

X線自由電子レーザー (SACLA) が拓くサイエンス

石川 哲也

Sciences to Explore with SACLA

Tetsuya ISHIKAWA

SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA) is the world second hard X-ray free-electron laser (XFEL) collocated with SPring-8 synchrotron radiation source. The in-vacuum undulator technology to reduce the periodic length of the undulator magnetic field enabled to generate coherent hard X-radiation with lower energy, 8 GeV, electron beam. This lower energy electron beam with additional higher gradient acceleration using the C-band accelerator tube reduced the size of the facility to be 1/3-1/5 of the preceding projects in the US and Europe. SACLA started user operation in 2012. Some of the early results are introduced. Future trends of XFEL are discussed.

Key words: X-ray free-electron laser, undulator, AMO, coherent diffraction imaging, damage-free X-ray crystallography, ultrafast science

加速器などの中で運動する自由電子からコヒーレント光を得る「自由電子レーザー」(FEL)は、他の方法でコヒーレント光を得ることが困難な硬X線領域で大きな威力を発揮する。1970年代に提案されたFELは、加速器に挿入された準単色光源としてのアンジュレーターを光共振器の中に入れたものであり、共振器中の光がアンジュレーターで誘導放出を誘起することにより、コヒーレント光を発生させるものであった¹⁾。しかしながら、反射率の高い正反射ミラーを必要とする光共振器をX線領域で構成することは困難であり、1980年代に理論的検討が行われる自己増幅自発放射 (self-amplified spontaneous emission; SASE)²⁾が出現するまでは、X線自由電子レーザー (XFEL) にほとんど現実性はなかった。

X線はナノを観るための光として、近年その重要性がますます高まっている。SPring-8のような第三世代放射光は、従来のX線源や第二世代までの放射光施設と比べ圧倒的なX線強度を誇っているとはいっても、サブナノメートル分解能での観察には、同一の試料を三次元的格子に配列させた結晶による回折現象を利用する必要がある。ピーク輝度がSPring-8の十億倍に達するXFELでは、単一試料からのX線散乱によってサブナノメートル分解能でのイメー

ジング計測の可能性があり、またフェムト秒領域でのパルスレーザーであることから、ナノの世界で高速度の運動をしている電子などの一瞬を切り取った観測が可能になりつつある (図1)。XFELの光出力は100 GWに達し、そこでのX線は波長の短さから原理的に非常に小さなサイズに絞り込むことが可能であるため、シュウィンガー限界³⁾に近いパワー密度を生成することが可能となる。

このようなXFELは、1990年代にアメリカでスタンフォード線形加速器センターの2マイル線形加速器を利用して建設することが計画され⁴⁾、またドイツでも超伝導線形加速器を用いたリニアコライダーに併設して建設することが計画された⁵⁾。わが国では、兵庫県のSPring-8サイトで、欧米と比較して小型化されたXFELの検討が進められ、2006年からの国の第三期科学技術基本計画の中で、国家基幹技術のひとつとして進められることになった。2011年に完成した施設は、SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA) と命名され、2012年から一般共同利用に供されている (図2)⁶⁾。

本稿では、最初に、SACLAの概要としてSASE型XFELの発振原理を簡単に解説し、日本で進められたコンパクト化の要点を述べる。その上でSACLAの現状を紹介する。

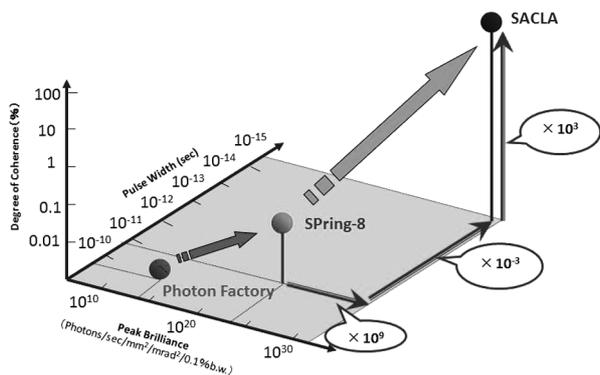


図1 SACLAの光源性能。インコヒーレント光源であるSPring-8とコヒーレント光源であるSACLAの光源性能を比較すると、ピーク輝度（単位：光子数/毎秒/光源単位面積/ビーム単位発散角/0.1%バンド幅）で比較すると 10^9 倍、パルス幅は1000分の1以下、空間的コヒーレンス度は1000倍程度となる。これらの指標でみるとSPring-8からSACLAへの性能向上は、Photon FactoryからSPring-8への向上よりずっと大きい。



