

3-1 SACLA 加速器

3-1-1 SACLAの運転概要

2012年の3月から開始されたユーザー運転は、大きなトラブルもなく年間を通して順調に行われた。表1に運転統計データをまとめる。予定されていた7000時間の年間総運転時間（利用運転時間3000時間を含む）は無事クリアされ、施設稼働率も99.4%に達した。機器トラブル等で生じたダウンタイムを除く、レーザー総利用時間を利用運転時間で割った平均レーザー利用率は92%を上回った。全利用運転時間におけるFault回数は5450回で平均Fault間隔は約37分であった。ユーザー実験と並行して、加速器、光源、ビームラインや検出器の安定化及び高度化にも継続的に取り組んでおり、2013年度の自己シード化XFEL生成、実験効率向上を目指したマルチビームライン化の早期実現を目指している。2012年度に実施された実験課題の内訳を図1に示す。コヒーレント回折イメージングとポンプ&プローブ実験の2つが全体の6割以上を占めている。X線非線形光学現象はここではAMO (Atomic, Molecular, and Optical physics) のカテゴリーの中にカウントされている。

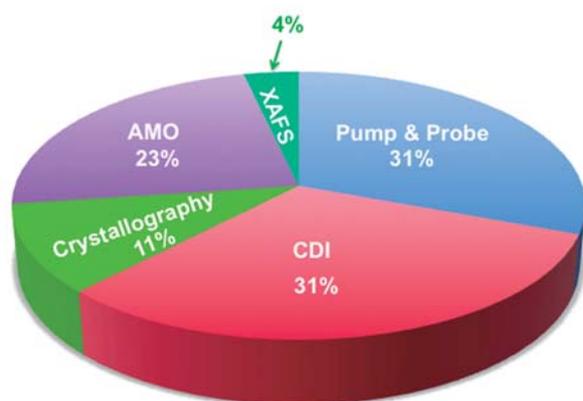


図1 2012年度の利用実験内訳

表1 SACLAの運転統計

Total Operation Time per Fiscal Year (Achieved / Planned)	7016 / 7060 hr
Operation Rate	~ 99.4%
Machine Tuning Time	583 hr
BL Tuning, Preparation & R&D Time	3281 hr
User Experimental Time	3152 hr
Downtime in User Experiments	241 hr
Laser Availability	~ 92.3%

SACLAの2012年度の利用運転は、全ての利用実験が10 Hzのパルス繰り返しで実施された。波長の大幅な変更は、その都度加速器制御室に依頼して実施するオンデマンド方式で、波長や強度等の確認も含め所要時間は30分程度である。波長の小さな変更(±10%程度)は、実験状況に応じて、K値変更専用のGUIを用いて実験ユーザーが随時実施できる。集光ビームの利用には、1 μmの汎用集光システムが用意されている。年度後半から50 nmの集光システムも利用可能となった。レーザーの強度、波長、位置、プロファイルは光学ハッチや実験ハッチに設置されたインラインモニターで実験しながら計測が可能になっている^[1]。全ての実験データはショット毎にタグにより管理され、実験終了後レーザー各ショットの属性データが利用可能である。年度の後半からは2色のXFELも利用できるようになった^[2]。利用できる最大レーザー波長差は約30%である。2つのレーザーの遅れ時間は最大40フェムト秒までアト秒の分解能で制御が可能である。

2012年度の光源性能を表2^[3]に示す。利用可能なレーザー波長範囲は4.5~15 keVである。レーザーのパルスエネルギーは波長に依存し、長波長程高い強度が得られる傾向にある。レーザー波長が1 Åより長い領域において、基本的に出力飽和に達した安定発振状態のレーザーが供給可能である。10 keVにおけるレーザーパルスエネルギーは、チャンピオンデータとしては300 μJ (10 keV) を越える所まで増大し、年間を通じ安定したレーザー光を全利用波長範囲でユーザー実験に供給することができた。レーザーの空間コヒーレンスは、ヤングのダブルスリット(50 μmのスリット間隔)による干渉縞のシングルショット計測により評価され、計測した全レーザーショットでレジビリティはほぼ100%であった^[4]。このことから、SACLAのレーザーは基本的に全ショットで十分な空間干渉性があると考えられる。

