

## 実験技術

## 簡便なミラー表面の形状測定

菅原 英直<sup>\*</sup>, 柳原 美廣<sup>\*\*</sup>, 浅岡 聖二<sup>\*\*\*</sup>, 前沢 秀樹<sup>\*\*\*</sup><sup>\*</sup>群馬大学教育学部, <sup>\*\*</sup>東北大学科学計測研究所,  
<sup>\*\*\*</sup>高エネルギー物理学研究所放射光実験施設Performance of a Convenient Profiler for  
Measurement of Mirror Surface FigureHidenao SUGAWARA<sup>\*</sup>, Mihiro YANAGIHARA<sup>\*\*</sup>,  
Seiji ASAOKA<sup>\*\*\*</sup> and Hideki MAEZAWA<sup>\*\*\*</sup><sup>\*</sup>Faculty of Education, Gunma University<sup>\*\*</sup>Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University<sup>\*\*\*</sup>Photon Factory, National Laboratory for High Energy Physics

In order to estimate mirror surface figures over rather wide area, we have developed a convenient profiler. It is usable even if a mirror is under exposure to synchrotron radiation. It consists of a small-sized laser source and a position sensitive detector which are mounted on X and Y platforms driven by stepping motors. After the laser light is incident on a mirror surface, the reflected laser light is detected with the position sensitive detector. When a set of the laser source and the detector is scanned parallel to the mirror surface, we can know variation in position on the detector surface where the laser light reflected from the mirror surface falls. Since this position variation arises from variation in the angle of reflection of the laser light on the mirror surface, it is reduced to a slope curve for the mirror surface parallel to an axis along which the laser light is scanned. Therefore, we can derive the surface profile by integrating the slope curve along the scanning axis. The Application of the profiler to mirrors under exposure to high power synchrotron radiation is described.

## 1. はじめに

放射光光源は第2世代から第3世代へと発展を続け、ますます大強度化、高輝度化へと向かっている。これにともなって、ビームラインおよび各種光学系を構成する光学素子の耐熱対策がますます

ます急を要する問題となっている。現状のままでは、折角の光源の性能がビームライン光学系の耐熱限界によって制限されてしまう恐れさえある。耐熱対策が最も急がれるのは、ミラーや回折格子、分光結晶等の光学素子である。入射する放射

<sup>\*</sup> 群馬大学教育学部

〒371 前橋市荒牧町 4-2

TEL 0272-20-7289 FAX 0272-20-7292

光による熱負荷のためこれらの光学素子に変形が生じれば、分解能の低下や信号強度の減少として直接実験結果の質に影響してくるからである。このため耐熱光学素子の素材の探索や冷却機構の開発に向けた努力が続けられており、本誌にもすでにいくつかの解説記事が掲載されている<sup>1-2)</sup>。

一方、このような耐熱光学素子関連の開発研究には光学素子の面精度や表面形状を測定して評価する装置が必要であるが、光学素子表面の粗さや形状変化を、できれば熱負荷を加えながら、定量的に「その場」観測できる手段が望ましい。ここでは、そのようなミラーの表面形状を測定するために我々が開発した装置を紹介する。

放射光ミラーの表面形状の測定に必要な条件としては、測定精度が高く、再現性がよいことはもちろんであるが、平面に限らず、球面、非球面にも対応できること、1 m 程度の長いミラーの形状も測定できること、実験室ホールのノイズや振動の多い環境でも測定に耐えること、超高真空中で放射光の照射を受けて使用状態にあるミラーについても適用できること、ビームラインに設置して使う場合一般にはスペースを余りとれないので小型のものが望ましいこと、特定の場所から他の場所へ移動が容易であること等であろう。このように放射光ミラーの表面形状測定装置には満足すべき条件が多いので、なかなかすべてを満たすのは難しく、実際には適当な妥協を求められるのが現状である。

ミラーの表面粗さを測定する装置には、レーザー光や白色光の干渉を利用した市販品がある。しかしこれらは表面粗さの測定については高い精度を示すけれども、表面の測定範囲が mm オーダーであるため、数 10 cm から 1 m の長さを必要とする放射光ミラーの形状測定には利用できない。長いミラーの表面形状測定に対応できるプロファイラーには市販品はなく、開発研究が必要となる。すでにこれまでにレーザー光の干渉を利用した長尺ミラー対応のプロファイラーがいくつか