図2 SACLA全景。中央右上から左下に向かう直線状の建屋がSACLA収納建屋。左下円弧状の建屋はSPring-8。SACLA線形加速器は、右上から始まり、建屋幅が広がった部分からアンジュレータホールがはじまる。高さが増えた部分が実験ホール。この部分までで全長約700mあるが、XFELビームはさらに左下の道路をくぐり、次の建屋内に導入される。ここには、SPring-8のビームも導入されており、XFELと放射光の2つのビームを同一試料の同一位置に導くことが可能である。

次に、SACLAで展開されているサイエンスや今後展開されるサイエンスを紹介し、最後に今後の展望を述べたい。

1. SACLAの概要

SACLAは、8 GeVの電子線形加速器の後方に、長尺真空封止型アンジュレーターを配置し、SASE原理に基づいてコヒーレントX線を発生させる装置である。真空封止型にすることによって、アンジュレーターの磁場周期を短くすることが可能となり、そのため比較的低エネルギーの電子ビームで短波長コヒーレントX線を発生することが可能である。このための電子線形加速器は、従来型の磁石を真

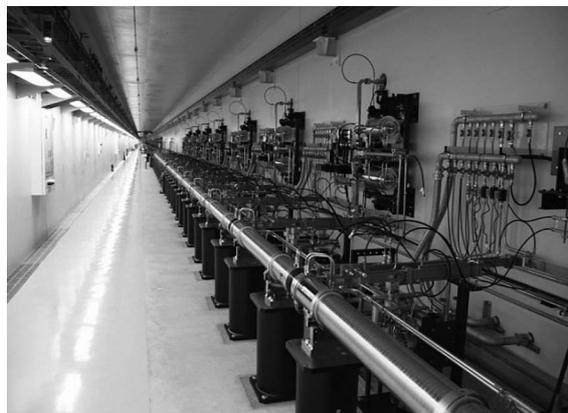


図3 SACLA加速器。

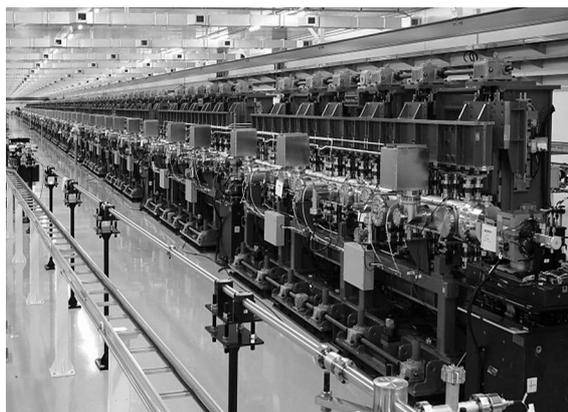


図4 SACLAアンジュレーター。

空チャンバーの外に置くタイプのアンジュレーターを用いている欧米の同種施設に比べて、低エネルギーになった分だけ短くなるが、さらに加速勾配の高いCバンド加速管を採用することによって、いつそうの小型化を実現した(図3, 図4)。

1.1 自己増幅自発放射(SASE)原理

低エミッタンス・高密度高エネルギー電子ビームがアンジュレーターを通過するとき、前方を走る電子は後方の電子が出す自然放射電磁場と相互作用し、加速されたり減速されたりする。このため、上流部で発生した自然放射のうち大きな強度をもつ部分が電子ビーム分布に放射の波長による密度変調を与え、その変調がその波長でさらに強い光を生成する。この過程が繰り返されて、自然放射に比べ桁違いに強度の大きな光が生成される。このような光の増幅原理を、SASE(自己増幅自発放射)原理という²⁾。種となる光はショットノイズから発生するため、SASEのエネルギースペクトルおよびそのフーリエ変換としてのタイムスペクトルは、微細な複数の鋭いピークの集まりとなることが多い。アンジュレーターの長さが長くなるとSASE強度は強くなるが、ある長さを超えるとその値はほぼ一定に

飽和する。

1.2 コンパクト化

アンジュレーターは、マクロな周期磁場（周期長を λ_{magnet} としよう）の中で高エネルギー電子を周期的に振動させて、自然放射電磁場としての光を発生させる。光速近くまで加速された電子が、自らの出した光の波面を追いかけるため、ドップラー効果によって光の波長 λ_{photon} は磁場周期長、電子ビームエネルギー γ 、アンジュレーターの K パラメーターの関数として、次の式で与えられる。

$$\lambda_{\text{photon}} = \frac{\lambda_{\text{magnet}}}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

