SPring-8 XFEL (SACLA) の光源特性と 利用実験に向けた研究開発[†]

登野健介¹・矢橋牧名²・初井宇記²・田中 均²・石川哲也²

¹高輝度光科学研究センター ☎ 679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1 丁目 1-1

²理化学研究所 播磨研究所 ☎ 679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1 丁目 1-1

(2011 年 2 月 14 日受付 ; 2011 年 3 月 29 日掲載決定)

Radiation Properties of SPring-8 XFEL (SACLA) and Developments in User-experiment Facilities

Kensuke TONO¹, Makina YABASHI², Takaki HATSUI²,
Hitoshi TANAKA² and Tetsuya ISHIKAWA²

¹JASRI/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

²RIKEN/SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148

(Received February 14, 2011 ; Accepted March 29, 2011)

An X-ray free electron laser (XFEL) has been constructed at the SPring-8 site and will be open for users at the beginning of 2012. Fundamental experimental facilities for user experiments have been developed ; for example, photon beamline, beam diagnostics systems, two dimensional X-ray detectors, and a femtosecond laser system which is synchronized to XFEL pulses. Extensive researches using SPring-8 and a prototype free electron laser (SCSS test accelerator) have been performed for developing experimental techniques for XFEL applications.

KEYWORDS : X-ray free electron laser, SPring-8, SASE

1. は じ め に

X 線を利用した分析法は物質・生命科学全般において必要不可欠の技術となっており、X 線源の進化によって科学の幅広い分野の発展が促されてきた。X 線源の飛躍的な進化としてあげられるのが、シンクロトロン放射光源の登場と発展である。高エネルギー加速器中の電子や陽電子が出すシンクロトロン放射光（以下、単に「放射光」と記す）は 1940 年代に初めて観測され、1960 年代から実験用光源として用いる動きが広がった^{1,2)}。それ以前の X 線管に比べて圧倒的に高い強度、広い波長範囲、パルス性等の優れた特徴を有し、1970 年代からは放射光利用専用の加速器が建設されるようになった。我

国においては、高エネルギー物理学研究所（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 1982 年に完成した³⁾。その後、アンジュレータやウィグラーと呼ばれる挿入光源を蓄積リングの直線部に設置し、高輝度 X 線を発生させる技術が開発された。現在では挿入光源利用に最適化された加速器設計を行うことが主流となっており、第三世代放射光源と呼ばれている。日本では 1997 年に SPring-8 が完成し、ヨーロッパの ESRF、アメリカの APS とともに代表的な第三世代放射光施設となっている⁴⁾。

2000 年代に入ると、X 線領域の自由電子レーザー（free electron laser, FEL）の建設が米国とヨーロッパで開始された^{5,6)}。米国では、スタンフォード国立加速器研究所（SLAC）にて Linac Coherent Light Source（LCLS）と呼ばれる X 線 FEL（XFEL）施設が世界に先駆けて建設され、2009 年春、ついに波長 1.5 Å の硬 X 線 FEL の

[†] 第 30 回表面科学学術講演会(2010 年 11 月 4 日～11 月 6 日)にて発表

E-mail : tono@spring8.or.jp

発振に成功した⁷⁾。そして2009年秋には軟X線FELの供用が始まり、硬X線領域での利用も間もなく開始されようとしている。ドイツでは、ドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY)にてEuropean XFELの建設が進められており、利用開始予定は2014年以降とされている。

わが国では理化学研究所播磨研究所において、真空封止型アンジュレータを用いた小型のXFELを開発する計画が2001年度に策定され、SPRING-8 Compact SASE Source (SCSS) プロジェクトと名付けられた。そして2005年度には原理実証のために電子加速エネルギー250 MeVのプロトタイプ機(SCSS試験加速器)を製作することになった。並行してXFELの設計が進められるなか、2006年度に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(以下、「推進本部」と記す)が組織され、2010年度までの5年計画で8 GeV線型加速器を備えたXFEL施設の建設が始まった。2010年度末の現在、建設はほぼ完了し、2011年度内の供用開始に向けて調整運転が行われている。

