

# X線ナノ集光の最前線とX線補償光学

山内和人

## Progress in X-Ray Nanofocusing Based on Compensation Optics

Kazuto YAMAUCHI

Mirror-based optics to focus synchrotron radiation X-rays down to single nanometer sizes are discussed. Adaptive optical devices play indispensable roles to satisfy the Rayleigh's quarter wavelength criterion in an ultimate focusing of hard X-rays. The shape accuracy of focusing mirror for a single nanometer focal spot size is needed to be unprecedentedly high such as less than 1nm PV to sufficiently reduce the wavefront errors of the reflected X-rays. An at-wavelength in-situ wavefront analysis method and a phase compensator mirror which is deformable by piezo-electric actuators were developed for a compensation optical system, which achieved focal spot size of 7 nm.

**Key words:** X-ray focusing, mirror, phase compensation, at-wavelength interferometry, deformable mirror

1895年にRöntgenによりその存在が発見されて以来、X線は基礎科学、医学、工学など幅広い分野において重要な役割を果たしてきた。特に物質科学、生命科学の分野においてはその高い物質透過性や結晶・原子との間の相互作用が有効に利用され、他の方法では代替不可能な分析ツールとして今日でも欠くことのできない存在であると認識されている。特に近年では1990年代に運用が始まったSPRING-8等の第三代放射光源の高輝度・低エミッタンス性を利用したさまざまな先端的分析技術の開拓が進み、現在ではX線自由電子レーザーの実現によりX線利用技術分野のさらなる進展が期待されている。高輝度X線源は、これを集光した際の集光点での光子密度の増大に有利であり、特に走査型X線顕微鏡において、高い空間分解能とスループットを両立できる光源である。このため、2000年以降、光学素子の性能を上げることによる集光サイズ微小化の競争が激化しており、ゾンプレートやレンズ、ミラーなどのさまざまなX線光学素子によって100 nm以下の集光サイズが実現された<sup>1-11)</sup>。これらの光学素子の中で、ミラーは、集光効率や大きなワーキングディスタンスの確保、色収差の少なさなどにおいて、他の光学素子を大きく凌ぐ優位性を有している。われわれは、独自の超精密加工・計測

技術を発展させることによって<sup>12-18)</sup>、2007年に全反射ミラー光学系においてsub-30 nmサイズのビームを回折限界のもとに実現している<sup>13)</sup>。回折限界での集光は、ミラー上の各点で反射したX線が、集光点において強め合いの干渉をする必要があり、レイリーの指針によれば、反射X線の波面誤差が波長の4分の1以下である必要がある<sup>19)</sup>。波長に対する比率で表した波面誤差 $\epsilon$ は、X線の波長を $\lambda$ 、ミラーの形状誤差のPV (peak-to-valley)を $d$ 、ミラーへのX線の斜入射角を $\theta$ とすると、

$$\epsilon = \frac{2d \sin \theta}{\lambda} \quad (1)$$

で与えられる。求められる形状精度 $d$ は $\theta$ にほぼ反比例し、 $\theta$ はミラーの開口数にほぼ比例して大きくなる。今日、集光はすでに回折限界の条件で達成されており、この条件での集光径の微小化には、ミラーの開口数を大きくする以外に方法がない。このとき、開口数に応じてミラーの曲率が大きくなり、これに伴う斜入射角の増大により、目標とする集光径にほぼ比例するように形状誤差を低減する必要がある。しかしながら、いかにミラーの作製技術の高度化を推し進めたとしても、事前にオフラインで性能を保証することはすでに限界に達している。sub-30 nm集光に

