

解説

SPring-8 におけるオンゲストローム FEL 開発

北村英男^{1,2*}, 新竹 積¹, 石川哲也^{1,2}¹理化学研究所*, ²高輝度光科学センター

Angstrom FEL Development at SPring-8

Hideo KITAMURA^{1,2}, Tsumoru SHINTAKE¹ and Tetsuya ISHIKAWA^{1,2}¹RIKEN, ²Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

The SPring-8 Compact SASE Source (SCSS) is being constructed in the SPring-8 site as a feasibility study for realizing an angstrom FEL (XFEL) with full coherence property in the transverse direction as well as in the longitudinal direction. SCSS has been funded in April 2001, aiming to generate first radiation in the VUV region in 2004, and ultimately 3.6 nm in water window in 2007. The combination of high-gradient C-band linear accelerator and in-vacuum short-period undulator realizes a SASE-FEL facility to generate soft X-ray within 100 m machine length. This paper describes the details of the source developments and the new scientific fields to be explored in the next generation source based on XFEL.

1. はじめに

放射光利用のある側面を一言で表現するならば「たかが光源されど光源」であろう。多くのユーザーは光源を意識することなくデータを採取できるようになっており、決してサンプルよりも上流側にある装置群（光学系，フロントエンド，挿入光源，蓄積リング）の仕組みや機能を気にかけない。光源は単なる道具なのであってこの意味で「たかが光源」なのである。X線領域の光源は管球，ローター，そして放射光へと進化したことは周知の事実である。しかし，多くの放射光ユーザーが見逃していることがある。実はローターと放射光はある単位系の光強度（総光束）については余り差がないのである¹⁾。したがってこの世からいきなり放射光が無くなったとしても重大な影響は出ないはずである。それではローターで現在の典型的な放射光実験を実行すると仮定してみる。結果はデータがとれないということになる。ユーザーはここに至って光源の性能差を思い知らされるのである。ローターと放射光の決定的な違いは何か。それは指向性である。ローターは完全無指向性であるが放射光（偏角放射）は少なくとも電子ビームの軌道面に直交する方向で鋭い指向性を示す。言い換えれば放射光の輝度特性の方がはるかに（3桁以上）勝っており，サンプル上に得られる実効的な光子数はローターと比較して3桁以上放射光の方が高い。日本で最初のX線放射光が得られたのはPhoton Factoryの1982年である。以来20年の放射光利用の実績があり，ローターに置き換えてもデータが得られるような放射光実験テーマは現在においては皆無と言って良い。それでは供用開始以来5年しか経ていないSPring-8において似たような仮想実

験を行うといかなる結果となるであろうか。SPring-8は高輝度X線を供給することを目的とした典型的な第三世代放射光源であって挿入光源，特にアンジュレータの輝度特性が最良となるように加速器設計が最適化されている。ここにおける仮想実験とは以下のようなものである。ユーザーには告げずに電子ビームエミッタンスを低下させ放射光の輝度特性を1桁程度下げたと仮定する。たぶん多くのユーザーはこれに気がつかないでデータをとり続けるであろう。データがとれないと文句を言うユーザーのパーセンテージはさほど多くはないものと推定される。しかし，さらに10年を経れば事態は大いに変わるに違いない。主要な放射光実験が第三世代の高輝度特性に最適化されてくるであろう。しかし，それと同時にこの光源に飽き足りない研究者も増えてくるはずである。このような研究者は現時点においては確かに少数派であるが，第三世代の真のユーザーであってかつこの世代の光源の限界を十分意識し次世代の光源を希求する人たちである。第二世代の初期（70年代後半）のころすでに第三世代の到来を予言する研究者たちが存在したのと同じ事情である。

それでは第三世代の限界とは何だろうか。いったい何がこの世代の光源に欠けているのであろうか。ヒントを与えよう。ホログラフィーは光源としてレーザー利用が当たり前となっている。しかし，この原理が発見されたのはレーザーが発明されるより10年以上も前のことである。したがって発見者のガボアはレーザーの出現を想定していたのではなく，あくまで波面の揃った（コヒーレントな）光を前提としていたのである。ガボアの頭脳にあった光源はランプである。ランプそのものはコヒーレントではないが，

* 理化学研究所播磨研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1
TEL: 0791-58-2809 FAX: 0791-58-2810 E-mail: kitamura@spring8.or.jp

そのランプに徹底的な光学的加工（切り取り）を施した後には僅かに残るエッセンスがある。これがコヒーレント光である。しかし、そのコヒーレント光の強度はランプ自体の全強度に比べて絶望的に弱く、実用ホログラフィーは不可能に近い。つまり、SPring-8等の第三世代放射光源は、生命科学分野の重要な次世代手法として期待されているX線ホログラフィーやコヒーレント散乱等のX線顕微鏡技術を実施する観点からみると残念ながらガボアのランプと同じなのである。これらの手法はSPring-8において試行実験の実績（大腸菌の観測：本稿第3章参照）があるものの本格的な実用段階へ進むためには光源そのものがコヒーレントであるような次世代の放射光源が必要である。

第三世代放射光源とは定義で明らかであるように高輝度特性を追求した光源であるが、どの程度高輝度であるのかを調べてみることはこの世代の光源の限界を見極める上で十分意義がある。まず、輝度（brilliance）の定義を再確認することにする。正式な輝度の定義は、光源が光り始めて消光するまでの積算出力を6個の物理量：光源の面積（ $\Delta x \Delta y$ ）、放射立体角（ $\Delta x' \Delta y'$ ）、スペクトル幅（ $\Delta \lambda / \lambda$ ）、パルス長（ $c \Delta t$ ）で除したものである。すなわち、輝度とは6次元位相空間（全位相空間）における光源のエネルギー密度あるいは光子密度に他ならない。高い輝度を得るためには以上の物理量の夫々をできるだけ小さくする必要があるが、これらの物理量には不確定性関係

$$\Delta x \Delta x', \Delta y \Delta y', (\Delta \lambda / \lambda) c \Delta t > \lambda / 2\pi$$

が成り立つことに注意しなければならない。古典論において最初の二つは回折限界、3番目はフーリエ限界と言われるものである。したがって全位相空間で光源が占める領域には最小値が存在する。これを最小不確定領域という。ほとんどの光源においてはこの領域を越えて光子が分布し、特にこの領域内に見出される光子の総数を光源のポーズ縮重度という。光源が発する全光子数に対するポーズ縮重度の比を全コヒーレンス度と定義すると現在の放射光源のそれは絶望的に小さな値となる。例えばSPring-8において稼働している総長27mの長尺アンジュレータ²⁾はX線域において世界最高輝度を誇る光源であるが全コヒーレンス度は波長0.1nmにおいて僅か 3×10^{-13} 程度である。では、全コヒーレンス度が100%であるような光源が存在するのであるか。答えはイエスである。レーザーの1種であるモードロックレーザーとその高調波である。しかし、残念ながらその利用可能な波長領域は赤外から真空紫外域（10nm以上）に限定されている。

現在のところ輝度を要求する放射光実験のうちほとんどが縦方向（時間）コヒーレンスを必要としないものである。この場合、全コヒーレンスから時間コヒーレンスを除いた横方向（空間）コヒーレンス特性が重要となる。実は、第三世代放射光源とは空間コヒーレンス特性だけを追求した