XFELの主な特徴としては、次の3点があげられる。(1) 従来光源を9桁も上回る高い輝度を有する。(2) 空間的コヒーレンスが完全に近い。(3) 数十フェムト秒の超短時間パルスである。以上のような特性を利用すれば、周期的秩序のない試料に対してもオングストロームオーダーの空間分解能で構造が求められると期待されている。しかも、原理的にはXFELのパルス幅程度の時間分解能による測定が可能である。このようにXFELのパフォーマンスを最大限に引き出して利用するためには、ビームライン、実験ステーション、データ収集システム、X線検出器など利用実験の基盤となる設備が肝要となる。間近に迫った供用開始に備えて、利用基盤設備の開発・整備が大詰めを迎えている。また、個別の利用研究テーマに沿った実験技術の開発もSPRING-8キャンパスを中心に進められてきている。本稿ではSPRING-8 XFELの利用に関する情報を提供することを主眼とし、光源性能と利用実験にむけた研究開発の紹介を行う。なお、SPRING-8 XFELは、SACLA (SPRING-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) と名付けられた。

2. X線自由電子レーザー

FELは、アンジュレータ内を通過する電子ビームに光の波長間隔の周期的な密度変調を生成させ、発達した放射場(レーザー場)との相乗作用で、コヒーレントな電磁波を放射させるものである。この原理は既に1970年代に提案されており⁸⁾、波長の制約がないコヒーレント光源として開発が進められた。初期のFELは、アンジュレータの両側に高反射率ミラーを置くことによって

共振器を構成し、その中で光と電子を相互作用させて電子ビームの密度変調を促すものであった(光共振器型)。しかしながら、X線領域には高反射率ミラーが存在しないため、他の方法によってXFELを実現しなければならない。そのひとつとして主流となっているのが、共振器を用いずに長いアンジュレータを利用する自己増幅自発放射(Self-Amplified Spontaneous Emission, SASE)型と呼ばれるものである^{9,10)}。前述のように、この方式のXFELは既にLCLSによって実現されている。

SASE型XFELの発生原理は以下のとおりである。アンジュレータの交番磁場によって電子ビームが蛇行を繰り返す際、自分自身の出すアンジュレータ放射(レーザーの種)のボンデラモーティブポテンシャルに捕捉され、進行方向に沿ってエネルギー変調を生じる。このエネルギー変調は電子の密度変調へと変換され、多数回の蛇行を経て密度変調は徐々に強調される。結果として、放射場のエネルギーも指数関数的に増大し、形成された密度変調と発達した放射場(レーザー場)とのエネルギー交換により、シングルパスでレーザー出力が飽和に達する。SASE型では電子ビームの密度揺らぎ(ノイズ)を源とするため、光共振器を用いる一般的なレーザーのようなシングルモードの出力を得ることは難しく、マルチモード発振となる。

一方、外部のレーザー等により電子ビーム密度の変調形成を制御する方式はシード型と呼ばれる。シングルモードの外部レーザーを利用して密度変調を促すことにより、SASE型のように多数のモードが発生せず、シングルモードとなる利点がある。ただし、現状ではX線領域のシード化のための技術が確立していない。このため、SPRING-8のXFEL計画では、第一段階としてSASE型XFELの安定運用を成し遂げ、次の段階でシード型XFELの確立を目指す。

SPRING-8のXFELは、SCSSの設計思想に基づいた小型で安定なシステムとなっている¹¹⁾。真空封止短周期アンジュレータを採用することにより、8 GeVの電子ビームエネルギー(欧米のXFELの約1/2-1/3)で波長1 Å以下のX線レーザーを供給することが可能である。XFEL施設の模式図をFig. 1に示す。ビームラインは最

Fig. 1. (color online). Schematic drawing of the XFEL facility at the SPRING-8 site.

Table 1. Radiation parameters of SPring-8 XFEL at an electron-beam energy of 8 GeV and an undulator deflection parameter (K) of 2.2.¹²⁾

Radiation wavelength (nm)	0.13
Photon energy (keV)	9.9
Bandwidth	$9.2\text{E}-4$
Source size (μm , rms)	33
Angular divergence (μrad , rms)	0.73
Beam size @ sample position (μm , rms)	80
Peak power (GW)	29
Pulse energy (mJ/pls)	0.78
Photons per pulse (phs/pls)	$5.0\text{E}+11$
Pulse width (fs, FWHM)	30
Maximum repetition rate (Hz)	60
Power ratio of higher-order harmonic to the fundamental	$1.3\text{E}-4$ $2.8\text{E}-3$

