373-377.
- [3] T. Ishikawa *et al.*: *Nat. Photon.* **6** (2012) 540-544.
- [4] P. Emma *et al.*: *Nat. Photon.* **6** (2010) 641-647.
- [5] L. H. Yu *et al.*: *Science* **289** (2000) 932-934.
- [6] G. Stupakov: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 074801.
- [7] G. Geloni, V. Kocharyan and E. Saldin: *J. Mod. Opt.* **58** (2011) 1391-1403.
- [8] E. Allaria *et al.*: *Nat. Photon.* **7** (2013) 913-918.
- [9] J. Amann *et al.*: *Nat. Photon.* **6** (2012) 693-698.
- [10] T. Tanaka: *Phys. Rev. Lett.* **110** (2013) 084801.
- [11] T. Hara *et al.*: *Nat. Commun.* **4** (2013) 2919.
- [12] K. Tamasaku *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **111** (2013) 043001.
- [13] D. A. Jaroszynski, R. Prazeres, F. Glotin and J. M. Ortega: *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994) 2387-2390.
- [14] G. De Ninno, B. Mahieu, E. Allaria, L. Giannessi and S. Spampinati: *Phys. Rev. Lett.* **110** (2013) 064801.
- [15] A. A. Lutman *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **110** (2013) 134801.

原 徹 HARA Toru

(独)理化学研究所 放射光科学総合研究センター
XFEL 研究開発部門 加速器研究開発グループ 先端ビームチーム
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0802 ext 3804
e-mail : toru@spring8.or.jp