もので、ここで定義されている輝度に正確な表現を与えるとは時間平均輝度となる。これは、単位時間あたり、単位相対バンド幅あたりに得られる光子数、すなわち光束を光源面積と放射立体角で除することによって得られる。つまり、時間平均輝度とは4次元部分位相空間（ x, x', y, y' ）における光源の光束密度に他ならない。しかしながら、歴史的にはこれが輝度と定義されてしまった。したがって、誤解を避けるために先ほど定義した正式な輝度を尖頭輝度と呼ぶことにする。部分位相空間においても最小不確定領域が定義できる。ほとんどの放射光源はこの領域を越えて光束が分布し、特にこの領域内に見出される光束を光源のコヒーレント光束という。光源が発する全光束に対するコヒーレント光束の比を空間コヒーレンス度と定義すると前述した27-mアンジュレータのそれは如何ほどになるであろうか。答えは波長0.1nmにおいて僅か0.0003である。したがって、コヒーレント光束を取り出すためには精密光学技術を駆使して全光束のうち少なくとも9997/10000を捨て去る必要がある。世界最高輝度を誇る放射光源でさえもこのような結果となるのである。

以上が第三世代放射光源の限界である。当然ながらコヒーレンスを追求する研究者たちはこの限界を超えた次世代の光源を求めることになるであろう。次世代光源に期待される性能は全コヒーレンス度100%（自動的に空間コヒーレンス度も100%）のX線を供給できることである。しかしながら、確かなことは、誘導放出原理に基づく光源でないことを実現することは不可能であろう。この原理に基づくX線域の光源としては現在のところ自由電子レーザーの1種であるSASE（Self-Amplified Spontaneous Emission）にのみ可能性がある³⁾。高い尖頭電流を持ち、質の高い（エミッタンスが低くかつエネルギー拡がりの小さい）電子ビームを長尺アンジュレータ内に走らせると発生した放射が前方の電子を加速あるいは減速することによりバンチ内に発生波長に等しい間隔で電子密度の濃淡（マイクロバンチ）が生じる。これらのマイクロバンチはコヒーレント放射の原理⁴⁾に基づき強い放射光を発生する。さらにこの放射光はより濃淡度の高いマイクロバンチをつくる。このような誘導放出の繰り返しで放射光強度は飽和出力まで成長していく。これがSASEの基本的な原理である。質の悪い電子ビームの場合、飽和に至るまでの距離が常識的に許容される値（100m）を超えてしまう。つまり、SASEを成功させるには第三世代の典型的なエミッタンスやエネルギー拡がりに比べて遙かに低い値をもつ電子ビームが必要となる。特にX線領域においては以上の条件は絶対である。このような電子ビームを得るための加速器はもはや蓄積リングではない。というのはこの加速器においては原理的に必ず放射光が発生し、その過程が量子的であるため電子ビーム内にエネルギー拡がりを増大させ、これが間接的原因となってエミッタンスをも増大させるのである。したがって、X線域のSASE（XFEL）用加

速器としては原理的に放射光発生のない加速器，線型加速器がふさわしいという結論が得られる。なお，エネルギー回収型の線型加速器に基づく放射光源として Energy Recovery Linac (ERL) が最近話題となっているが⁵⁾，高平均ビーム電流運転による高平均輝度の放射光を供給することを目的としており，必ずしも XFEL に最適化したものではない。これも第四世代光源と呼ぶこともあるが，光源のコヒーレンス特性に関しては現状の第三代よりも幾分改善されるとしてもコヒーレンス度100%には程遠い。したがって，カテゴリーとしては第三代に含めるべきである。

高性能線型加速器に基づく XFEL 施設を建設しようという動きは米国スタンフォード線型加速器センター (SLAC)，欧州ドイツ電子シンクロトロン (DESY) において活発である。SLAC では2001~2003年を R&D 期間，2004~2006年を建設期間として，2マイル線型加速器の先端に周期長 3 cm の100-m アンジュレータを建設する計画 (LCLS 計画) を立てており，波長目標として14.5 GeV ビームで0.15 nm としている⁶⁾。DESY では2010年をターゲットとして XFEL 建設計画 (TESLA 計画) があり，25-GeV 超伝導線型加速器と周期長 5 cm の100-m アンジュレータの組み合わせで0.1 nm 域を目標としている⁷⁾。いずれの計画も高エネルギー物理学分野の将来計画である「リニアコライダー」と強くリンクしているのが特徴である。一方，我が国では SPring-8 における XFEL 開発が唯一のものである。この計画は，①我が国独自の技術である真空封止型ミニギャップアンジュレータ⁸⁾を採用することにより磁石周期長の短周期化 (15 mm) を図り，動作ビームエネルギーを 6 GeV 以下，アンジュレータ長 (飽和出力長) を25 m 以下としていること，②加速勾配の高い C バンド加速管⁹⁾を採用することにより，短周期アンジュレータの採用と相まって施設のコンパクト化とローコスト化を目指していること，③電子銃として，高周波加速によるエミッタンス増大が原理的に皆無である DC 動作の熱電子型を採用していること，④高エネルギー分野の将来計画とは独立した放射光科学固有のプロジェクトであることを特徴としている。本稿で紹介するのは，上記コンセプトの実証を目的とする開発研究である¹⁰⁾。その特徴から SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) プロジェクトと呼称しており，ビームエネルギーは 1 GeV，目標波長は 3.5 nm 領域の軟 X 線である。研究期間は平成13年度 (2001) から平成19年度 (2007) を予定している。以下に，本開発研究の詳細と XFEL に基づく利用研究の可能性について述べる。

なお，本稿における「X 線領域」は，空気を透過する波長領域 (0.2 nm 以下) という光学の伝統的定義にしたがっていることを補足しておく¹¹⁾。

2. XFEL の開発研究

2.1 SR から FEL へ，そして SASE-FEL へ

SASE-FEL のメカニズムを理解するには，次に示す順に放射光の発生メカニズムを理解することが重要である。これによって，発生する光の特性，さらにその利用方法がご理解いただけるし，場合によってはユーザーの中から光源の開発に興味を持ち，将来，XFEL 計画に参加される方が出てこないとも限らない。さて放射光源は歴史的に次の順に開発されてきた。

Synchrotron Radiation → Undulator Radiation → FEL → SASE FEL

これは，すなわち次式で定義された輝度 (尖頭輝度，peak brilliance) を高くする歴史であった。

$$B = \frac{N_p}{\Delta x \Delta y \Delta x' \Delta y' (\Delta \lambda / \lambda) \Delta t}$$

ここで分母は位相空間の体積である。 Δt は光子バンチ長 (電子バンチ長に等しい) であり， N_p はバンチあたりの光子数である。輝度とは，位相空間の単位体積あたりの光子数である。

Fig. 1 は，相対論的な速さで円運動をする電子がつくる電界の軌道面内のプロットである。相対論の効果によって電気力線が帯状に集中し，螺旋を描いて外へ伝播する。これが軌道放射 Synchrotron Radiation (以下偏向部放射と呼ぶ) である。その束が遠くにいるユーザーに届くと，強力なパルス波形 (インパルス) の横電界を観測する。デルタ関数のようなインパルス波形をフーリエ分析すると，広帯域のスペクトルが得られる。パルス波の時間幅は，電子の速度が速くなると短くなり，そのスペクトルは短波長へと伸びてゆく。各放射光施設では，電子のエネルギーを数百 MeV から数 GeV まで高めて，X 線領域を作り出している。

ところで偏向部放射の電気力線の束は，**Fig. 1** の紙面に垂直な方向について，電子の進行方向 (紙面近く) に集中している。その開き角度は $\Delta y' = 1/\gamma$ である。ここで γ は電子ビームの相対エネルギー。これによって偏向部放射光は水平な線状に上下方向が収束するために輝度が高くなっているのである。しかし，水平方向には発散している。したがってユーザーはスリットを用いて必要な幅だけ切り出す必要があり光量を失う。つまり偏向部放射光は $\Delta x'$ が大きく輝度が十分ではない。これは電子が大きく水平方向に曲がってゆくのがある原因である。

そこでより高い輝度を得るために，アンジュレータが使用されるようになった。アンジュレータでは永久磁石または電磁石を上下に交互に配置して (**Fig. 2**)，電子の軌道を少しずつ左右にまげて $\Delta x'$ を制限し，かつこれを何回も

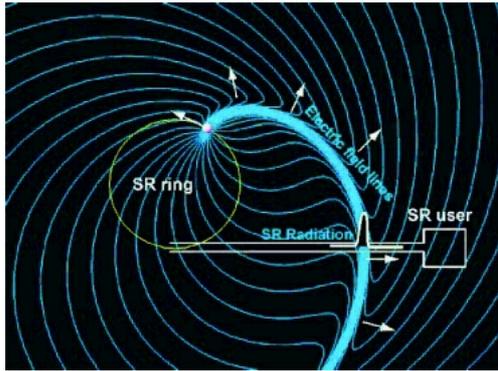


Figure 1. Synchrotron radiation pattern (electric line plot). Relativistic electron running around a circle trajectory generates a spiral shaped high-field zone, which propagates outward. When it arrives, a user observes a spike like transverse electric field, this is the synchrotron radiation. (Radiation2D simulator is available from web-site <http://www.xfel.spring8.or.jp>).