表2 SACLAのレーザー性能

Pulse Energy	0.2~0.3 mJ @ 10 keV
Available Wavelength Range	4.5 ~ 15 keV
Electron Beam Pulse Duration	< 10 fs (FWHM)
Spatial Coherence	Nearly full
Repetition Rate	10 Hz (Design 60 Hz)
Stability Intensity $\sigma_{\delta I}/I$	$\leq 10\%$
Pointing $\sigma_{\delta z}/z$ (FWHM)	3 ~ 7%
Wavelength $\sigma_{\delta \lambda}/\lambda$	~ 0.1%

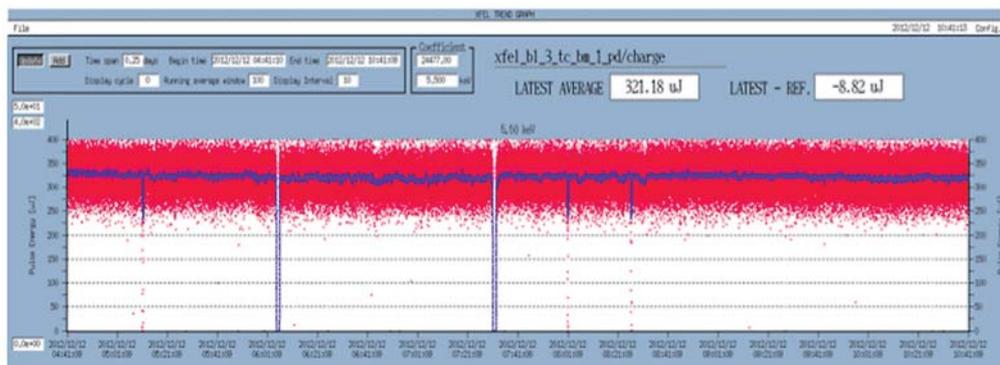


図2 達成されたレーザー強度の安定性。測定箇所は実験ハッチの直上流の光学ハッチ。

レーザー発振状態での強度変動は、標準偏差で約10%であり、図2に示す様にレーザー出力は長期間安定している。レーザーの位置変動（標準偏差）は、サンプル直近の光学ハッチ内で、ビームサイズの3～7%が得られている。レーザーの中心波長変動は設定波長の0.1%を下回り、レーザースペクトル幅の内側に収まっている。レーザーのパルス幅については、直接測定は行われていないが、通常運転時10 keVの光子エネルギーにおいて常時10フェムト秒を大きく下回っていると評価されている。この根拠は、シングルショットスペクトル計測^[5]、クリプトンのDouble Core-Hall生成収率の定量評価^[6]、自己相関を用いた電子ビームパルスの電流分布計測、並びにSASEの増幅利得カーブを再現する3次元シミュレーションによるレーザー特性評価が全て、10フェムト秒を下回るレーザーパルス幅を予測するからである。図3にSACLAの電子ビームの高輝度特性を裏付けるSASEの増幅利得カーブ測定データを示す。指数関数的な出力増幅領域のゲイン長は2.3 mで、この値は年間を通じてほぼ維持されている。この極めて短いゲイン長は、SACLAの電子ビームが高いピーク電流までエミッタンスを維持したまま圧縮されていることを裏付けると共に、レーザーのパルス幅が10フェムト秒

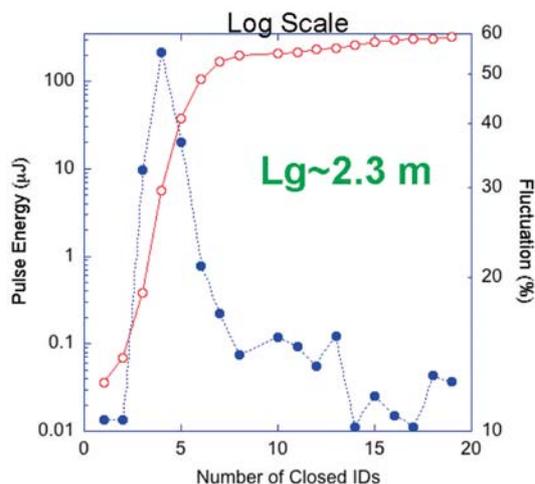


図3 実験的に得られたSASE XFELの増幅利得カーブ

を下回っていることの証拠にもなっている。SACLAでは30 GW以上の高いピークパワーが常時利用可能であり、ビームラインの強力な集光システム（1 μm ^[7] & 50 nm集光^[8]）と相まって、X線の非線形光学現象の世界をリードする環境が整いつつある。