提案され、開発されている<sup>3-6)</sup>。しかし干渉を利用した装置は振動に敏感で、放射光実験室のホールで測定するにはかなり厳しいであろうし、また球面や非球面の表面の測定に対応するのも難しいであろう。それにもかかわらず、ESRF ではすでにこの種のプロファイラーをビームラインに採用している<sup>7)</sup>。放射光光源に最も近いミラーの熱変形を、プロファイラーでその場観測によってモニターし、ミラーの背面に取り付けた数個のピエゾ素子にフィードバックしてミラーの変形をキャンセルするものである。しかしこのような装置はたいへん大がかりであり、いろいろなビームラインに共用するというわけにはいかないし、製作コストもまた高価である。

ここで述べる我々が開発したプロファイラーは、測定すべきミラー面にレーザー光を入射し、その反射光を位置敏感型検出器で検出することによって表面の凹凸形状を測定するものである。いわゆるオプティカルレバーの原理である。これは、小型軽量、取り扱いも簡単で、製作費も安価でありながら、 $0.5 \mu\text{rad}$  程度の表面の傾きを十分観測することができる。また平面に限らず、球面および非球面にも対応できる。超高真空中で放射光を受けているミラーに対しても、真空の外から測定することができる。このプロファイラーはこれまでに放射光ミラーのベンディング機構のテスト<sup>8)</sup>と高エネルギー物理学研究所放射光実験施設(KEK-PF)でビームラインに組み込まれているミラーについての測定、および放射光の熱負荷によるテストミラーの表面変形の観測<sup>9)</sup>に使われた。ここでは、この装置の概要を述べたあと、KEK-PFで行った後者の実験について述べて、このプロファイラーの有用性を示したい。

## 2. 表面形状測定装置の概要

我々が開発した表面形状測定装置の概略を図 1 に示す。上が上面図、下が正面図である。レーザーをアオリと回転機構付きホルダーに取り付け、

被測定物の表面から反射されたレーザー光を半導体位置敏感型検出器 D で検出する。この検出器も回転と上下、左右の微調機構付きステージに取り付けられる。そして、レーザーと検出器はそれらの微調機構と共に水平方向、垂直方向の駆動台 X, Y 上に固定されて、パルスモーターによって上下左右に走査される。ここで用いた駆動台は、X, Y ともに移動量 100 mm のものであるが、ミラー表面の走査範囲を大きく必要とする場合には、当然移動量の大きい駆動台を選ぶ必要がある。