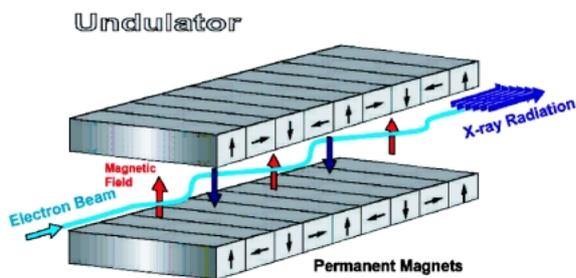


Figure 2. Undulator magnet. Electron runs along a sin-wave trajectory and generates focused quasi-monochromatic radiation in longitudinal direction.

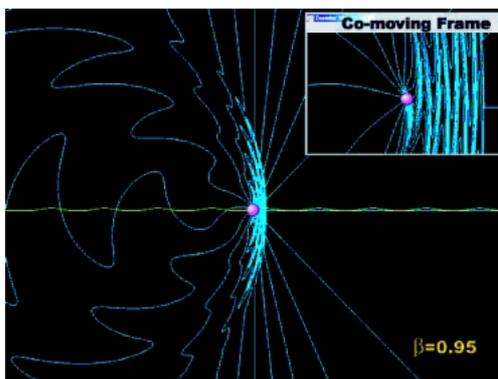


Figure 3. Undulator radiation pattern (Radiation2D).

繰り返すことで、輝度を上げている。**Fig. 3**がアンジュレータ放射であり、電子の前にサイン波状の軌道(アンジュレータ軌道)に相当する横波の波形が折りたたまれている。これはサイン波の頭で曲がるたびに発生した放射光がそれぞれ重なったものである。したがって、ユーザーが得る波形は、偏向部放射のようなインパルスではなく、アンジュレータの周期数に相当するサイン波の波束となり、そ

のスペクトルは特性波長に鋭く集中する。このようにアンジュレータ放射では、 $\Delta x'$ と $\Delta \lambda$ が小さくなることで高い輝度が得られるのである。アンジュレータの特性波長は、次式で与えられる。

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

ここで、 λ_u はアンジュレータ磁場の周期長、 K は強度をあらわす無次元量であり、通常1~2程度の値が使用される。電子ビームのエネルギーを上げてゆけば、X線の波長が短くなっていくことがわかる。これはドップラー効果とローレンツ短縮によるものである。

さて、もっと輝度を上げる方法はないだろうか？ 輝度の定義式に戻って、偏向部放射からアンジュレータへは分母を小さくしてきた。もう小さくするパラメータがない。そこで分子を大きくすることを考える。いちばん簡単には、加速器に入れる電子量(電流)を多くすることを思いつく。電流に比例して輝度が大きくなるであろう。しかし加速器の技術的な問題から、これを飛躍的に大きくすることはできない。そこで光子 Flux の中身の詳細を考えてみる。

Fig. 1と**Fig. 3**の電気力線のプロットは、すべて大きさのない点電荷(電子1個)のつくる電場であった。実際のSR施設の加速器の中を走る電子は、長さ1cm程度のバンチ形状をしており、この中に約 $10^8 \sim 10^{10}$ 個もの電子が含まれる。これらが例えばアンジュレータの中で電磁波を放射する。アンジュレータの出口で各電子はそれぞれ**Fig. 3**のような横波電場の波束を持っている。ユーザーが受け取るのは、このすべての電子が発生するアンジュレータ放射の合成(電界の和)である。問題は、それぞれの電子のZ方向の位置である。残念なことに、各電子のZ方向の位置はバラバラであり、結果的にそれぞれのアンジュレータ放射のZ方向の位置(位相)がバラバラとなり、その合成をとると、ある場合には逆位相となって消しあうものが出てくることである(**Fig. 4**左)。全く統計的にランダムな位相の波を重ねると、その強度は、

$$E_{spt} = \sqrt{N_e} E_1$$

$$P_{spt} = N_e P_1$$

となる。ここで、 N_e は電子数、 E_1 、 P_1 は電子1個の作る放射光の電界強度とパワーである。重要な点は、合成される電界強度が電子数の平方根でしか大きくならない点である。これが自然放射(Spontaneous radiation)である。第1~3世代光源、ERL光源の放射光がこれにあたる。

ではもし**Fig. 4**右に示すように、電子をちょうどアンジュレータ放射光の波長できれいに整列させたらどうだろうか？ この場合、すべての電子が発生する放射光の位

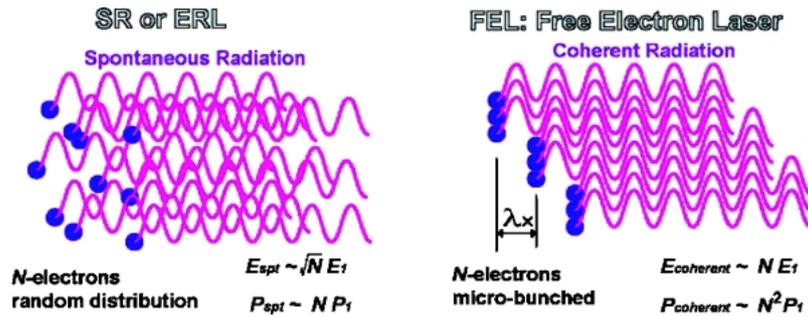


Figure 4. Spontaneous radiation v.s. coherent radiation. In the SR or ERL machine, the radiation fields from randomly distributed electrons partially cancel each others. On the other hand, in the FEL machine, electrons are micro-bunched at radiation wavelength, all radiations are in-phase and its power is coherently enhanced.

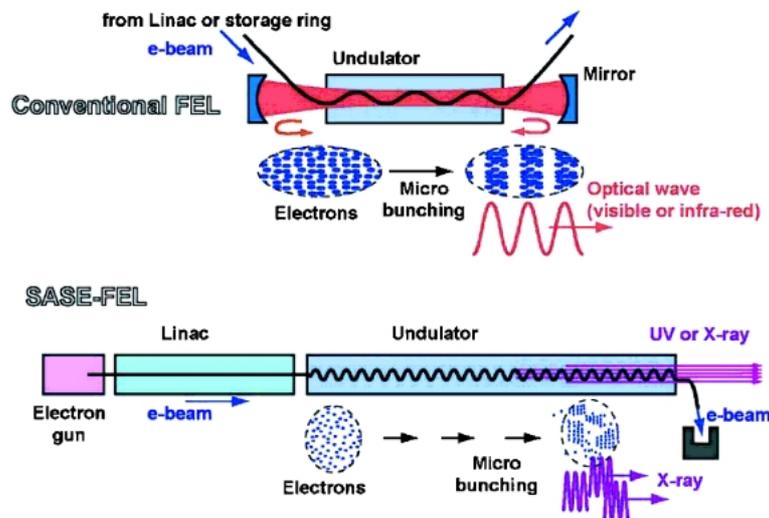


Figure 5. Conventional FEL and SASE-FEL.

