



4. ビームライン

矢橋牧名^{1,2}, 登野健介², 富樫 格², 犬伏雄一¹, 佐藤堯洋¹,
富澤宏光^{1,2}, 工藤統吾^{1,2}, 大橋治彦^{1,2}, 木村洋昭^{1,2}, 竹下邦和^{1,2},
高橋 直^{1,2}, 後藤俊治^{1,2}, 石川哲也¹

¹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 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

²財団法人 高輝度光科学研究センター

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

要旨 SACLA における XFEL ビームライン及び実験ステーションについて紹介する。ビームラインは、コヒーレントな波面を乱さずに分光等を行う高精度の光学系とパルス毎に光特性を評価する診断系から構成される。実験ステーションには、同期レーザー・集光システム等の基幹実験システムが整備され、多様な実験を展開することが可能である。

4.1 はじめに

XFEL は、超高輝度、高い空間コヒーレンス、超短パルスという際立った特性を有する X 線光源である。オンゲストロームの空間分解能とフェムト秒の時間分解能を合わせ持つ極めて精緻な観察プローブであるとともに、特異な状態をつくりだす強力なポンプ光源としても注目されている。単粒子イメージング、ダイナミクス研究、非線形光学等、広範な分野への革新的な応用が期待されている。

SACLA・BL3 は、日本で初めて、世界でも LCLS に続く 2 番目の硬 X 線 FEL ビームラインとして整備が行われた。XFEL は、数十年の歴史を有する放射光と異なり、極めて新しい光源である。実験装置や手法は今後急速に変化し、発展していくことが予想される。さらに、SACLA は 5 本の独立なアンジュレータラインが設置可能となっている。これらのことから、SACLA・BL3 は、高い性能の実現とともに、将来の拡張性や運用の効率性を重視して設計された¹⁾。

ビームライン建設とコミッションの道のりを簡単にまとめる。実験研究棟は、2009年3月に工事が開始され、2010年5月に竣工を迎えた。6月より、実験ハッチの建設とビームライン機器の設置が行われ、制御機器等の整備も進められた。2011年2月より SACLA のビームコミッションが開始された。3月にはアンジュレータ自発放射(波長0.08 nm)を光学ハッチに導いた。アンジュレータ超精密アライメントを経て、2011年6月7日にはレーザー増幅を初めて確認した。7月には1 μ m コヒーレント集光装置(以下、1ミクロン集光装置と記す)の立ち上げを行い、10月より試行的な利用実験を開始した。また、SPring-8 のアンジュレータ光と SACLA の XFEL 光を同

時に利用できる、世界でもユニークな「相互利用施設」の建設を2009~2010年度に行った。2012年1月には XFEL 光を相互利用ハッチまで導いた。

本稿では、SACLA におけるビームライン及び実験ステーションの現状を紹介する。実験装置については、目下立ち上げ中であり詳細を示すことはできなかったが、コミッションの最新状況を例示することにより、今後の利用実験を検討頂く際のヒントも出来る限り提示するよう心がけた。その視点からも読み解いて頂けると幸いである。また、随時更新される技術情報として、SACLA のホームページ (<http://xfel.riken.jp/users/index.html>) も合わせてご参照頂きたい。

4.2 全体構成

ビームラインの鳥瞰図を Fig. 1 に示す。全ての実験に共通で用いられるビームライン光学系・診断系は、光学ハッチ内に集約して設置されている。ビームライン光学系は、不要なガンマ線・ハロー・高次光等を除去するとともに、必要に応じて分光を行い、下流に XFEL 光を輸送する。ビームライン診断系は、極めて強いパルス性を有する XFEL 光を安定に供給し、かつ利用実験を高い精度で行うために非常に重要であり、重点的に開発整備が行われた。これらの光学系・診断系は、4 keV 以上の硬 X 線に対して最適化されている。

利用実験の場として、4 つの実験ステーション (EH1~4) が整備された。上流から、先進オプティクス (EH1)、ポンプ・プローブ (EH2)、コヒーレント集光 (EH3)、大型装置 (EH4) という構成になっている。多様な実験を行うために、これらの実験ステーションでは、基幹実験