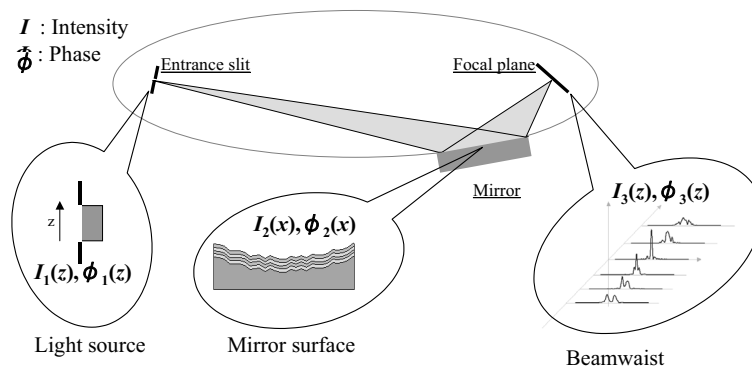


図1 ミラー性能の at-wavelength 評価の概念図。計測可能な強度プロファイル  $I_2$  と  $I_3$  から、ミラー上の位相  $\phi_2$  を位相回復アルゴリズムを用いて算出する。ここでは、ミラー長手方向に沿って  $x$  座標を、光軸に垂直なビームの収束発散の面内に  $z$  座標を取っている。

において、ミラーの形状誤差の許容値は約 PV 3 nm であり、さらなる集光径の微小化には新たなブレークスルーが必要であることは明らかである。

われわれは、これを克服することができる技術として、補償光学システムの導入を提案し、その可能性を実証してきた。ここでは、本システムの基幹となるミラー精度の at-wavelength その場計測について述べ、その後、波面誤差補正光学系を備えた sub-10 nm 集光光学系について述べる。

## 1. 光学系波面誤差の at-wavelength 評価

### 1.1 位相回復法による波面計測

集光ミラーを反射した X 線によって形成される集光点の強度プロファイルの完全さは、十分にサイズの小さい光源を想定すると、ミラーでの反射の際に導入される波面誤差のみによって決定される。SPring-8 等の第三世代放射光施設の高輝度 X 線源では、光源サイズが十分に小さく、特に垂直方向においてはこの条件をほぼ満足することができる。水平方向においては、蓄積リング内の電子の広がりから、光源サイズが十分に小さいとはいえないが、開口の小さいスリットを挿入することにより、この条件を満たすことができる。このようなビームラインを想定して、われわれが提案した波面誤差の at-wavelength 計測の概念図を図 1 に示す。われわれは、集光点の X 線の強度プロファイル  $I_3$  を計測することができ、また、上記のように十分に小さい光源である場合には、ミラー上の X 線強度プロファイル  $I_2$  を計算によって正確に求めることができる。この 2 つの強度プロファイルを知れば、複素振幅波動場としての未知数は、ミラーでの反射直後の位相  $\phi_2$  と集光点での位相  $\phi_3$  であり、これらはさまざまな位相回復アルゴリズムを利用することによって回復することが可能である<sup>20-24</sup>。そして、

$\phi_2$  を知ることができれば、これは式 (1) に従って、直接ミラーの形状誤差に対応している。すなわち、集光光学系の at-wavelength 波面計測は、集光点での強度プロファイルから位相を回復する問題に帰着できる<sup>20-24</sup>。

集光光学系では、収束するビームの集光点を中心とする円弧上での複素振幅波動場は、円弧が集光点から十分離れている場合、そのフーリエ変換が集光面上の複素振幅波動場と対応する。位相の回復の手順は、以下ようになる。初期条件として、理想形状のミラーを想定してミラー直近の円弧上の複素振幅波動場を仮定する。これをフーリエ変換することによって集光点での複素振幅波動場を求め、位相はそのままにして、振幅を実測の強度プロファイルによって修正する。このようにして得られた集光点での複素振幅波動場を逆フーリエ変換することによって、ミラー直近の円弧上の複素振幅波動場を再度計算することができ、ここでも位相はそのままにして、振幅のみを十分に小さい光源を仮定した際に得られる円弧上の振幅に置き換える。この計算を繰り返し、実測値である集光点での強度プロファイルを正しく再現する値に位相が収束したとき、これを  $\phi_2$  とし、ミラーの形状誤差に換算することによって、ミラーの at-wavelength 評価が完了する。

### 1.2 ナノ集光ミラー形状誤差の at-wavelength 計測

波面誤差の at-wavelength その場計測の可能性を示すことを目的に、回折限界において 30 nm の集光サイズが期待できるミラーを製作し、その性能を 15 keV の X 線によって計測し評価した。図 2 に、実験系の写真と模式図を示す。本実験は BL29-XUL<sup>25,26</sup> の 1 km 長尺ビームライン棟の実験ハッチ 3 において行われた。集光点の強度プロファイルの計測では、サテライト領域まで高精度な計測が可能なナイフエッジスキャンによる暗視野計測<sup>6)</sup>を採用した。ピエゾ素子駆動ステージにより、集光点付近でビームを横

