

# 高強度のX線レーザーで 未知の現象への扉を開く —企業利用やインフラ整備も進行中

X線自由電子レーザーSACLAの共用利用が今年3月に開始された。5カ月の第1期間が終了した現在、あらたな光学現象の観察などの成果が得られるとともに、隣接する放射光施設との共同利用やスーパーコンピュータ京との接続といったインフラのさらなる整備も進行中である。



理化学研究所 播磨研究所 所長の石川哲也氏

X線自由電子レーザー(XFEL:X-ray free electron laser)は、電子を真空中で取り出して加速し、磁場で曲げることによってX線を発生させ、それを多く重ね合わせることで高輝度でコヒーレントなレーザー光を作り出す装置である。

自由電子レーザー(FEL)は1970年に考案された。さらに1984年に光共振器の役割を果たすものとして、電子による自己増幅を利用するSASE(self-amplified spontaneous emission)方式が提案された。磁場の間隔および電子ビームの強さを調整することによってどの波長でも発生させることが可能であるため、X線領域のレーザーとして検討が始まった。

XFELには短波長まで幅広いレーザー光を発生するほかにも、フェムト秒レベル(100fs以下)のパルス光が発生可能で、輝度は高輝度放射光源であるSPring-8の10億倍となるといった特徴を持つ。つまり原子スケールの空間分

解能と、化学反応なども撮影できる時間分解能、そして桁違いの強度を兼ね備えたレーザーと言える。

こういった特長から世界で建設が進められている。2009年に稼働を開始したのが米スタンフォード大学SLAC国立加速器研究所のLCLS(linac coherent light source)である。続いて2011年に理化学研究所 播磨研究所のSACLA(SPring-8 angstrom compact free electron laser)が発振した。さらに2016年にはヨーロッパのXFELが稼働予定である。

## SACLAの概要

XFELは基本的に、電子を取り出す電子銃、電子を加速する加速管、磁石のN極とS極を交互に並べて電子を蛇行させて放射光を発生させるアンジュレータからなる。SACLA(図1)は日本独自のアイデアと企業の技術で各装置を小型化することにより全長約700mとなっている。LCLSの約4km、European

XFELの約3.3kmと比べて大幅に小型化とそれにもなう低コスト化を実現している。なおSACLAの建設コストは約390億円である。「小型化による産業界のメリットは非常に大きいと考えている。本施設の稼働に成功したことで、より多くの人にXFELを利用してもらうためのステップを一段上がったと言える」(理化学研究所 播磨研究所 所長の石川哲也氏)。

SACLAのパラメータは、波長は0.063~0.28nmで、パルス幅は10fs、設計上の繰り返し周波数は60Hzだが現在10Hzで稼働している。ビームサイズはアンジュレータ(図2)を出た時点で約200μm径であり、そのあと非球面全反射ミラーによって縦横ともに約1μm径に圧縮される(図3)。この時点でエネルギー強度は $10^{17}$ W/cm<sup>2</sup>におよぶ。