相が揃っているため、合成電界は単純に電子数倍となり、

$$E_{\text{coherent}} = N_e E_1$$

$$P_{\text{coherent}} = N_e^2 P_1$$

となる。このように、電子が整列した場合の放射パワーは、自然放射の電子数倍となる。これをコヒーレント放射 (coherent radiation) と呼ぶ。通常、電子バンチ1個に含まれる電子数は $10^8 \sim 10^{10}$ 個もあるから、もし全ての電子がきれいに整列すると、その放射パワーは $10^8 \sim 10^{10}$ 倍と飛躍的に大きくなる。恐ろしく高い輝度が得られることになる。ただし、これは赤外線 FEL のように、波束の長さが電子バンチ長より長い場合であり、X線では波束が短いので、 N_e は波束長当たりの電子数となるが、それでも $10^6 \sim 10^8$ 倍のゲインがある。規則正しく整列した電子から発生したアンジュレータ放射が、互いに干渉して強め合っているために、わずかでも見る角度が変わると干渉関係がくずれてパワーが弱くなる。逆にいえば、放射パワーは鋭く前方方向に集中している。また波束が連続的に繋がる

ため、スペクトル幅が非常に小さくなる (コヒーレント長とスペクトルの関係)。これが FEL である。

Fig. 5 上に示すように、従来型の FEL では、ひとつの電子バンチから発生したアンジュレータ放射をミラーで反射して、次にくる電子バンチに重ねる。放射場の横電界によって、電子が横方向に繰り返し力を受ける。一方、電子の軌道はもともとアンジュレータの磁場によって、わずかであるが Z 軸から傾いているために、横電場からの力で、電子はその進行方向に加速、または減速されて、アンジュレータ放射の波長でバンチ (micro-bunching) して、強力なコヒーレント放射を発生する。

さて、現在まで Fig. 5 上の方式で実現された FEL の発振波長は、赤外線から紫外線までである。これより波長を短くしようとすると、反射率の高い反射ミラーがなく、光のロスが FEL ゲインを上回り、FEL は発振しない。そこで、もし従来型 FEL で100回光が往復して発振飽和するならば、Fig. 5 下のように、アンジュレータの長さを100倍にすればいいではないか？ これならミラーが必要ない。これは自然放射を自己増幅しているもので、Self-Am-

plified Spontaneous Emission の頭文字をとって SASE (サセ) 型 FEL と呼ばれる。SASE-FEL はミラーを必要としないので、電子のエネルギーを上げさえすれば波長を短くできる。ただし、次に示すいくつかの技術的な問題を解決しなくてはならない。これらは、電子の 6 次元位相空間 (x, x', y, y', dz, dE) の体積を小さくして電子密度を大きくしていることにほかならない。

- (1) まず波長が短くなると、そのままでは FEL のゲインが極端に低くなるので、高密度の電子ビームが必要となる。実際の加速器では、電子のパンチ長を短く圧縮することで、高密度の電子を実現する。(→short electron bunch length)
- (2) 長い高精度アンジュレータの製造技術。(→long undulator precise fabrication)
- (3) 長い距離にわたって発生する X 線が電子とともに並行に飛行する必要から、長いアンジュレータの中でのアラインメント技術 (電子ビームの軌道をまっすぐに通すこと)。(→precise beam alignment)
- (4) 同じ理由で、電子それぞれの横方向の運動量が小さいことが求められる。すなわち電子ビームに小さなエミッタンスが要求される。(→low transverse emittance)
- (5) 波長が短くなると、電子雲をマイクロパンチに形成する力が低くなるので、エネルギー分散がきわめて小さい電子ビームが要求される。(→low longitudinal emittance)

RIKEN/SPring-8 では、これらの問題を具体的に解決し、SASE-FEL の動作実証をするために、電子エネルギー 1 GeV の SCSS 計画を実施している。

2.2 SCSS の基本構成

Fig. 6 は SCSS の基本構成である。電子銃から発生する低エミッタンス電子ビームを C バンド加速器にて 1 GeV まで加速し、長さ 25 m のアンジュレータに通し、最短波長 3.6 nm、ピークパワー 2 GW の強力かつ短パルス (0.5 psec) の軟 X 線を SASE-FEL モードで発生させ、ユーザーに供給する。以下、電子銃から順に SCSS の特徴を解説する。

2.2.1 電子入射器

SASE-FEL には、低エミッタンス $(\epsilon_x, \epsilon_y, \Delta t, \Delta E/E)$ の電子ビームが要求される。横方向の規格化エミッタンス $\gamma\epsilon_x, \gamma\epsilon_y = 1 \text{ } \mu\text{m.mrad}$ 、縦方向にはパンチ長 $\Delta t = 0.5 \sim 1 \text{ psec}$ 、エネルギー分散 $\Delta E/E = 10^{-4}$ 、電荷量 1 nC、ピーク電流 1~2 kA が要求される。これら X, Y, Z すべての方向でのエミッタンスが同時に小さいことが必要である。

諸外国の SASE-FEL 計画では、通常、電子銃にフォトカソードを用いて RF-Gun を採用している。これは、パルス長 1 psec 程度の短パルスレーザー光をフォトカソードに照射して、カソードから直接短パルスの電子ビームを引き出し、これを速やかに加速することで、低エミッタ

スの電子ビームを得ようというアイデアである。最近 1 $\mu\text{m.mrad}$ に近い実験データの報告もなされているが、実験を行ったグループを訪問して直接意見を聞いて回った結果、チャンピオンデータとしてはすばらしいが、日常運転に使用するには到底安定性や信頼性が不足していることがわかった。これは主にレーザーシステムの不安定性 (ビームの方向不安定, モード不安定, タイミングジッタ, パワー変動, プロファイル不安定) が原因であり、各研究所で改善のための研究がなされているが、十分な性能となるまでには、かなりの労力と時間を要するものと思われる。そこで我々は、熱電子銃とバンチャーシステムという古典的な方式を発展させることとした。この方式であればレーザーを使用しないので、不安定要素が少ない。しかし直流に近い電子ビームをバンチャーで圧縮してゆくので、エミッタンスを悪化させないように細部にわたり設計を最適化している。

さてカソードから出る電子のエミッタンスは、熱カソードでの電子の熱運動量とカソード半径の積で与えられるので、出来るだけ小さい面積のカソードを使用すればよい。これには、電子放出密度の高いカソードが必要となる。我々は、直径 3 mm の CeB_6 (cerium hexa-boride) 単結晶を使用し 3 アンペアの電子ビームを引き出す。電子放出密度は 40 A/cm^2 を超える。またカソード近傍での空間電荷によるエミッタンス低下を防止するため、カソードには 500 kV の高電圧を印加する方式を採用した。数値計算によると電子銃アノードでのエミッタンスは $0.4 \text{ } \mu\text{m.mrad}$ と非常に小さいことが予想されている。

CeB_6 など希土類のカソードを使用する場合に問題となるのは、その加熱技術である。動作温度が $1400 \sim 1500^\circ\text{C}$ と高温であるため、熱放射量が大きく必要な加熱電力が大きくなること、 CeB_6 の熱分解で発生するボロン原子の金属への拡散による金属脆性の問題、ヒーター温度が高いために起こるヒーター寿命の短縮、熱膨張によるカソード寸法の変化など数多い。我々は、これらの問題を解決するため、 CeB_6 を高純度グラファイトロッドに収め、これをグラファイトのヒーターで間接加熱する方式とした。グラファイトヒーターの技術は、半導体の引き上げ工程用に開発されたもので、純度の高いグラファイトを用いて製造されている。グラファイトは高温での機械的、電気的特性が安定しておりヒーターとして最適の材料となっている。Fig. 7 は開発中のカソードアッセンブリーと加熱試験の様子であり、動作温度までの安定な加熱に成功している。2003 年の春には、500 kV 高電圧によるビーム引出し、およびエミッタンス測定実験を計画している。