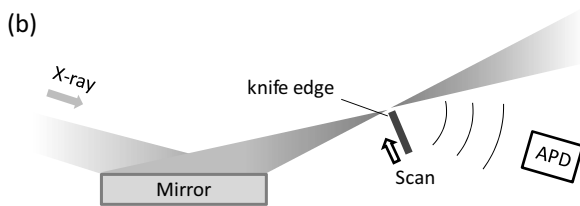
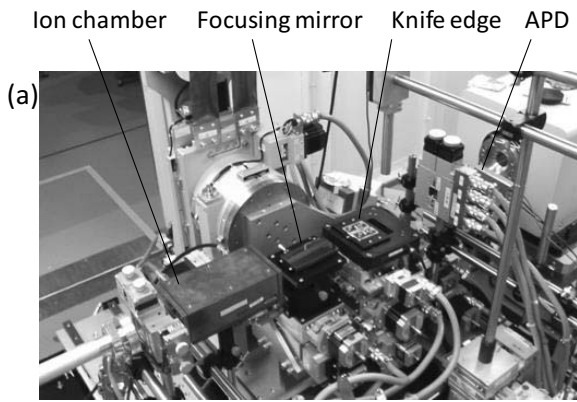


図2 At-wavelength 波面計測実験系。(a) 写真, (b) 光学系の模式図。

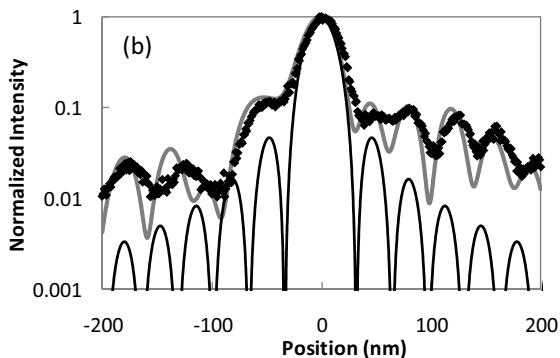


図3 集光点の強度プロファイル。黒プロット：実験値，灰線：算出された波面収差をもとに復元された強度プロファイル，黒線：理想の強度プロファイル。

切るようにナイフエッジをスキャンし、エッジからの散乱 X 線を APD (avalanche photodiode) によって計測している。図3は、集光点での強度プロファイルの実測値と、回復した位相をもとに計算した強度プロファイル、および、理想ミラーの場合の強度プロファイルを示している。縦軸は対数軸であり、ナイフエッジスキャンによって非常に高精度に集光ビームの強度プロファイルが測定できていることがわかる。実測された強度プロファイルには、ミラーの形状が理想である場合の強度プロファイルにはない複数の大きなサテライトピークが確認できる。回復された位相をもとに計算された強度プロファイルと実測された強度プロファイルに注目すると、これらは非常によく一致しており、位相回復計算によって正しい波面誤差が求められてい

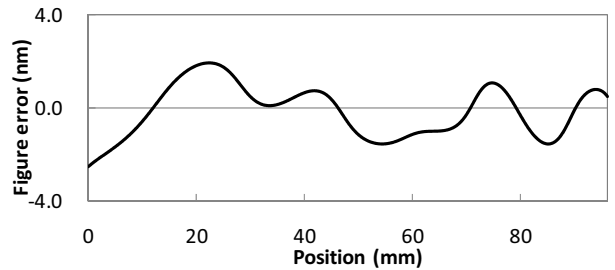
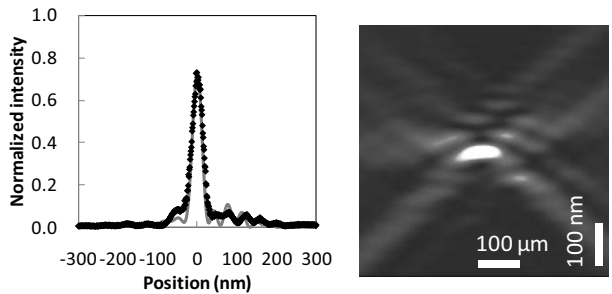
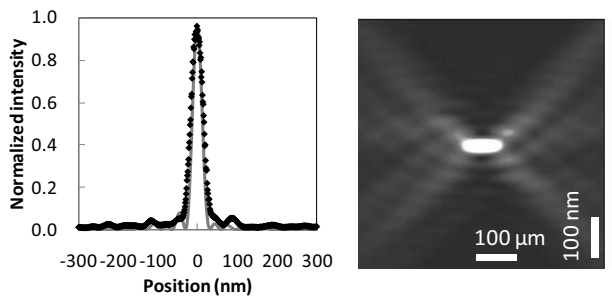


