

# 1枚の楕円面ミラーによる硬X線2次元100 nm集光

湯本博勝

公益財団法人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 1-1-1

## 要旨

全反射現象を利用したX線集光光学素子は、最先端のX線顕微分析技術を支えるツールとして、放射光施設やX線自由電子レーザー施設において多用されている。高精度X線光学素子の作製技術の進歩は、顕微分析技術の向上に資する重要なテーマである。本稿では、1回の反射により2次元集光が可能な楕円面ミラーによる硬X線ナノ集光ビームの形成技術の進展について述べる。我々のグループでは、高精度非球面加工法や表面形状計測法などのミラー作製システムを開発することで、従来、作製困難であったナノ精度楕円面集光ミラーを作製した。この楕円面ミラーをSPRING-8において評価した結果、7 keVのX線において85 nm×125 nm（半値幅）の2次元集光ビーム形成に成功した。

## 1. はじめに

光源を発した光を反射し2次元集光するために楕円形状を利用した主要な3種類の斜入射反射型光学系をFig. 1に示す。Fig. 1(a)は、光源と集光点をそれぞれ焦点に持つ回転楕円体ミラーであり、光軸について回転対称な形状を有する。1回の反射により2次元集光が可能である。Fig. 1(b)は、楕円面ミラーであり、Fig. 1(a)の回転楕円体ミラーの一部を切り出した表面形状を持つ。楕円面ミラーは、1枚のミラーで2次元集光を可能とする最も単純な形状を有する。Fig. 1(c)はKirkpatrick-Baez (K-B) 配置<sup>1)</sup>と呼ばれ、硬X線領域で2次元マイクロ・ナノ集光用ミラーとして最も普及している光学系である。K-B配置型集光光学系では、1次元集光用の凹面ミラーを2枚直交して直列配置し、それぞれのミラーで縦横独立して1回ずつ反射し集光することで2次元集光ビームを形成する。この光学系では、微小集光用に収差低減のために光軸方向のみに楕円形状を有する楕円筒面ミラーがしばしば用いられる。

K-B配置型光学系の楕円筒面ミラーにより、2005年に100 nmオーダーの集光ビームが報告された<sup>2-4)</sup>。現在は50 nmを下回る集光サイズが形成可能である<sup>5)</sup>。硬X線領域用の楕円筒面形状をもつ全反射集光ミラーの作製技術は、完成された技術となっている<sup>6,7)</sup>。サブナノメートルの形状精度を持つ楕円筒面ミラーが、市販品として入手可能である。一方、1枚のミラーで2次元集光が可能な楕円面ミラーや回転楕円体ミラーは、今まで100 nmオーダーサイズの2次元集光ビームの形成が非常に困難であり<sup>8,9)</sup>、ミラー作製技術の確立が望まれてきた。当グループでは、X線顕微分析法のための高性能X線光学素子の開発を目的とし、楕円面ミラーによる硬X線ナノ集光ビーム形成技術の開発に取り組んだ<sup>10-13)</sup>。

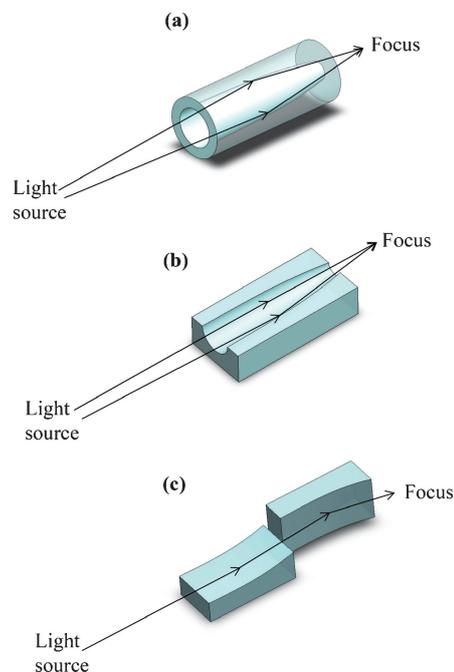


Fig. 1 (Color online) Two-dimensional focusing optics using grazing-incidence mirror. (a) Ellipsoidal mirror (Ellipsoid of revolution). (b) Ellipsoidal mirror in off-axis configuration. (c) K-B mirror system.

