

はじめに：X線自由電子レーザーによる
光科学の開拓

公益財団法人高輝度光科学研究センター 登野 健介*

This article briefly introduces SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsER), describing where x-ray free electron lasers (XFELs) stand in the evolution of synchrotron radiation (SR) sources, background and construction history of XFEL in Japan, and what kind of results XFEL is expected to yield. SACLA offers outstanding performance which is far different from that of the existing SR sources. It provides x-ray pulses with high peak power, nearly full spatial coherence, and femtosecond temporal width. Some examples are given to show how the capabilities of SACLA are utilized in experiments and lead us to discoveries in various fields of science.

Keywords: synchrotron radiation, XFEL, SACLA, photon science

X線源の進化の歴史で特筆すべき出来事のひとつは、シンクロトロン放射光（以下単に「放射光」と記す）の登場である。現在、放射光は物質・生命科学の幅広い分野で活用され、学术界はもちろん、産業界においても重要な研究開発基盤として認識されている。加速器中の荷電粒子からの放射光は1940年代に初めて観測され、1960年代から実験用のX線源として用いられるようになる^{1,2)}。ただ、「第一世代」と呼ばれる当時の光源は、高エネルギー物理学実験用の加速器を副次的に利用したものであった。やがて、放射光の

高い輝度や幅広い波長範囲といった有用性が認識され、1970年代からは放射光利用に特化した加速器が建設されるようになる（第二世代放射光源）。日本においては1982年、現在の高エネルギー加速器研究機構に2.5 GeV蓄積リング光源（フォトンファクトリー）が建設された³⁾。その後、アンジュレーターやウィグラーと呼ばれる挿入光源が開発され、さらに高い輝度のX線を発生させることが可能となった。現在主流となっている蓄積リングは挿入光源の利用を前提として設計されており、第三世代放射光源と呼ばれている。我が国では1997年にSPring-8が完成し、ヨーロッパのESRF、アメリカのAPSとともに世界を代表する大型第三世代光源として最先端研究の舞台を提供している⁴⁾。

2000年代に入ってX線自由電子レーザー（X-ray Free Electron Laser, XFEL）の建設がアメリカとヨーロッパで開始された^{5,6)}。米国のSLAC National Accelerator LaboratoryではLinac Coherent Light Source (LCLS)と呼ばれるXFEL施設が2009年に完成し、波長1.5 ÅのXFELの発振に成功した⁷⁾。ヨーロッパでは、Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)にてEuropean XFELが建設中である（2015年運転開始予定）。また、韓国のPohang Accelerator Laboratory、スイスのPaul Scherrer InstituteにおいてもXFELの建設が進められている（それぞれ2015年、2016年運転開始予定）。

我が国では2001年度に、真空封止アンジュレーターを利用した小型XFELの開発計画「SPring-8 Compact SASE Source (SCSS)」プロジェクトが理化学研究所において策定された⁸⁾。2005年度には原理実証のために加速エネルギー250 MeVのプロトタイプ機（SCSS試験加速器）の製作が開始される⁹⁾。そして2006年度には理化学研究所と高輝度光科学研究センターによりXFEL計画合同推進本部が組織され、2010年度までの5年間でSACLA（SPring-8 Angstrom Compact

Introduction: X-Ray Free Electron Laser Opens the Frontier of Photon Science

Kensuke TONO* (Japan Synchrotron Radiation Research Institute),

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1 公益財団法人高輝度光科学研究センター XFEL 利用研究推進室

TEL: 0791-58-0831 内線 3321, FAX: 0791-58-0830,

E-mail: tonok@spring8.or.jp

free-electron Laser) が建設された¹⁰⁾。完成後約 1 年間の調整運転を経て、2012 年 3 月に一般ユーザーへの供用がスタートした。2012 年度には延べ約 3100 時間のユーザー利用実験が実施され、施設側の調整運転を含めた年間総運転時間は約 7000 時間に及んだ。