XFEL研究開発部門

田中 均

3-1-2 SACLAの加速器

3-1-2. 運転・ビーム制御の高度化

3-1-2-1. 硬X線領域における2色FEL発振

硬X線領域における2色FEL発振は、既に1990年代に赤外線波長領域で実現されており、最近極紫外線や軟X線においても発振の報告がある。しかしながらこれらの2色FELはいずれも2波長間の波長差が数%と、ユーザー実験を行う上で使いづらいものであった。SACLAでは、可変ギャップアンジュレータの利点をフルに生かすことで、10 keV以上の硬X線領域において世界で初めて2色FEL運転を実施し、最大約30%の波長差を実現した^[2]。2色FEL運転は、2012年度後半より既にユーザー実験での利用を開始している。

2色FELでは、2012年夏期点検調整期間中にSACLA BL3アンジュレータ部に設置したセルフシード用シケインを用い、BL3の19台のアンジュレータをシケイン上下流の2セクションに分け、各々異なるK値でFELを発振させる。上流側セクションには8台のアンジュレータ、下流側には11台のアンジュレータがあり、アンジュレータギャップを開けることで、各セクション内で使用するアンジュレータの台数を調整することができる。また2色パルスの時間間隔は、シケインで電子バンチを遅延することにより、0～40フェムト秒の範囲でサブフェムト秒の精度で自由に変えることができ、原理的に時間ジッターは無視できる。

図4は2色FELのスペクトルを2結晶分光器で測定した例である。7 GeVの電子ビームを用い、上流側アンジュレータ（K=1.92）からは9 keV付近のSASEが、下流側

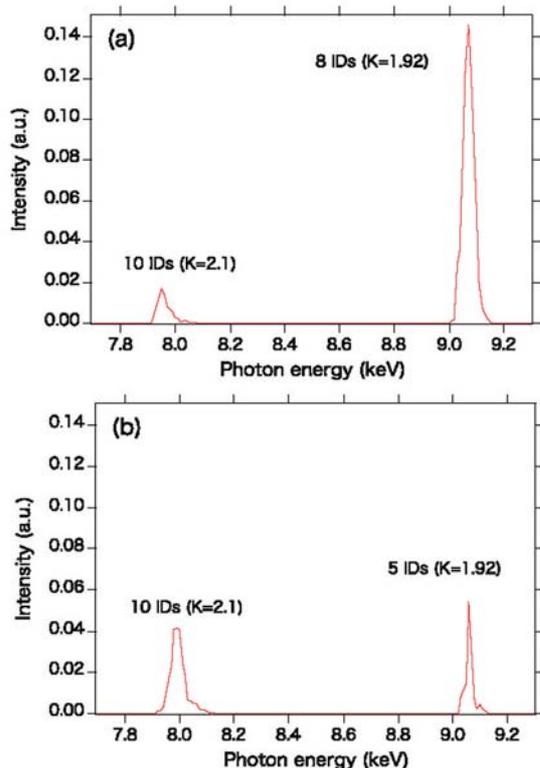


図4 2色FELのスペクトル例。(a)8台の上流側アンジュレータを全て使用した場合、(b)上流側アンジュレータを5台に減らした場合。

アンジュレータ ($K=2.1$) からは8 keV付近のSASEが得られている。図4 (a) の場合、上流側のレーザー発振で生じる電子ビームのエネルギーブレッドによって、下流側の発振が抑制されている。上流側のアンジュレータ台数を減らすことで上流側のレーザー出力を下げれば、図4 (b) のように下流側の出力を上げることができる。

3-1-2-2. マルチビームライン化に向けた電子バンチエネルギー制御方法の開発

SACLAでは増大する利用実験に対応するため、2014年度にBL2が調整を経て設置される予定である。マルチビームライン運転では、現在開発中のキッカー電磁石を用いて、電子バンチを複数のビームラインへ交互に振り分ける運転を計画しているが、複数の独立したユーザー実験を並行して実施するには、ユーザー実験毎、即ちビームライン毎にレーザーの波長を変える必要がある。現状のSACLAユーザー運転時の波長範囲は4.5~15 keVであり、数keV程度であれば、アンジュレータK値を変えることで波長を調整することができる。しかし、K値を小さくしすぎるとレーザー強度が大幅に落ちるため、波長を大幅に変える場合は電子ビームのエネルギーを調整しなければならない。そこでSACLAでは、マルチビームラインを用いたマルチユーザー運転に向けて、電子バンチ毎にビームエネルギーを制御する方法を考案し、2012年度に試験