システム（フェムト秒同期レーザーシステム・1 ミクロン集光装置等）のみ常設とし、個別の利用実験装置は可搬式を原則とした。このために、短時間で精度良くアライメントを行うためのシステムが開発された。具体的には、床面にセルフレベルング加工を施し、エアパットを取り付けた装置架台をレーザートラッカーを用いて調整することにより100 μm 単位の位置再現性を実現した。また、光学ハッチ・実験ハッチとも、複数のビームラインにまたがって設置されており、将来のビームライン増設時にも効率良く対応することができる。

4.3 ビームライン基幹部

光学ハッチ内には、全ての実験で用いられるビームライン光学系・診断系が導入されている。Fig. 2 に構成を示す。

ビームライン光学系は、実験の目的に応じて、入射角の異なるダブルミラーシステム及び二結晶分光器が選択可能となっている。ダブルミラーシステムは、光学素子として垂直偏向の平面ミラーを2枚用い、入射光と平行に振り返りて実験ステーションに導く。ミラー及び駆動機構はM1, M2a, M2bの3式が用意されており、M1とM2a、またはM1とM2bを組み合わせて使用することにより入射角4 mradと2 mradをそれぞれ実現する。カーボンコーティングを用いたときのカットオフエネルギーはそれぞれ7.5 keV, 15 keVである。XFEL用の光学素子は、コヒーレントな波面を乱さないよう極めて高い品質を持ち、

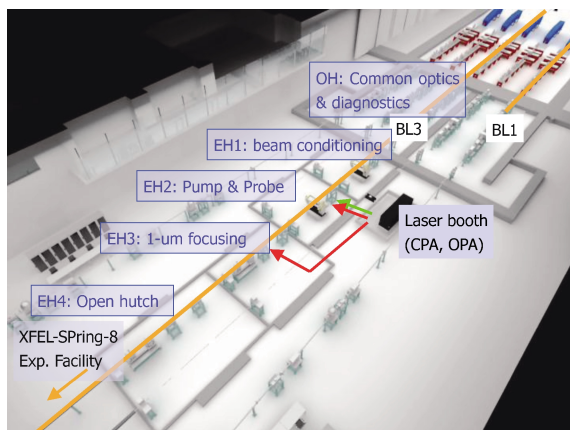


Fig. 1 Schematic view of SACLA experimental hall & beamlines.

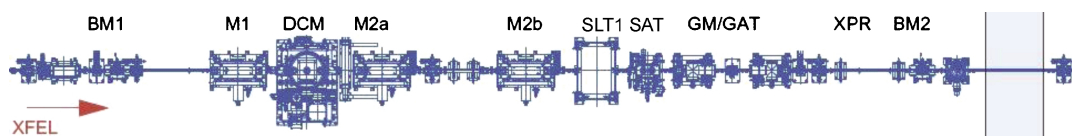


Fig. 2 Layout of optics & diagnostics of BL3. BM1,2: thin-foil beam monitor; M1, M2a, M2b: plane mirrors; DCM: double-crystal monochromator; SAT: solid attenuator; SLT1: slit; GM/GAT: gas monitor/gas attenuator.

さらにXFEL光の高いピーク強度によりメルティング・アブレーション等のダメージを受けないことが求められる。このために、ミラーの表面形状はEEM²⁾によって超精密に加工され、またコーティング材質としては反射率が高くX線吸収が小さい軽元素（カーボン等）を採用している。但し、短波長側ではダメージの影響は低減されるため、金属コーティングを利用できる可能性があり、調査を進めている。

二結晶分光器（DCM: Double-Crystal Monochromator）においては、分光素子として無歪み鏡面研磨加工されたシリコン(111)結晶を用いている。結晶表面のコンタミネーションに起因する、ダメージやコヒーレントな波面の劣化を避けるために、超高真空対応のDCMを開発した。真空内にステップモーターは配置せず、角度・位置の精密調整はピエゾ駆動のヒンジステージを用いることにより、安定かつ精密な動作を実現した。結晶冷却については、XFEL光・自発光を合わせても入射平均パワーは1 W以下であり、第3世代放射光源と異なり大きな問題ではないが、結晶及び駆動機構の温度を安定させるため水冷却が行われている。DCMを選択した場合、使用波長を固定することが可能であるが、XFELのスペクトル幅($\Delta E/E \sim 5 \times 10^{-3}$)と比較して分光後の幅は数十分の一に制限されるため($\Delta E/E = 1 \times 10^{-4}$)、強度が低下し強度変動も増大する。