## 2. 楕円面ミラーの利点

楕円面ミラーは、K-B配置型光学系と比較して小さな回折限界集光サイズを実現可能である。これは、ミラーの長手方向の集光であるメリジオナル集光の開口サイズに対して、短手方向の集光であるサジタル集光の開口サイズが大きく設計可能であることによる。メリジオナル集光のみの楕円筒面ミラーを2枚組み合わせたK-B配置型光学系

と比べ、メリジナル集光とサジタル集光により大きな開口サイズをもつ楕円面ミラーを設計できる。本性質は、楕円面ミラーによる2次元集光の最大の利点であり、楕円面ミラーによる2次元集光がK-B配置型光学系と根本的に異なる点である。

K-B配置型の2枚ミラー集光光学系と比べて、楕円面の1枚ミラー集光光学系が優れた他の利点として、次が挙げられる。

①高効率集光が可能。これは1枚分のミラーの反射率の損失を避けられるためである。

②高い縮小倍率の光学系を設計可能。これは1枚分のミラーの焦点距離を確保する必要がないためである。これにより、長いワーキングディスタンスや高い集光密度が得られる。

③シンプルなミラー姿勢調整。これは姿勢調整に要する軸が少なくなるためである。これにより姿勢調整装置が簡便となり、さらに、集光ビームサイズや集光位置の安定性の向上につながる。

このように効率的に小さな集光サイズを形成可能な楕円面集光ミラーは、X線分析技術への応用上非常に利点が多い。さらに、X線自由電子レーザーや将来の低エミッタンス放射光施設においては、現在の放射光施設よりも丸い光源形状であり、このような光源を効率高く最大限利用可能な集光光学素子は、K-B配置型光学系ではなく、縦横の焦点距離が等しい楕円面ミラーであると言える。

### 3. 楕円面ミラーの表面曲率半径

楕円面ミラー作製の困難さは、楕円面ミラー表面がもつ急峻な2次元非球面形状に起因する。楕円面ミラー表面の長手方向と短手方向の表面曲率半径 $R_m$ と $R_s$ は次のように表される<sup>1)</sup>。

$$R_m = \frac{1}{\sin \theta} \left( \frac{2}{\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}} \right) \quad (1)$$

$$R_s = \sin \theta \left( \frac{2}{\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}} \right) \quad (2)$$

ここで、 $\theta$ はミラー中央部での斜入射角であり、 $f_1$ と $f_2$ はそれぞれ、光源からミラーまでの焦点距離と、ミラーから集光点までの焦点距離である。硬X線領域の全反射角はおおよそ10 mrad以下と小さいため、

$$R_s \approx R_m \theta^2 \quad (3)$$

と近似できる。

今、硬X線領域での臨界角を踏まえると全反射する斜入射角 $\theta$ は1~10 mradである。このため、表面曲率半径

$R_m$ と $R_s$ には4桁から6桁の差が生じ、楕円面ミラーは、長手方向と短手方向に極端に異なる曲率半径を持つ。例えば、SPring-8の標準的なビームラインの第1実験ハッチにミラーを設置して、10 keV付近の硬X線が反射するように集光する場合を想定し、焦点距離 $f_1$ が50 m、 $f_2$ が200 mmであり、斜入射角 $\theta$ が4 mradと仮定すると、 $R_m$ は100 m、 $R_s$ は1.6 mmとなる。楕円面ミラーの短手方向の表面曲率半径はボールペンの芯ほどの非常に小さいものとなる。一方で、長手方向の表面曲率半径は、従来のK-B配置型光学系に利用される楕円筒面ミラーと同じく数百m前後となる。