この式から、 K が一定の場合、光の波長は磁場周期長に比例し、電子ビームエネルギーの2乗に反比例することを示している。これから、一定波長のアンジュレーター光を出す場合、アンジュレーターの磁場周期を短くすると、必要な電子エネルギーが小さくできることがわかる。すなわち、磁場周期が短くできれば、線形加速器を低エネルギーにして長さを短くすることが可能であり、施設のコンパクト化につながる。これが、コンパクト XFEL としての SACLA の着想に至った原点である。具体的な数字に関して、SACLA と LCLS のアンジュレーターパラメーター⁷⁾と比較してみよう。LCLS では周期長 30 mm のアンジュレーターを使っているのに対して、SACLA では周期長が 18 mm である。このため、式 (1) から、同じエネルギー (γ) の加速器を使うと、同じ K 値で、SACLA アンジュレーター光の波長は LCLS の 0.6 倍になる。逆に、同じ波長のアンジュレーター光を同じ K 値で出すには、LCLS に比べて 0.77 倍の電子エネルギーがあればよい。これだけを考えて、LCLS の 14.35 GeV に対して 11 GeV の線形加速器をつくれればよいということになるが、さらに K 値を小さくすることによって、8 GeV の電子エネルギーで LCLS より短波長側を広げるデザインとした。一方、線形加速器として LCLS で用いられている S バンド加速管の 2 倍の周波数の C バンド加速管⁸⁾を採用することによって、加速勾配を倍程度大きくし、このことによって線形加速器の短縮を図っている。

短周期アンジュレーターを用いると、全体としては短い距離で磁極数を稼ぐことが可能になるので、実効的にアンジュレーター長も短くすることができる。LCLS では磁場周期 30 mm で、1 ユニット 3.4 m のアンジュレーターを 33 基繋いで使っているの、この部分の長さだけで 112 m になる。これに対応する SACLA での値は、磁場周期 18 mm、1 ユニット 5 m のアンジュレーターを 18 基繋いで使うので、90 m になる。長さとしては短い、磁場周期数

は LCLS の 1.3 倍程度となる。

このような加速器とアンジュレーターでの工夫により、LCLS では 1000 m 以上ある XFEL 発生部分を 650 m に縮めたが、さらに大幅なコンパクト化に寄与したのがフォトン・ビームラインと実験ステーションである。LCLS で約 1000 m の長さのこの部分を、50 m の実験研究棟の中に収めている。これは、SACLA でのフォトン・ビームラインと実験ステーション建設の基本的思想が LCLS とは異なるためである。LCLS では、1 つの線形加速器からの電子ビームを 1 つのアンジュレーターに入れ、そこからの XFEL ビームを X 線ミラーでいくつもの実験ステーションに切り替えて送り込む⁹⁾。実験ステーションのそれぞれは、多くの計測に対応可能となるように、複雑な機能を 1 つの計測器に盛り込んだ大型の装置からなり、それが常設された形態でビームを分配する。硬 X 線領域での X 線ミラーは照射角が小さく、ビームの振れ角も小さいため、大型の実験ステーション機器を避けて後方の実験ステーション機器にビームを送るためには、ミラーから相当距離実験ステーションを離す必要が出る。このために LCLS の実験ステーションは、アンジュレーターから遠距離に設置され、フォトン・ビームラインと実験ステーションだけで 800 m 程度の長さを占めている。SACLA では、XFEL ビームを光学素子で振ることはせずに、タンデムに並べた実験ステーション機器をビームに挿入・退避させることによって、計測装置を切り替える方式を採用した。また、複雑な計測に対応する大型計測装置を作るのではなく、一つひとつが十分に確立した要素部品を組み合わせることによって、さまざまな異なる計測手法に対応可能な装置を構成していく方式とした。さらに SACLA では、1 つのアンジュレーターからの XFEL ビームを分配するのではなく、線形加速器からの電子ビームを振り分けて、異なる 5 本のアンジュレーターに導入することにより、異なる XFEL 波長の利用研究が同時並行的に進められるようにした。SACLA 完成時には、1 つの硬 X 線 XFEL ラインと 1 つの広帯域自発光ラインの 2 つのフォトン・ビームラインが設けられたが、平成 24 年度から新たな硬 X 線 XFEL ラインの建設がはじまり、平成 26 年度内には利用研究が始められる見込みである。