図4 位相回復結果をもとに復元されたミラー面形状誤差。



(a)

(b)



(c)

(d)

図5 ミラーの形状修正前後の集光点付近の強度プロファイル。(a) 形状修正前の集光点における強度プロファイルの実測値(黒)と回復した位相を用いた強度プロファイルの計算結果(灰)、(b) 回復した位相を用いて計算した集光点近傍の強度プロファイル。(c, d) 形状修正後。

る可能性が高いことがわかる<sup>21,22)</sup>。図4は、式(1)の関係を用いて波面誤差をミラー表面の形状誤差に換算したものである。波面収差の絶対値はおおむね  $\lambda/4$  であり、これに対応して、およそ PV 3~4 nm の形状誤差となっている。

### 1.3 At-wavelength 計測の確からしさの評価

At-wavelength 波面計測の確からしさを検証するため、回復された波面誤差から求めたミラー表面の形状誤差を追加成膜法によって修正し、修正されたミラーの集光性能を再度 SPring-8 で評価した。追加成膜法とは、ミラーの前面に置かれたピンホールを通して、ミラーの局所領域に所定量の成膜を行い、凹部を埋めながら形状の修正を行う手法である。われわれの装置では、目標の膜厚分布に対して

PV 0.5 nm 程度の精度で成膜が可能である。修正後に再度集光特性を評価した結果を図5に示す。(a)と(c)は修正前と修正後の強度プロファイルを示しており、(b)と(d)は回復した位相をもとに計算したX線強度プロファイルを集光点近傍において示している。追加成膜法による形状修正によって、修正前に大きかったサテライト領域のピークがきれいに取り除かれ、その領域に散っていたX線がメインピーク内に集まっていることがわかる。このことは、図4に示したミラー形状誤差の正しさを示すものである。修正後の強度プロファイルをもとに再度評価した波面誤差は $\lambda/10$ 程度であり、レイリーの $\lambda/4$ 則に基づく回折限界条件の評価が十分に可能なレベルで at-wavelength 計測の確からしさが確認できたといえる。

## 2. 補償光学システムによる放射光 X 線の Sub-10 nm 集光

### 2.1 光学系

sub-10 nm 集光ミラーの許容形状誤差は、レイリーの $\lambda/4$ 則に従えば、式(1)より、斜入射角を7 mrad、X線のエネルギーを20 keVとすると、約PV 1 nmである。ミラー基板の加工・計測技術が向上しても、オフラインでこれを保証することは、もはや不可能である。また、sub-10 nm 集光に必要な開口数を実現するためには多層膜の形成が不可欠であり、多層膜の積層誤差によっても、反射X線の位相が影響を受ける。われわれは、ミラー作製時にオフラインで除去しきれない波面誤差を最終的にその場補正することを目的に、独自の波面補正システムを提案した。図6にその波面補正システムの概念図を示す。本光学系の特徴は、比較的スペースのある集光ミラーの上流側に波面補正用の斜入射形状可変ミラーを配置している点にある。補正用ミラーの斜入射角を集光ミラーよりも小さく抑えることにより、式(1)の関係から、補正用ミラーの要求精度を集光ミラーに比べて緩和することができる。具体的な波面補償は、まず、補正用ミラーを平面にして集光点での強度プロファイルを測定し、前述の at-wavelength 計測に基づいて波面誤差を算出するとともに、これを補償するように補正用ミラーの形状を変形することによって完了する。前節では、ミラー上と集光点の強度プロファイルを用いて位相の回復を行ったが、ここでは、補正用ミラーの真の形状がわからないことを前提に、集光点近傍の複数の断面での強度プロファイルを測定し、これらの強度プロファイルをもとに同様の収束計算によって位相の回復を行っている。