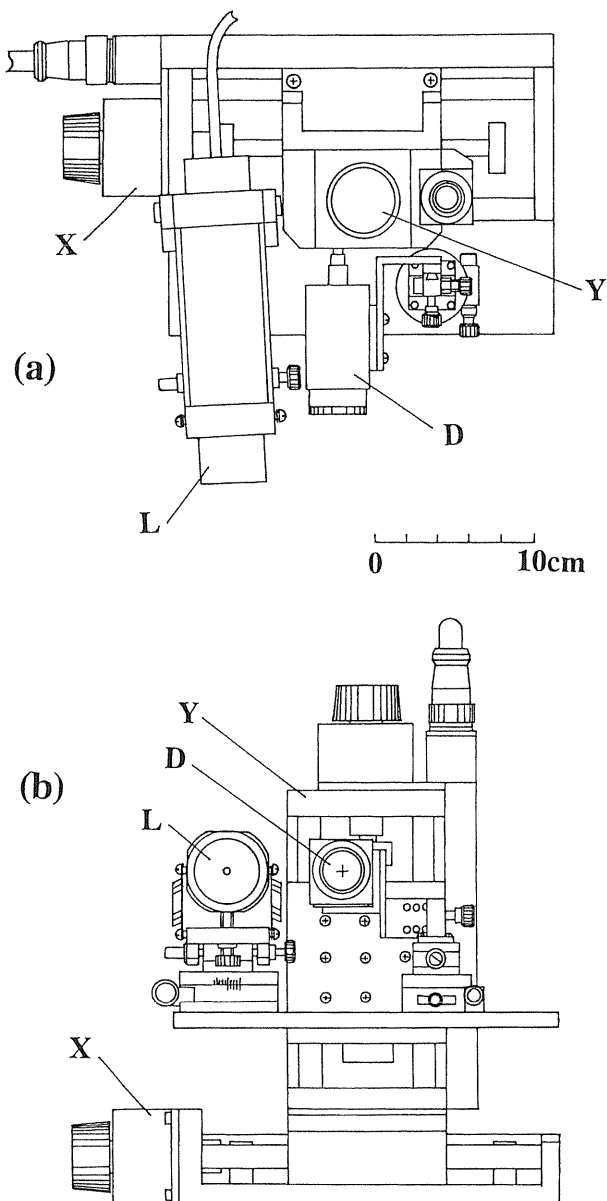


Figure 1. Design of the profilometer. (a), top view; (b), front view. L, laser source; D, position-sensitive detector; X and Y, platforms for horizontal and vertical scan, respectively.

る。駆動台の精度が測定の精度や再現性に直接影響するので、この駆動台の選択は重要である。

使用したレーザーは、発振出力 0.5 mW の HeNe レーザーで、ビーム径は 0.8  $\phi$ , 拡がり角は 1.2 mrad である。また検出器は、浜松ホトニクス製のものであり、検出素子の中心を原点として、光スポットの重心の位置を  $x, y$  座標で表示する。 $x, y$  座標は、いずれも  $-5 \text{ V} \sim +5 \text{ V}$  の 3 桁の電圧値として出力され、1 V が検出素子上の 1 mm に対応している。有効受光面は  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  である。検出器の位置検出誤差は  $\pm 1\%$ , 光量変化による誤差は  $\pm 1\%$ , ドリフトは  $\pm 0.5\%/\text{day}$  である。レーザー光以外の背景光が検出器に入るのを避けるため、検出器の直前に 6328 Å 用干渉フィルターを取り付けた。また、検出器には、検出可能な光量レベル範囲が設定されているので、光量がこの範囲に入るように減光フィルターを用いた。このため、検出器に入射するレーザー光は約 3% に減じられている。計測時間はパルスモーターの駆動速度によって決定される。ここで用いたものは X, Y 方向とも、 $2 \mu\text{m}/\text{sec}$  から  $10 \text{ mm}/\text{sec}$  の間で適当に選ぶことができる。パルスモーターの駆動は GP-IB を介して、パーソナルコンピューターで制御できる。位置敏感型検出器の出力も容易にコンピューターに取り込むことができる。

図 2 は、プロファイラーと測定すべきミラーの間の幾何学的関係を示すものである。ミラー面から L だけ離れた位置に、位置敏感型検出器の受光面がある。その原点が O である。ここでミラーの表面上の 1 点 P に AP 方向からレーザー光が入射し、その反射光が検出器の原点 O に向かうものとする。このとき、P 点の法線は PQ である。いま例えば熱負荷により素子表面が変形し、反射光が PB に向かったとすると、検出器からは、B 点の  $x, y$  座標が出力されるので、この  $x, y$  から P 点の法線の角度変化が  $\Delta\theta_x = x/2L$ ,  $\Delta\theta_y = y/2L$  のように求められる。この  $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$  は法

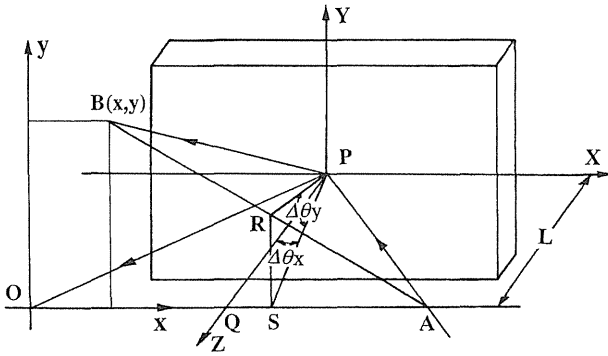


Figure 2. Geometry between the profiler and a mirror whose surface figure is measured.