Fig. 2. (color online). (a) Time and (b) energy spectra of the XFEL radiation at $K=2.2$.¹²⁾

大5本まで設置可能で、運転当初は硬X線用 (BL3) と広帯域軟X線用 (BL1) の2本を準備する。

SPring-8 XFELの光源性能をTable 1に示す¹²⁾。表のパラメーターは、シミュレーションコードSIMPLEX¹³⁾を用い、アンジュレータの偏向定数(K 値)を2.2として求めた。この K 値は、アンジュレータの磁場強度を表す無次元の数で、電子エネルギー、磁場周期長とともにアンジュレータ放射の基本光子エネルギーを決定する主要なパラメーターである。SPring-8 XFELのアンジュレータでは、磁極間の距離を変えることで K 値を連続的に変化させることが可能である。このことはX線の光子エネルギーを連続的に変化させられることを意味しており、SPring-8 XFELの大きな特徴の一つとなっている。例えば電子エネルギー8 GeVの場合に K 値を2.2から1.1まで変化させると、光子エネルギーを10から20 keV超まで走査することができる。電子エネルギー

を下げれば、より低いエネルギーの光を供給することも可能である。

Fig. 2に時間スペクトルとエネルギースペクトルを示す。約30 fs幅のパルスの中に多数のスパイク状の微細構造が見てとれる。これらのスパイクは自発光のショットノイズを反映しており、SASE型FELの宿命として避けられないものである。しかも、このようなスパイク状の構造がパルスごとに変動してしまうため、XFELを利用するには注意する必要がある。一般的なレーザーのようにシングルモードの光を利用するには、シード型XFELの実現を待たなければならない。X線領域でのシード化技術を早急に確立するため、SCSS試験加速器を使った研究開発が既に開始されている¹⁴⁾。

3. XFEL利用のための基盤設備

間近に迫ったXFELの供用開始に向けて、基盤的な利用実験設備が推進本部の利用グループによって整備されている。ビームライン光学系、実験ステーション、データ収集システムなど、既存の放射光施設で蓄積された技術を活用しつつ、XFELの光特性に適合するように開発が加えられている。以下に、主要な設備について紹介する。

3.1 硬X線ビームライン

ビームラインは、利用者が使いやすいかたちでXFELの光を届けるためのシステムであり、フロントエンド(加速器セクションとの取合い部分)、光学・輸送系、エンドステーションから構成される。フロントエンドは光源収納部の最下流に設置され、コリメーターにより不要な軸外放射を除去する役目を果たす。光学・輸送系は放射線遮蔽ハッチ(光学ハッチ)に納められ、放射線安全の担保、加速器側との真空接続といった役割に加えて以下の重要な機能を果たす。

3.1.1 光特性の加工(特に、光軸上に混入するガンマ線の除去)

光学・輸送系の最も重要な役目は、X線ビームと同軸上についてきたガンマ線を分離し、X線のみを実験ステーションに導くことである。Fig. 3に硬X線ビームラインBL3の構成を示す。主要な光学機器として二結晶分光器(Si 111, バンド幅0.01%)と全反射平面ミラー(2枚1組)が設けられており、目的に応じてどちらかを利用することができる。二結晶分光器は精密に波長の定まった光を提供するが、分光された後では光量が1桁程度落ちてしまう。また、3次高調波などの高次光の混入にも注意が必要である。平面ミラーは、全反射臨界エネルギーより低エネルギーのX線に対して高い反射率を示すため、大強度のビームが必要な場合に使用する。なお、二結晶分光器と平面ミラーのどちらを使用する場合

Fig. 3. (color online). Hard X-ray beamline (BL-3) for SPring-8 XFEL.