将来的には、アンジュレーターのいっそうの短周期化や、レーザー加速などの新しい加速方式による線形加速器の小型化によって、さらにコンパクトな XFEL 施設が誕生する可能性がある。われわれは、2030 年代に現在の SACLA の 4 分の 1 以下の規模で、ほぼ同等の機能をもつ XFEL 施設の建設が可能かどうかの検討を進めている。

2. XFELでのサイエンス

最初に述べたように、XFELは、放射光を含めた従来のX線源では考えられなかった(a)高いピーク輝度、(b)ほぼ完全な空間コヒーレンス、(c)フェムト秒領域の狭いパルス幅という大きな特徴をもっている。このような新しいプローブが手に入ると、今まで手の届かなかった学術領域に踏み込むことが可能となる。過去を振り返ってみると、1895年のレントゲンによるX線の発見や⁹⁾、1960年のマイマンによるレーザーの発明¹⁰⁾など、新しいプローブの入手によりその後の科学技術の発展に大きな影響を与えた例は多数あるが、XFELは非常に影響の大きかった2つの例を組み合わせたものであるため、今後の展開が大いに期待される。本稿を準備している2014年4月時点で、世界にはアメリカLCLSと日本のSACLAの2つのXFEL施設のみが稼働している。今後、ヨーロッパ共同体が建設を進めているEuro-XFEL、スイスのSwiss-XFEL、韓国のPAL-XFELなどが本格的に動き始める2017年頃までは、日本とアメリカの二人旅が続くものと思われるが、XFELの適用分野の広さのゆえか、二施設が激突する場面は少なく、むしろお互いに得意分野を持って棲み分けることが可能なように見える。ここでは、XFELの(a)~(c)の特徴がどのようなサイエンスを拓きつつあるかを、AMO、コヒーレントX線イメージング、タンパク結晶構造解析を例としてご紹介する。このほかにも高エネルギー密度科学やX線非線形光学、X線量子光学などの分野で非常に新しい展開が生まれつつあり、近い将来に機会を改めて紹介したい。

2.1 AMO

AMOとはAtom, Molecule, Opticsの頭文字をつなげたもので、原子・分子と光の相互作用全般を扱う分野である。新しい光源が出現したときに、まず始まるのは光と物質との相互作用研究であり、その素過程として、光と原子との相互作用は重要である。世界初の短波長SASE光源として2005年に運転を始めたのは、ドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY)のFLASH¹¹⁾である。FLASHは、ドイツで提案され、のちにヨーロッパ共同体の計画となるEuropean XFELのプロトタイプ機の性格をもつVUV-SX領域のSASE-FELであり、超伝導線形加速器を利用することによって高繰り返しが可能となることが売り物である。超伝導線形加速器は繰り返しを大きくすると加速勾配が大きく取れないことや、He冷凍機の運転コストが膨大になることから、日本では計画の初期段階で検討対象から外してしまったが、そもそもの出発点がリニアコライダーであったドイツの計画では、超伝導線形加速器を使うことが必須であった。そこでは多彩なAMO研究が展開された。特に、

10^{16} W/cm²を超える高い光強度は多重イオン化過程を引き起こし、また 10^{-15} sに近い短いパルス幅は、超高速光誘起過程の時間発展の追跡を可能とした。従来の高強度レーザーが原子の外側の電子と相互作用するだけなのに対して、高いエネルギーのFELは強く束縛された内殻に空孔を形成できる。FLASHでは、短波長領域での非線形過程の重要性が、クラスターの爆発¹²⁾や、Xe原子での極端に高い電荷状態の観測¹³⁾などによって示された。さらに、より精密な反跳イオン運動量分析^{14,15)}や、電子分光^{16,17)}との組み合わせによって、相互作用素仮定のより詳細な理解を進めていった。コインシデンス技術を多用するこの種の計測では、高繰り返しが可能であるという超伝導線形加速器の特性が遺憾なく発揮された。FLASHで華々しく始まったFELでのAMO研究は、その後SACLAのプロトタイプであるSCSS¹⁸⁾やLCLSでも展開され^{19,20)}、SACLAでもマックス・プランクからドイツ物理工学研究所(PTB)所長に転進したJoachim Ullrichに率いられたヨーロッパのAMO軍団が、東北大学の上田潔教授のグループと一緒に強力に推進している²¹⁾。