線の角度変化であるが、結局 P 点での接線の角度変化に対応している。パルスモーター駆動台により P 点を X 方向, Y 方向に走査すれば、光学素子の任意の方向について表面形状を測定できることになる。この場合には X 方向の走査については  $\Delta\theta_x$  を, Y 方向の走査については  $\Delta\theta_y$  をそれぞれの方向の移動距離で積分すれば, それぞれ X 方向, Y 方向の素子断面の表面形状そのものを得ることができる。ただし, ミラーの様な膨張や収縮のような, ミラー表面に平行な変化は観測にかからない。この量は積分定数に相当する。

### 3. 放射光照射によるミラーの表面変形の測定

製作したプロファイラーの測定精度, 測定の再現性, 走査中の駆動台からの振動ノイズ等を実験室で調べ, 十分測定に叶うことを確かめたあと, KEK-PF のアンジュレータビームライン BL-28 で, 放射光照射によるミラー表面の形状変形について 2 種類の測定を行った。1 つはビームラインに組み込まれている分岐ミラーの表面形状の測定であり, 他はビームラインに照射実験用真空チャンバーを取り付け, その中にセットしたテストミラーの放射光照射による熱変形の測定である。次にこれら 2 つの実験について, いくぶん詳しく述べることにする。

#### 3.1 KEK-PF BL-28 分岐ミラーの表面変形

KEK-PF の BL-28 で, 光源から約 13 m のところに設置され, 分岐ミラーとして使われている SiC ミラーの表面をのぞき窓を通して大気中から観測した。このミラーはサイズが 400L × 40H × 40T のトロイダル鏡で, その半径は仕様上は  $R_1 = 250$  m,  $R_2 = 680$  mm である。入射角は  $86^\circ$  の斜入射に設定されている。図 3 は, このミラーのほぼ中心の 1 点に, 約 1 m 離れた大気中からレーザー光を入射して, 放射光照射前から照射中, 照射後の形状変化をアナログレコーダーで記録したものである。レーザー光が当たっている観測点の水平方向の面の傾きの時間変化が a で, 垂直方向の面の傾き変化が b である。照射の開始 (シャッター opened) から終了 (シャッター closed) までの時間は約 7 分である。測定中, 光源の電流は 328 mA で, このときのアンジュレータ光の全パワーは約 515 Watt に達する。しかし上のデータは, ミラーの上流に置かれたダイアフラムによって, ビームサイズを 5 mmW × 5 mmH に制限して照射したときのものであるから, 実際のパワーはこれよりかなり小さい。しかも, ミラーは斜入射で使われているから, ミラー表面の単位面積当たりのパワーはそれほど大きく

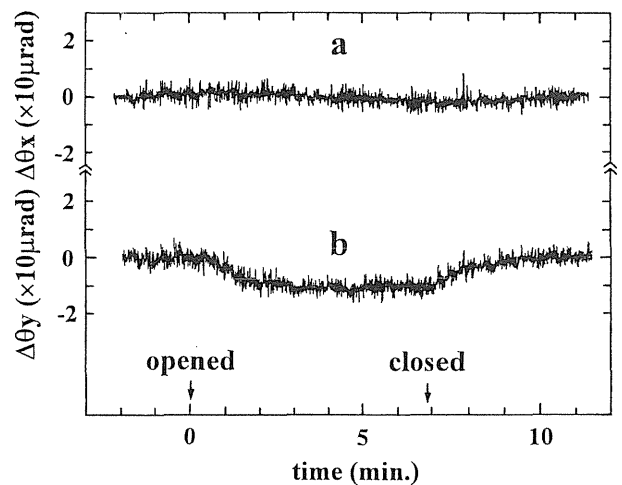


Figure 3. Analog recorder traces of the time-dependent slope change of the SiC mirror under the irradiation of the synchrotron radiation beam at BL 28 of KEK-PF.

ない。照射を開始して数10秒後に、ミラーは観測点で下向きに傾きはじめ、約2分後にはほぼ10  $\mu\text{rad}$  だけ傾いて安定する。これは10 m 後方で、反射光の位置がビームと垂直方向に100  $\mu\text{m}$  変わることを意味する。シャッターを閉じると、約3分後に照射前の状態に回復する。これに対して、水平方向の傾き変化は2  $\mu\text{rad}$  程度であり、垂直方向に比べて大変小さいことが分かる。このことは、ミラー表面に水平な方向には温度勾配がほとんどないことを意味している。放射光はミラーの表面に対して斜入射で入射しており、ミラーは水平方向に長い距離にわたって照射されているから、その中央部では水平方向の温度勾配は小さいであろう。

図3には、ときどき比較的大きなパルス的なノイズが観測されている。このノイズは他のビームラインのビームシャッターの開閉による振動やフロアーの振動によるものであることが、いっしょに発する音と同期していることから分かる。このことは、そのような振動にともなって、ミラーの反射光の方向が瞬間的に変化することを意味しており、実験の種類によっては結果に重大な影響を与えることになるかも知れない。