### 4. 開発目標とした楕円面ミラーの光学配置

開発目標とした硬X線ナノ集光用楕円面ミラーの光学パラメータを次に示す。焦点距離 $f_1$ は50 m、 $f_2$ は200 mmである。ミラー中心での斜入射角 $\theta$ を9 mradとし、白金を表面に用いることで、7 keVのX線エネルギーにおいて、全反射条件下で理想反射率75%が得られる。ミラー反射領域を、長手方向に93 mm、短手方向に0.45 mm作製することで、7 keVのX線において回折限界集光サイズ37 nm×67 nm (Full Width at Half Maximum: FWHM)が期待できる。ミラー表面形状は、Fig. 2に示すように長手方向100 mmに対して深さが約30  $\mu$ m、短手方向0.45 mmに対して深さが約7  $\mu$ mである。ミラー中心部において、長手方向の曲率半径は44 mであるのに対して、短手方向の曲率半径は3.6 mmである。

本楕円面集光ミラーが回折限界集光サイズを達成するために要求される表面形状精度を、波動光学シミュレーション<sup>12)</sup>により見積もったところ1 nm (root mean square (RMS))が必要であることが分かった。また、レーリー

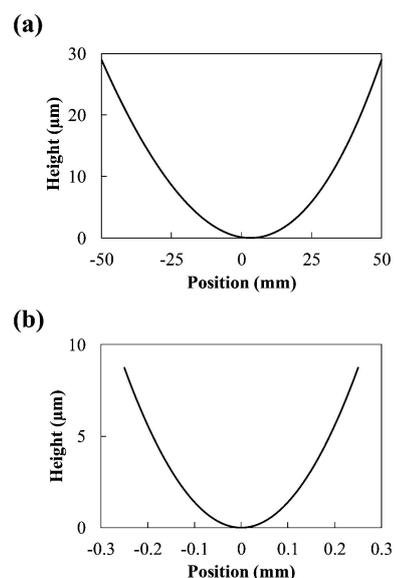


Fig. 2 Surface profiles of designed ellipsoidal focusing mirror. (a) Long axis direction. (b) Short axis direction.

の $\lambda/4$ 則<sup>14)</sup>によると2.5 nm (peak-to-valley (PV))の表面形状精度が要求される。回折限界集光サイズを得るためには、従来の楕円筒面ミラーと同じ表面形状精度が要求される上に、楕円面ミラーの作製では、急峻な形状を持つ短手方向も同時にナノ精度でコントロールしなければならない。

## 5. 楕円面集光ミラーの作製

### 5.1 X線ミラーによる微小集光技術

X線ミラーによる微小集光のための技術が様々なグループにより開発されてきた<sup>15-25)</sup>。1次元集光用の楕円筒面ミラーの作製法として、機械式曲げ (bending technique)<sup>3,15)</sup>、差分成膜法 (differential deposition)<sup>4,16)</sup>、曲げ研磨法 (bent-polishing method)<sup>17)</sup>、直接加工法<sup>2,21,22)</sup>などが報告されており、100 nm 程度の集光径が実現されている。

大阪大学山内教授らは、高精度X線ミラーの作製技術として、ミラー基板表面に目標とするX線ミラー形状を作りこむ直接加工法を進展させた。同グループは、超精密加工法であるEEM (Elastic Emission Machining)<sup>21,22)</sup>や可視光干渉計を利用した形状計測システムMSI (Micro Stitching Interferometry)<sup>23)</sup>やRADSI (Relative Angle Determinable Stitching Interferometry)<sup>24,25)</sup>を開発し、表面形状計測と数値制御形状修正加工に基づく決定論的な (deterministic) ミラー作製技術を適用することでK-B配置型の楕円筒面ミラーを用いて7 nm × 8 nm (FWHM)の集光ビームの形成に成功した<sup>26)</sup>。