図7にデモンストレーションに用いた一次元 sub-10 nm

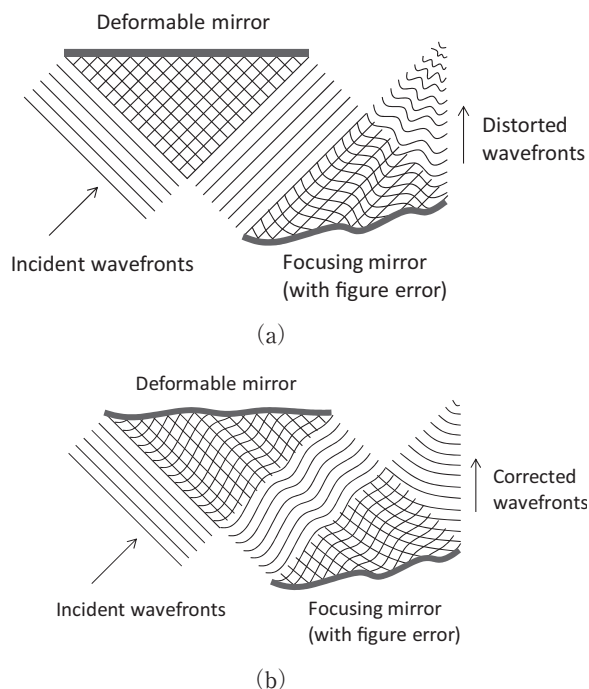


図6 集光ビーム波面補正システムの模式図。(a) 波面補正前、(b) 波面補正後。

集光のための補償光学系の写真と模式図、波面誤差補正用ミラーの外観を示す。また、表1および表2に集光ミラーおよび補正用ミラーの仕様を示す。ここでは、補正用ミラーの長さは集光ミラーに比べて2倍であり、これに伴って補正用ミラーの斜入射角は集光ミラーに比べて2分の1に設定されている。このことによって、補正用ミラーの形状精度2 nmが集光ミラー上での形状精度1 nmに対応し、補正用ミラーに求められる精度の低減に貢献している。補正用ミラーは表面の中心線が反射面であり、形状可変のために表面の左右に2組の18分割のピエゾアクチュエーターが貼られ、9周期分のサインカーブを縦分解能 sub-1 nm レベルで設定することができる<sup>27,28)</sup>。

### 2.2 補償光学に基づく集光特性評価

一次元 sub-10 nm 集光実験の結果を図8に示す。実測した強度プロファイルと回復した位相をもとに計算した強度プロファイルを合わせて示している。強度プロファイルは焦点を含む上下流7か所で測定し、位相はその場で回復され、逆位相の波面を得るように自動的に補正用ミラーを変形している。図からわかるように、実測と計算によって求まる強度プロファイルはよく一致しており、ここでも at-wavelength 計測の確からしさが確認できる。そして、補正後には、焦点位置において、回折限界における理論値に等しい集光径7 nmを達成している<sup>29)</sup>。現在では、同等のシステムをカークパトリック・バエズ (K-B) ミラー<sup>30)</sup> の