電子銃から下流のバンチャー部の詳細については紙面の都合で割愛するが、数値計算によるとパンチ長 3 psec、ビームエミッタンス $1.5 \text{ } \mu\text{m.mrad}$ という必要十分な特性を持っていることが予測されている。

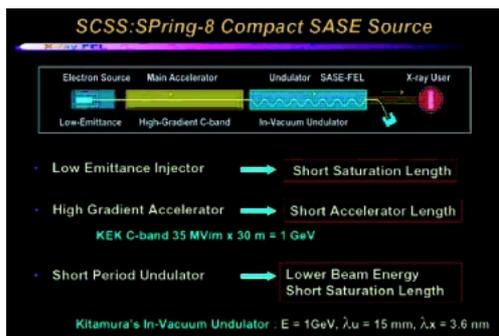


Figure 6. SCSS System Diagram.

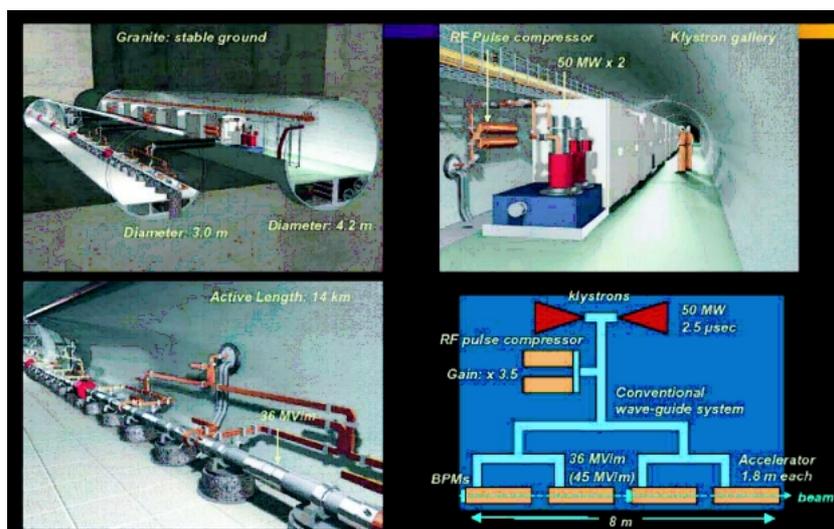
Figure 7. Cathode assembly (left). The CeB_6 single crystal cathode (3 mm diameter) is mounted on the high-purity graphite rod. The cathode is heated up to 1400 degree C using graphite heater (right).

Figure 8. The C-band accelerator system has been developed for the e+e- linear collider project. Four C-band system will be used in SCSS to accelerate the beam to 1 GeV.

2.2.2 Cバンド主加速器

電子入射器から得られる20 MeVのビームを、4ユニットのCバンド加速システムにより1 GeVに加速する。Cバンド加速システムは、もともと高エネルギー物理実験の将来計画であるリニアコライダー向けにKEKにて開発されたものであり (Fig. 8), マイクロ波の周波数を従来のSバンド (2856 MHz) の2倍のCバンド (5712 MHz) とすることで、高い加速電界を経済的に達成できるという特色がある。1996年に開発を開始し、2000年までに50 MW C-band klystron, 加速管, モジュレータ電源など開発を終了している。現在はそれらの要素部品の高性能化を行っている。

「ライナックのビームは不安定で、FELを作っても使えない」という意見がある。パルスごとのエネルギー変動、ビーム量の変動、ビーム形状の変動、ビーム位置変動が原因である。SCSSではライナックの安定化を一つの大きなR&D項目に掲げ、つぎの開発を行っている。

- (1) エネルギー変動対策→温度制御, 各電源の安定化, デジタルフィードバック

- (2) ビーム量, ビーム形状の変動対策→カソード温度フィードバック制御, バンチャー空洞電源の安定化, コリメータ最適化
 - (3) ビーム位置変動→架台の安定化, 温度制御, 高精度RF-BPM, バンチャー部のアライメント (特に収束磁石をアライメントしやすい単レンズとした)
- これらの対策によって、十分に使用に耐えるXFELを実現できるものと考えている。

2.2.3 真空封止アンジュレータ

放射光施設のコストパフォーマンスをよくするには、できるだけ電子ビームエネルギーを下げるのが望ましい。これが“短周期アンジュレータ”を希求する背景である。これにはアンジュレータの周期長を短くすればよいことがわかる。しかし有効な磁場強度を得るには、それに比例して上下磁極間のギャップを小さくする必要がある。しかし一方、電子ビームの通路 (Acceptance) も一定以上確保する必要があり、使用できるギャップには自ずと最小限界がある。小さすぎると電子ビームの一部がアンジュレータの磁極に衝突し、ビームロスとなり、また永久磁石が放射

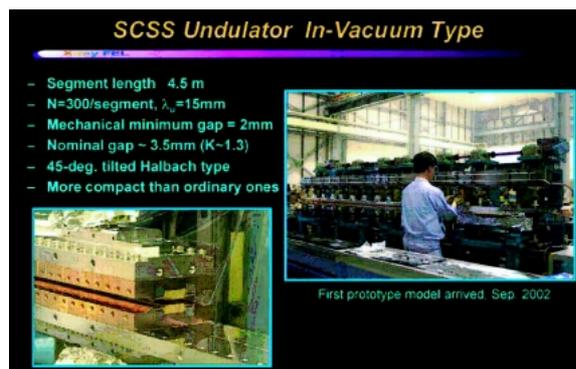


Figure 9. The in vacuum type undulator for SCSS project. After assembling test, the magnet array will be installed into vacuum tank.

線によって減磁する¹²⁾。

通常、磁極間には真空チェンバがある。当然である。電子ビームは真空中、永久磁石や電磁石は大気中、だから真空チェンバが必要である。いろいろと工夫しても上下二枚で真空チェンバは数 mm。アンジュレータの周期長を短くするには、どうしてもギャップを小さくしたい。これを解決するには、磁石ごと真空中に入れてしまえばいい。チェンバがないだけギャップを小さくできる。これによって短周期の場合にはファクター 2 以上のゲインがある。しかしこれは非常識きわまりない。磁石からのガス放出、放射線による永久磁石の減磁、放射光やビーム電流による発熱、その他、不可解な現象などにわずらわされて、とんでもないトラブルに巻き込まれるだろう。

この常識と困難な技術的問題にチャレンジして、実際にものにしたのは我が国のグループである。彼らは、磁石に TiN コーティングをするなど、ひとつひとつの技術的問題を日本にある進んだ工業技術を応用、改良して問題を解決し、「真空封止型アンジュレータ」を実用化した^{13,14)}。すでに SPring-8 を始め、海外も含めて、約 30 台以上の真空封止型アンジュレータが稼動している。真空封止型アンジュレータの技術は完成している。Fig. 9 は SCSS 向けに開発中の真空封止型アンジュレータである。写真は磁石の仮組みであり磁場調整のあと真空チェンバ内に装着される。周期長 15 mm、ギャップ 3.7 mm、セグメント (1 台のアンジュレータ) 長さ 4.5 m の真空封止型アンジュレータを 5 台使用する予定である。

3. 利用研究

FEL の光源としての特徴は、これまで述べられてきたように、フェムト秒領域に入る短パルス X 線であること、非常に高いピーク輝度をもつこと、光源サイズが小さいこと、電子のコヒーレントな運動によりコヒーレント光が発生することである。この結果、単一モードに入る光子数が大きな高縮重状態を形成することになる。したがって、FEL の利用研究は、当然これらの特徴を活かしたものと