図3の測定の後、同じミラーについて放射光を照射しない状態で、プロファイラーを縦方向に走査して得られた結果が図4である。ミラーの縦方向の中心を0として上下 $\pm 3$  mmの範囲を下から上に走査して、表面の傾き $\Delta\theta_y$ を観測したものである。中心から $\pm 2.5$  mmの付近で $\Delta\theta_y$ は急激に0となる。これは、ミラーから反射されたレーザー光のスポットが、プロファイラーの光検出器の受光面からはずれて信号が0となるためである。またその少し内側で、曲線は丸みを帯びているが、これは反射レーザー光のスポットの一部が検出器の受光面からはずれてくるため、光検出器が受光面上の正しい位置を示さなくなるためである。ミラーの垂直面内の曲率半径は、仕様上では680 mmであるから、プロファイラーを縦方

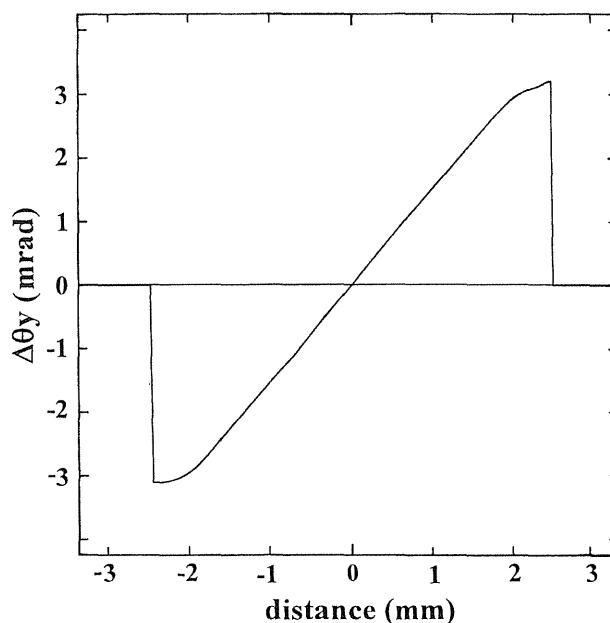


Figure 4. Vertical surface slope of the SiC toroidal mirror at BL 28 of KEK-PF.

向に走査すると、反射レーザー光の方向はこの曲率のため急激に変化してプロファイラーの受光面からはずれてしまう。しかし、 $\pm 1.5$  mmの範囲のデータからこのミラーの垂直面内の曲率を求めると、 $(679 \pm 1)$  mmとなり、仕様上の値と非常によく一致する結果が得られる。

図4ではトロイダルミラーの縦方向の曲面による反射方向の変化の方が、局所的な凹凸による反射光の方向変化よりはるかに大きいので、ミラーの表面の乱れをはっきり認めることはできない。表面の局所的な凹凸を観測したい場合には、近似的な曲率半径を使って $\Delta\theta_y$ を計算し、この計算値と図4のような測定によって得られる $\Delta\theta_y$ との差をグラフ上に表示すればよい。こうすることによって縦軸のスケールが拡大され、実際のミラー一面と理想的な曲面との傾きの差分が強調される。さらに、これを積分した曲線を作れば、観測している曲面が理想面からどの程度はずれて凹凸を示しているかを知ることができる。

### 3.2 SiC テストミラーの照射実験

ここでは、KEK-PFのBL-28にCVD-SiC製

テストミラーを組み込んで、放射光照射によるミラー表面の形状変化をプロファイラーで観測した例について述べる。

照射実験を行うため、光源から約15 m 離れたところに真空容器を設置し、その中に Cu 製水冷ホルダーにマウントした SiC テストミラーを取り付けた。図5はこのテストミラーの配置の様子を示すものである。ミラーのサイズは35H×40W×10t である。ミラー表面の上半分は SiC のままであり、下半分には Rh が蒸着されている。これら2種類の表面について放射光の照射実験を行なった。図のように放射光 SR は入射角45°でミラーに入射する。プロファイラーのレーザー光は斜め下方から入射される。ミラーはホルダーに固定したまま上下に動かすことができ、真空を破らずに SiC 表面と Rh を蒸着した表面のいずれかを選択できる構造になっている。ミラーの上流側にダイアフラムがあり、照射アンジュレータ光の断面が制限されている。このためミラー面は垂直面内で 8H×20W の領域だけが照射される。