でも、出射ビームの位置は一定になるように光学系が設計されている。

3.1.2 光特性の診断

光強度、ビームプロファイル、スペクトル、パルス時間幅などの光特性を診断することも光学・輸送系の重要な役割である。従来の放射光ビームラインとの違いが最も際立つ部分が診断機器であるといえよう。

SASE 型 FEL では強度やスペクトルなどの光特性がショットごとに変動してしまう。したがって、利用に際しては、X 線パルスを試料へ照射すると同時に特性の診断を行い、実験結果の解析に使用しなければならない。このため、XFEL の診断においては非破壊測定が基本となる。すなわち、入射パルスのわずかな部分のみを診断に用い、残りの大部分は利用実験に供する必要がある。例えば BL3 の位置・強度モニターにおいては、厚さ約 13 μm の CVD ダイア薄膜を光軸上に挿入し、薄膜から散乱された X 線を観測することでビーム位置と強度を求める¹⁵⁾。波長 1 Å 程度の場合、ダイア薄膜によって散乱・吸収される X 線は入射光量の 1% 以下であり、残りの 99% 以上は透過して下流の診断機器や実験装置に送られる。プロファイルモニターにおいても同様にダイア薄膜を利用し、膜上に現れる蛍光像を観察する。

最も診断の難しい特性のひとつがパルス時間幅であり、現状ではこれといった決め手がない。原理的にはオートコリレータなどの確立された手法があるため、現在、技術的に実現するための開発が行われている。例えば、オートコリレータに欠かせない光学素子である X 線ビームスプリッターが、大阪大学や海外の XFEL 施設と協力して開発されている。

さて、上記のような機能を十分に発揮させるためには、光の特性に適合した光学素子を使用しなければならない。高いピークパワーを誇る XFEL に適用される光学素子には、特に厳しい条件が課せられる。第一の条件として、入射ビームのコヒーレンスを損なわないことが求められる。二番目の条件は、XFEL の照射によってダメ

ージを受けないことである。全反射ミラー、ベリリウム窓、蛍光スクリーンのような基本的な素子については SPring-8 の 1 km ビームラインを用いて研究開発が進められてきており、既に条件をクリアするものが得られている^{12, 16, 17)}。

3.2 実験ステーション

硬 X 線ビームラインを利用した実験では、放射線遮蔽ハッチ（実験ハッチ）の中で XFEL の照射が行われる。BL3 については光軸に沿って連結された 4 個の実験ハッチ（EH1-EH4）が設けられ、実験の用途によって使い分けられる。さらに、XFEL と SPring-8 の両方のビームを導入することができる 5 番目の実験ハッチも建設されている。

実験ステーションには、ユーザーの利便性を考えて汎用性の高い機器があらかじめ整備されている。例えばパルスモーター制御システム、光軸確認用可視光レーザー、光パルスセクター、集光システムなどが用意されており、利用実験に供される。このような汎用機器についても、多くの場合、XFEL の特性にあったものを開発する必要がある。例えば集光システムは、大阪大学・山内教授のグループが中心となって開発した精密加工法、Elastic Emission Machining 法を適用した超平坦ミラーを利用する¹⁷⁾。これにより、XFEL のコヒーレンスを損なうことなく 1 μm 程度に集光されたビームを供給できる。また、次節以降で紹介するフェムト秒レーザーシステム、データ収集システム、2 次元 X 線検出器なども整備されている。

3.3 同期フェムト秒レーザーシステム

XFEL の特徴の一つである超短時間パルス性を活用した測定手法として、ポンプ・プローブ法による時分割計測があげられる。フェムト秒の光学パルスレーザーと XFEL を組み合わせることにより、例えば光励起状態の情報を X 線回折、X 線吸収分光法などで調べることができる。

XFEL のエンドステーションには光学レーザー用のク

リンプースが設置されており、フェムト秒レーザーシステムが収容されている。このシステムはチタンサファイアレーザーをベースとしたもので、モード同期オシレータとチャープパルス増幅器により数 mJ の出力が得られる。さらに、光パラメトリック増幅器を用いることにより近赤外～紫外領域の光を供給することも可能である。

3.4 データ収集システム

XFEL を利用する実験では、たった一回のパルス照射であっても試料が深刻な損傷を受けてしまう。このため、従来の放射光実験のように秒単位、場合によっては数時間もの積算を行って 1 個の測定データとする実験スタイルとは大きく異なってくるであろう。基本的なスタイルとしては、単一パルスで有用なデータを取得し、次のパルスは新しい試料（あるいは試料中の新鮮な部分）に照射するといったものが考えられる。