なり、現在の放射光利用とは異なる形態となることが予想される。一方で、Cornell 大学などで計画が進められている Energy Recovery Linac (ERL) は、短パルス、小光源サイズとなることは FEL と同様であるが、X 線の発生機構自体は第三世代放射光と変わるところはなく、現在の放射光利用と類似の形態で第三世代で端緒についたコヒーレント利用計測や、高時間分解計測をさらに発展させていく場となることが予想される¹⁵⁾。既に、第三世代光源として世界でもトップクラスの性能に達している SPring-8 から ERL に進むのはステップ幅が狭く、SPring-8 で考えるべき次世代光源は FEL であるというのが我々の結論である。

SPring-8 の計画時点で、SPring-8 での利用研究に関して幅広い議論が行われ、その結果を基にして利用実験装置の整備が行われた訳であるが、振り返って考えてみると実際に光を見る以前には、しばしば見当はずれな議論が行われていた。また単に第二世代の延長での議論も少なからずあった。歴史を振り返れば、PF 建設時にも似たような状況は存在した訳であり、ここで言う FEL 利用に関する議論も同じ運命を辿る可能性は高い。放射光研究では、新世代放射光源ができるごとに 'unexpected science' が展開され、Advanced Photon Source (APS) では計画段階からそのことを謳っていたほどである。FEL に関しても同様となることを期待したい。「星の王子様」の著者として知られる Antoine de Saint-Exupery が、The Wisdom of Sands にしるした "The most important task before us may be . . . not to foresee it, but to enable it" は間違いなく FEL の場合にもあてはまるものと考えられるが、ここでは、現状で「予見可能」な利用研究を議論する。

第三世代放射光源は、アンジュレータからの放射光利用に最適化された光源であり、そのために蓄積リング内の電子ビームエミッタンスを小さくしてアンジュレータでの干渉効果を増進する試みが続けられてきた。この結果として、ある意味で光源の縮小像を作ることと等価であるマイクロビーム形成において、それまでは不可能だった小さなサイズに多くの光子数を集めることが可能となり、サブミクロンスケールでの微小領域の解析が進んでいる。しかしながら、蓄積リング型光源の本来のなエミッタンスの限界を打ち破ることが可能であれば、ナノメートル領域の集光も原理的には可能となり、原子や分子のスケールでの局所的な構造や物性研究の道が拓ける。時間領域でも蓄積リング型光源はその本来の性質からパルス幅 10 ピコ秒程度のところに限界がある。ここ 10 年間でのフェムト秒レーザーの利用研究を振り返ると、フェムト秒領域に達することにより化学反応の初期過程が明らかになり始めている¹⁶⁾。長波長のレーザーでは、電子過程のみが観察されているが、フェムト秒 X 線パルスを利用すると、これとは相補的な化学反応初期過程での構造変化を追及することができる。

第三世代放射光源の利用により、X線領域でのコヒーレンスの利用が本格的に開始された。第三世代での小さなエミッタンスと比較的大きな周長は、結果として試料位置から遠くの小さな光源を見ることになり、空間コヒーレンスの増大をもたらすこととなった。ここで注意しなければならないのは、第三世代光源からのX線のコヒーレンスは、レーザー光源がそうであるような光源自体がコヒーレントな機構をもつためにコヒーレント光が発生するというよりはむしろ、小さな光源を遠くで見ることによる伝播に起因するコヒーレンスだということである¹⁷⁾。試料が光源から遠くに離れると、試料内の小さな体積中ではX線の振幅と位相は良く定義された量となる。このために、その体積内の構造に起因する干渉が観察できるようになる。したがって、全くのインコヒーレント光源であるX線管を用いても、数百オングストロームのコヒーレンス体積内での構造を反映したBragg反射が観察できるのであり、また19世紀の初頭にYoungが有名なダブルスリットの実験をなしたのも、この伝播に起因するコヒーレンスを利用したからに他ならない¹⁸⁾。大多数の干渉実験には光源コヒーレンスは必須でなく、伝播コヒーレンスが重要である。現に既存の放射光施設で行われていることから明らかなように、X線ホログラフィにとってさえ光源コヒーレンスは必須なものではない。

XFELからの強力なX線は、短波長電磁波と物質との相互作用の新しいプローブとなる。先行するLCLSやTESLAでは、XFELの利用に関して様々な検討が進められているが、今後の議論のベースとして、その検討結果の一端を紹介しておこう^{19,20)}。短波長電磁波と物質との相互作用の基礎となるのは、原子物理学であり、ビームに接触するビームライン機器や光学素子の開発のためにも、この未開拓な分野は早期に研究に着手すべきであるというのが、彼らの見解である。そこでは、一原子内での多重コアホール形成、非線形光学のX線領域への拡張、高電荷状態のクラスター形成、FELで励起された物質からのレーザー発振、高励起レーザープラズマ形成などが検討されている。また、多数の高エネルギー光子が空間・時間ともに局在するXFELでは、物質との相互作用によりプラズマ状態や、そこに至らなくとも非常に高励起集団状態を形成することが可能であり、Warm Dense Matter というべき新しい物質相が形成される。この物質相に関しては様々な新しい物理が展開されることとなろう。XFELでのフェムト秒パルスは、この10年間にフェムト秒レーザーが基礎化学に果たした役割と同様な役割を、構造化学的な側面に関して担うものと思われる。すなわち、化学反応の初期過程での原子レベルでの構造変化の追跡が可能となろう。たんぱく質分子などの巨大生体高分子では、単一分子からのコヒーレント散乱によって、原子レベル分解能に対応する高角散乱までのデータを単一パルス照射で取得できる可能性があり、散乱強度の位相を何らかの方法で回復でき

ば、単純なフーリエ変換によって実空間での原子位置座標に戻すことが可能である。このほかにも、LCLSとTESLA-XFELのレポート^{19,20)}には、様々な応用の可能性が議論されている。これらを、この短い紙面で紹介しつくすことは困難であるし、また紹介したところでLCLSが予定通りに動けば、我々がXFELを手に入れるころには殆どやり尽されてしまうはずであるので、このあたりで切り上げ、別の観点からXFELの利用に関して議論したい。

LCLSの利用に関するレポートが出版された2000年から2年間を経過する間に、世界中でポストゲノム研究としてのタンパク質分子の構造と機能に関する研究プログラムが立ち上がり、わが国でもRR2002と称する研究プロジェクトが始まっている。これが順調に推移すれば、普通の意味での結晶化が可能な分子は既存の第二世代および第三世代放射光施設を用いてあらかた構造解析が終了しているであろうし、普通の意味での結晶化が困難であっても微小結晶ができるものであれば、第三世代放射光による構造解析が可能になりつつある。一方で、比較的小分子に対して現在有効な解析方法であるNMRは、近い将来適応範囲を広げることが予想され、XFELが利用可能になったときにLCLSレポートで強調されているほど単分子構造解析の重要性が残っているかどうかは議論のあるところであろう。