図6は SiC 表面の中心部の1点にレーザー光を入射して、放射光の照射前から、照射中、照射後と連続的に、表面の傾きの時間変化(上図)とミラーの表面温度の時間変化(下図)を測定したものである。図はアナログレコーダーに記録したデータである。上部の図の a は水平方向の傾き、

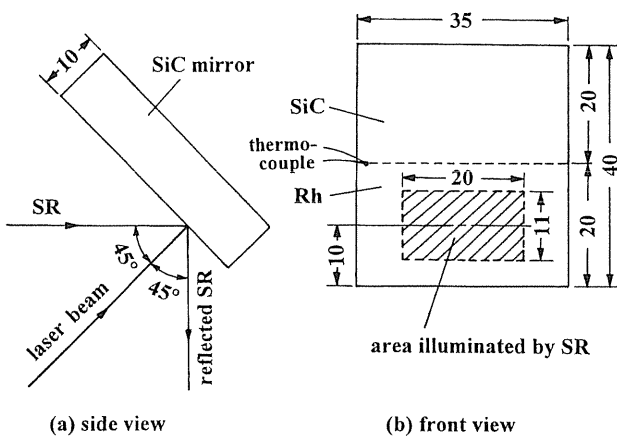


Figure 5. Arrangement of a CVD-SiC mirror for irradiation test with high power synchrotron radiation.

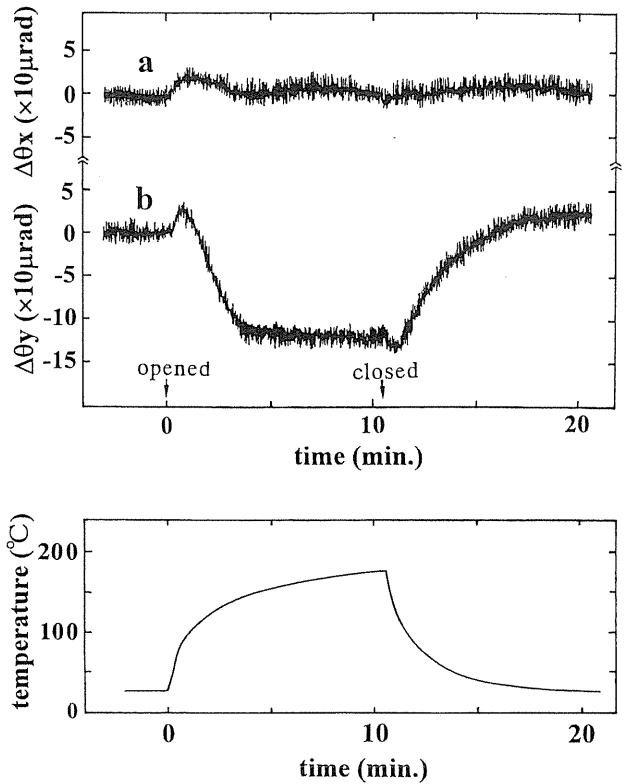


Figure 6. Analog recorder traces of the time-dependent slope change (upper) and temperature change (lower) of the SiC test mirror under the irradiation of the synchrotron radiation beam.

bは垂直方向の傾きである。図にはビームシャッターの開閉の時間位置を矢印で示した。測定時の光源の状態はアンジュレータマグネットのギャップが70 mm, リング電流が331 mA であり, ミラーが受けている放射光のパワーは約240 Watt である。照射中の傾き変化は, 水平方向 a より垂直方向 b の方がかなり大きい。Δθ<sub>y</sub> については, 照射開始後すぐに一旦わずかに上方に傾き, 約1分後から今度は傾きが逆方向(下方)に大きく増加する。そして約4分経過した後, 傾きはほぼ一定となる。ビームシャッターを閉じると一旦傾きは同じ方向にさらに増加し, 約1分後に最大に達したあと, ゆっくり回復してくる。しかし照射前の状態にそのまま戻るわけではなく, 逆方向に傾く。このような変化の特徴はミラー及びホルダーの形状や冷却方法などに大いに依存するであろう。放射光のミラー面での形状は, 水平