## X線領域での非線形効果

2012年3~7月に行われた利用実験

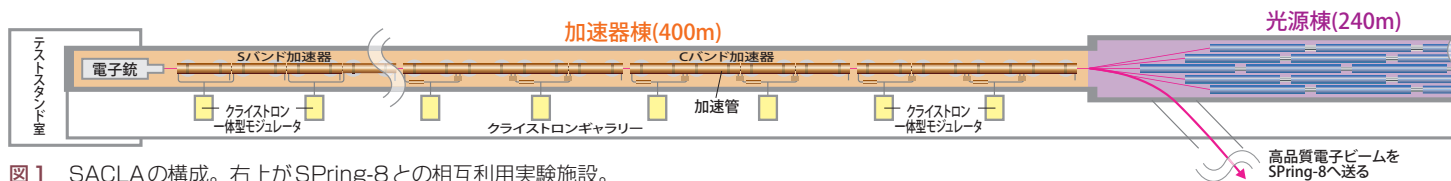


図1 SACLAの構成。右上がSPring-8との相互利用実験施設。



図2 電子銃の外観

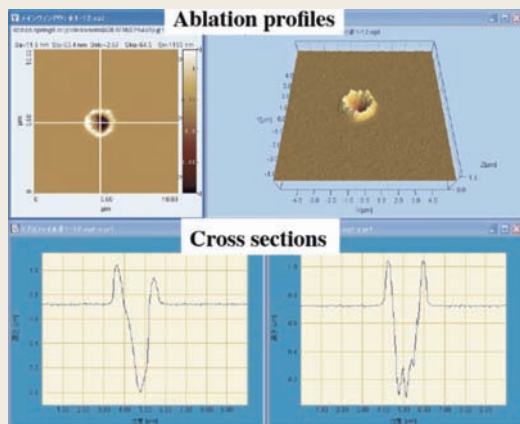


図3 ビームサイズの評価

には、国内外から55件の申請があり、その中から25件が選ばれた。その成果の一つが、スタンフォード大学の研究者によって行われた高次高調波の発生だ。7.3keVの光子2個から14.6keVの光子1個を生成することに成功した。X線での高次高調波の観察は初となる。「XFELのある大学の研究者が取って来たことからビームの安定性が評価されていると考えている」(石川氏)。

ほかにも原子番号36の希ガスであるクリプトン原子において、最内殻をイオン化するダブルコアホール現象を観察できた。「ダブルコアホール現象のデータは今後の実験の際の補正パラメータとして利用する重要な基礎情報となる」と石川氏は言う。

研究成果が期待されている分野の一つが、医薬品の開発に直結する、タンパク質の構造解析だ。現在クライオ電子顕微鏡と同じ手法での分析手法の確立を試みている。試験的に金のナノキ

ューブに可視レーザーを照射し、溶けて丸くなる様子の観察に成功するなど、観察手法を確立している最中だ。

タンパク質については広域X線吸収端近傍構造解析(EXAFS)の吸収構造とSPring-8などの放射光施設での構造解析による結果が一致しないことが議論となっているという。「原因のひとつとして放射光施設における放射線損傷が考えられる。XFELでのシングルショットの照射により、放射線によるダメージを受ける前の姿のデータを取得する可能性が期待されている」(石川氏)。

一方、企業による研究も行われている。東芝は材料加工の際に起こる物理現象の解明に取り組んだ。東芝ではレーザーを照射することで材料を改質する手法を原子炉の材料の強化に利用していたものの、改質がどのような反応機構で起こっているのか分かっていなかった。そのためレーザーを照射した際の

変化をリアルタイムで計測したということだ。

## インフラ整備も進行中

SACLAでは大量の実験データを取得するため、データ処理がより大がかりになる。そのため神戸市にあるスーパーコンピュータ京の利用が想定されている。「まずはSINET4(学術情報ネットワーク)を経由することによる京の利用を始め、来年には専用回線を用意したい」(石川氏)。

一方、SPring-8に隣接するという環境を生かした研究もできるようにするという。図1の右上の施設では、SACLAからのレーザーとSPring-8からの放射光を同時に利用できる。SPring-8の放射光を対象物に当てながら、SACLAで変化を観察するといった使い方が可能だ。

ここで検討されている実験のひとつが真空崩壊だという。 $10^{23}\sim 10^{24}\text{W/cm}^2$ を超えるエネルギーを何も空間上に集めると電子と陽電子が生じる現象である。「SACLAからのビームを1nm径にまで絞ることができれば、このエネルギーに届くと考えられる。桁違いに大きなエネルギーをもつSACLAによって新しい理論物理学の扉が開くことも大いに期待できる」と石川氏は語る。

今後は現在マルチモードのレーザー光にシード光を導入することで、さらに強いシングルモードの光を発生させる調整を行う予定もある。「SACLAは新しい光源であることから、従来の観察法では分からなかった現象を観察でき、いろいろと興味深いテーマが出てきている」(石川氏)。さらに新しい利用方法が登場する可能性もあるだろう。今後も多くの研究成果が期待できそうだ。

訪問した研究室  
理化学研究所 播磨研究所