ゲノム解析から始まったライフサイエンス分野での変革は、ポストゲノム研究としてのタンパク質研究を経て、ポストポストゲノム研究としての細胞機能を分子レベルで理解する方向に向かうものと思われる。この分野でのXFELの有効性を検討しておくことは無駄ではなからう。放射光を用いた細胞レベルの研究としては、かなり以前から軟X線領域でのマイクロコピー等による観察が行われALSでは、25 nm分解能の軟X線顕微鏡観察が行われている²¹⁾。また、第三世代放射光での硬X線マイクロビームを用いた走査型微小領域蛍光分析等の試みがある²²⁾。SPring-8では、後で詳しく紹介するように、コヒーレント散乱計測とオーバーサンプリング法による位相回復を組み合わせた「X線散乱ナノコピー」の開発が進められており、ナノテクノロジー関連やライフサイエンス関連試料への広範な応用が始まりつつある²³⁾。この方法を用いて、現状で大腸菌試料の25 nm分解能での観察が可能になっている²⁴⁾。XFELを用いれば、nm分解能データを単一パルス照射で得ることは容易であり、細胞中の分子間の相互作用とある程度のダイナミクスをこの空間分解能で追跡することが可能となろう。また、今後の検出器開発の動向によっては、さらに分解能の高い原子レベルでの動的観察の可能性も拓けてくるものと思われる、「ダイナミック・ピココピー」とでも呼ぶべき方法が実現する可能性がある。

ここで、XFEL利用に向けたSPring-8での現時点での取り組みを紹介しよう。第三世代放射光の先端的な可能性を

頭にすることを目的として、SPring-8では他の第三世代放射光施設にはない2つの特徴的なビームラインを整備した。1つはBL29XULとして知られている1 km ビームライン^{25,26)}であり、もう1つはBL19LXUとして知られている27 m アンジュレータビームライン²⁷⁾である。実際には27 m 真空封止型アンジュレータの成功が、高加速勾配線形加速器と真空封止型アンジュレータの組み合わせでコンパクトなSASE型FELの可能性を拓いたとも言える。1 km ビームラインは、SPring-8の標準型4.5 m 長真空封止型アンジュレータを光源とし、光源点から1 km 離れたエンドステーションを持つビームラインであり、そこでは大面積空間コヒーレント X 線ビームが利用可能である。したがって各種コヒーレント X 線光学素子開発などに用いることができる。一方で27 m アンジュレータビームラインは、現時点では世界最高輝度の X 線が利用可能なビームラインであり、FELでのビーム診断法にむけての各種 X 線干渉計の開発²⁸⁻³⁰⁾や、ポンププローブ計測法の開発³¹⁾、X 線光学素子の耐熱試験などに利用されている。

コヒーレント X 線を扱う光学系では、可視光のレーザの光学系で見られるのと同様に、光学素子のわずかな不完全性が波面の歪を引き起こす。X 線では波長が短いために、不完全性の程度は一般に小さいものでなくてはならない。すでに、第三世代放射光のビームラインに設置された全反射 X 線ミラーでも、旧来の機械研磨法で作ったものは反射ビーム内に表面形状に起因する干渉パターンが観察されている。SPring-8では、XFELの光学素子に向けて、大阪大学と協力して超平坦ミラーの開発と評価方法の確立が進められている。これらの途中経過に関して本誌に報告したが³²⁾、平面ミラー・非球面ミラーともに従来方法を凌駕した加工方法が確立し、また形状計測方法もこの数年間で格段に進歩している。一方で結晶光学素子では、シリコン単結晶が適正な表面加工を施すことによりコヒーレンスを保存する光学素子となることは、関連研究者の間でほぼ認められている。しかし、熱的性質の面やXFEL光との相互作用を考慮してより興味が持たれるダイヤモンド単結晶に関しては、X 線トポグラフが示す高い完全性にもかかわらず5~10マイクロラジアン程度のモザシティが残っていることが問題となっている。この原因は、バルク結晶に内在するものか、あるいは表面加工層に起因するもので様々な議論があり、結論が出るには至っていない³³⁾。

光学素子開発と平行して、ビーム診断用 X 線干渉計開発も進められている。27 m アンジュレータビームラインでの強度相関を利用した X 線干渉計測法の開発と応用に関して、本誌に矢橋たちによる報告³⁴⁾が掲載されているので、そちらを参照されたい。また、X 線干渉利用計測として、マイケルソン型干渉計を用いた X 線フーリエ変換分光法の開発³⁵⁾、プリズムを用いた、2 光束干渉計³⁶⁾とその微分干渉計測への応用³⁷⁾などが開発されている。一

方で、短パルス入射の場合の X 線動力学的回折現象の理論的側面が時間を含む高木・トーパン方程式に基づいて検討され、結晶による回折でコヒーレンスがどのように変換されるかが検討されている³⁸⁾。

XFEL 利用に向けての SPring-8 の取り組みの最後の項目として、コヒーレント X 線散乱ナノスコピイを紹介する。コヒーレント X 線散乱で測定できるのは散乱強度分布であり、他の散乱計測と同様に位相情報は失われる。しかしながら、入射 X 線がコヒーレントであれば、ある仮定のもとに散乱電場は電荷分布の3次元フーリエ変換に比例する量となるので、計測強度から振幅を計算し、何らかの方法で位相を回復することにより、散乱強度から実空間電荷分布に戻す逆問題を解くことが可能である。この方法で得られる実空間電荷分布の空間分解能は原理的に用いられる X 線の波長で制限されるため、短波長のコヒーレント X 線を用いることにより、原子レベル分解能の実空間像を再構成できる可能性がある。この方式の顕微法（マイクロスコピイ）の第一歩はブルックヘブンの NSLS で軟 X 線を用いて実現された³⁹⁾。この場合の空間分解能は、長波長軟 X 線を用いたために70 nm に留まっていたが、ナノスコピイと呼べるものである。この方法の開発を行った J. Miao はその後 SSRL に移り、LCLS での単一分子構造解析に向けての開発を続けているが、SPring-8での短波長 X 線での高空間コヒーレンスに着目し、SPring-8で硬 X 線領域でのコヒーレント X 線散乱ナノスコピイの開発研究を SSRL と理研が協力して進めることとなった。まず SiN 基板上に電子ビームリソグラフィで作った Ni パターンによるテスト実験を行い、2次元再構成では8 nm 程度の分解能が比較的簡単に得られること、埋もれたパターンの実空間像が得られること、3次元再構成でも50 nm 程度の分解能で実空間像が得られることを示し²³⁾、この方法がナノ材料評価に有効であることを実証した。その後、大腸菌試料の観察に応用され、構成元素が軽元素で散乱強度が十分ではないにもかかわらず、25 nm での2次元再構成像を得ることができた²⁴⁾。コヒーレント散乱像と再構成実空間像を Fig. 10 に示す。この測定は BL29XUL の標準アンジュレータを用いて行われたものであり、アンジュレータ光の中心のコヒーレント部分をピンホールで切り取って入射光を作っている。散乱強度が弱いために、図に示された散乱像を得るのに数千秒程度の積算を行っている。ピンホールを抜けてくる入射 X 線強度は 10^8 photons/sec 程度であり、積算時間が $\sim 10^3$ 秒程度であるので、XFEL で 10^{11} photons/pulse の入射強度が得られれば、同等な像が単一パルスで得られることになる。また、現在使用している検出器の量子効率率は60%程度であるので、検出器の高効率化によって再生像の画質および分解能の向上が見込まれる。入射強度が 10^{13} photons/pulse に達すれば、単一パルスで200~300 pm 分解能の再生像が得られることが期待でき、細胞内を原子分解能で観察す

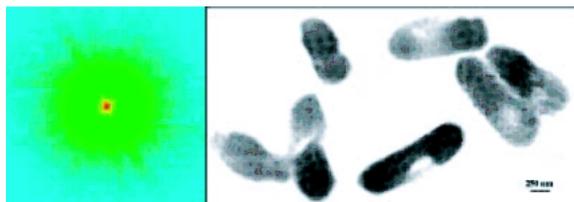


Figure 10. Coherent x-ray scattering pattern from E. Coli bacteria (left) and reconstructed real space image with 25 nm spatial resolution (right). Oversampling method was used for phase retrieval (Ref. 24).

