

トピックス

コヒーレント照射での X 線全反射ミラー

石川哲也^{1,2*}, 矢橋牧名², 玉作賢治¹, スポロフ アレクセイ², 山内和人³,
山村和也⁴, 三村秀和³, 斉藤 彰³, 森 勇藏^{3,4}

¹理化学研究所播磨研究所*, ²高輝度光科学研究センター放射光研究所,
³大阪大学大学院工学研究科精密科学専攻, ⁴大阪大学大学院工学研究科超精密科学研究センター

X-Ray Total Reflection Mirrors for Coherent Illumination

Tetsuya ISHIKAWA^{1,2}, Makina YABASHI², Kenji TAMASAKU¹, Alexei SOUVOROV², Kazuto YAMAUCHI³,
Kazuya YAMAMURA⁴, Hidekazu MIMURA³, Akira SAITO³ and Yuzo MORI^{3,4}

¹Harima Institute, RIKEN/SPring-8, ²JASRI/SPring-8,

³Department of Precision Science and Technology, Graduate School of Engineering, Osaka University,

⁴Research Center for Ultra-Precision Science and Technology, Graduate School of Engineering, Osaka University

Abstract

X-ray mirrors for coherent illumination demand much higher surface quality than is achievable with the conventional polishing techniques. Plasma chemical vaporization machining (CVM) and elastic emission machining (EEM) have been applied for x-ray mirror manufacturing. Figure error of a flat silicon single crystal mirrors made with CVM+EEM process was reduced to 2.0 nm peak-to-valley and 0.2 nm RMS. The machining process was also applied to make elliptical mirrors. One-dimensional focusing with a single elliptical mirror showed diffraction-limited properties with the focal width of 200 nm. Two-dimensional focusing with Kirkpatrick-Baez configuration gave a focal spot size of 200 nm × 200 nm.

1. はじめに

X 線全反射ミラーは、放射光ビームラインでの主要な光学要素の一つであり、全反射臨界角のエネルギー依存性を利用した高調波 X 線の除去、凹面鏡によるビームの集光・平行化などに広範に利用されている¹⁾。世界中の放射光施設で全反射ミラーを使っていない所は無い。これまで、X 線全反射ミラーでは、反射ビームのモーメント制御に関連して、形状誤差の中でもスロープエラーが重要な量とされ、Long Trace Profiler (LTP)²⁾を用いたマイクロラジアン領域でのスロープエラー計測が標準的な評価方法となっている。

SPring-8 をはじめとする第三世代光源は、小さな光源サイズを活かしたマイクロビーム形成に有利である。基本的には分散性がなく、ニュメリカルアパーチャの大きな全反射ミラーは、このための有力な方法として各施設で高性能化を目指した研究開発が進められている^{3,4)}。第三世代放射光での全反射ミラーの問題点の一つは、X 線の高い干渉性により、従来問題外であった微小な形状誤差がスペックルを生成し、反射ビームの空間的一様性を損ねることである。これを解決するためには、今までの加工方法や評価方法から一歩進んだ技術開発が必要であることは、この数年間 ESRF/APS/SPring-8 の 3 施設のオプティクス関係者の間では共通の認識となっていた。またこの開発は、X 線ビームが完全に空間的コヒーレンスを持つことが期待される第四世代放射光 (XFEL) の光学系を考える上でも非常に重要である。

SPring-8 では、かねてから大阪大学工学部精密科学科で開発されていたプラズマ CVM 加工法^{5,6)}や EEM 加工法⁷⁻⁹⁾に注目していたが、平成13年初頭に阪大側で放射光ミラー加工の準備が整い、SPring-8 側でも1000 m ビームライン¹⁰⁾が超精密測定に対応すべく整備され大面積コヒーレントビームでの精密測定が可能となった結果、まさに卒啄同時 (どちらが卒でどちらが啄かは敢えて議論しないが) のタイミングで「世界最高の X 線全反射ミラーを作る」共同研究開発プロジェクトが開始された。

本稿では、阪大の持つ最先端表面加工技術と SPring-8 のコヒーレント X 線ビームを用いた最先端評価技術が出会い、共同研究が開始されてから1年半余りの間に X 線ミラーの加工と評価にもたらされた変化について報告する。大阪の手 (加工技術) と兵庫の眼 (評価技術) との出会いが、従来の X 線ミラーの諸概念を根本的な部分で変革しつつあると感じ取って頂ければ幸甚である。