X線ミラーの様々な作製技術のうち、100 nm 以下の回折限界集光サイズを形成可能であるX線ミラーを、安定して作製可能な方法は、数値制御加工に基づく決定論的なミラー作製法が最も適していると考えられる。なぜならば、硬X線領域で100 nm 以下の回折限界集光サイズを得るには、非球面形状を少なくとも数 nm の形状精度で作製を要するためである。X線ミラー表面に求められるサブnmの表面粗さと、数 nm の形状精度の両方を満足するミラー表面形状を作製するためには、意図的に目標通りの形状を加工し、オフラインの表面形状評価法がなければ、ナノ精度X線ミラーの実現は極めて困難であろう。特に直接加工法は、ミラー形状の完成後の長期間の安定性を得るためにも非常に有効である。

### 5.2 楕円面ミラーの作製プロセス

開発ターゲットとした急峻な非球面形状を有するX線ミラーの作製に対応するために、当グループでは、従来の高精度ミラー作製技術を応用し、SPring-8において超精密加工装置<sup>10)</sup>と形状計測装置<sup>11)</sup>を開発した。その作製工程①～④を次に示す。②～④のプロセスはSPring-8において実施した。これによりX線ミラーに対応可能な良好な形状精度と表面粗さを両立した。ミラー基板材料として

合成石英ガラスを用い、基板サイズ100 mm × 50 mm × 30 mm (厚さ)の表面上に楕円面形状を形成した。

①ダイヤモンド砥石を用いた高精度研削装置により約1  $\mu\text{m}$  (PV)の形状精度で目標とする楕円面形状を高効率に形成した。

②研削加工に伴い増大した表面粗さを、当グループで開発した回転型ヘッドを持つ加工装置により表面粗さ除去加工を実施した。これにより、研削痕やスクラッチ痕が除去され、X線ミラーとして十分な表面粗さである0.2 nm (RMS)まで改善した。

③ノズル型ヘッドを持つ加工装置を開発し、表面形状計測の結果に基づき、数値制御形状修正加工を施した。必要精度を満足するように、置き直し後の計測再現性と同等の形状精度まで加工を実施した。

④DCマグネトロンスパッタ装置により、ミラー基板表面に白金を均一に50 nmの厚みでコーティングした。

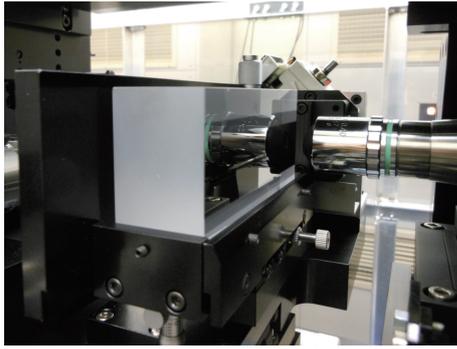
先に見積もった楕円面ミラーに要求される表面精度を満足するように加工・計測を繰返し、開発した楕円面ミラーの表面形状誤差は、長手方向93 mm × 短手方向0.45 mmの評価領域で1.0 nm (RMS)、また、ミラー中央部の長手方向50 mm × 短手方向0.45 mmの評価領域で0.8 nm (RMS)を達成した。白金コーティング後の表面粗さは、評価領域0.1 mm角で0.3 nm (RMS)であった。

### 5.3 楕円面ミラーの表面形状計測法

これまでに報告のある硬X線用楕円筒面ミラーの傾斜角分布は、長手方向に高々 $\pm$ 数 mradであったが、開発目標の楕円面ミラーは、短手方向に $\pm$ 70 mradの傾斜角分布を有しており、形状計測が格段に困難になる。当グループでは楕円面ミラーの作製プロセスの中でキーとなる形状計測法として、RADSIタイプの高精度スティッチング干渉計を構築すると共に、形状計測時の収差補正法を開発した<sup>11)</sup>。