2.2 コヒーレントX線イメージング

X線の強度が十分に強く、空間的にコヒーレントであれば、ある一定条件の下で、試料からのX線散乱パターンから試料の電子密度分布を知ることができる。これはコヒーレントX線イメージングとして知られているが、その起源はMiaoらが1999年にネイチャー誌に発表した軟X線で行った実験である²²⁾。翌2000年、同じくネイチャー誌でNeutzeらは、フェムト秒大強度X線パルスで単一タンパク分子のコヒーレントX線イメージングを論じ、放射線損傷によって分子が壊れる前に原子分解能像を取得する可能性を論じた²³⁾。これらがXFELのコヒーレントX線イメージングの基盤となっており、この可能性によってXFEL建設計画が促進されたともいえる。FELを利用した研究開発はFLASH, SCSS, LCLS, SACLAおよびイタリアでのSXVUV領域のFELとして建設されたFERMIでも進められているが、ここではSACLAでの開発を中心に紹介したい。

先に述べたように、SACLAでの実験装置開発は大きな専用装置を建設するのではなく、要素ごとに開発し、それを組み合わせてさまざまな異なる計測手法に対応するものである。コヒーレントX線イメージングも、大阪大学の山内等が中心となってSPRING-8で開発を続けてきたスペックル・フリーの集光ミラー系²⁴⁾で、SACLAのビームを $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ の大きさに集光し、そこに試料を置く。試料から散乱されたX線は、SACLAで初井らが開発したMulti-Port CCD (MPCCD) 検出器²⁵⁾で記録される。試料操作用装置

としては、SACLAでSongらが開発したMAXIC²⁶⁾と、慶応大学の中迫らが開発したKOTOBUKI²⁷⁾がある。MAXICは、液体中に懸濁した試料やエアロゾル化した試料でのコヒーレント回折イメージングに対応しているが、後に述べるフェムト秒シリアルナノ結晶構造解析²⁸⁾にも対応している。KOTOBUKIは凍結した試料にXFELを照射してコヒーレントX線イメージングを取得するための装置であり、クライオ電顕²⁹⁾に対応するものである。

MAXICを利用して、北海道大学の西野らは生きた細胞を液体中に封入して観察可能な試料ホルダーを開発し、そのコヒーレント回折イメージを取得した³⁰⁾。強力なXFEL照射によって一定時間後には細胞は死滅するが、それはX線が当たっている数フェムト秒よりはずっと後である。KOTOBUKIでは大阪大学の高橋らが、金のナノ粒子や金・銀のナノボックスのコヒーレント回折イメージで世界最高分解能レベルの7 nmを達成している³¹⁾。

コヒーレント回折イメージングへの期待としては、単一タンパク分子イメージングがあるが、原子分解能に達するには、現状のLCLSやSACLAではX線強度が3~4桁足りない。これは、シーディングなどの光源技術の改良による光子フラックス増強、集光系の改良による光子密度の増強、超解像等の解析技術の革新などによって克服される可能性があるが、今後の課題であろう。

2.3 タンパク結晶構造解析

前節でも述べたが、コヒーレントX線イメージングによるタンパク単一分子での原子分解能構造解析の可能性は、米欧日のいずれにおいても、XFEL計画推進の大きなモチベーションのひとつであったが、現状では、LCLS、SACLAともに強度的に数桁不足している状況にある。これは、結晶化が困難な膜タンパク等の構造解析に非常に重要と考えられていたが、XFEL建設が進んでいる間にもタンパクの結晶化技術は非常な勢いで進展し、現時点ではLipid Cubic Phase法などでの膜タンパク結晶化が可能になってきた。特に、従来の放射光計測では若干困難な微小サイズの結晶の育成は多くのタンパクで可能となっており、大強度短パルスXFEL光を用いて、多数の微小結晶からシングルショット回折パターンを取得し、それを解析して構造を決定する「フェムト秒シリアルナノ結晶構造解析⁷⁾」は、タンパク構造解析の新しい手法として注目を集め、2012年米国サイエンス誌の「科学十大ニュース」のひとつとして取り上げられている。

SACLAでは、MAXICを改良した薄型試料チェンバーとMPCCDの組み合わせによって、シリアルナノ結晶構造解析が岩田らによって進められている。この方法では、1つ

の試料にはシングルショットしか照射しないので、放射光でのX線結晶構造解析で問題となる放射線損傷の心配がない。また、放射光での結晶構造解析とは異なり、室温での構造解析が可能になる。SACLAでの計測装置はHe雰囲気中での測定が行われるため、試料ハンドリングが楽で、液体懸濁試料などのリサイクルが可能であるため、必要試料量が少なく済むという特徴がある。