2. コヒーレント X 線

SPring-8 の1000 m ビームラインでは、蓄積リング内の電子ビームの垂直方向のサイズが10 μm 程度と小さくしかもアンジュレータからの X 線の垂直発散角が小さいために、垂直方向には回折限界に近い X 線ビームとなる¹¹⁾。これを遠くで観測した場合、空間的コヒーレンスが非常に高くなるが、直感的に把握していただくためには Fig. 1 を見て頂くのがよいだろう¹²⁾。これは、光源から約1000 m 下流に置かれたビームライン真空と大気を遮断するべ

* 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: 0791-58-2805 FAX: 0791-58-2807 E-mail: ishihawa@spring8.or.jp

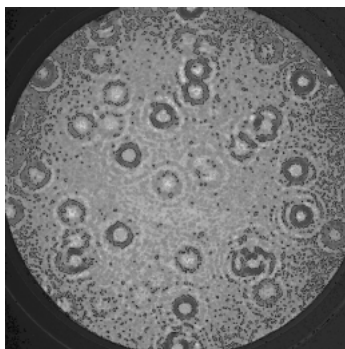


Figure 1. Airy pattern from a Be window observed at the 1000 m end-station of BL29XUL in SPring-8. 0.48 mm × 0.48 mm field of view.

リリウム窓のエネルギー16 keVでのX線イメージをその3 m後方に置かれたイメージ検出器で観察したものである。このベリリウム窓は表面粗度0.1 μm RMSに研磨されたものであり、それまでSPring-8で標準的に使っていた1 μm RMSのものでは窓からの散乱イメージがビームに重畳されて多くのイメージング測定でデータ劣化の原因となっていたのを改善するために製作されたものである。全体的なビームの一様性はこれまでのものと比べて大幅に改善されたが、ところどころに同心円状の干渉パターンが観察される。これは可視光レーザービームで埃のついたレンズを使ったときに観察されるAiryパターンそのものであり、ベリリウムの鏡面研磨時に用いられた研磨材が残存しているために生じている。これから示唆されるように、コヒーレントX線に対する光学素子形状は従来のインコヒーレントX線用のものと比較して、ずっと高精度なものが要求される。逆にコヒーレントX線を用いた評価は従来問題とならなかった微小な形状誤差にも敏感である。このことを利用して、全反射ミラーの評価研究が進められた。

3. コヒーレント照射で要求されるミラー形状精度

コヒーレント照射時に要求されるミラーの形状精度は直感的に従来のインコヒーレント照射の場合より厳しくなることは明らかであるが、より定量的に抑えておくことがミラー加工精度・計測精度を決定する上で重要である。従来広く用いられている幾何光学を基礎とした光線追跡法によるミラーの性能予測はコヒーレント照射では破綻することは明白であり、これに換わって波動光学的な性能予測手法を整備する必要がある。このために、Fresnel-Kirchhoff積分の数値解法コードを作製した¹³⁾。

このコードを用いて、ミラーの形状誤差モデルとして完全平面ミラー上に高さを1.0 nmに固定した二次元ガウシアンパンプを置き、ガウシアン幅(2σ)を変数として反射波の強度分布・位相変化を計算した。この結果をFig. 2に示すが、0.1 mm程度の幅でも、反射波の強度分

布にある程度の影響を与えている。つまり、コヒーレント照射でのX線ミラーでは、空間分解能0.1 mm程度で形状誤差がサブナノメートルの加工が必要だと結論される。プラズマCVMとEEMを組み合わせた加工方法は原理的にこの精度での加工が可能であり、高精度形状計測ができれば、そのデータをもとに形状修正を行うことも可能である。しかしながら、今まで広く用いられているLTPによる形状測定の空間分解能1 mmでは不足しており、より空間分解能の高い形状計測法を開発する必要があることを示している。

高空間分解能の形状計測方法としては、Zygo New Viewなどの顕微干涉計測方法があるが、これだけでは視野が狭くX線ミラーのように大面積で高精度計測を行う用途には向いていない。そこで我々は顕微干涉計測法で計測した局所的形状を大型フィゾー干涉計で計測したグローバルな形状を用いてつなぎ合わせ、全体として大面積かつ高空間分解能形状計測を可能とするマイクロステッチングインターフェロメーターを作製した¹⁴⁾。この方法で、0.1 mm以下の空間分解能で0.1 nm (P-V) オーダーの形状計測が可能となった。この方法では、局所的なデータを貼り合わせてグローバルなデータを作るため、絶対精度に問題があるが、個々の計測結果の再現性が非常に良好であること、そのデータを用いて前述のFresnel-Kirchhoff積分で予測した反射波のイメージが測定結果を非常に良く再現すること、またこれと独立に測定された反射波の強度分布から逆問題を解いてミラー形状を導出した結果¹⁵⁾と良好な一致を見ること、の3点から十分な絶対精度をもつ計測方法だと考えている。