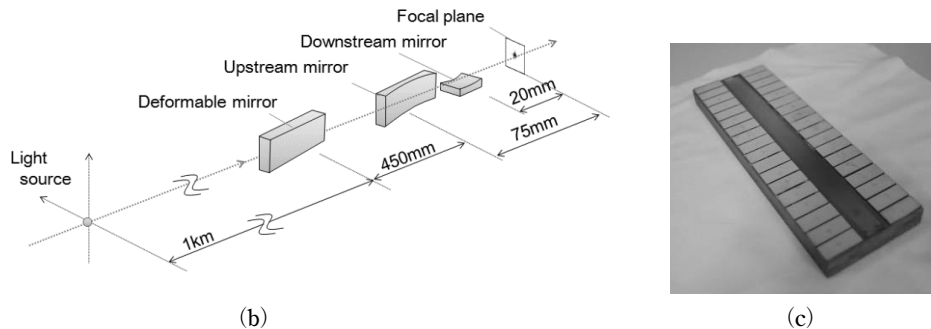
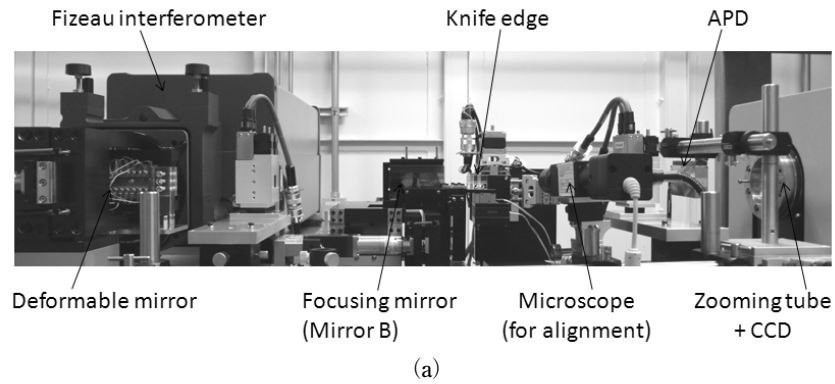


図7 一次元 sub-10 nm 集光光学系. (a) 装置系写真, (b) 光学系模式図, (c) 形状可変ミラー写真.

表1 集光ミラーの仕様.

一次ブラッグピークの X 線エネルギー	20 keV
ミラーのサイズ	75 mm (L) × 30 mm (W) × 20 mm (T)
焦点距離	75 mm
斜入射角	7.0 mrad
多層膜	[Pt/C] <sub>20</sub>
基板材料	合成石英 ( $t=15$ mm)

表2 形状可変ミラーの仕様.

ミラーのサイズ	150 mm (L) × 50 mm (W) × 10 mm (T)
ミラー材料	Si
ピエゾアクチュエーター	18 分割のアクチュエーターを 2 組
ピエゾアクチュエーターのサイズ	7.5 mm (L) × 20 mm (W) × 1 mm (T)

構成にすることによって、二次元 sub-10 nm 集光が実現しており、放射光 X 線の極限的な集光において、補償光学システムの有用性を実証できたものと考えている。

本手法は X 線自由電子レーザーの集光への応用も可能であることは明らかである。X 線自由電子レーザーは、たんぱく質の単分子構造解析や非線形光学などへの展開が強く望まれており、第三代放射光の場合と同様に、より微細な集光への要望が高まっている。その際、X 線自由電子レーザーではパルス 1 ショットでの波面誤差測定が求められる。このため、新たにタルボ (Talbot) 効果を用いたシアリング干渉計の導入を検討しており、その可能性を実証しつつある<sup>31)</sup>。

X 線集光ビームのサイズは、高輝度 X 線源が広く普及した 2000 年以降、集光光学素子作製技術の高度化に支えられ急速に微細化した。しかしながら、オフラインでの光学素子の精度保証はすでに限界に達した感があり、さらなる

ビームサイズの微細化には、新たなブレークスルーが必要である。ここでは、この例として、光学素子性能の at-wavelength 評価法と、これに基づく補償光学システムを提案し、その可能性を示した。

本研究は、大阪大学と理化学研究所播磨研究所、高輝度光科学研究センターとの共同によって行われ、文部科学省科学研究費補助金 (特別推進研究 (1002009), 基盤研究 S (23226004)), グローバル COE プログラム「高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点」、X 線自由電子レーザー利用推進事業、戦略的創造研究推進事業 CREST の支援を受けている。ここに謝意を表す。