本計測法では、部分的なミラー形状 (サブアパーチャー形状) をミラウ型顕微干渉計により計測すると同時に、隣り合ったサブアパーチャー形状間の相対角度を $5 \times 10^{-9}$  radの精度で計測する。その後、相対角度基準でサブアパーチャー形状をつなぎ合わせることでミラー全体形状を算出する。これによりスティッチングによる誤差の蓄積が低減できる。一方、楕円面形状が $\pm$ 70 mradなどの大きな傾斜角分布を持つために顕微干渉計のレンズの収差が原因で、楕円面のサブアパーチャー形状の計測時にはシステムエラーが発生する。このため、傾斜した面を顕微干渉計により計測した際に発生するシステムエラーについて、平面形状を用いて実験的に評価し、楕円面のサブアパーチャー形状を補正することで、サブアパーチャー形状内に含まれる不確かさの低減を図りつつ、隣り合ったデータ間の重ね合わせ誤差を低減した。

開発ターゲットとした楕円面ミラーの計測では、サブア



**Fig. 3** (Color online) Photograph of ellipsoidal mirror on surface profiler.

パーチャ形状のサイズは0.7 mm (長手方向) × 0.5 mm (短手方向) であり, 0.5 mm おきに形状を198枚取得することで, 楕円面ミラーの全領域99 mm × 0.5 mm を評価した。本計測システムにより, 開発ターゲットとした楕円面ミラーを利用して, 要求される精度を満足する0.5 nm (RMS) の計測再現性を達成した。**Fig. 3** は, 表面形状計測装置上に設置された白金コーティング後の楕円面ミラーの写真である。

## 6. X線を利用した集光性能評価

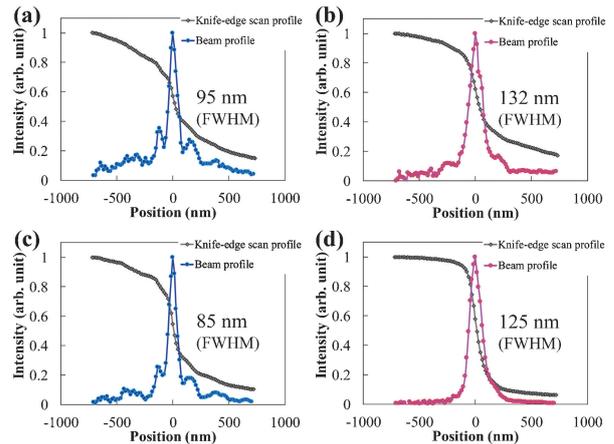
### 6.1 楕円面ミラーの姿勢調整

K-B 配置型ミラー光学系では, 2枚のミラーについて, ミラー間の相対関係を含めた姿勢調整が必要であるのに対して, 楕円面ミラーの集光調整時は, 1枚のミラーを姿勢調整するのみであり, 集光調整軸数が低減される。楕円面ミラーの姿勢調整に要する許容精度について波動光学集光シミュレータにより見積もった<sup>12)</sup>。回折限界集光サイズを形成するためには, 並進3軸と回転3軸の6自由度の内, 特に焦点距離とミラー面内回転, 入射角については,  $\pm 10 \mu\text{m}$  や  $\pm 0.25 \mu\text{rad}$  などの精度で同時に調整する必要があり, K-B 配置ミラー光学系と変わらない精度が要求される。

波動光学シミュレータの結果に基づき, 楕円面ミラーの集光調整用に, ミラー面内と入射角の2軸回転, 水平方向と垂直方向の2軸並進を行う調整装置を開発した。回転軸について  $0.1 \mu\text{rad}$  の調整精度が可能ないように, 10 nm 単位の高分解能直動アクチュエータと弾性ヒンジを組み合わせた自動ステージを作製した。焦点距離に関しては, 試料側で調整可能ないように並進ステージを配置した。

### 6.2 集光プロファイル評価

作製した楕円面ミラーの集光特性を SPring-8 BL29XU-L<sup>27)</sup> において評価した。Si(111)二結晶分光器からの7 keVの単色光により楕円面ミラーを照明した。楕円面ミラーは, 第3実験ハッチに設置し, 光学ハッチ内