4. 平板ミラー

コヒーレントX線照射による全反射ミラー評価は、平板ミラー試料から始められた。Si(001)面を従来法で研磨したミラーの一部をプラズマCVM法で研磨し、さらにその一部をEEM法で研磨した試料を作成し、各々の場所での単色X線(20 keV)反射ビーム内の強度分布を浜松ホトニクス製X線スーミング管で、ミラー検出器間の距離(カメラ長)を変えて観察した¹⁶⁾。Figure 3は、マイクロステッチングインターフェロメーターによるそれぞれの場所での形状計測データを示す。従来法研磨での表面形状は凹面となっているが、プラズマCVM法で空間波長5 mm以上の形状誤差が修正され、P-Vで3.5 nm程度の平面まで到達する。さらにEEM法では空間波長0.1 mm程度までの形状修正が可能であり、P-Vで2 nmの平面まで到達した。Figure 4にカメラ長166 mm, 566 mm, 966 mmでの反射ビームのイメージを示す。従来法による研磨では、凹面形状に対応して距離によるビーム幅の減少が観察される。また、ビーム内部には干渉効果による非常に強いフリッジコントラストが観察される。プラズマCVM法での研磨面では、形状が平面に近づくために距離によるビーム幅

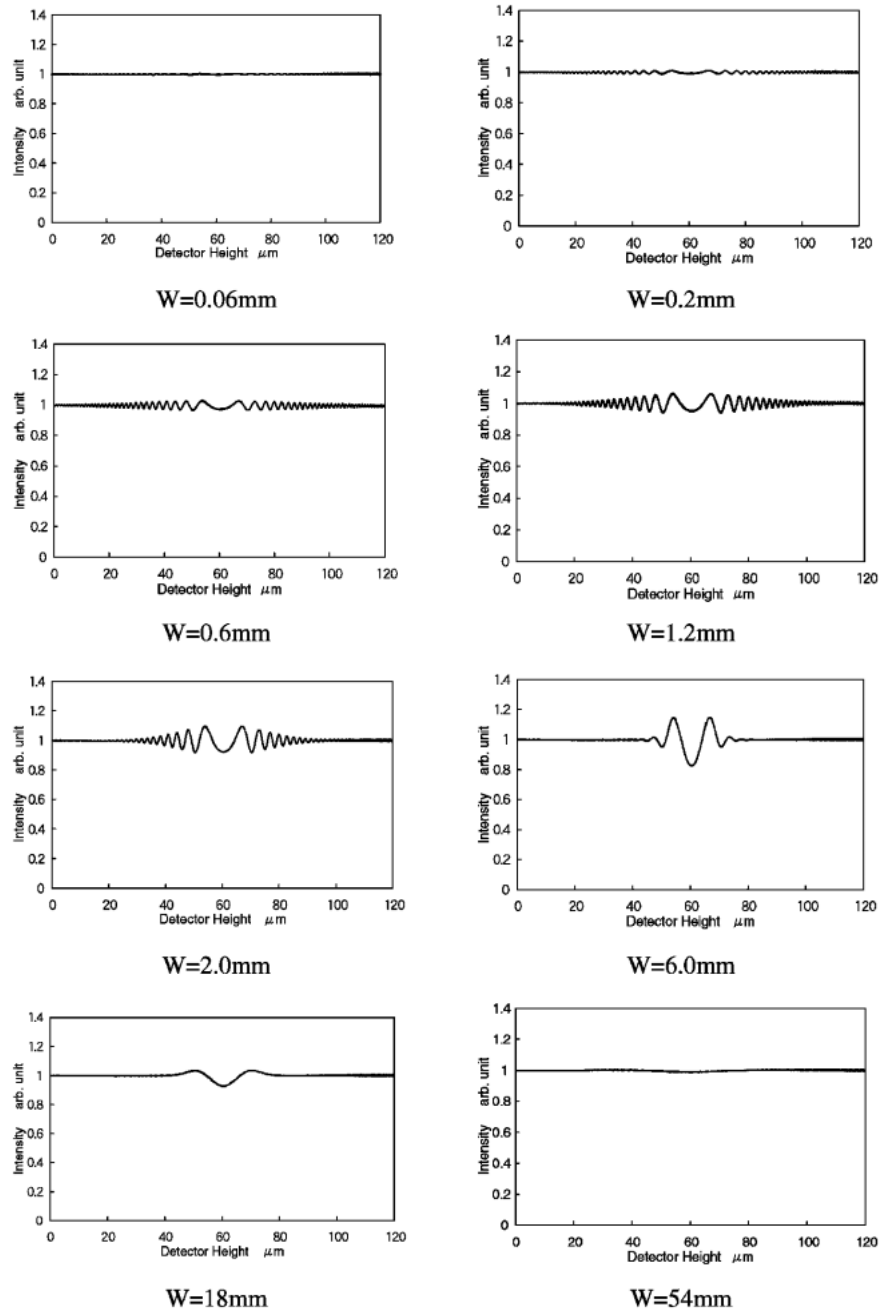


Figure 2. Calculated intensity distributions at 966 mm downstream of a mirror having a 2-dimensional Gaussian bump of 1 nm height and width W in 2σ . Intensity fluctuation caused by Fresnel diffraction at the mirror edges was subtracted.