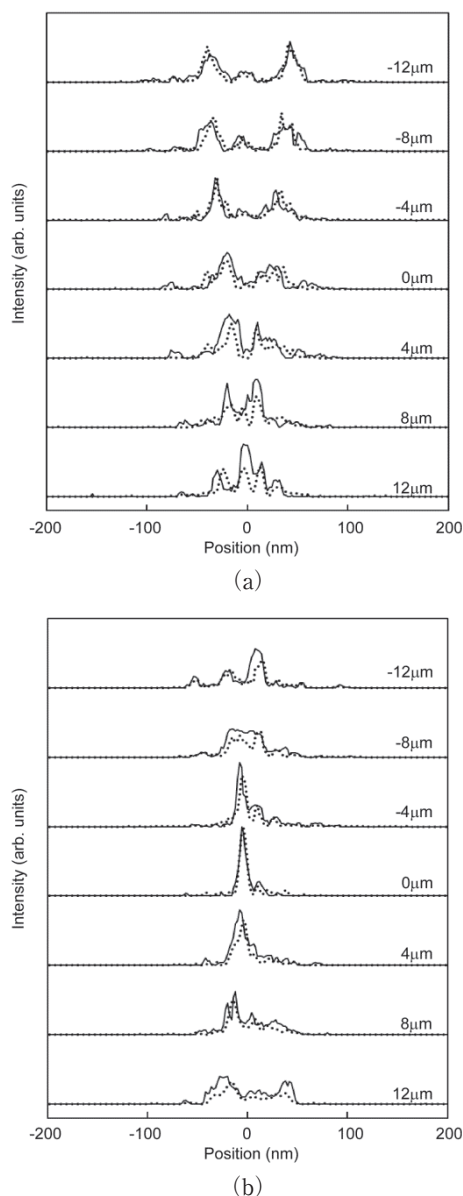


図8 一次元 sub-10 nm 集光実験における波面補償前 (a) と補正後 (b) の集光点近傍での強度プロファイル。実線は実測の強度プロファイル、破線は回復した位相をもとに計算された強度プロファイル。

## 文 献

- 1) W. Liu, G. E. Ice, Z. J. Tischler, A. Khounsary, C. Liu, L. Assoufid and A. T. Macrander: "Short focal length Kirkpatrick-Baez mirrors for a hard x-ray nanoprobe," *Rev. Sci. Instrum.*, **76** (2005) 113701.
- 2) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori: "Nearly diffraction-limited line focusing of a hard-X-ray beam with an elliptically figured mirror," *J. Synchrotron Rad.*, **9** (2002) 313-316.
- 3) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Yamamura, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: "Efficient focusing of hard x rays to 25 nm by a total reflection mirror," *Appl. Phys. Lett.*, **90** (2007) 051903.

- 4) O. Hignette, P. Cloetens, G. Rostaing, P. Bernard and C. Morawe: "Efficient sub 100 nm focusing of hard x rays," *Rev. Sci. Instrum.*, **76** (2005) 063709.
- 5) C. G. Schroer, M. Kuhlmann, T. F. Günzler, B. Lengeler, M. Richwin, B. Griesebock, D. Lützenkirchen-Hecht, R. Frahm, E. Ziegler, A. Mashayekhi, D. R. Haefner, J.-D. Grunwaldt and A. Baiker: "Mapping the chemical states of an element inside a sample using tomographic x-ray absorption spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 3360-3362.
- 6) Y. Suzuki, A. Takeuchi, H. Takano and H. Takenaka: "Performance test of Fresnel zone plate with 50 nm outermost zone width in hard X-ray region," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 1994-1998.
- 7) H. C. Kang, J. Maser, G. B. Stephenson, C. Liu, R. Conley, A. T. Macrander and S. Vogt: "Nanometer linear focusing of hard X rays by a multilayer Laue lens," *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 127401.
- 8) C. Bergemann, H. Keymeulen and J. F. Van der Veen: "Focusing X-ray beams to nanometer dimensions," *Phys. Rev. Lett.*, **91** (2003) 204801.
- 9) C. G. Schroer and B. Lengeler: "Focusing hard X rays to nanometer dimensions by adiabatically focusing lenses," *Phys. Rev. Lett.*, **94** (2005) 054802.
- 10) Ch. Morawe, J. P. Guigay, V. Mocella and C. Ferrero: "An analytical approach to estimating aberrations in curved multilayer optics for hard x-rays: 2. Interpretation and application to focusing experiments," *Opt. Express*, **16** (2008) 16138-16150.
- 11) Y. Suzuki: "Resolution limit of refractive lens and Fresnel lens in X-ray region," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 7311-7314.
- 12) H. Mimura, S. Morita, K. Kimura, D. Yamakawa, W. Lin, Y. Uehara, S. Matsuyama, H. Yumoto, H. Ohashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohmori and K. Yamauchi: "Focusing mirror for x-ray free-electron lasers," *Rev. Sci. Instrum.*, **79** (2008) 083104.
- 13) K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki and Y. Mori: "Figuring with subnanometer-level accuracy by numerically controlled elastic emission machining," *Rev. Sci. Instrum.*, **73** (2002) 4028-4033.
- 14) K. Arima, A. Kubota, H. Mimura, K. Inagaki, K. Endo, Y. Mori and K. Yamauchi: "Highly resolved scanning tunneling microscopy study of Si (0 0 1) surfaces flattened in aqueous environment," *Surf. Sci. Lett.*, **600** (2006) 185-188.
- 15) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Ueno, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori: "Microstitching interferometry for x-ray reflective optics," *Rev. Sci. Instrum.*, **74** (2003) 2894-2898.
- 16) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: "Relative angle determinable stitching interferometry for hard x-ray reflective optics," *Rev. Sci. Instrum.*, **76** (2005) 045102.
- 17) T. Kimura, H. Ohashi, H. Mimura, D. Yamakawa, H. Yumoto, S. Matsuyama, T. Tsumura, H. Okada, T. Masunaga, Y. Senba, S. Goto, T. Ishikawa and K. Yamauchi: "A stitching figure profiler of large X-ray mirrors using RADSI for subaperture data acquisition," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **616** (2010) 229-232.
- 18) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Ueno, A. Souvorov, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa and Y. Mori: "Wave-optical evaluation of interference fringes and wavefront phase in a hard-x-ray beam totally reflected by mirror optics," *Appl. Opt.*, **44** (2005) 6927-6932.
- 19) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics, 7th edition* (Cambridge University Press, UK, 1999) p. 527
- 20) K. Yamauchi: "A strategy to fabricate KB mirrors for 10 nm hard