SACLAで世界に先駆けて開発されたもうひとつのタンパク結晶構造解析法として、放射光と同様に比較的大きな1つの単結晶からの回折データを、シングルショット照射で、照射位置と照射方位を変えて、複数個取って解析する方法がある。理研の吾郷らはこの方法によってチトクロム酸化酵素の無損傷構造を決定し、放射線損傷の影響のあるSPring-8での構造解析結果と比較した³²⁾。また、岡山大学の沈らは、SPring-8で構造解析がなされた植物の光合成で重要な役割を果たすPhotosystem II結晶³³⁾にこの方法を適用し、無損傷構造の解析に取り組んでいる。

2.4 超高速科学

XFELではフェムト秒領域のX線パルスが得られるので、さまざまな高速現象の瞬間的な様相を捉えることが可能になる。特に、触媒の超高速反応や化学変化の途中の様子を捉えるのに超高速X線スペクトロスコピーは重要であり、いままでにいくつかの方法が提案されている。SASE型XFELでは、ショットごとにパルスのスペクトル形状や時間構造が異なるため、超高速スペクトロスコピーでは入射X線の変化を補償する仕組みが必要になる。SACLAでは、XFELビームを透過型回折格子を用いて2ビームに分け、一方を入射スペクトル計測、他方を吸収スペクトル計測に用いる、分散型超高速分散型X線吸収スペクトロメーターが開発された(図5)。これを用いて、水溶液中のシュウ酸錯体分子に100フェムト秒幅の近紫外域レーザーパルスを照射し、分子に含まれる鉄元素の周囲の電子密度が照射直後から時間とともに変化する様子が、10フェムト秒以下の幅をもつXFELパルスを用いて測定された³⁴⁾。この結果、SACLAのX線パルスが、フェムト秒というきわめて短い時間の中に起こる化学反応などの現象を直接捉えるのに優れていることが実証された。

2009年にLCLSが最初のX線自由電子レーザーの発振に成功し、2011年にSACLAがより短波長でのレーザー発振を観測して以来、現時点まで世界には2台のX線自由電子レーザーが稼働中であり、サイエンスの新たなフロンティアを切り拓いている。3台目が本格的に動き始めるのは2017年になることが予想され、それまではLCLSと

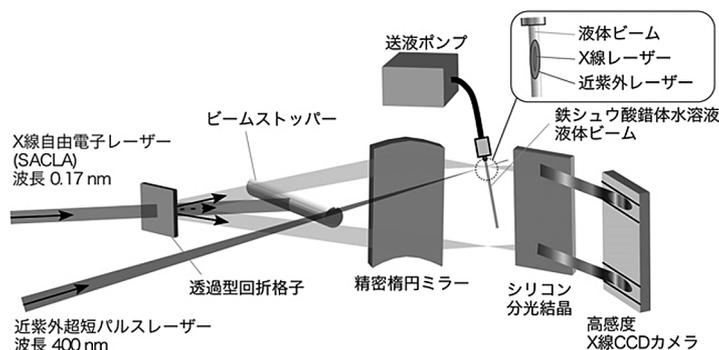


図5 2ビーム分散型X線吸収分光装置概念図。近紫外域の超短パルスレーザーを試料に照射して化学反応を開始させ、ある遅延時間においてX線自由電子レーザーを照射する。遅延時間を変えながら測定することで、反応開始直後の変化を時々刻々と測定できる。X線は透過型回折格子によって上下2つのビームに分け、試料を通過しない参照光を同時測定することで、入射X線パルスのばらつきを補償する。試料透過光および参照光はシリコン分光結晶により分散させ、X線CCDカメラでスペクトルを一括測定する。

SACLAは二人旅を続けることになる。X線自由電子レーザーが立ち向かうサイエンスフロンティアは非常に広く、二人旅ではあっても一騎打ちとなる必然性は全くない。これは、同様に粒子加速器を利用するものではあっても、ひとつの物を追い求め激しい競争を常とする素粒子物理と、生命から素粒子までとてつもなく幅広い対象を相手とする光子科学の性格の違いからきている。