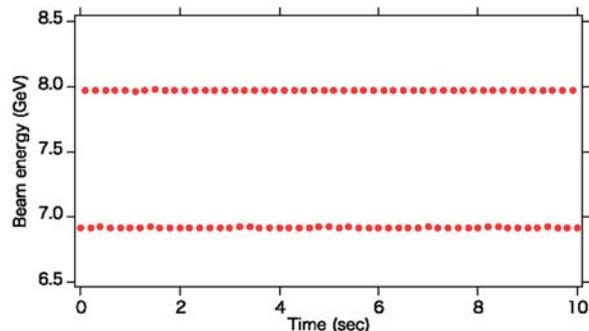


図5 マルチエネルギー運転時の電子バンチエネルギー測定例。電子バンチ繰り返し10 Hzに対し、C-band加速管16本を5 Hzで動作させている。

運転を行った^[9]。この方法では、線型加速器の下流側一部のRFユニットを電子バンチ繰り返しの整数分の1で動作させることにより、電子バンチ毎にビームエネルギーを変化させる。図5に試験運転の結果を示す。この例では、電子バンチ繰り返し10 Hzに対し、C-band下流の8 RFユニット (加速管16本) を5 Hzで動作させることで、電子バンチのエネルギーを交互に6.9 GeVと8.0 GeVの間で変えている。この方法には電子バンチ毎の早いRFパラメータの変更などがなく、全てのRFユニットは一定の繰り返しで定期的動作するため、加速器やレーザーの安定な運転が期待できる。

3-1-2-3. 電子ビーム軌道及びエンベロップ制御モデルの改善

線型加速器の場合、ビームエンベロップ (ベータ関数) は蓄積リングのように周期的安定解を持たないため、Q-scan法などで測定したTwissパラメータやエミッタンスの初期条件を、線形転送行列モデルを用いて伝搬させ求める必要がある。SACLAで開発した線形転送行列モデルは、PARMELA等のシミュレーションコードとはよい一致を示しているものの、実際のSACLA加速器で測定されるビーム応答とは大きな差異があった。詳細な測定を繰り返した結果、これまで顧みられなかった進行波加速管端部カプラーセルにおける四極成分が原因であることがわかった^[10, 11]。この四極成分は、加速管カプラーセル形状やRF位相に依存し、加速電界が高いC-band加速管で特に顕著に見られる。実測した四極成分に基づいて線形転送行列モデルを修正したところ、ビーム軌道補正やビームエンベロップ調整の精度を各段に向上させることができた^[12]。

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

原 徹

3-2-2. RF機器の高度化

2012年度には、入射部加速空洞の高周波位相変動抑制と入射部ビーム摂動要因の除去を実施し、XFELの安定性を大幅に向上することができた。入射部加速空洞の高周波位相変動は、レーザーの強度変化に直結することが知られており、それを抑制するため、入射部加速空洞、並びにそれらにRF信号を供給する低電力高周波機器を収納するラックの高精度温度制御（0.1 Kの温度安定度）を実現してきた。しかし、長期間のレーザー運転を通して、0.1 Kの温度安定度では不十分である事が分かり、この安定度を一桁改善し、0.01 Kの温度安定性が得られるよう、上記2つの温度制御システムの改善を実施した。

一方で、入射部加速空洞の温調ヒータ用AC電源のPWM（Pulse Width Modulation）制御に関連したレーザー強度の不安定性も観測された。この原因は、ヒータへのPWM電流で空洞近傍にノイズ磁場が発生し、この磁場により電子ビームがキックを受け、レーザー増幅部に当たるアンジュレータビームラインに渡って、電子ビームの軌道が数十 μm 程度蛇行し、レーザー増幅効率が低下するためである。磁気ノイズによる電子ビームの軌道変動を抑制するため、このヒータ電力制御をPWMから直流電源による制御方式に変更し、磁気ノイズ源を取り除いた。図6には、これらの改修前後のX線レーザー強度変動の周波数スペクトルを示す。改修前のスペクトルには、PWMの変調周波数に対応する2 Hzのピークが見られる。改修により、0.01 Hzのゆっくりとした強度ドリフトから数Hz強度変動まで、広い周波数帯域において、変動を大幅に抑制できた。

