

X線自由電子レーザーSACLAが広げる未来

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

X線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsEr) は、世界ではじめてのコンパクト XFEL 施設である。理研と JASRI の共同チームにより、2006 年度から 2010 年度の 5 年間にわたり、SPring-8 サイトに建設された。真空封止短周期アンジュレータを用いることにより、比較的低い電子ビームのエネルギーにおいても、1 Å を切るような短波長 X 線レーザーの生成が可能となった。SACLA は、当初の計画通り、2011 年 3 月に最初の X 線自発放射を観測し、翌 4 月からレーザー発振のための本格的な精密調整を開始、6 月 7 日には、世界最高の光子エネルギーである 10 keV においてレーザー発振を達成した[1]。その後も調整を続け、2012 年 3 月からは供用運転を開始した。典型的には、4.5~15 keV の光子エネルギーにおいて、パルス当たりの光子数 $\sim 10^{11}$ photons、パルス幅 10 fs 以下[2]の X 線レーザーが利用に供されている。また、さらに強度を高めるために、大阪大学山内和人教授のグループと共同で集光ミラーシステムを開発し、1 ミクロンサイズの高品位の集光ビームがルーティンの利用実験に用いられている[3,4]。また、光学レーザーと XFEL を同期したポンプ・プローブ実験には、両者のタイミングの計測が非常に重要であるが、我々は、10 フェムト秒の分解能を有するタイミングモニターを開発し、利用実験への適用を進めている。さらに、SACLA のパルスレートである 60 Hz に同期可能な第面積 2 次元検出器を開発し、イメージングや微結晶の回折実験等に幅広く利用している。

XFEL は、新しいサイエンスを開拓する極めて有力なツールであるが、一方で、光源リソースの不足によるビームタイムの制約が世界共通の大きな課題となっている。我々は、多岐にわたる先端学術研究や産業利用に多くの利用機会を提供するために、新規の XFEL ビームライン (BL2) の整備を進めている。来年度には利用を開始する予定である。また、ビームの時間・波長領域の品質を向上させるために、シード型の XFEL の整備も行っており、本年度中の試験を計画している。

[1] T. Ishikawa et al., “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region”, *Nature Photon.* **6**, 540 (2012).

[2] Y. Inubushi et al., “Determination of the Pulse Duration of an X-Ray Free Electron Laser Using Highly Resolved Single-Shot Spectra”, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 144801 (2012).

[3] K. Yumoto et al., “Focusing of X-ray free-electron laser pulses with reflective optics”, *Nature Photon.* **7**, 43 (2013).

[4] T. Koyama et al., “Investigation of ablation thresholds of optical materials using 1- μ m-focusing beam at hard X-ray free electron laser”, *Opt. Exp.* **21**, 15382 (2013).

SAGA LS-AIST 合同シンポジウム
 SPring-8 Angstrom Compact free-electron LAser

**X線自由電子レーザー
 SACLAが広げる未来**

矢橋 牧名
 RIKEN 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
 yabashi@spring8.or.jp
 July 31, 2013 @サンメッセ鳥取

**X線自由電子レーザー
 X-ray Free Electron Laser: XFELが切り拓くサイエンス**

高輝度 (X10⁹)
 非線形・量子X線光学
 高エネルギー密度科学
 原子分子光科学

XFEL
 イメージング生物学
 超高速度物質科学
 微小結晶構造解析

高コヒーレンス (100% in transverse)
 超高速 (~10 fs)

Contents

- SACLA の概要と基本性能
- 集光光学系と先端利用
- 汎用利用に向けた取り組み
 - 連続試料導入フェムト秒結晶構造解析 (SFX)
 - フェムト秒X線吸収分光
- 展望