昨年、米国エネルギー省は、LCLSのアップグレードとして、超伝導線形加速器を用いた高繰り返し化と複数ユーザー同時利用の方向に舵を切り、また並行して、常伝導線形加速器による短波長X線自由電子レーザー発生を行うことが決定された。元来LCLSはXFELのプロトタイプ機として計画され、成功の暁には別途新規計画を立ち上げるものとされていた。そこで、ローレンス・バークレー研究所を中心に、超伝導線形加速器をベースとした新施設が計画され、これが進むかと思われたが、最終段階でバークレーの計画とスタンフォードの計画を統合して、スタンフォードにLCLS-IIという形での施設整備を行うことが決まった。これは、Euro-XFELを意識した巨大施設となり、進めるからには世界一でなければならぬというアメリカの国民性が色濃く反映されている。

SACLAが進む方向は、アメリカやヨーロッパ共同体の考えている「巨大化」とは真逆の「コンパクト化」であり、現状の700 mの5分の1程度の規模でXFEL施設の建設ができないかどうかを検討している。この規模になり、建設コストも低減されれば、大きな大学や企業の工場内などに設置することが可能となり、さらに将来の技術革新によってテーブルトップ化まで進むことも夢ではない。SACLAが打ち出した「コンパクトXFEL」の概念は世界中で多くの注目を集め、前述のようにスイス・韓国がすでに追従して独自のXFEL建設に着手している。これに加え

て、中国・スウェーデンでも検討が進められている。また一方で、常伝導X-band加速管でリニアコライダーを検討しているCERNのCLICグループが、コンパクトXFELの概念にインスパイアされ、さまざまな国にX-band加速管を用いたコンパクトXFELの建設を持ちかけており、オーストラリアなどで検討が始まっている模様である。

アメリカが超伝導線形加速器に向かう理由のひとつに、線形加速器ベースの光源はリング型加速器ベースの光源に比べて、どうしても同時利用可能なビームライン数が少なくなり、これを高繰り返し可能な超伝導加速器でカバーすることが挙げられよう。しかし、同時利用者数の増加と引き換えに、ピーク輝度の低下、建設経費や運転経費の増大に対処しなければならないので、より慎重な考察が必要のように思われる。現状での電子蓄積リングのエミッタンス改善の様子を考えると、数十年後には、電子蓄積リングでリング型XFELが可能になるのではないかと考えられる。実際、スタンフォードではPEPリングの改造によるリング型軟X線FELの検討がはじまっている。われわれは、2040年代に想定されるSPring-8の次々回のアップグレードにおいて、リング型XFELの実現を目指して準備を進めていきたい。

本稿をまとめるにあたって、理化学研究所放射光科学総合研究センターや高輝度光科学研究センターXFEL推進室の皆様にご教示をいただいたことに感謝したい。また、この分野の参考文献が高エネルギー物理なみに多数の共著者によって書かれているために、本誌に記した文献のフォーマットが必ずしも本誌の規定に合致していないことをお詫びしたい。

