3. SACLAの現状と高度化

3-1　SACLAの運転と加速器の高度化

2015年の4月からBL2とBL3の2本のX線レーザービームラインによるユーザー運転が開始された。夏期運転停止期間には、これまで短パルス自発光を提供してきたBL1を軟X線のレーザービームラインに改造する工事が完了し、秋以降ユーザー運転に向けたビームコミッショニングを進めている。図1に2本のX線レーザービームラインと1本の軟X線ビームラインが整備された現SACLA施設の模式図を、表1に2015年度の運転統計データを示す。実験準備やレーザー調整の改善と効率化を進めた結果、利用運転時間を全運転時間の60%、約4000時間まで増やす事ができた。最終的には全運転時間に占める利用運転の割合を70%まで引き上げる事を目標とする。加速器システムの継続的な高度化によって、レーザーのパルスエネルギーは10 keVの光子エネルギーで約0.6 mJが安定的に達成され、年度に亘る平均レーザー中断間隔は30 ppsの標準繰り返しで1時間を初めて上回った。

表1　SACLAの運転統計

	FY2015
Total Operation Time per Fiscal Year (Achieved / Planned)	6483 / 6638 hr
Operation Rate	~ 97.7%
Machine Tuning Time	158 hr
BL Tuning, Preparation & R&D Time	2401 hr
User Experimental Time	3924 hr
Downtime in User Experiments	154 hr
Laser Availability	~ 96.1%

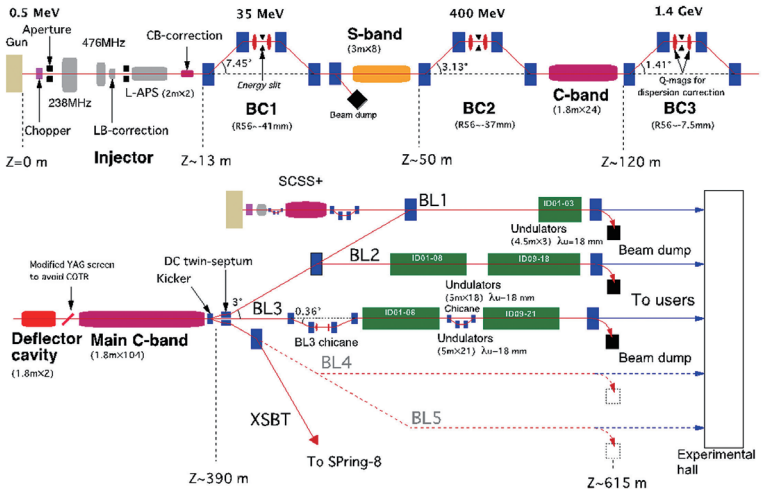

図1　現状のSACLA施設の模式図.
2本のXFELのビームライン，BL2 とBL3がユーザー実験に利用可能；3番目のレーザービームライン（軟X線）となるBL1は現在ビームコミッショニング中.

X線レーザーを提供する2番目のビームラインBL2 の建設は2014年の夏期運転停止期間に完了、その年の10月にレーザー増幅の初観測に成功した。レーザー強度の増大とレーザー特性の安定化に向けビーム調整が続けられ、2015年春には、レーザー性能はパルスエネルギーで100 μJ以上を定常的に維持できるレベルに到達した。2015年4月に最初のBL2におけるユーザー実験がDCモード（BL2のみを単独で用い、BL2とBL3の2本のビームラインに対するパルス毎のレーザー振り分けは行わない運転）で実施された。

SACLAの潜在能力を有効活用するために必要となる複数レーザービームラインの同時パルス運転試験は、2015年1月から開始された。この運転は、異なるビームラインで任意のレーザー波長を提供するためパルス毎に電子ビームエネルギーを変更するTIME（Time-Interleaved Multi-Energy acceleration）運転[1]とエネルギーの異なる電子ビームを所定のビームラインへパルス毎に選別して輸送する電子ビームルート切り替えシステム[2]の2つを組み合わせる革新的な運転手法である。システム改善とビーム調整の不断の努力によって、2015年7月に、BL2とBL3の2本のレーザービームラインに対し、レーザー強度として100～200 μJ/pulse、異なる2つのレーザー波長（レーザー波長は独立に選択可能）を安定に供給するパルス振り分け運転を達成した。この結果、2015年の秋のユーザー実験からBL2とBL3の同時使用が可能になった。2本のビームラインのレーザーパルス振り分け運転時に、各ビームラインで得られるレーザー強度の安定性を図2に示す。一方で、現状の複数レーザービームラインの同時運転では、提供できる電子ビームのピーク電流が2 kA程度に制限されるという課題が残った。これは、BL2に電子ビームを曲げて輸送する際、CSR（Coherent Synchrotron Radiation）効果により電子ビームのエミッタンスが激しく劣化するためである。これを改善し、SACLA線型加速器と直線上にあるBL3で通常用いられる10 kAを超えるピーク電流を、複数レー