3

SACLA @SPring-8

世界初のコンパクトXFEL施設
 建設: FY2006~2010
 利用運転: 2012年3月~

諸外国のXFEL

1990年代, リニアコライダー技術をもとにアメリカ・ドイツで検討がはじまった

ドイツの計画 (European XFEL)
 超伝導加速器・高線り返し
 2016年に完成予定

アメリカの計画 (LCLS)
 既存加速器を利用
 2009年にファーストラージング

とても大きい

5

コンパクトXFELのコンセプト

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

電子ビームエネルギーの抑制

サイズ低減

高加速勾配

さらなるサイズ低減

低エミッタンス

真空封止・短周期アンジュレータ

Cバンド 高勾配加速システム

低エミッタンス熱電子銃・入射器

6

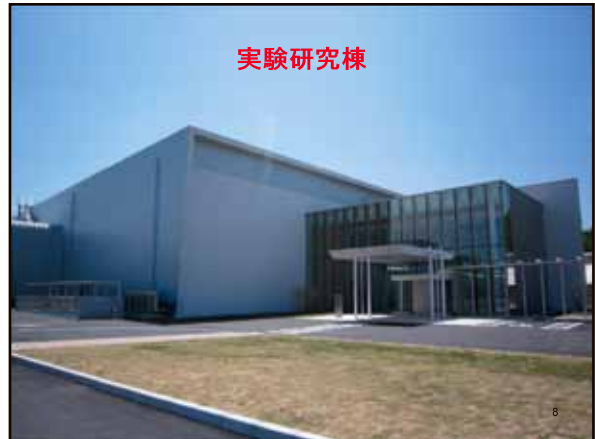
SACLAのファーストレージング



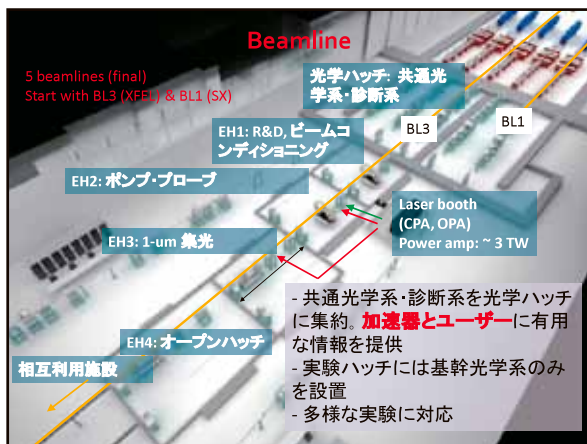
2012年3月から利用運転開始

7

実験研究棟



8



性能のサマリー

Pulse Energy	0.3 mJ @10 keV \rightarrow 2×10^{11} photons
Photon energy range	4.5 to 15 keV
Stability Intensity σ_{IM}	$\leq 10\%$
Pointing	3 ~ 7% of beam size
Repetition rate	20 Hz (Max. 60 Hz)



A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region

Hitoshi Tanaka and Makina Yabashi et al.*

Nat. Photon 6, 540 (2012)
Basic performance in ~2011

10

フォトン数をはかるー絶対強度計測ー

カロリメータ (AIST, 齋藤剛生G)

後方散乱型ビームモニタ (SACLA)

ガスモニタ検出器 (DESY/PTB)

室温タイプも開発

Photon energy /keV	Pulse energy / μJ	
	Radiometer	XGMD
4.4	32.26 ± 0.35	32.9 ± 2.0
5.8	104.2 ± 1.3	106.6 ± 6.1
9.6	95.3 ± 2.3	93.9 ± 6.1
13.6	42.2 ± 1.1	40.8 ± 2.9
16.8	0.96 ± 0.03	

Max. Deviation = 3.3%

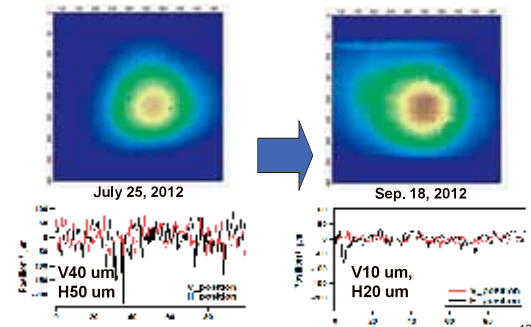
Kato et al, *Appl. Phys. Lett.* 101 023503 (2012)

T. Tanaka et al., NIMA 659, 528 (2011),
K. Tiedtke et al., JAP. 103, 94511 (2008).

Nov. 24, 2011

ビーム形状をはかる。ポインティングは？

入射部の温度安定化 (2012年夏)



レーザー・XFELの時間差をはかる

光学レーザーとXFELの到達時間計測
XFELで電子を励起、透過率の変化を光学レーザーでプローブ

Sato-san (SACLA/U Tokyo)
Togashi-san (SACLA)