2組のミラーまたはDCMの選択は、排他的に行われる。いずれを選択した場合にも、実験ハッチ内のサンプル位置でのビーム高さは一定に保たれるため（床面より1420 mm）、実験中にも容易に切り替えることが可能となっている。Fig. 3に、これらの光学系のカバーする光子エネルギー範囲を示す。また、Fig. 4には、DCMで分光したXFEL光のビームプロファイルを示す。均一なプロファイルが得られており、ビームサイズより、典型的な角度発散は1~2 μrad 程度と見積もられている。また、ビームの重心位置の変動（数10 μm から100 μm 程度）が現在観測されているが、調査の結果、SACLA加速器入射部の温度変動と相関があることが判明した。2012年夏を目処に安定化が行われる予定である。

これらの光学系は、硬X線レーザー増幅のための超精密調整に応用された（本号の田中均氏らの記事を参照）。具体的には、DCMにMPCCD（本号の初井宇記氏らの記事を参照）を組み合わせることにより、アンジュレータの

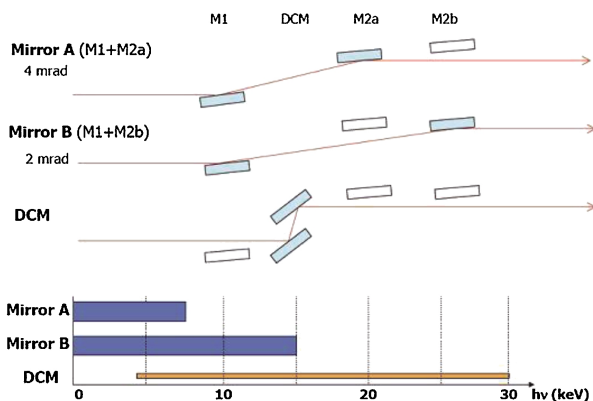


Fig. 3 Optical configuration and ranges of photon energy.

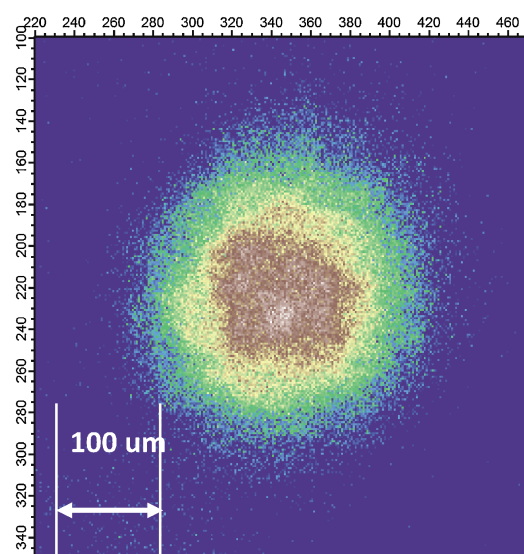


Fig. 4 Spatial profile of XFEL radiation with DCM application, measured at 110 m from the undulator exit.

電子ビーム軌道のアライメントを行った。Fig. 5に、自発放射の分光後の空間プロファイルを示す。分光波長は、アンジュレータの共鳴波長よりわずかに長波長側に設定してある。電子ビームのエミッタンスは垂直・水平方向ともに非常に小さいため、ドーナツ状の理想的な軸外放射が観測されている。このプロファイルから、重心位置を1 μrad の精度で決定することが容易に可能であり、アンジュレータ毎の重心位置の差分を、セグメントの上下流に設置されたステアリングマグネットによって補正することにより、18台全てのアンジュレータの軌道を精度良く整えた。

XFELの利用実験では、初期アライメントや強度依存性を計測するために、ビーム強度を数桁にわたって減衰させる必要がある。このために、ビームライン基幹部にはシリコン単結晶の固体アッテネータ(0.1 mmから3 mmまで可変)とガスアッテネータが用意されている。シリコンの厚さ及びガス濃度は遠隔で制御可能である。また、軸外

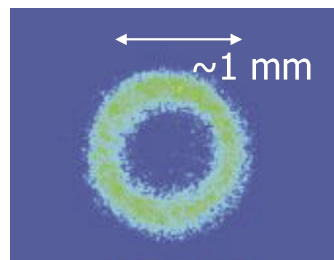


Fig. 5 Spatial profile of spontaneous radiation from ID#13, measured with MPCCD. The distance between the source to the camera is ~ 120 m.