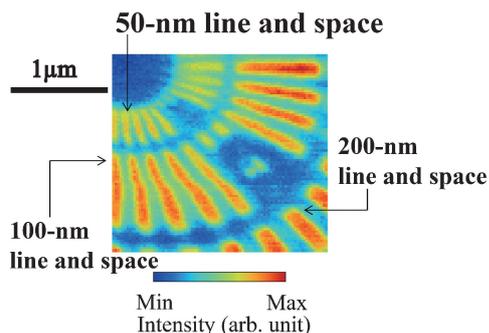


**Fig. 4** (Color online) Measured intensity profiles of focused beams. (a) and (b) were obtained by using a reflecting area of the total 93 mm × 0.45 mm. (c) and (d) were obtained by using a reflecting area of the 50 × 0.45 mm central-part area. (a) and (c) Focused beam profiles in the meridional focusing direction. (b) and (d) Focused beam profiles in the sagittal focusing direction. Reprinted from Ref. 13 under CC BY 4.0 License.

に設置されたスリットを仮想光源 (空間制限フィルタ) とすることで, 入射側の焦点距離を50 m とした。楕円面ミラーの集光性能を評価するため, 本スリットサイズを  $5 \mu\text{m}$  とすることで, 十分に小さな幾何光学的集光サイズが得られる。楕円面ミラーで反射した光を2次元画像検出器で観察しながら, フーコーのナイフエッジテスト<sup>28)</sup>により, 楕円面ミラーの姿勢を精密に調整した。

姿勢調整後, ナイフエッジスキュン法を用いて集光ビームプロファイルを計測した。ナイフエッジとして直径  $200 \mu\text{m}$  の金製のワイヤを用いた。**Fig. 4** に集光プロファイルを示す。楕円面ミラー上の全体  $93 \text{ mm} \times 0.45 \text{ mm}$  を反射領域とした場合の集光プロファイルは **Fig. 4(a)** と **(b)** であり, 集光ビームサイズは  $95 \text{ nm}$  (メリジオナル集光) ×  $132 \text{ nm}$  (サジタル集光) (FWHM) であった。また, 楕円面ミラー上の中央部  $50 \text{ mm} \times 0.45 \text{ mm}$  を反射領域とした場合の集光プロファイルを **Fig. 4(c)** と **(d)** に示す。このとき, 集光サイズは  $85 \text{ nm}$  (メリジオナル集光) ×  $125 \text{ nm}$  (サジタル集光) (FWHM) を達成した。このビームサイズは回折限界集光ビームサイズ  $70 \text{ nm}$  (メリジオナル集光) ×  $69 \text{ nm}$  (サジタル集光) (FWHM) や, オフラインの表面形状計測により評価された形状誤差を考慮した場合の集光サイズ  $73 \text{ nm}$  (メリジオナル集光) ×  $75 \text{ nm}$  (サジタル集光) (FWHM) よりも大きい。

楕円面ミラー全体を照明した場合の方が, 中央部のみを照明領域とした場合よりも集光サイズが大きい点や, 回折限界集光サイズに達していない点は, 楕円面ミラーの表面形状計測における絶対精度の不足が主な原因である。現在, 表面形状計測法の改善や, X線波面計測と波面補正



**Fig. 5** (Color online) Absorption-contrast X-ray image of resolution-test object observed by scanning X-ray microscopy using focused beam. Reprinted from Ref. 13 under CC BY 4.0 License.