SACLA の XFEL の主な特徴としては、次の 3 点が挙げられる。

- 30 GW を超える高いピークパワーを有する。
- 空間的コヒーレンスが完全に近い。
- 10 fs 以下の超短時間パルスである。

このような特徴はこれまでの X 線とは一線を画すものであり、XFEL を利用した実験は、既存の X 線分析技術とは本質的に異なるものとなりうる。例えば、高いピークパワーとコヒーレンスを活かすことで、単一パルスの照射によって試料の回折像を記録し、構造を再構成することが可能となる。しかも、フェムト秒領域の超短時間パルスであるため、原子や分子の運動の時間スケールよりもはるかに短い露光時間で測定することができる。このことは、時間的にも空間的にも平均化されていない構造情報が得られることを意味している。したがって、局所的な密度ゆらぎやショットノイズ的なイベントがトリガーとなって進行するような現象であっても測定の対象となり得る。また、測定試料の放射線損傷の問題も、XFEL の特徴を利用して克服することが可能である。従来の X 線源を用いた測定においては、測定中の放射線損傷は本質的に避けることができない。当然のことながら XFEL の場合も損傷は不可避であるが、フェムト秒の露光によって損傷が進む前の試料の姿を捉えることができる。タンパク質結晶構造解析など、これまで試料の損傷に悩まされてきた実験手法において、大きな進展が期待されている。さらに、X 線回折法などの直接的な構造解析法にフェムト秒の時間分解能が与えられれば、分光学的手法が主流となっている高速現象の研究に強力な武器が加わることになる。原子・分子の X 線励起ダイナミクスや X 線光学の研究においても、非線形過程が顕著になる光強度領域において実験が可能になれば、新たな領域に踏み出すことができる。

今回の XFEL 特集記事では、XFEL の特徴を活かした実験事例として、コヒーレント回折イメージング、タンパク質結晶構造解析、時間分解 X 線回折、XFEL 励起反応ダイナミクス追跡を取り上げる。XFEL の黎明期に新たな研究分野を開拓しつつある研究者達の情熱に触れていただきたい。

〈参考文献〉

- 1) H. Winick (ed), *Synchrotron Radiation Research*, Springer-Verlag, Berlin, 1980.
- 2) J.P. Blewett, *J. Synchrotron Rad.*, 5 (1998) 135.
- 3) K. Kohra, T. Sasaki, *Nucl. Instrum. Methods*, 208 (1983) 23.
- 4) H. Kamitsubo, *J. Synchrotron Rad.*, 5 (1998) 162.
- 5) J. Arthur, P. Anfinrud, P. Audebert, K. Bane, I. Ben-Zvi, V. Bharadwaj, R. Bionta, P. Bolton, M. Borland, P.H. Bucksbaum, R.C. Cauble, J. Clendenin, M. Cornacchia, G. Decker, P. Den Hartog, S. Dierker, D. Dowell, D. Dungan, P. Emma, I. Evans, G. Faigel, R. Falcone, W.M. Fawley, M. Ferrario, A.S. Fisher, R.R. Freeman, J. Frisch, J. Galayda, J.-C. Gauthier, S. Gierman, E. Gluskin, W. Graves, J. Hajdu, J. Hastings, K. Hodgson, Z. Huang, R. Humphry, P. Ilinski, D. Imre, C. Jacobsen, C.-C. Kao, K.R. Kase, K.-J. Kim, R. Kirby, J. Kirz, L. Klaisner, P. Krejcik, K. Kulander, O.L. Landen, R.W. Lee, C. Lewis, C. Limborg, E.I. Lindau, A. Lumpkin, G. Materlik, S. Mao, J. Miao, S. Mochrie, E. Moog, S. Milton, G. Mulhollan, K. Nelson, W.R. Nelson, R. Neutze, A. Ng, D. Nguyen, H.-D. Nuhn, D.T. Palmer, J.M. Paterson, C. Pellegrini, S. Reiche, M. Renner, D. Riley, C.V. Robinson, S.H. Rokni, S.J. Rose, J. Rosenzweig, R. Ruland, G. Ruocco, D. Saenz, S. Sasaki, D. Sayre, J. Schmerge, D. Schneider, C. Schroeder, L. Serafini, F. Sette, S. Sinha, D. van der Spoel, B. Stephenson, G. Stupakov, M. Sutton, A. Szoke, R. Tatchyn, A. Toor, E. Trakhtenberg, I. Vasserman, N. Vinokurov, X.J. Wang, D. Waltz, J.S. Wark, E. Weckert, Wilson-Squire Group, H. Winick, M. Woodley, A. Wootton, M. Wulff, M. Xie, R. Yotam, L. Young, A. Zewail, *Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report*, SLAC, Stanford, 2002.
<http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/cdr/>
- 6) M. Altarelli, R. Brinkmann, M. Chergui, W. Decking, B. Dobson, S. Dusterer, G. Grubel, W. Graeff, H. Graafsma, J. Hajdu, J. Marangos, J. Pfluger, H. Redlin, D. Riley, I. Robinson, J. Rossbach, A. Schwarz, K. Tiedtke, T. Tschentscher, I. Vartanians, H. Wabnitz, H. Weise, R. Wichmann, K. Witte, A. Wolf, M. Wulff, and M. Yurkov (Eds.), *XFEL: The European X-Ray Free-Electron Laser*, Technical De-