の変化はなくなる。ビーム内部の干渉コントラストのレジビリティも従来法研磨面に比べると低くなるが、それでも反射ビーム全面に残っている。さらに EEM 法で修正した研磨面では、ビームの両端にエッジの効果による強いコントラストのフリッジがあるものの、ビーム中央部ではほぼ一様なコントラストを与える。

3種類の異なる研磨方法で仕上げた表面のそれぞれで、マイクロステッチングインターフェロメータでの計測結果を境界条件として用いて Fresnel-Kirchhoff 積分を数値計算して得た反射ビーム内の強度分布と実測値を比較した結

果を **Fig. 5** に示す。計算結果は、測定データの傾向をほぼ再現している。計算値の方により細かい構造が現れているが、検出器のポイントスプレッド関数でのコンボリューションを行えば一致の程度はさらに向上する。

一方、異なるカメラ長での測定データから、Gerchberg-Saxton アルゴリズム¹⁷⁾によって位相を回復することによって反射表面形状を計算する逆問題の解法コードも整備された¹⁵⁾。この方法で得られた表面形状はマイクロステッチングインターフェロメータでの計測結果と良く一致する。

この段階で、オフラインでのマイクロステッチングイン

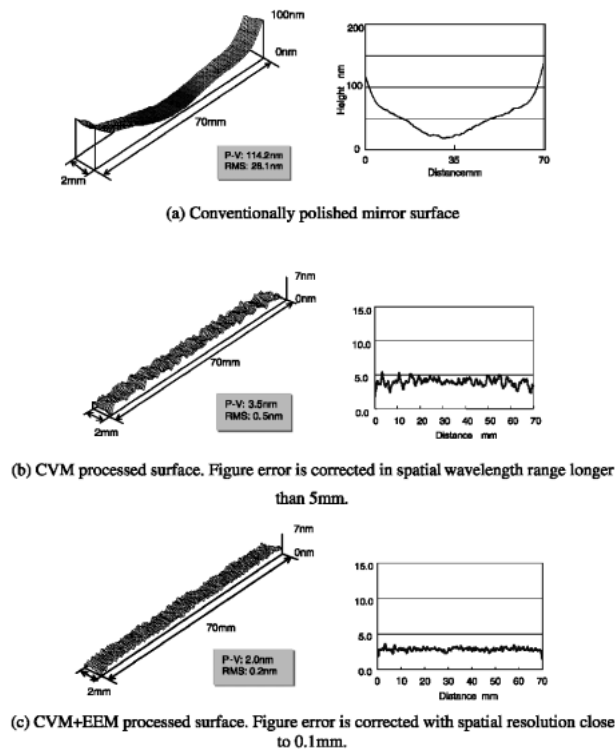


Figure 3. Surface figures measured with micro-stitching interferometer. (a) Conventionally polished surface, (b) CVM processed surface and (c) CVM+EEM processed surface.

ターフェロメータによる形状計測データを用いた Fresnel-Kirchhoff 積分の数値解による性能予測と X 線を用いて測定された結果が概ね一致したことはここで開発された(a)形状計測方法が正しく、(b)数値計算方法も正しく、また(c) X 線による計測システムが期待通りコヒーレント照射を実現していることを示している。このことは、オフラインの形状計測からミラー性能が波動光学的に予測可能なことを意味し、しかもプラズマ CVM 加工や EEM 加工では数値制御による形状修正が可能であることから、オフラインでの形状計測結果を用いての形状修正が可能であり、最終形状に到達するまでの全工程をオフラインで行えることを示すものである。

5. 非球面ミラー^{18,19)}

ここまでの平面ミラーの開発・評価は平成13年2月から6月にかけて行われ、この開発過程で形状計測方法と波動光学計算方法に大きな進展があった。これらの成果に基づき、平成13年の秋に非球面ミラーの開発研究に着手した。具体的には、楕円面ミラーを2枚組み合わせることで良く知られた Kirkpatrick-Baez (KB) 配置²⁰⁾での二次元集光系で回折限界集光を実現することを当面の目標とした。整形ミラーでの二次元集光は湾曲ミラーを用いる方法に比べ長時間安定性に勝ることが容易に想像でき、フォトンファクトリで開発が進められた経緯があるが^{21,22)}、SPring-8