ることが可能となる。またここでのパルス幅はフェムト秒領域に入るので、動いている試料のある瞬間をストロボ的に観察することが可能となる。しかしながら、大強度・短パルス X 線照射後に、試料がももとの形態を保っているとは考えにくく、同一細胞での時間変化を追いかけて一種のムービーを作ることは困難であろう。そのためには、異なる試料からの像から時間変化を再構成していく方法の開発が必要になると思われるが、細胞内で起こっている現象を原子レベルで画像化することは、細胞機能の分子レベルでの理解にむけての基盤的方法となり得るものである。

XFEL とはいってもたかが光源であり、現時点では考えもつかぬような新たな利用法が次々と出現することを期待して、この項を終わりにしたい。

4. おわりに

X 線領域の第三世代光源は、我が国 (SPring-8) において欧州 (ESRF) に遅れること 2 年、米国 (APS) には 1 年で利用可能となった。この遅れは短いようだがもたらされた結果は深刻であった。輝度に適合した放射光実験の主たるものはあらかじめその成果が刈り取られてしまったのである。我々が第四世代光源である XFEL の開発研究を進めることになった動機のひとつは以上の経験から得られた教訓である。欧米の 2 計画 (LCLS と TESLA) が先行している状況での開発研究であるが、決して後追いではなく我々が固有に持っている技術 (真空封止アンジュレータと C バンド加速管) を基にした新しいコンセプト (コンパクトとローコスト) で XFEL の早期実現を目指している。このコンセプトは極めて困難な開発テーマ (極低エミッタンス電子銃等) を我々に与えたが、担当者の不断の努力で克服されるであろう。本稿では第四世代の重要性を強調するあまり、第三世代についてはその欠点のみを指摘したが、光源の安定性に関して他の追従を許さないという長所と、多数のビームラインにおいての同時利用が可能という高い経済性を有している。したがって、両世代の光源は互いにその欠点を補いつつ共存していくものと思われる。最後に全国の放射光および加速器分野の方々にご支援・ご協力をお願いしてこの稿を終える。

参考文献

- 1) 北村英男: 光学第13巻, 2 (1984).
- 2) T. Hara, M. Yabashi, T. Tanaka, T. Bizen, S. Goto, X. M. Marechal, T. Seike, K. Tamasaku, T. Ishikawa and H. Kitamura: *Review of Scientific Instruments* **73**, 1125 (2002).
- 3) Kwang-Je Kim: *Physical Rev. Lett.* **57**, 1871 (1986).
- 4) T. Nakazato et al.: *Physical Rev. Lett.* **63**, 1245 (1989).
- 5) S. M. Gruner et al.: *Review of Scientific Instruments* **73**, 1402 (2002).
- 6) J. Arthur: *Review of Scientific Instruments* **73**, 1393 (2002).
- 7) A. Wagner: *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* **79**, 643 (1999).
- 8) H. Kitamura: *Journal of Synchrotron Radiation* **7**, 121 (2000).
- 9) T. Shintake et al.: EPAC96, Fifth European Particle Accelerator Conference. Institute of Physics Publishing, vol. 1, 792 (1997).
- 10) T. Shintake, H. Matsumoto, T. Ishikawa and H. Kitamura: *Proceedings of SPIE* **4500**, 12 (2001).
- 11) 例えば理科年表参照.
- 12) T. Bizen, T. Tanaka, Y. Asano, D. E. Kim, J. B. Bak, H. S. Lee and H. Kitamura: *Nucl. Instrum. & Meth.* **A467-468**, 185 (2001).
- 13) S. Yamamoto, T. Shioya, M. Hara, H. Kitamura, X. W. Zhang, T. Mochizuki, H. Sugiyama and M. Ando: *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 400 (1992).
- 14) T. Hara, T. Tanaka, T. Tanabe, X. M. Marechal, S. Okada and H. Kitamura: *J. Synchrotron Rad.* **5**, 403 (1998).
- 15) Proceedings of X-ray Science Workshop on an Energy Recovery Linac source of synchrotron radiation (2000); <http://erl.chess.cornell.edu/papers/X-rayScienceWorkshopDec2000.htm>
- 16) 例えば, E. W.-G. Diau, J. L. Herek, Z. H. Kim and A. H. Zewail: *Science* **279**, 847 (1998).
- 17) M. Born and E. Wolf: 'Principles of Optics', Chapter 10, 7th Edition, Cambridge University Press, Cambridge (1999).
- 18) T. Young: *Phil. Trans.* **91** (1801) 23.
- 19) G. K. Shenoy and J. Stohr eds.: 'LCLS The first experiments', SLAC, Stanford (2000).
- 20) G. Materlik and Th. Tschentscher eds.: 'TESLA technical Design Report, PartV, The X-Ray Free Electron Laser', DESY, Hamburg (2001).
- 21) 例えば, C. A. Larabell, D. Yager and W. Meyer-Ilse: *AIP Conf. Proc.* **507**, 107 (2000).
- 22) S. Bohic, A. Simionovici, A. Snigirev, R. Ortega, G. Deves, D. Heymann and C. G. Schroer: *Appl. Phys. Lett.* **78**, 3544 (2001).
- 23) J. Miao, T. Ishikawa, B. Johnson, E. H. Anderson, B. Lai and K. Hodgson: *Phys. Rev. Lett.* **89**, 088303 (2002).
- 24) J. Miao, K. O. Hodgson, T. Ishikawa, C. A. Larabell, M. A. LeGros and Y. Nishino: *Proc. Nat. Acad. Sci.* **100**, 110 (2003).
- 25) T. Ishikawa, K. Tamasaku, M. Yabashi, S. Goto, Y. Tanaka, H. Yamazaki, K. Takeshita, H. Kimura, H. Ohashi, T. Matsushita and T. Ohata: *SPIE Proceedings* **4145**, 1 (2001).
- 26) K. Tamasaku, Y. Tanaka, M. Yabashi, H. Yamazaki, N. Kawamura, M. Suzuki and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods* **A467-468**, 686 (2001).
- 27) M. Yabashi, T. Mochizuki, H. Yamazaki, S. Goto, H. Ohashi, K. Takeshita, T. Ohata, T. Matsushita, K. Tamasaku, Y. Tanaka and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods* **A467-468**, 678 (2001).
- 28) M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: *Phys. Rev. Lett.* **87**, 140801 (2001).
- 29) K. Tamasaku, M. Yabashi and T. Ishikawa: *Phys. Rev. Lett.*

- 88, 044801 (2002).
- 30) H. Yamazaki and T. Ishikawa: *J. Appl. Crystallogr.* in press.
- 31) Y. Tanaka, T. Hara, H. Yamazaki, H. Kitamura and T. Ishikawa: *J. Synchrotron Rad.* **9**, 96 (2002).
- 32) 石川哲也, 矢橋牧名, 玉作賢治, スポロフ アレクセイ, 山内和人, 山村和也, 三村秀和, 斎藤 彰, 森 勇藏: 放射光 **15**, 296 (2002).
- 33) J. Hozowska, A. K. Freund, J. P. Sellschop, C. Detlefs, R. C. Burns, M. Rebak, J. O. Hansen, D. Welch, C. E. Hall and T. Ishikawa: *SPIE Proceedings* **4501**, 106 (2001).
- 34) 矢橋牧名, 玉作賢治, 石川哲也: 放射光 **16**, 13 (2003).
- 35) K. Tamasaku, M. Yabashi and T. Ishikawa: submitted to *Phys. Rev. Lett.*
- 36) Y. Suzuki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, L1019 (2002).
- 37) Y. Kohmura, H. Takano, A. Takeuchi, Y. Suzuki and T. Ishikawa: *J. Appl. Phys.* in press.
- 38) H. Yamazaki and T. Ishikawa: *J. Appl. Crystallogr.* **35**, 314 (2002).
- 39) J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz and D. Sayre: *Nature* **400**, 342 (1999).