XFEL 研究開発部門

加速器研究開発グループ

基盤光源チーム

大竹 雄次

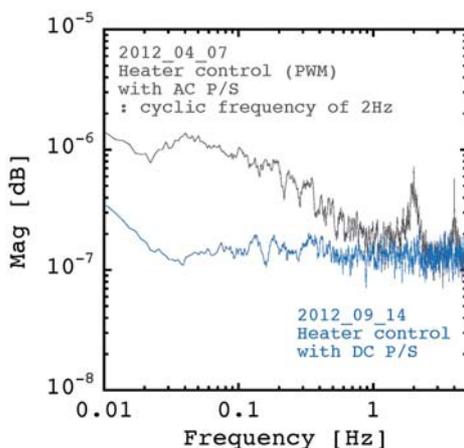


図6 入射部加速空洞の高周波位相変動抑制と入射部ビーム摂動要因の除去の2つの改善の前後でのレーザー強度変動の周波数スペクトル。上の線（グレー）が改修前で下（ブルー）が改修後である。

3-2-3 光源の高度化

3-2-3-1. シード型XFELの実現に向けて

SACLAでは、セルフシード法によるシード型XFELを早期に実現し、時間コヒーレン스에優れたXFELを利用者に供給するための高度化が進行中である。2011年度までに基本的な検討を完了し、これに引き続いて数値計算に基づく詳細な解析を行った結果、ダイヤモンドの単結晶を透過したX線に含まれる単色成分をシードとして利用する、最もシンプルな機器配置が採用された。さらにこの解析結果に基づき、必要な機器の設計やパラメータの最適化を行うとともに、アンジュレータラインの再配置を行った。具体的には、総計18セグメントで構成されるアンジュレータのうち第9セグメントを下流の第19セグメントの位置へ移設し、セルフシードに必要な機器を設置するためのスペースを確保するとともに、電子バンチとXFELパルスを分離するシケイン軌道を生成するための電磁石4台を同スペースに設置した。2013年度夏期点検調整期間には、このシケインの中間部に透過型分光器として機能するダイヤモンド単結晶が設置される予定である。また、シード化によるXFELの性能向上をより効果的なものとするためにはアンジュレータの増設が必要不可欠であるため、SACLA用アンジュレータのプロトタイプとして製作された既存のアンジュレータ（基本仕様は実機と同等）を、モーターやエンコーダの交換など必要な改造を施した後に、第20セグメントの位置に増設した。またこれと並行して、2台のアンジュレータが増設用に新規に製作された。これらは2013年夏期点検調整期間に調整・設置される予定である。

3-2-3-2. 自己相関法によるXFELパルスの時間構造の評価

上述したセルフシード用磁場シケインを通過する際、電子バンチはそれまでに生成したXFELパルスから時間的に遅れて後半のアンジュレータに入射する。このため、電子バンチとXFELパルスのオーバーラップの範囲はシケインの軌道振幅に依存する。これを利用すると、レーザー発振に寄与する電子（有効電子）バンチの時間構造、あるいはXFELのパルス長を評価することができる。即ち、シケインによって電子バンチに与えられる遅延時間の関数として、XFELのパルスエネルギーを測定すればよい。測定及び解析の結果、SACLAでは有効電子の大部分が少なくとも10フェムト秒以下の狭い領域に局在しているとの結論が得られた。これは、ゲインカーブの測定などから推測される電子バンチの最大ピーク電流と矛盾しない。これを踏まえて、より正確にXFELパルス幅やピークパワーを決定するための一連の測定が2013年度に実施される予定である。