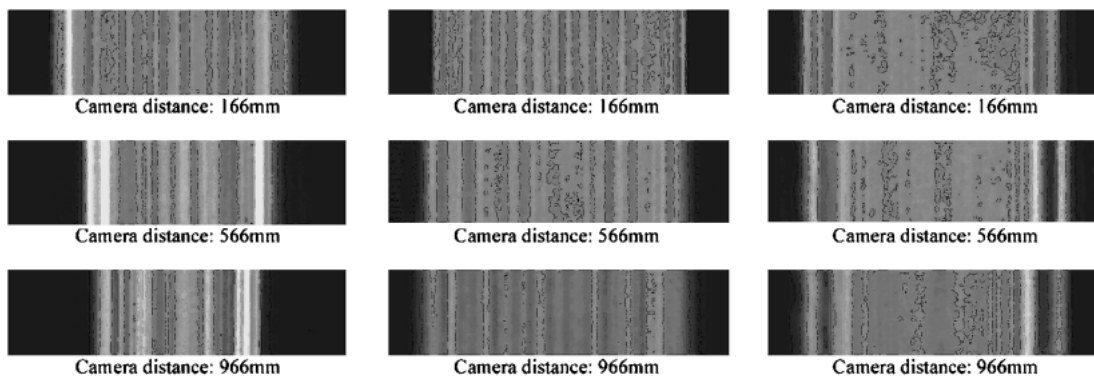


Figure 4. X-ray images of the reflected beams from the conventionally polished mirror (left column), CVM processed mirror (center column) and CVM + EEM processed mirror (right column) at camera distance of 166 mm (1st row), 566 mm (2nd row) and 966 mm (3rd row).

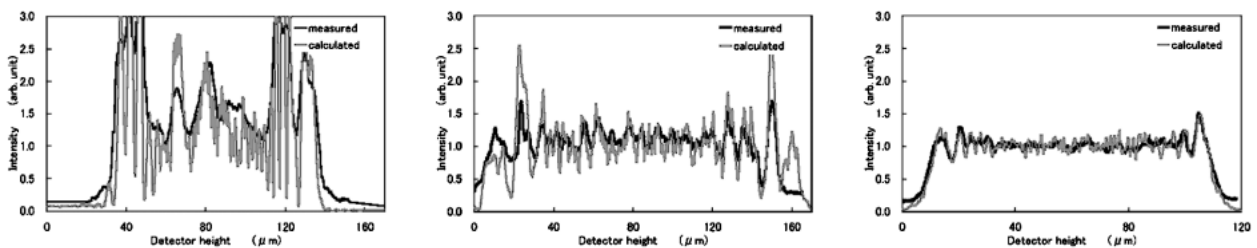


Figure 5. Measured (black) and calculated (gray) intensity distributions for the conventionally polished mirror (left), CVM processed mirror (center) and CVM + EEM processed mirror (right) at camera distance of 966 mm.

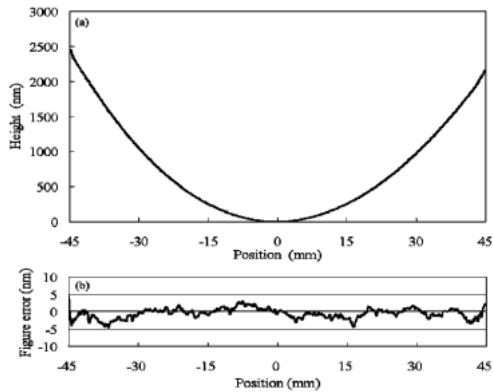


Figure 6. Figure (a) and figure error (b) of the manufactured elliptical mirror surface.

でも微小領域蛍光分析への応用を目指した開発が進められてきた²³⁾。しかしながら、従来の研磨方法による整形ミラーではスロープエラーが大きいため、サブミクロンの焦点サイズを得るためにはワークディスタンスを数センチ以下とする必要があった。今回平板ミラーで達成された技術水準を考慮すると、10~20センチのワークディスタンスを持つKBミラー集光系が現実的に可能であり、より広範な応用を考慮して長焦点距離のKB集光系を開発することとした。