の不要な迷光等を除去するために、4象限スリットが設けられている。さらに、任意のXFELパルスを選択的に利用するためのパルスセクター³⁾が用意されている。

次いで、SACLAの光診断系について述べる。XFELは、極めて高い安定性を有する蓄積リングベースの放射光源と異なり、光特性のショット毎の変化は避けられず、ショット毎に光特性を診断するためのシステムが非常に重要である。このために、いくつかのビーム診断機器が光学ハッチ内に設置されている。最も重要な対象は、光強度(パルスエネルギー)の計測である。しかしながら、XFEL光は極めて高いピーク強度を有しており、リニアリティの確保に工夫が必要となる。例えば、放射光ビームラインで広く用いられている大気圧のイオンチャンバーでは電子・イオンの再結合が顕著になりリニアリティが失われる。また、XFELビームラインにおいては、微弱な自発放射から強力なSASE-FELまで、数桁の広いダイナミックレンジをカバーする必要がある。この目的のために、薄膜強度モニタ(BM: thin-foil beam monitor)が開発された⁴⁾。これは、入射X線のごく一部を後方に散乱する薄膜と、上下左右に配置された4つのフォトダイオード(PD)により構成されている。全PDの出力の和をとることにより光強度が求められ、2組のPDの出力の差をとることにより重心位置が求められる。信号散乱用の薄膜としては、SPring-8のBL29XUにおけるテストの結果、均質なプロファイルが得られるナノダイヤモンドフォイルが採用された。PDの出力は、プリアンプ・メインアンプで波形整形された後、16ビットADCによりデジタル処理が行われ、最終的には電荷量に比例する信号がデータベースにショット毎に記録される。強度の計測例をFig. 6に示す。ダイナミックレンジとしては、6桁以上有することが確認されている。

また、BMとは独立に、ガスからのX線散乱をPDによって検出するガス散乱型モニタ(GM)も利用可能である。これは、BMとの比較較正や、長波長領域の強度計測に用いられる。GMはビームライン基幹部に設置されており、ガスを導入するために上下流に差動排気システムを用いている。さらに、より簡便なデバイスとして、空気によるX線散乱を検出する強度モニタが開発され、実験ス

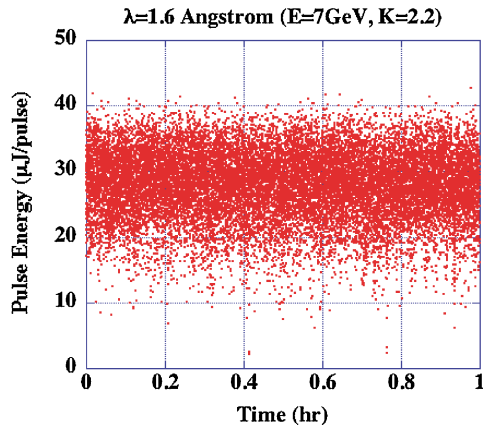


Fig. 6 Pulse energy measured with BM1.

ーションにおいて用いられている。これらの強度モニターを用いて、放射光ビームラインと同様に強度の規格化を行うことが可能である。

ビームライン基幹部における各光学素子の上下流には、スクリーンモニター (SCM) が設置されており、光学調整やプロファイルの確認等に利用される。SCM は、2 種類の蛍光スクリーン (Ce:YAG, B-doped diamond) 及び PD を備えており、これらを遠隔でビームパスに挿入して空間プロファイルや強度の計測を行うことができる。蛍光像は、XFEL 光に同期した CCD カメラによって検出され、リアルタイムの画像確認や保存が可能である。Ce:YAG 及び PD は破壊型計測であるが、B-doped diamond は硬 X 線に対して高い透過率を有し、実験と並行してプロファイルの常時計測を行うこともできる。