方向に広く垂直方向に狭いので、温度勾配は水平方向に小さく垂直方向に大きいと予想される。これが  $\Delta\theta_x$  の変化を小さくし、 $\Delta\theta_y$  の変化を大きくしている理由の一つであろう。ビームシャッターを開いた直後と閉じた直後の過渡的な変化は、ミラー上の1点が定常状態に移行するまでに、熱伝導にともなって短時間に収縮および膨張をしていることを示唆している。図6の下図に示す温度変化は、図5に示したように、SiC面とRh面の境界上のミラーの端の部分に熱電対を固定して測ったものである。温度変化の特徴は表面の傾き変化に概ね対応しているが、シャッター開閉直後の過渡期的変化は異なっている。放射光を照射して10分後にはミラーの表面温度は175°Cに達する。これはミラーの端で測ったものであるから、中心部ではもっと高いであろう。図6に示した放射光の熱負荷による表面変形のデータは再現性が極めてよく、独立に測定した2つのデータを重ねてみると、ビームラインや実験室フロアーの振動によるシャープなノイズを除いて、全く重なり合う。

図6と同じSiC面について、レーザー入射点を放射光の照射領域を横切って、 $\pm 10$  mmの範囲を下から上に走査して得られたデータを図7に示す。測定時の光源の状態は図6の場合とほぼ同じである。図7においてaが照射前、bが9分間照射し続けたとき、cがシャッターを閉じて12分後のデータである。いずれも測定時間は約1.5分であった。a, b, cともに右端で $\Delta\theta_y$ が鋭く下方に変化している。この位置はミラーの上端の角の部分に相当し、ここでレーザー光が散乱されるために起こるものである。a, b, cを見ると、照射前後に比べて照射中ではミラー表面の傾きが大きく変わることがわかる。シャッターを閉じて12分後でも、表面の形状cは照射前の形状aに戻るのではなく、aと比べて約60  $\mu\text{rad}$ だけ上側に傾いている。ときどきパルス的に観測されるノイズを除けば、a, b, cの中のほとんどの微細構造は同じ位置に再現されており、表面上の局所的な

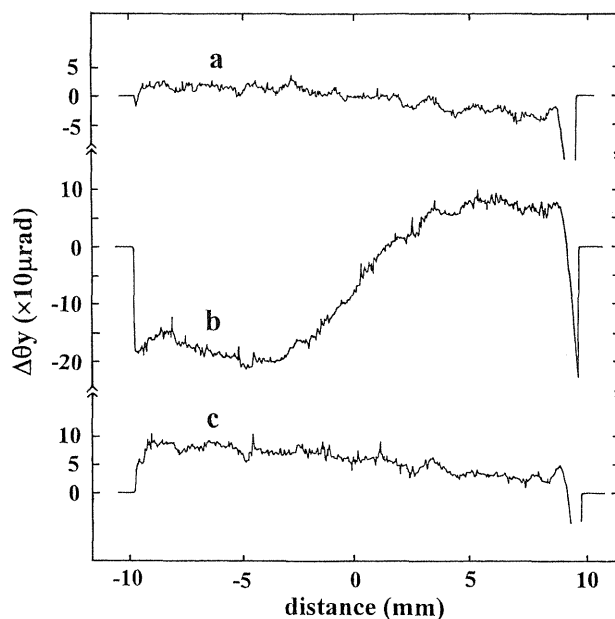


Figure 7. Vertical surface slopes of the SiC mirror. a, before irradiated with the synchrotron beam; b, under continuous irradiation for 9 minutes; c, after irradiated for 11 minutes and then cooled for 12 minutes.

凹凸は放射光の照射によってほとんど影響を受けず、広い領域にわたる傾きだけが変化しているということが分かる。

図7の $\Delta\theta_y$ を積分すれば、レーザー光を走査した上下方向のミラーの断面の表面形状そのものが得られる。それを図8に示した。ミラーが表面に平行に収縮または膨張しても $\Delta\theta_y$ には影響しないから、図にはそのような表面変形は考慮されていない。従って図では、左端(SiC表面の下端)でミラーの厚さを規格化した形で与えている。照射前の表面形状は両端に比べて中央がすでに0.12  $\mu\text{m}$ 凹んでいる。これに240 Wattの光を照射すると、ミラー全体が下向きに傾き、さらに中央部が下端に比べて1.7  $\mu\text{m}$ 凸となる。このとき放射光は横軸の0を中心に約 $\pm 5.5$  mmの領域に照射されている。光を止めて12分後にはミラー全体が照射中とは逆に傾いて、ミラーの中央部で0.7  $\mu\text{m}$ 逆に凹み、照射前の状態に戻っていない。このような状況は図6と定性的に一致する。図6でもやはり照射後10分程度時間が経過すると照