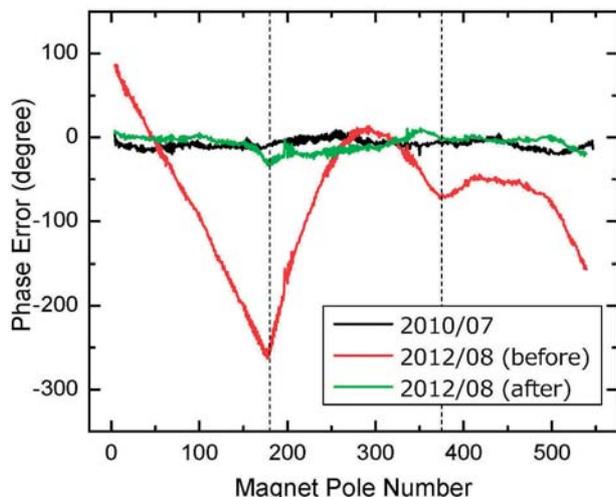


図7 アンジュレータ#18の位相誤差の履歴。黒線：2010年7月、赤線：2012年8月（補正前）、緑線：2012年8月（補正後）。

3-2-3-3. SAFALIによる磁場測定と補正

SACLAでは、各セグメントからの自発放射光のスペクトルを測定し、これを解析することによって当該セグメントのK値を精密に測定しているが、2011年秋以降、ある特定のセグメント（2台程度）について、スペクトルのピーク幅が予測値よりも広がっていることが確認された。これは、アンジュレータの磁場性能が劣化していることを示唆しており、原因究明のために2012年度の夏期点検調整期間中に再度磁場測定を行った。測定は、可搬式の磁場測定システム（SAFALI）を用いて、アンジュレータを移動することなく、光源収納部に設置された状態のままで行った。この結果、図7に示すように2010年7月の測定結果と比べて位相誤差が大きく劣化していることが明らかとなった。これは放射線減磁によるものではなく、図中点線で示したように、3つのユニットに分割している磁石列のギャップに偏差が生じたためであり、これらを再調整することでほぼ元通りの磁場性能が再現された。このようなギャップ偏差が生じた原因については継続して調査中である。

XFEL研究開発部門
加速器研究開発グループ
光源物理チーム

田中 隆次

3-2-4 加速器制御系の高度化

2011年度に引きつづきX線領域でのレーザー発振を安定に行うためのデータを安定して処理することが求められるのに加え、2012年度はレーザー発振を阻害する要因となっている不安定要素をいち早く検知するために各制御系

のより一層の高精度化を安定性向上とともに行うことを目指した。

3-2-4-1. データ収集システム

2011年度に試験環境にて行った試験結果をもとに、データベースサーバを2台構成としオンライン更新系と過去データの蓄積及び参照系を分離することで負荷分散を図り、データ蓄積用ストレージについては汎用ファイルサーバと兼用していたネットワークストレージシステムからファイバーチャネル接続の専用ストレージに変更してデータ通信の広帯域化と高速化を図った。

Low-Level RF系やビーム診断機器の一部ではパルス運転の周期に同期してデータ収集している。このビームに同期して収集されたデータをSybaseに収集されている非同期のデータと同一のライブラリーで使用できるデータベースアクセス関数の開発を行い、加速器の状態とビーム品質の相関等を利用して品質向上や異常時の原因究明に役立てることを目指した。ライブラリーの開発を10月に終了して、SACLA施設管理系状態監視ソフトウェアに導入した。2013年度の夏期点検調整期間中に導入を予定している。

3-2-4-2. 機器制御

- ・測温抵抗体読み出しモジュール：高周波加速装置等の温度制御として10 mK以下の精度が要求されているため新たに温度読み出しユニットの開発を行った。2012年度は主にアナログ回路の評価を行い1 mKの分解能が実現できることが確認できたため、2013年度にPLCに搭載できるユニットの開発を予定している。

- ・プロファイルモニター読み出し系：ビームプロファイルの読み出しにはCameraLink規格のカメラとキャプチャボードを使用している。現状のカウンターボードでは起動時にアタチされないことが頻繁にあるため別のカウンターボードに変更して安定した動作が行えるようになった。また、XSBTのカメラ切り替え機でメンテナンスが容易なように延長器を1台ずつ取り外せるシャーシを開発して設置を行った。

- ・ネットワークシステム：運用の安定化を目指して、SFPの故障、光ファイバーの破損等で運転が停止しないよう支線ネットワークの経路を二重化した。

先端光源開発研究部門
制御系研究開発グループ

福井 達

参考文献

- [1] K. Tono et al.: *New Journal of Physics* **15**, (2013) 083035.

- [2] T. Hara et al.: submitted to some journal.
- [3] H. Tanaka: "The SPring-8 Angstrom Free Electron Laser (SACLA)", Proc. of the 3rd International Particle Accelerator Conference (IPAC), New Orleans, May, (2012) pp. 2106-2110.
- [4] C. H. Song et al.: to be published elsewhere.
- [5] Y. Inubushi et al.: *Physical Review Letters* **109**, (2012) 144801.
- [6] K. Tamasaku et al.: *Physical Review Letters* **111**, (2013) 043001.
- [7] H. Yumoto et al.: *Nature Photonics* **7**, (2013) 43.
- [8] H. Mimura et al.: submitted to some journal.
- [9] T. Hara, et al.: *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **16**, (2013) 080701.
- [10] Y. Tajiri et al.: "SACLA 加速器における進行波加速管のビーム輸送モデルの修正", to be published in the Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, August 2013.
- [11] H. Maesaka et al.: "進行波型電子線形加速器の収束効果の解析と測定", to be published in the Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, August 2013.
- [12] T. Hasegawa et al.: "SACLA における線形加速器モデルに基づく電子ビーム軌道の自動補正", to be published in the Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, August 2013.