また、XFEL はライナックベースの光源のため、加速器のエネルギーの変化により、レーザーの波長が容易に変化する。中心波長を簡便にモニターするために、薄膜の回折を利用したスペクトロメータが開発された。BM にも利用されたナノダイヤモンドは、均一なデバイ・シェラー環を形成する。このプロファイル回折計の 2θ アームに取り付けた MPCCD で読み取ることにより、スペクトルの重心を求める。ショット毎に画像処理を行い、中心波長がデータベースに記録される。

コヒーレンス特性は XFEL の重要な性質の一つである。複数の予備的な実験により SACLA は優れた空間コヒーレンスを有していることが示唆されている。今後さらに精密に測定を行うとともに、Hanbury-Brown Twiss 型のコヒーレンス計測も進める予定である。

4.4 時間領域計測

XFEL のフェムト秒パルスを活用して、様々な現象の素過程を追跡することが可能となる。典型例として、超短パルスレーザーを用いて試料に光学的な変化を与え、その後の電子状態や原子位置の変化の様子を XFEL 光のスナ

Table 1 Specification of optical laser system

| | Wavelength | Pulse energy (μJ) | Pulse duration (fs) |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| CPA | 800 nm | 2500 | 30 |
| OPA | Idler: 2.5–1.5 μm | 90–390 | 100 |
| | Signal: 1.6–1.2 μm | 160–510 | |
| | SHI: 1.16–0.79 μm | 1–128 | |
| | SFI: 600–530 nm | 21–270 | |
| | SFS: 530–480 nm | 240–260 | |
| | FHI: 480–395 nm | 1.6–56 | |
| | SH-SFI: 295–265 nm | 3.0–55 | |
| SH-SFS: 265–240 nm | 34–53 | | |

ップショットにより計測することが計画されている。これらのポンプ・プローブ実験を行うために、フェムト秒同期レーザーシステムが導入された。本システムは、実験ステーション近傍のレーザーブース内に設置され、ここから EH2 にレーザーが輸送されて実験が行われる。また、EH3 への輸送も準備されている。

レーザーシステムは、チタンサファイヤ (Ti: Sapphire) ベースのモード同期オシレータ、チャープパルス増幅器 (CPA: chirped pulse amplifier) と光パラメトリック増幅器 (OPA: optical parametric amplifier) から構成されている。CPA は、波長 800 nm、パルスエネルギー 2.5 mJ、パルス幅 30 fs (FWHM) のビームを供給する。OPA は、赤外～紫外領域において、パルス幅約 100 fs のビームを生成する。これらの出力を Table 1 にまとめる。レーザーシステムの繰り返しレートは 1 kHz であるが、回転シャッターを用いて XFEL の繰り返しレート (最大 60 Hz) に分周することが可能となっている。XFEL に対する同期レーザーの遅延時間は、電気的な遅延装置を用いて 1 ps 単位、光学遅延ステージを用いて 1 fs 単位での調整が可能である。

本レーザーは、加速器をドライブする RF 信号によって同期駆動が行われている。RF 信号は温度安定化された光ファイバーを用いて高精度で実験ホールまで輸送されている。フェムト秒領域の計測を行うためには、XFEL 光とレーザーの到達時間ジッターの評価が非常に重要であり、EH2 においてレーザーポンプ・XFEL プローブの調整実験が進められている。

また、XFEL 光のパルス幅の計測も非常に重要である。電子バンチ長は、RF 偏向キャビティを用いて 30 fs 程度と求められているが、その中でもエミッタンスの良い一部分しかレーザー増幅には寄与しないため、XFEL のパルス幅は 20 fs 以下と予想されている。パルス幅の計測方法は、世界的にも未だ確立されていないが、X 線オートコリレータの検討や、スペクトルのスパイク計測⁵⁾