- X-ray focusing,” *SPIE Workshop at SPIE’s Optics & Photonics* (San Diego, California, 2005).
- 21) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, S. Handa, T. Kimura, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: “Direct determination of the wave field of an x-ray nanobeam,” *Phys. Rev. A*, **77** (2008) 015812.
  - 22) H. Yumoto, H. Mimura, S. Matsuyama, S. Handa, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi: “At-wavelength figure metrology of hard x-ray focusing mirrors,” *Rev. Sci. Instrum.*, **77** (2006) 063712.
  - 23) G. R. Brady and J. R. Fienup: “Nonlinear optimization algorithm for retrieving the full complex pupil function,” *Opt. Express*, **14** (2006) 474–486.
  - 24) J. R. Fienup: “Phase retrieval algorithms: A comparison,” *Appl. Opt.*, **21** (1982) 2758–2769.
  - 25) T. Ishikawa, K. Tamasaku, M. Yabashi, S. Goto, Y. Tanaka, H. Yamazaki, K. Takeshita, H. Kimura, H. Ohashi, T. Matsushita and T. Ohata: “1-km beamline at SPring-8,” *Proc. SPIE*, **4145** (2001) 1–10.
  - 26) K. Tamasaku, Y. Tanaka, M. Yabashi, H. Yamazaki, N. Kawamura, M. Suzuki and T. Ishikawa: “SPring-8 RIKEN beamline III for coherent X-ray optics,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **467-468** (2001) 686–689.
  - 27) R. Signorato, O. Hignette and J. Goulon: “Multi-segmented piezoelectric mirrors as active/adaptive optics components,” *J. Synchrotron. Rad.*, **5** (1998) 797–800.
  - 28) T. Kimura, S. Handa, H. Mimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Inagaki, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: “Wavefront control system for phase compensation in hard X-ray optics,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48** (2009) 072503.
  - 29) H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, H. Yokoyama, S. Matsuyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: “Breaking the 10 nm barrier in hard-X-ray focusing,” *Nat. Phys.*, **6** (2010) 122–125.
  - 30) P. Kirkpatrick and A. V. Baez: “Formation of optical images by x-rays,” *J. Opt. Soc. Am.*, **38** (1948) 766–773.
  - 31) S. Matsuyama, H. Yokoyama, R. Fukui, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, W. Yashiro, A. Momose, T. Ushikawa and K. Yamauchi: “Wavefront measurement for a hard-X-ray nanobeam using single-grating interferometry,” *Opt. Exp.*, **20** (2012) 24977–24986.

(2013年2月18日受理)