Conduction band
 $E_{\text{gap}} < E_{\text{photon}}$
Absorption
 $E_{\text{gap}} > E_{\text{photon}}$
Transmission
Valence band

XFEL 1D focus
Pulse energy < 10 uJ

S. M. Durbin, et al., X-ray pump optical probe cross correlation study of GaAs *Nature Photonics* 6, 111

時間ジッターと分解能

Sato et al., in preparation

Sorting

Histogram of arrival time
Timing jitter: 130 fs (rms)

Installation to BL as a "permanent" system, combined with grating beam splitter (early 2014)

パルス幅とピークパワー

Pulse Energy	0.3 mJ @10 keV
Photon energy range	4.5 to 15 keV
Stability Intensity σ_{int}	$\leq 10\%$
Pointing	3 ~7% of beam size
Repetition rate	10 Hz (Max. 60 Hz)
Pulse duration	??
Peak Power	??

15

時間と周波数(スペクトル)との関係

Temporal domain

Frequency domain

フーリエ変換

Resolution << 100 meV

各国のシングルショットスペクトロメータ

LCLS: Collimated beam + bent, thin crystal analyzer

SACLA: Diverged beam (elliptical mirror) + flat, thick crystal analyzer

M. Yabashi et al, PRL 97, 084802 (2006)
Y. Inubushi et al, PRL 109 144801 (2012)

D. Zhu et al, APL 101, 034103 (2012)

SwissFEL: Grating

P. Karvinen et al, Opt. Lett. 37 5073 (2012)

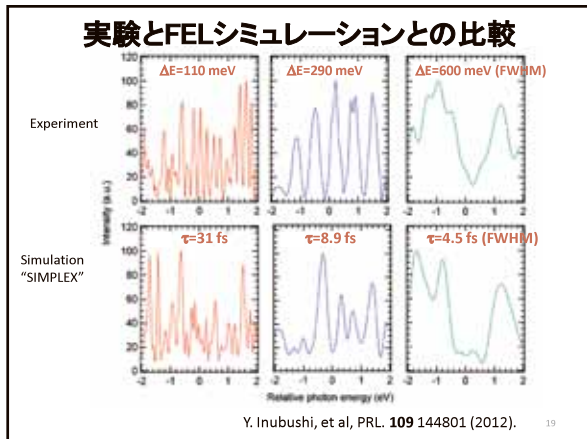
高分解能スペクトル計測 (Si555)

犬伏 研究員 (SACLA)

Weak Narrow ← Bunch compression Spike width in freq. domain → Strong Broad

Fourier relationship between temporal and frequency

18

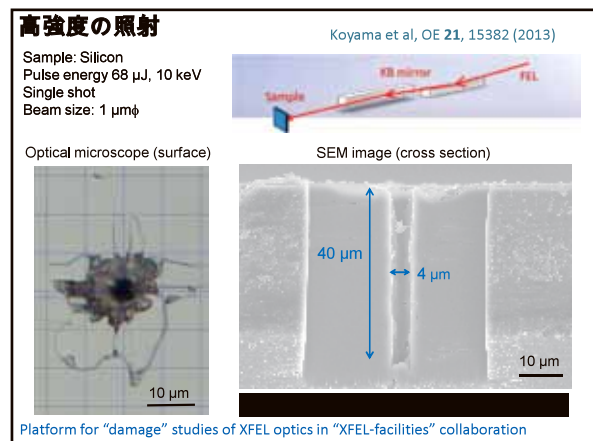
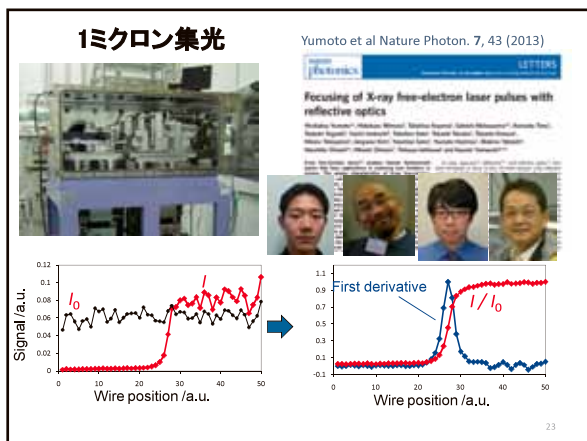
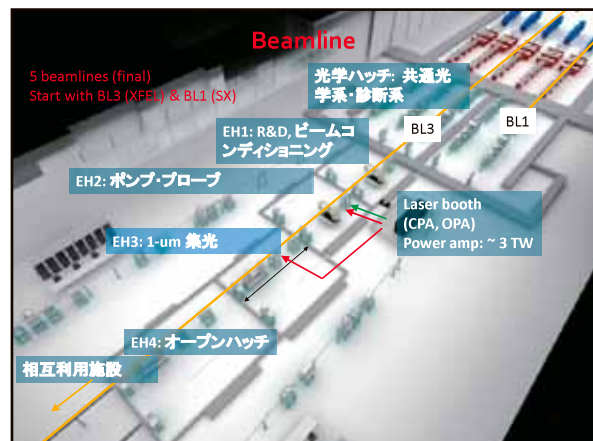