技術<sup>29,30)</sup>の適用を検討している。楕円面ミラーの作製技術はまだ発展の途上である。

得られた集光ビームを利用して走査型X線顕微鏡を構築し、分解能テストパターン(XRESO-50HC, NTT-AT Corp.)を観察し2次元集光ビームの分解能を評価した。

**Fig. 5**に吸収コントラスト像を示す。測定間隔は25 nmで、測定視野は $2.2 \mu\text{m} \times 2.1 \mu\text{m}$ とした。水平方向のメリジонаル集光と垂直方向のサジタル集光ともに、50 nmのLine and spaceの構造が分解できている様子が観察された。これにより、楕円面ミラーによる2次元集光が同一焦点面内で行われており、楕円面集光ミラーのアライメントが正しく実施されていることを確認した。

## 7. おわりに

全反射型光学素子は、屈折や回折を利用した光学素子と比較して、集光効率が高い、入射X線エネルギーに対してワイドバンドパスである(臨界角近傍まで色収差を無視できる)などの優れた特徴を持つ。このため、入射エネルギーのスキャンが必要なXAFS(X-ray absorption fine structure)分析などのスペクトロスコピーや、様々な波長のX線を利用するビームライン常設の集光光学素子として全反射ミラー型集光光学素子は欠かすことができない。しかしながら、現状で屈折や回折によるX線集光光学素子では10 nm前後の集光サイズが報告されている<sup>26,31-35)</sup>のに対し、全反射型ミラーで達成されている最小集光サイズは25 nm<sup>5)</sup>に止まっている。全反射型ミラーで実現可能な微小集光サイズは、原理的には回転体ミラーにより10 nm以下が可能<sup>36)</sup>であるが、このためには非常に高い精度のミラー作製技術が要求される。また、回転体ミラーの作製の前に、提案光学系<sup>13)</sup>の構築も考えられる。さらに集光径の微小化を目指して、エネルギーバンド幅は制限されるが、多層膜ミラーによる短波長X線の利用も有効である。多層膜ミラーは、他の光学素子と比べてエネルギーバンド幅が広いいため、ナノ集光の際にワーキングデ

ィスタンスを確保しやすい<sup>37)</sup>。このため、ナノ集光用X線光学素子として、今後も反射型光学素子は重要な役割を占めていくものと考えている。

本研究では、楕円面ミラー作製上の課題であった表面加工法と表面形状計測法に関して、新たなミラー作製基盤をSPring-8において構築することで楕円面ミラーを作製した。開発した高精度ミラー作製プロセスは、ナノ集光や高強度ビーム形成を目的とした楕円面ミラーだけではなく、他の様々な2次元非球面ミラーの作製に应用可能である。これにより、2次元非球面ミラーを利用した光学系への応用<sup>38-42)</sup>や、設計自由度の向上が可能となるなど、大いに波及効果が期待できる。今後、楕円面ミラーの生産プロセスを改善し、楕円面ミラーの普及に貢献したい。

## 謝辞

本研究は、高輝度光科学研究センターの小山貴久主幹研究員、大橋治彦グループリーダー、大阪大学の松山智至助教、山内和人教授、理化学研究所の香村芳樹チームリーダー、石川哲也センター長との共同研究によって得られた成果です。本研究はJSPS科研費(25286095)の助成を受け実施されました。放射光実験はSPring-8の理研物理科学ビームラインI(BL29XU-L)において利用課題(No. 20150026)として行われました。