文 献

- 1) J. M. J. Madey: "Stimulated emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field," *J. Appl. Phys.*, **42** (1971) 1906-1913.
- 2) R. Bonifacio, C. Pellegrini and L. M. Narducci: "Collective instabilities and high-gain regime in a free electron laser," *Opt. Comm.*, **50** (1984) 373-378.
- 3) J. Schwinger: "On gauge invariance and vacuum polarization," *Phys. Rev.*, **82** (1951) 664-679.
- 4) J. Arthur, G. Materlik, R. Tatchyn and H. Winick: "The LCLS: A fourth generation light source using the SLAC linac," *Rev. Sci. Instrum.*, **66** (1995) 1987-1989.
- 5) G. Materlik and Th. Tschentscher (eds.): "TESLA technical design report, PART V, The X-Ray free electron laser," (Deutsches Elektronen Synchrotron DESY, Hamburg, 2001).
- 6) T. Ishikawa *et al.*: "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region," *Nat. Photonics*, **6** (2012) 540-544.
- 7) P. Emma *et al.*: "First lasing and operation of an ångstrom-wavelength free-electron laser," *Nat. Photonics*, **4** (2010) 641-647.
- 8) T. Inagaki *et al.*: "C-Band Linac in SCSS prototype accelerator of the Japanese X-FEL project," *Particle Accelerator Conference (PAC)* (2007) pp. 2766-2768.
- 9) W. C. Röntgen: "Über eine neue Art von Strahlen," *Ann. Phys.* (second ser.), **64** (1898) 1, 13, 19.
- 10) T. H. Maiman: "Stimulated optical radiation in ruby," *Nature*, **187** (1960) 493-494.
- 11) W. Ackermann *et al.*: "Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window," *Nat. Photonics*, **1** (2007) 336-342.
- 12) H. Wabnitz *et al.*: "Multiple ionization of atom clusters by intense soft X-rays from a free-electron laser," *Nature*, **420** (2002) 482-485.
- 13) A. A. Sorokin, S. V. Bobashev, T. Feigl, K. Tiedtke, H. Wabnitz and M. Richter: "Photoelectric effect at ultrahigh intensities," *Phys. Rev. Lett.*, **99** (2007) 213002.
- 14) R. Moshhammer *et al.*: "Few-photon multiple ionization of Ne and Ar by strong free-electron-laser pulses," *Phys. Rev. Lett.*, **98** (2007) 203001.
- 15) M. Kurka *et al.*: "Two-photon double ionization of Ne by free-electron laser radiation: A kinematically complete experiment," *J. Phys. B*, **42** (2009) 141002.
- 16) M. Meyer *et al.*: "Two-photon excitation and relaxation of the 3d-4d resonance in atomic Kr," *Phys. Rev. Lett.*, **104** (2010) 213001.
- 17) V. Richardson *et al.*: "Two-photon inner-shell ionization in the extreme ultraviolet," *Phys. Rev. Lett.*, **105** (2010) 013001.
- 18) T. Shintake *et al.*: "A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region," *Nat. Photonics*, **2** (2008) 555-559.
- 19) C. Bostedt *et al.*: "Ultra-fast and ultra-intense x-ray sciences: First results from the linac coherent light source free-electron laser," *J. Phys. B; At. Mol. Opt. Phys.*, **46** (2013) 164003.
- 20) L. Young *et al.*: "Femtosecond electronic response of atoms to ultra-intense X-rays," *Nature*, **466** (2010) 56-62.
- 21) M. Yabashi *et al.*: "Compact XFEL and AMO sciences: SACLA and SCSS," *J. Phys. B*, **46** (2013) 164001.
- 22) J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz and D. Sayre: "Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometre-sized non-crystalline specimens," *Nature*, **400** (1999) 342-344.
- 23) R. Neutze, R. Wouts, D. van der Spoel, E. Weckert and J. Hajdu: "Potential for biomolecular imaging with femtosecond X-ray pulses," *Nature*, **406** (2000) 752-757.
- 24) H. Yumoto *et al.*: "Focusing of X-ray free-electron laser pulses with reflective optics," *Nat. Photonics*, **7** (2013) 43-47.
- 25) T. Kameshima *et al.*: "Development of an X-ray pixel detector with multi-port charge-coupled device for X-ray free-electron laser experiments," *Rev. Sci. Instrum.*, **85** (2014) 033110.
- 26) C. Song *et al.*: "Multiple application X-ray imaging chamber for single-shot diffraction experiments with femtosecond X-ray laser pulses," *J. Appl. Cryst.*, **47** (2014) 188-197.
- 27) M. Nakasako *et al.*: "KOTOBUKI-1 apparatus for cryogenic coherent X-ray diffraction imaging," *Rev. Sci. Instrum.*, **84** (2013) 093705.
- 28) H. N. Chapman *et al.*: "Femtosecond X-ray protein nanocrystallography," *Nature*, **470** (2011) 73-77.
- 29) Y. Fujiyoshi, T. Mizusaki, K. Morikawa, H. Yamagishi, Y. Aoki, H. Kihara and Harada: "Development of a superfluid helium stage for high-resolution electron microscopy," *Ultramicroscopy*, **38** (1991) 241-251.
- 30) T. Kimura *et al.*: "Imaging live cell in micro-liquid enclosure by X-ray laser diffraction," *Nature Comm.*, **5** (2014) 3052.
- 31) Y. Takahashi *et al.*: "Coherent diffraction imaging analysis of shape-controlled nanoparticles with focused hard X-ray free-electron laser pulses," *Nano Lett.*, **13** (2013) 6028-6032.
- 32) K. Hirata *et al.*: "Determination of damage-free crystal structure of an X-ray-sensitive protein using an XFEL," *Nat. Methods*, **11** (2014) 734-736.
- 33) Y. Umena, K. Kawakami, J. Shen and N. Kamiya: "Crystal structure of oxygen-evolving photosystem II at a resolution of 1.9Å," *Nature*, **473** (2011) 55-61.
- 34) Y. Obara *et al.*: "Femtosecond time-resolved X-ray absorption spectroscopy of liquid using a hard X-ray free electron laser in a dual-beam dispersive detection method," *Opt. Exp.*, **22** (1014) 1105-1113.

(2014年5月14日受理)