性能のまとめ

Pulse Energy	0.3 mJ @10 keV
Photon energy range	4.5 to 15 keV
Stability Intensity σ_{int}	$\leq 10\%$
Pointing	3 ~7% of beam size
Repetition rate	10 Hz (Max. 60 Hz)
Pulse duration	< 10 fs
Peak Power	> 40 GW

20

- ### Contents
1. SACLA の性能と先端光計測技術
 2. 集光光学系と先端利用
 3. 汎用利用に向けた取り組み
 1. 連続試料導入フェムト秒結晶構造解析 (SFX)
 2. フェムト秒X線吸収分光
 4. 展望
- 21



キセノンの多光子・多重電離 Fluence ~50 uJ/um² @5.5 keV

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Deep Inner-Shell Multiphoton Ionization by Intense X-Ray Free-Electron Laser Pulses

H. Fukuzawa,^{1,2} S.-K. Son,³ K. Mochizuki,⁴ S. Mondal,⁵ K. Nagata,^{1,4} S. Wada,^{1,2} X.-J. Liu,⁶ R. Feifel,⁷ Y. Tachibana,¹ Y. Ito,¹ M. Kimura,¹ T. Sakai,⁸ K. Yamamoto,⁹ H. Hayashi,¹ J. Kojima,¹ P. Johnson,⁸ M. Sano,¹ E. Kikkawa,¹⁰ H. Hara,^{11,12} H. Eto,^{1,12} E. Fournier,^{13,14} E. Buhler,¹⁵ C. Miron,¹⁶ K. Terauchi,¹⁷ Y. Inohara,¹⁸ T. Hara,¹⁹ M. Yabuchi,²⁰ M. Yao,²¹ R. Santos,^{22,23} and K. Ueda^{1,2}

高ピークパワー: ダブルコアホール

- 100 uJ/10 fs = 10 GW (after KB)
- Focusing size: ~1x1 um²
- 10 GW/(1 um)² ~ 10¹⁸ W/cm²

励起効率

$$P = \frac{I \tau \mu M}{eh\nu N_A \rho}$$

$\tau \sim 1$ fs
 $P \sim 1\% @ 10^{18}$ W/cm²
 -> 多光子過程が観測可能に
 $P \sim 100\% @ 10^{20}$ W/cm²
 -> **多光子過程だらけに**

クリプトンのダブルコアホール

PHYSICAL REVIEW LETTERS

Double Core-Hole Creation by Sequential Attenuated Photoionization

Contents

- SACLA の性能と先端光計測技術
- 集光光学系と先端利用
- 汎用利用に向けた取り組み
 - 連続試料導入フェムト秒結晶構造解析 (SFX)
 - フェムト秒X線吸収分光
- 展望

S. Boutet et al, Science 2012

SFX装置の開発

Song TL 登野TL (SACLA)
+ エンジニアリングチーム

岩田想教授 (京大)

- 小型
- ヘリウム環境下で動作 (真空環境不要)
- 拡張性、アップグレード

検出器の高度化

MPCCD 検出器

- 高角までカバー: $\pm 20^\circ \rightarrow \pm 45^\circ$
completed in March 2013
- 量子効率の向上
10 keV: 30% @ 50 um t -> 86% @ 300 um t start in March 2015