のテスト等が進められている。

4.5 まとめと展望

SACLA の利用実験装置は、2006～2010年度、文科省「X線自由電子レーザー利用推進研究課題」によって整備が行われ、2011年度は、理研の「XFEL 利用装置提案課題」により、当該装置のテストと共用化、並びに新規装置の開発が行われた。特に、1 ミクロン集光装置については、既に立ち上げが完了しており、本号の三村秀和氏らの記事で報告されている。その他の装置についても、コヒーレント回折イメージング装置を中心に順調に立ち上げが進められており、性能が確認され次第速やかに報告が行われる予定である。

施設の高度化についてまとめる。SACLA と SPring-8 の相互利用実験施設は、2012年度からのテスト実験を予定している。XFEL と放射光源に加えて、光学レーザーや軟 X 線 FEL など、様々なビームの複合利用の検討が行われている。また、XFEL のシード化は、シングルモード化と輝度の数桁の向上を可能にするものであるが、近い将来の利用運転開始を目指して検討が進められている。さらに、広帯域自発放射ビームライン BL1 は、現在は光学ハッチ内のみの利用となっているが、ビームライン・実験ステーションの高度化を進めており、光源側においても軟 X 線領域のレーザー生成に向けた検討を行っている。但し、この波長領域のレーザーとしては、FLASH や LCLS 軟 X 線ステーションという他の FEL 施設、さらには高次高調波に代表される実験室光源との競合もあるため、戦略的な観点が求められている。日本の強みと SACLA の特徴を活かしたサイエンスを発展させるために、利用者の皆様からのインプットを是非お願いしたい。

最後に、繰り返しになるが、SACLA のビームラインは、将来の拡張に対して柔軟かつ効率的に対応することを基本に構築された。この基本思想は先行する LCLS とは大きく異なるものである。彼らは、6 つの実験ステーショ

ン毎に独立した光学系・診断系と大がかりな実験装置を常設しており、大規模な改造は容易ではない。両者の優劣の議論は未だ尚早であるが、少なくとも、我々の「懐の深い」システムが極めて短期間でレーザー発振に貢献したことは確かであり、将来の様々な展開に迅速に対応することも可能である。利用者の皆様からの斬新で野心的なご提案を期待している。

参考文献

- 1) M. Yabashi and T. Ishikawa (eds.): XFEL/SPring-8 Beamline Technical Design Report, ver. 2.0 (RIKEN/JASRI, Hyogo, Japan, 2010).
- 2) K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki and Y. Mori: Rev. Sci. Instrum. **73**, 4028-4033 (2002).
- 3) T. Kudo, T. Hirono, M. Nagasono and M. Yabashi: Rev. Sci. Instrum. **80**, 093301 (2009).
- 4) K. Tono, T. Kudo, M. Yabashi, T. Tachibana, Y. Feng, D. Fritz, J. B. Hastings and T. Ishikawa: **82**, 023108 (2011).
- 5) M. Yabashi, J. B. Hastings, M. S. Zolotarev, H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, K. Yamauchi and T. Ishikawa: Phys. Rev. Lett. **97**, 084802 (2006).

● 著者紹介 ●



矢橋牧名

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 ビームライン研究開発グループ グループディレクター

E-mail: yabashi@spring8.or.jp

専門: X線光学

【略歴】

1996年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻、2003年博士(工学)、1996年財団法人高輝度光科学研究センター、2007年理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部を経て、2011年4月より現職、博士(工学)。

4. Beamline

**Makina YABASHI^{1,2}, Kensuke TONO², Tadashi TOGASHI²,
Yuichi INUBUSHI¹, Takahiro SATO¹, Hiromitsu TOMIZAWA^{1,2}, Togo KUDO^{1,2},
Haruhiko OHASHI^{1,2}, Hiroaki KIMURA^{1,2}, Kunikazu TAKESHITA^{1,2},
Sunao TAKAHASHI^{1,2}, Shunji GOTO^{1,2}, Tetsuya ISHIKAWA¹**

¹RIKEN SPring-8 Center, Kouto 1-1-1, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan

²Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), Kouto 1-1-1, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan

Abstract We introduce XFEL beamlines and experimental stations at SACLA. The beamline is composed of optical system that preserves wavefront of XFEL radiation, and diagnostics system for performing shot-by-shot characterization of XFEL pulses. In the experimental stations, key systems such as an optical synchronization laser and a focusing device have been prepared. Various types of experiments can be performed.