理想的には、繰り返し最高 60 Hz の XFEL パルスを無駄にすることなく、毎秒 60 回で測定とデータの記録を行うシステムが構築されるべきである。しかも、二次元イメージングのような実験では毎秒 5 ギガビット以上という膨大なデータを処理する必要がある。このような場合にも対応できるデータ処理システムが、推進本部のデータ処理系開発チームを中心に整備されている。

3.5 二次元 X 線検出器

XFEL の利用実験では二次元の画像データを取得する場合が多く、二次元検出器が必要となる。光の特性を考慮すると、検出器には以下のような要件が求められる。

3.5.1 高速撮像

XFEL の利用実験においては、ショットごとのデータを漏れなく記録できなければならない。XFEL は最高 60 Hz で運転されるため、検出器には 60 fps (frame per second) で高速撮像する性能が求められる。

3.5.2 大面積

例えば XFEL の利用によって大きな成果が期待できる二次元イメージングにおいては、広角領域まで回折パターンが取得できるようにセンサー部分の面積を大きくする必要がある。

3.5.3 1 光子レベルの検出感度

広角領域まで回折パターンを計測する場合には 1 光子レベルの検出感度が求められる。当然のことながら、ここまでの感度を実現するにはノイズを極めて低く抑えなければならない。

3.5.4 高い最大許容信号強度 (Peak signal)

一方で、入射光軸に近い低角領域には多数の光子が到達するため、広いダイナミックレンジが求められる。また、高い X 線照射耐性が必要である。

以上のような要請を満たす multi-port CCD (MPCCD) 検出器が、推進本部のデータ処理系開発チームによって開発されており、XFEL の供用開始時には利用可能となる。仕様の詳細は文献にゆずることとする^{12, 18)}。

4. XFEL 利用研究のための実験技術開発

前節で紹介した基盤機器の整備だけでなく、個別の研究テーマに即した実験技術の開発も行われている。海外の施設に遅れを取らないよう、XFEL の運用開始後すみやかに利用研究を実施すべく準備を進めなければならない。日本の場合は SPring-8 キャンパス内に第三世代光源と SASE 型 FEL (SCSS 試験加速器) が同居しており、利用研究に向けた開発において有利な立場にあると言える。一例として、SPring-8 キャンパスにおいて実施されたコヒーレント回折イメージング (Coherent Diffraction Imaging ; CDI) の実験について紹介する。

試料に単色平面波のコヒーレント光を照射した場合、遠方の像空間 (逆空間) における複素散乱振幅 $F(\mathbf{k})$ は以下の式で表すことができる。

$$F(\mathbf{k}) \propto \int \rho(\mathbf{r}) \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (1)$$

式中の $\rho(\mathbf{r})$ は試料の電子密度分布である。したがって、 $F(\mathbf{k})$ を測定すれば、フーリエ変換によって構造 (電子密度分布) を求めることができる。しかし、実際に計測されるのは振幅 $F(\mathbf{k})$ ではなく強度 $|F(\mathbf{k})|^2$ であり、位相情報が含まれていない (位相問題)。

位相問題を解決するために、試料の周辺領域にまで観察領域を拡大させ、逆空間におけるサンプリングレートを増大させる方法が提案されている (オーバーサンプリング法)。これにより、 $\rho(\mathbf{r})$ を再構成するために必要な位相情報が回折パターンに含まれ、Fineup の HIO (hybrid input-output) 法¹⁹⁾などの反復的アルゴリズムを適用して実空間像を再構成することができる。

SPring-8 においては、主に BL29XU にて硬 X 線領域の CDI 実験が行われている。Fig. 4 (a) は、西野らに

Fig. 4. (color online). (a) Diffraction pattern of human chromosome. (b) Reconstructed 3D image.