## 参考文献

- 1) P. Kirkpatrick and A. V. Baez: *Journal of the Optical Society of America* **38**, 766 (1948).
- 2) H. Mimura *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, L539 (2005).
- 3) O. Hignette *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 063709 (2005).
- 4) W. Liu *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 113701 (2005).
- 5) H. Mimura *et al.*: *Appl. Phys. Lett.* **90**, 051903 (2007).
- 6) H. Yumoto *et al.*: *Nat. Photonics* **7**, 43 (2013).
- 7) H. Mimura *et al.*: *Nat. Commun.* **5**, 3539 (2014).
- 8) M. Hoshino and S. Aoki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, L654 (2006).
- 9) A. Snigirev *et al.*: *J. Synchrotron Rad.* **14**, 326 (2007).
- 10) H. Yumoto *et al.*: *Proc. of SPIE* **9206**, 920605 (2014).
- 11) H. Yumoto *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 051905 (2016).
- 12) H. Yumoto *et al.*: *AIP Conf. Proc.* **1696**, 020033 (2016).
- 13) H. Yumoto *et al.*: *Scientific Reports* **7**, 16408 (2017).
- 14) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (7th ed. Cambridge University Press, Cambridge, 2001) 528.
- 15) O. Hignette *et al.*: *Proc. SPIE* **4499**, 105 (2001).
- 16) G. E. Ice *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 2635 (2000).
- 17) A. Takeuchi *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 093708 (2005).
- 18) H. Thiess *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **616**, 157 (2010).
- 19) P. Z. Takacs *et al.*: *Appl. Opt.* **38**, 5468 (1999).
- 20) F. Siewert *et al.*: *J. Synchrotron Rad.* **21**, 968 (2014).
- 21) K. Yamauchi *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 4028 (2002).
- 22) K. Yamauchi *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, 7129 (2003).
- 23) K. Yamauchi *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 2894 (2003).
- 24) H. Mimura *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 045102 (2005).
- 25) H. Yumoto *et al.*: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **616**, 203 (2010).
- 26) K. Yamauchi *et al.*: *J. Phys.: Condens. Matter* **23**, 394206

- (2011).
- 27) K. Tamasaku *et al.*: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **467-468**, 686 (2001).
- 28) D. Malacara (Editor): Optical Shop Testing (3rd ed. John Wiley & Sons, Inc.) 275 (2007).
- 29) W. Yashiro *et al.*: J. Opt. Soc. Am. A **25**, 2025 (2008).
- 30) F. Seiboth. *et al.*: Nat. Commun. **8**, 14623 (2017).
- 31) H. Takano *et al.*: Appl. Phys. Express **3**, 076702 (2010).
- 32) S. P. Krüger *et al.*: J. Synchrotron Rad. **19**, 227 (2012).
- 33) W. Chao, *et al.*: Opt. Express **20**, 9777 (2012).
- 34) J. Patommel *et al.*: Appl. Phys. Lett. **110**, 101103 (2017).
- 35) S. Bajt *et al.*: Light: Science & Applications **7**, 17162 (2018).
- 36) Y. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. **43**, 7311 (2004).
- 37) C. Morawe *et al.*: Opt. Express **16**, 16138 (2008).
- 38) H. Wolter: Ann. Physik **10**, 94 (1952).
- 39) H. Wolter: Ann. Physik **10**, 286 (1952).
- 40) S. Matsuyama *et al.*: Scientific Reports **7**, 46358 (2017).
- 41) J. Yamada *et al.*: Applied Optics **56**, 967 (2017).
- 42) K.-J. Kim and Y. V. Shvyd'ko: Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 030703 (2009).

### 著者紹介



#### 湯本博勝

公益財団法人高輝度光科学研究センター  
主幹研究員

E-mail: yumoto@spring8.or.jp

専門：X線光学，精密工学

#### 【略歴】

2008年3月大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 博士課程修了。工学博士。2008年4月より現職。

## Two-dimensional 100-nm focusing of hard X-ray with high-precision ellipsoidal mirror

**Hirokatsu YUMOTO** Japan Synchrotron Radiation Research Institute  
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, JAPAN

**Abstract** X-ray micro/nano-focusing mirrors employing the total reflection phenomenon are widely utilized as fundamental tools for advanced X-ray microscopic analyses at synchrotron radiation facilities and X-ray free electron laser facilities. Progress of fabrication technologies for high-precision mirror optics is an important subject for study to improve X-ray microscopic analyses. Here, we present a high-precision ellipsoidal mirror which can two-dimensionally focus hard X-rays with a single reflection. By enhancing mirror fabrication technologies including a precision surface finishing method and a surface profiler, an ellipsoidal mirror with a nanometer precision was developed. Focusing properties of the developed ellipsoidal mirror were evaluated at SPring-8. Two-dimensional focus with a beam size of 85 nm × 125 nm in full width at half maximum was demonstrated at an X-ray energy of 7 keV.