ミラー材質は平板ミラーと同じく、Si単結晶の(001)面を用いた。最終的には焦点距離300 mmと150 mmの2枚の楕円ミラーでKB配置を構成することとし、最初に焦点距離300 mmのミラーによる一次元集光テストを行った。ビームの入射方向に対して100 mm、その垂直な方向に対しては2 mmの領域において非球面形状を作製した。実験では有限な大きさを持つ光源から出た光を焦点で絞り込むことになるが、形状を決定するにあたり光源を点と考えそこから出た光が1点に集光する楕円形状を採用した。**Figure 6**にミラーの設計形状と加工されたミラーの形状誤差を示す。非球面形状にもかかわらず、P-V: 7.79 nm, RMS: 0.92 nmの高精度の形状を実現している。形状計測の再現性はP-V: 1 nm程度であり、追加加工を行うことで形状誤差をさらに小さくすることも可能である。X線による評価は1 km長尺ビームラインを使用するため光源からミラーまでの距離を1000 mとした。Siで20 keVのX線まで使用できるように、最大照射角度を1.55 mradとして設計した。

Figure 7は理想形状の場合の集光強度分布の計算結果である。計算は実際の測定に合わせて、入射X線を15 keV ($\lambda = 0.8 \text{ \AA}$)、入射角度を1.4 mrad、入射スリットの幅を100 mmとし、Fresnel-Kirchhoff積分に基づく計算を行った。この結果は、波動光学的な回折限界の集光強度プロファイルを表している。集光光学系のミラーの設計において、 f を焦点距離、 λ をX線の波長、 D をミラーの開口

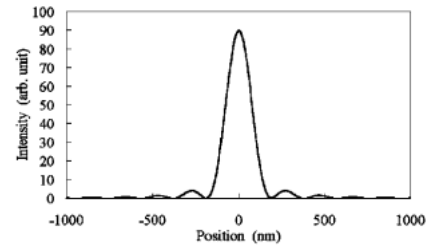


Figure 7. Focused beam profile calculated from ideal elliptical shape by using Fresnel-Kirchhoff integral.

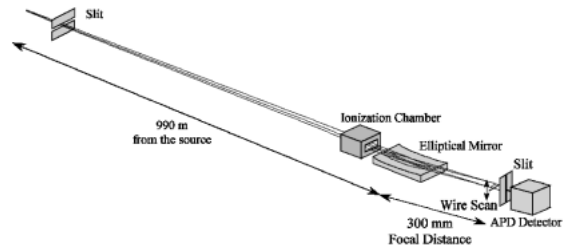


Figure 8. Experimental setup at BL29XUL of SPring-8.

とすると、集光強度プロファイルの第一極小点間で定義されるスポットサイズ d は、

$$d = 2.0 \times \lambda f / D \quad (1)$$

で与えられる。ここでは、入射角度が1.4 mradであることから、140 μm の開口のミラーと見なせ、それぞれを代入すると、 $d = 0.342 \mu\text{m}$ となり、当然のことではあるがFresnel-Kirchhoff積分の計算結果と一致する。

集光評価実験は、1000 mビームラインで**Fig. 8**に示す配置で行われた。集光強度プロファイルはナイフエッジ法により測定した。ミラー表面に対して垂直に、直径200 μm の金ワイヤを走査させ、透過X線強度をアバランシェフォトダイオードで測定した。ワイヤの走査はピエゾステージを用いて高い走査精度を得た。ワイヤのビームに対する傾きの影響を除去するために、25 μm のスリットを通過してきた光を測定した。測定された強度データをイオンチェンバによる入射X線強度の測定値によって規格化し、そのデータを走査間隔で微分することによりX線の一次元強度分布が求められる。

Figure 9にこのようにして得られた一次元強度プロファイルを示す。インセットはワイヤ走査時の透過強度を示す。測定は2回行い、それぞれ50 nmおよび25 nmステップでワイヤを走査した。また、**Fig. 6(b)**の形状計測データを用いてFresnel-Kirchhoff積分を計算した集光強度分布を実線で示した。半値幅で200 nmの集光度を達成しており、ほぼ回折限界に到達している。測定された集光効率は80%でありゾーンプレートに比べてはるかに高い値となっている。測定プロファイルは計算結果とほぼ一致し、

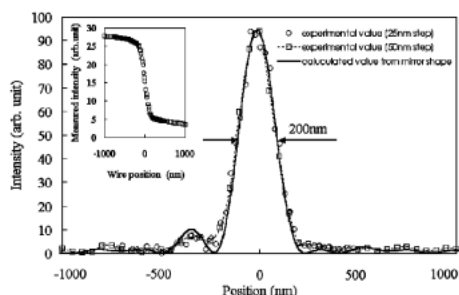


Figure 9. Measured and calculated beam profiles at the focal point. Solid line shows the calculated profile with measured surface profile. The profiles were derived by differentiating transmission profiles of wire-scanning in the inset.