初井TL 亀島研究員 小野研究員

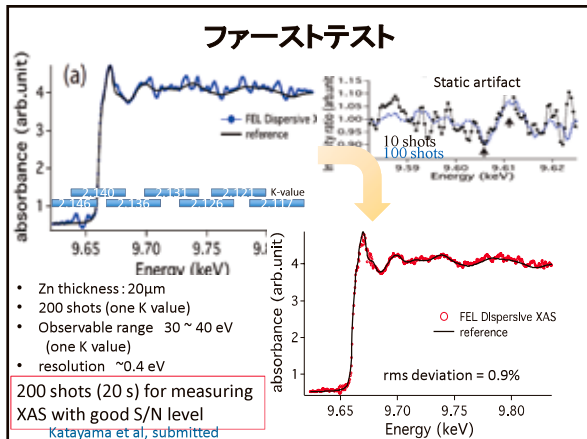
Conventional MPCCD: Work in vacuum, Angle < $\pm 20^\circ$

Short-Work distance MPCCD: Be-window: operation w/o vacuum chamber, Angle < $\pm 45^\circ$

Liquid jet, Beam stop, CCD Sensor

Contents

- SACLA の性能と先端光計測技術
- 集光光学系と先端利用
- 汎用利用に向けた取り組み
 - 連続試料導入フェムト秒結晶構造解析 (SFX)
 - フェムト秒X線吸収分光
- 展望

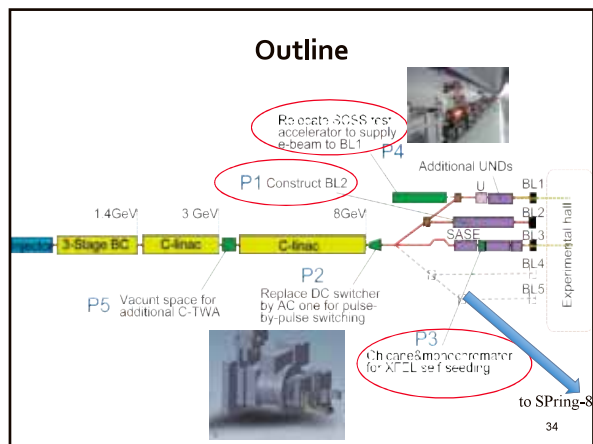


Contents

1. SACLA の性能と先端光計測技術
2. 集光光学系と先端利用
3. 汎用利用に向けた取り組み
 1. 連続試料導入フェムト秒結晶構造解析 (SFX)
 2. フェムト秒X線吸収分光
4. 展望

32

- ### SACLAのアップグレード
- 品質の向上
 - ダイヤモンド結晶を用いたセルフシード
Aman et al, Nat. Photon 2012
 - 2色XFEL
 - パワーレーザーとの連携 (阪大 兒玉教授G)
 - 量的な増加
 - 2013Aの課題採択率 ~40%
 - XFELビームラインの新設 (BL2)
 - SCSSのアンジュレータホールへの移設 (SCSS+)
 - SPring-8との連携
 - 高性能のインジェクタ. 省エネ・性能向上へ
- 33



まとめ

先端的な利用者との緊密な連携
異分野の専門家が知恵を出し合い、頂点をめざす

汎用分野への展開
幅広い分野の研究者と連携しながら、大きな流れをつくる

若手の育成と人材交流

↓

**光科学の基盤・拠点として
日本の科学技術の発展に貢献**

35

謝辞

All SACLA/SPring-8 Members

Especially,

Kensuke Tono, Tadashi Togashi, Yuichi Inubushi, Tetsuo Katayama, Kanade Ogawa, Takaki Hatsui, Yasumasa Joti, Togo Kudo, Takashi Kameshima, Yoichi Kirihara, Shun Ono, Hiroaki Kimura, Hiromitsu Tomizawa, Haruhiko Ohashi, Hirokatsu Yumoto, Takahisa Koyama, Shunji Goto, Kenji Tamasaku, Mitsuru Nagasono, Kazuaki Togawa, Takashi Tanaka, Toru Hara, Hitoshi Tanaka, Ryotaro Tanaka, Mitsuhiro Yamaga, Toru Ohata, Yukito Furukawa, Takashi Sugimoto, Hideo Kitamura, & Tetsuya Ishikawa

Yoshiro Fujiwara & Engineering Team

Osaka University
Yasuhiro Sano, Satoshi Matsuyama, Taito Osaka,

Univ. of Tokyo
Hidekazu Mimura, Takahiro Sato, Ichiro Inoue

ご清聴ありがとうございました

36