よって測定されたヒト染色体の回折パターンである²⁰⁾。このデータにHIOアルゴリズムを適用すると試料の平面像が得られる。さらに、試料を回転させながら回折パターンを測定すれば、三次元像を得ることもできる(Fig. 4 (b))。X線が得意とする内部構造の観察にも成功しており、CDIの有用性を端的に示す研究例である。

上記のような従来光源を用いた実験とXFELの場合の決定的な違いは、 10^{11} - 10^{12} photons/pulse という光子密度の高い単発のパルス光を用いて回折パターンを取得する点である。そこで、極端紫外FEL (SCSS 試験加速器) を利用した単一パルスイメージングの研究開発が進められている。SCSS 試験加速器もSASE型FELであり、波長の違いを除けばXFELと同様の光特性を示す。西野らはHERALDO (holography with extended reference by autocorrelation linear differential operation) と呼ばれるホログラフィーの一種を用いて、単一パルス照射で試料のイメージを取得することに成功した²¹⁾。また、Songらのグループも単一パルスイメージングに成功している²²⁾。これらの測定では空間分解能が極端紫外光の波長によって制限されてしまうが、XFELの適用によってオングストロームオーダーの解像度を期待することができる。

5. おわりに

SPRING-8が完成してから13年以上が経過し、放射光X線を利用した実験技術は成熟の域に達してきた。ただ、この間にもたらされたものは、多くの場合、計測の精密化・高分解能化・高速化であった。すなわち、これまでの光源の進化は、本質的な部分での進歩というよりは量的なものであり、それに伴うサイエンスの発展も予測可能な範囲にとどまっていた。

これに対してXFELは、従来光源と質的に全く異なっており、サイエンスに与える影響を単なる外挿で考えることはできない。米国において既に利用研究が始まっている現在でもなお、XFELによってもたらされるサイエンスの可能性は未知数のままである。現時点では予測困難なことも多いが、今まさに未踏の領域が拓けようとしている。

謝 辞

本稿の執筆にあたって、X線自由電子レーザー計画合同推進本部(理化学研究所/高輝度光科学研究センター)より資料を提供していただいた。また、北海道大学の西野教授からも資料の提供を受けた。この場を借りて感謝の意を表したい。

文 献

- 1) See, for example, H. Winick (ed): "Synchrotron Radiation Research" (Springer-Verlag, Berlin, 1980).
- 2) J.P. Blewett: J. Synchrotron Rad. **5**, 135 (1998).
- 3) K. Kohra and T. Sasaki: Nucl. Instrum. Methods **208**, 23 (1983).
- 4) H. Kamitsubo: J. Synchrotron Rad. **5**, 162 (1998).
- 5) J. Arthur et al.: Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report (Stanford, 2002, <http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacreports/slac-r-593.html>)
- 6) M. Altarelli et al. (Eds): XFEL: "The European X-Ray Free-Electron Laser, Technical Design Report" (DESY Hamburg, 2006, <http://xfel.desy.de/tdr/tdr/>)
- 7) P. Emma et al.: Nature Photonics **4**, 641 (2010).
- 8) J.M.J. Madey: J. Appl. Phys. **42**, 1906 (1971).
- 9) R. Bonifacio, C. Pellegrini and L.M. Narducci: Optics Commun. **50**, 373 (1984).
- 10) K.-J. Kim: Nucl. Instrum. Methods A **250**, 396 (1986).
- 11) T. Tanaka and T. Shintake (Eds.): SCSS X-FEL Conceptual Design Rep. (RIKEN Harima Inst., 2005).
- 12) M. Yabashi and T. Ishikawa (Eds): XFEL/SPRING-8 Beamline Technical Design Report (RIKEN, 2010).
- 13) T. Tanaka: Proc. FEL **2004**, 435 (2004).
- 14) T. Togashi et al.: Optics Express **19**, 317 (2011).
- 15) K. Tono, T. Kudo, M. Yabashi, T. Tachibana, Y. Feng, D. Fritz and J. Hastings: Rev. Sci. Instrum. **82**, 023108 (2011).
- 16) S. Goto, S. Takahashi, T. Kudo, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino and T. Ishikawa: Proc. SPIE **6705**, 67050H-6 (2007).
- 17) H. Mimura et al.: Rev. Sci. Instrum. **79**, 083104 (2008).
- 18) 例えば、矢橋牧名, 他: 放射光 **22**, 56 (2009).
- 19) J.R. Fienup: Appl. Opt. **21**, 2758 (1982).
- 20) Y. Nishino, Y. Takahashi, N. Imamoto, T. Ishikawa and K. Maeshima: Phys. Rev. Lett. **102**, 018101 (2009).
- 21) Y. Nishino et al.: Appl. Phys. Express **3**, 102701 (2010).
- 22) J. Park, Y. Kohmura and C.-Y. Song: 放射光 **23**, 325 (2010).