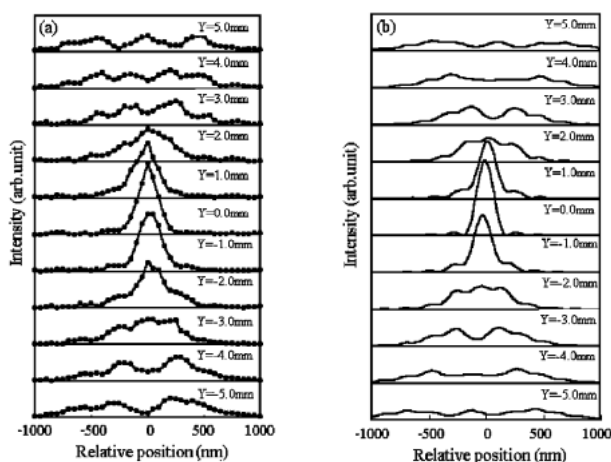


Figure 10. Measured (a) and calculated (b) cross-sectional intensity profile at every 1 mm distance in the beam direction over the ± 5 mm region from the best focus position.

特に特徴的な左サイドピークについても位置と高さが一致している。このことから以下の項目が確認されたと言える

- 1) ミラーの絶対形状計測が正確に行われている
- 2) ナイフエッジ法による強度分布計測が正確に行われている
- 3) 理論計算により X 線集光強度分布が正しく算出されている

1)~3)の項目のすべてが満足されなければ、計算結果と実験結果は一致しない。すなわち平面ミラーで開発された計測方法、計算方法は曲面ミラーにも適用可能であり、さらに形状修正を行うことでミラーの形状精度を向上させ、理想強度分布により近い集光を行うことが可能であることを示している。

このミラーでの集光特性を更に詳しく調べるために、ワイヤ位置を集光点の前後で動かして強度プロファイル測定を行った。**Figure 10(a)**に位置と強度プロファイルの関係を示す。測定は、最もビームが絞られている位置から 1 mm 間隔で 10 mm の領域において行った。**Figure 10(b)**は理想形状でのシミュレーション結果であり実験結果と傾

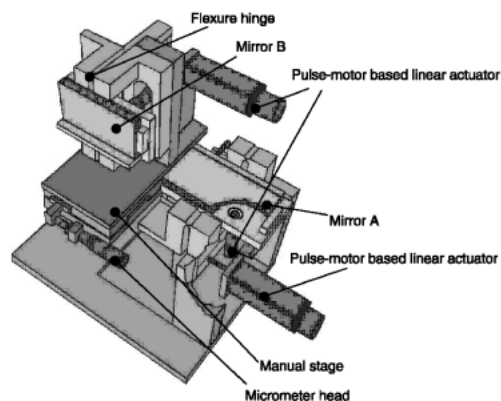


Figure 11. Schematic drawing of a K-B mirror aligning unit.

向が一致している。このことは焦点近傍での干渉による光の強めあいと弱めあいが観測されたものであり、このような X 線の波動光学的挙動からも、ほぼ回折限界に近い集光状態であることが確認できる。

同様に焦点距離 150 mm の楕円ミラーの加工、形状計測、X 線評価を行い焦点距離 300 mm のミラーと組み合わせて KB ミラーを構成した。二枚のミラーの方位調整を行うための機構を試作し (**Fig. 11**), 二次元集光試験を行った結果、ベストの状態には追いついていないものの $200 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$ の集光スポットサイズを確認した (**Fig. 12**)。

6. 今後の開発項目

ナノフォーカス光学系としての KB ミラーが実現し、今後は応用に進んでいく予定であるが、光学素子・光学系としても以下の開発項目が残っている。

- KB ミラー調整の自動化：ベストフォーカスに持っていくプロセスを自動化し、光学調整になじみの薄い利用者でも簡単に調整できるようにする。目標としては、スタートから 1 時間以内ですべての調整を終了することである。
- 前置光学系の振動除去：SPring-8 の 1000 m ビームラインには、液体窒素冷却二結晶分光器が設置されており、窒素循環による振動が除去しきれていない。さらに振動抑制方式の開発を続けるとともに、フィードバックによる安定化を図ることにより、見かけの光源サイズの増大を抑えることを計画している。
- コーティング：白金等のコーティングによりニュメリカルアパーチャを増大させると、さらに 1 桁小さい集光サイズが実現可能である。しかしながら、現状でのコーティング方法の殆どは CVM + EEM で形成された理想に近い面精度を壊す方向に働くため、面精度を損なわずに金属コーティングを行う方法を開発する必要がある。
- 環境安定化：微小集光ビームの応用では試料走査等により計測に時間がかかることが想定されるため、KB ミラーには長時間安定性が求められる。これを実現するた