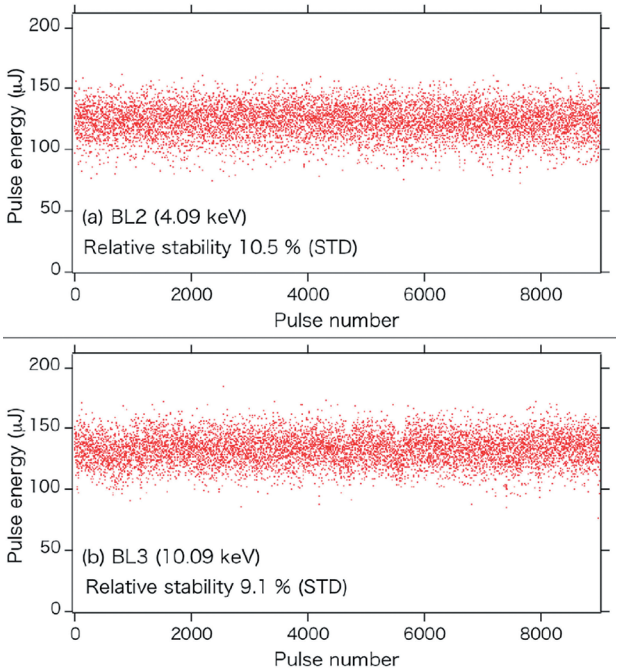

図2　複数レーザービームラインの同時使用運転時の (a) BL2と (b) BL3のレーザー強度の安定性．図中の赤点は1ショットのレーザー強度データを示す．この測定に於いて，電子ビームのエネルギーはBL2で6.3 GeV, BL3で7.8 GeV. また，アンジュレータのK値はBL2で2.85, BL3で2.1であった．

ザービームラインの同時運転モードにおいて利用可能にするため、パルス振り分けシステムを含むビーム輸送系の大幅な改造を検討中である。

軟X線波長領域においてレーザーの提供を目指すBL1の大規模な改造が2015年の夏期運転停止期間に完了した。図3にBL1の上流に置かれたBL1専用加速器システムの写真を示す。このシステムは、SACLAのプロトタイプ機であるSCSS試験加速器[3]を光源棟に移設し、2つのC-band加速ユニット等の要素機器を追加して建設された。3台の真空封止アンジュレータが設置され、SACLAとの互換性を考慮し、周期長は同一の18 mmが採用されている。X線のビームライン部分、フロントエンド要素機器や光学ハッチに納められる光学機器等は、軟X線FELを取り扱うため大幅な改修が行われた。BL1に接続されている2つの電子加速器、BL1専用加速器とSACLA線型加速器は現状では切り替えが可能である。BL1専用加速器を選択すれば、BL1の運転はSACLAの運転と独立に実施できる。ビーム輸送系、安全インターロックシステム等の付属システムは、この柔軟な運用を可能とするように改造された。BL1のビームコミッショニングは2015年9月14日から始まり、10月7日には波長30 nmにおいてレーザー増幅の初観測に成功した[4]。11月には施設検査に合格し、本格的なビーム調整フェーズへと駒を進めた。レーザー強度は、2015年末時点で

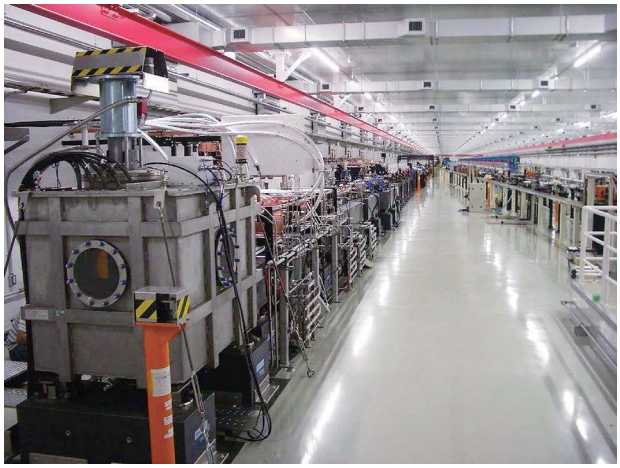

図3　BL1最上上流に建設されたBL1専用加速器システム．写真は最上流に位置する電子銃高圧タンク側から撮ったもの．

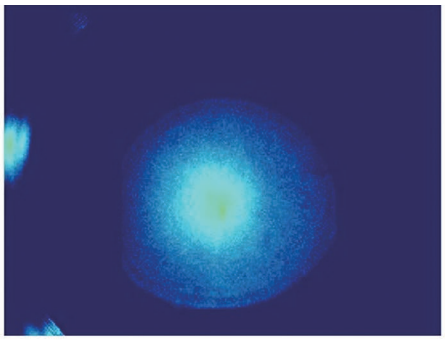

図4　BL1光学ハッチ内の MCP（マイクロチャンネルプレート）で計測されたレーザープロファイル．

数μJ/pulseまで引き上げられ、ビーム調整は順調に進展している。図4に光学ハッチにおいて観測されたBL1のSASE FELのプロファイルを示す。2016年度のBL1のユーザー利用に向け、ビーム調整が継続されている。

References

[1] T. Hara et al.: *PRSTAB* **16** (2013) 080701.
[2] T. Hara et al.: *Proc. of FEL2015*, Daejeon Korea, (2015) pp. 293-296.
[3] T. Shintake et al.: *Nature Photonics* **2** No. 9 (2008) 555.
[4] T. Sakurai et al.: *Proc. of 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tsuruga, Japan, (2015) pp. 256-260.