- sign Report, DESY, Hamburg, 2006.
- 7) P. Emma, R. Akre, J. Arthur, R. Bionta, C. Bostedt, J. Bozek, A. Brachmann, P. Bucksbaum, R. Coffee, F.-J. Decker, Y. Ding, D. Dowell, S. Edstrom, A. Fisher, J. Frisch, S. Gilevich, J. Hastings, G. Hays, Ph. Hering, Z. Huang, R. Iverson, H. Loos, M. Messerschmidt, A. Miahnahri, S. Moeller, H.-D. Nuhn, G. Pile, D. Ratner, J. Rzepiela, D. Schultz, T. Smith, P. Stefan, H. Tompkins, J. Turner, J. Welch, W. White, J. Wu, G. Yocky, J. Galayda, *Nature Photonics*, 4 (2010) 641.
- 8) T. Tanaka, T. Shintake (Eds.), *SCSS X-FEL Conceptual Design Report*, RIKEN Harima Institute, Sayo, 2005.
- 9) T. Shintake, H. Tanaka, T. Hara, T. Tanaka, K. Togawa, M. Yabashi, Y. Otake, Y. Asano, T. Bizen, T. Fukui, S. Goto, A. Higashiya, T. Hirono, N. Hosoda, T. Inagaki, S. Inoue, M. Ishii, Y. Kim, H. Kimura, M. Kitamura, T. Kobayashi, H. Maesaka, T. Masuda, S. Matsui, T. Matsushita, X. Marechal, M. Nagasono, H. Ohashi, T. Ohata, T. Ohshima, K. Onoe, K. Shirasawa, T. Takagi, S. Takahashi, M. Takeuchi, K. Tamasaku, R. Tanaka, Y. Tanaka, T. Tanikawa, T. Togashi, S. Wu, A. Yamashita, K. Yanagida, C. Zhang, H. Kitamura, T. Ishikawa, *Nature Photonics*, 2 (2008) 555.
- 10) T. Ishikawa, H. Aoyagi, T. Asaka, Y. Asano, N. Azumi, T. Bizen, H. Ego, K. Fukami, T. Fukui, Y. Furukawa, S. Goto, H. Hanaki, T. Hara, T. Hasegawa, T. Hatsui, A. Higashiya, T. Hirono, N. Hosoda, M. Ishii, T. Inagaki, Y. Inubushi, T. Itoga, Y. Joti, M. Kago, T. Kameshima, H. Kimura, Y. Kirihara, A. Kiyomichi, T. Kobayashi, C. Kondo, T. Kudo, H. Maesaka, X.M. Marechal, T. Masuda, S. Matsubara, T. Matsumoto, T. Matsushita, S. Matsui, M. Nagasono, N. Nariyama, H. Ohashi, T. Ohata, T. Ohshima, S. Ono, Y. Otake, C. Saji, T. Sakurai, T. Sato, K. Sawada, T. Seike, K. Shirasawa, T. Sugimoto, S. Suzuki, S. Takahashi, H. Takebe, K. Takeshita, K. Tamasaku, H. Tanaka, R. Tanaka, T. Tanaka, T. Togashi, K. Togawa, A. Tokuhisa, H. Tomizawa, K. Tono, S. Wu, M. Yabashi, M. Yamaga, A. Yamashita, K. Yanagida, C. Zhang, T. Shintake, H. Kitamura, N. Kumagai, *Nature Photonics*, 6 (2008) 540.