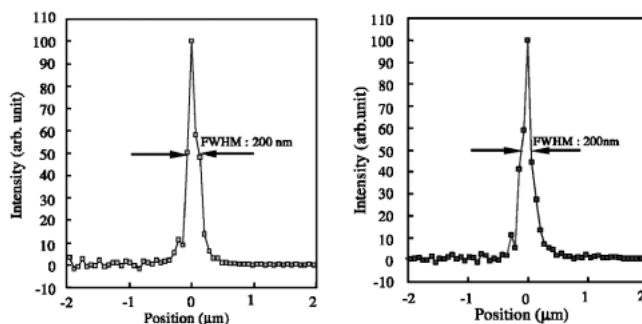


Figure 12. Two-dimensional focusing property of the K-B mirror. Horizontal (left) and vertical (right) profiles.

めの、恒温環境装置等の開発の必要性があると考えている。

7. おわりに

大阪大学で開発された超精密表面形成法である CVM + EEM プロセスを放射光 X 線ミラーの製作に適用した。その結果、従来方法では困難であったコヒーレント X 線に適合するミラーが製作可能となった。マイクロステッチングインターフェロメータによる形状計測と Fresnel-Kirchhoff 積分の数値解法コードの整備により、従来の光線追跡法が原理的に役に立たないコヒーレント X 線照射での X 線ミラー性能予測を可能とした。CVM + EEM プロセスによるミラー形成は、非球面形状にも有効であることを楕円面ミラーを例として示し、世界初の X 線領域でのミラーを用いた回折限界集光に成功した。楕円面ミラーを 2 枚組み合わせた KB 配置により、 $200 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$ の集光スポットサイズに到達した。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費 (COE 形成基礎研究費 08CE2004) ならびに新技術事業団 (現科学技術振興事業団) からの研究費を受けて行われたものであることを付記し、ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) For example, G. E. Ice: *X-Ray Spectrometry* **26**, 315 (1997).
- 2) P. Z. Takacs: *Nucl. Instr. Methods A* **246**, 227 (1986).
- 3) O. Hignette, J. Peffen, V. Avaro, E. Chinchio and A. Freund: *Proc. SPIE* **4501**, 43 (2001).
- 4) G. E. Ice, J-S. Chung, J. Z. Tischler, A. Lunt and L. Assoufid: *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 2635 (2000).
- 5) Y. Mori, K. Yamamura and Y. Sano: *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 4620 (2000).
- 6) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura and Y. Sano: *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 4627 (2000).
- 7) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo: *Precis. Eng.* **9**, 123 (1987).
- 8) Y. Mori, K. Yamauchi and K. Endo: *Precis. Eng.* **10**, 24 (1988).
- 9) K. Yamauchi, H. Mimura, H. Inagaki and Y. Mori: *Rev. Sci. Instrum.* (2002) *in press*.
- 10) T. Ishikawa, K. Tamasaku, M. Yabashi, S. Goto, Y. Tanaka, H. Yamazaki, K. Takeshita, H. Kimura, H. Ohashi, T. Matsushita and T. Ohata: *Proc SPIE* **4145**, 1 (2001).
- 11) M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: *Phys. Rev. Lett.* **87**, 140801 (2001).
- 12) S. Goto: *Proc. ESRF-APS-SP8 Optics Workshop*, to be published.
- 13) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Kanaoka, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori: *Proc. SPIE* **4782** (2002) *in press*.
- 14) H. Mimura et al.: *in preparation*.
- 15) A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa, Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura and A. Saito: *J. Synchrotron Rad.* **9**, 223 (2002).
- 16) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, A. Saito, H. Kishimoto, Y. Sekito, M. Kanaoka, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: *Proc. SPIE* **4501**, 30 (2001).
- 17) R. W. Gerchberg and W. O. Saxon: *Optik (Stuttgart)* **35**, 237 (1972).
- 18) K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Miura, Y. Sano, A. Saito, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku, T. Ishikawa and Y. Mori: *J. Synchrotron Rad.* **9** (2002) *in press*.
- 19) Y. Mori, K. Yamauchi, K. Yamamura, H. Mimura, Y. Sano, A. Saito, K. Ueno, K. Endo, A. Souvorov, M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: *Proc. SPIE* **4782** (2002) *in press*.
- 20) P. Kirkpatrick and A. V. Baez: *J. Opt. Soc. Am.* **38**, 766 (1948).
- 21) Y. Suzuki, F. Uchida and Y. Hirai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, L1660 (1989).
- 22) Y. Suzuki and F. Uchida: *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 578 (1992).
- 23) S. Hayakawa, N. Ikuta, M. Suzuki, M. Wakatsuki and T. Hiraoka: *J. Synchrotron Rad.* **8**, 328 (2001).