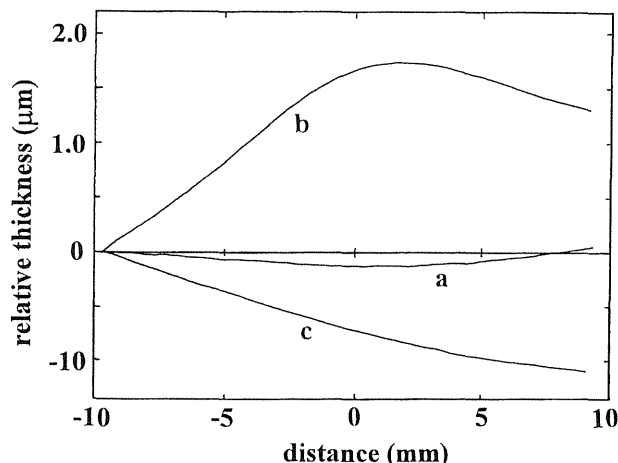


Figure 8. Vertical surface figures of the SiC mirror. a, before irradiated with the synchrotron beam; b, under continuous irradiation for 9 minutes; c, after irradiated for 11 minutes and then cooled for 12 minutes.

射前とは逆に傾くのが観測された。

図8の横軸の-10 mmの位置はSiC表面の下端の位置に対応し、さらにその下にはRhを蒸着した表面が続いている(図5)。図8を測定したとき、放射光の照射領域はSiC面の中心部にあって、ミラー全体から見ると中央より上の方である。したがって図8のbが横軸に対して非対称に傾く原因は主としてこのようなミラー表面の非対称な熱負荷による非対称な温度勾配や非対称な応力によるものと考えられる。

SiC表面について、水平方向にレーザー光を約30 mm走査して得られた断面の表面形状を図9に示す。放射光が照射される領域は横軸の0を中心に±10 mmである。aが放射光を照射する前、bが照射し続けて12分後、cがシャッターを閉じて15分経過後のものである。それぞれの場合に、図の左端で厚さが一致するように規格化して示した。変化の大きさおよび形状の時間変化の傾向は図8と矛盾しない。各カーブには局所的な凹凸も観測されている。図8と図9を比べると、水平方向の方が垂直方向よりも照射時のミラー表面全体の一様な傾きの程度はかなり小さい。

SiCの上にRhを蒸着した表面についても、図

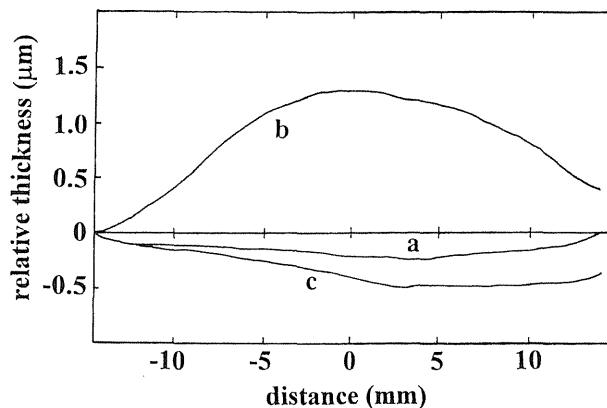


Figure 9. Horizontal surface figures of the SiC mirror. a, before irradiated with the synchrotron beam; b, under continuous irradiation for 12 minutes; c, after irradiated for 14 minutes and then cooled for 15 minutes.

8、図9と同様に上下方向および水平方向の断面の表面形状を測定した。照射中の表面形状は図8、図9のSiC表面の場合と定性的に類似して、中心部が膨張し全体が傾く。しかし、ミラー表面全体の一様な傾きを除いた正味の膨張は、約240 Wattの全パワーの照射に対して、Rh表面で $0.7 \mu\text{m}$ 、SiC表面で $1.0 \mu\text{m}$ であった。この差はRh表面の方が熱伝導がよいので表面の温度勾配が小さいことによっているものと考えられる。このことは、放射光ミラーでは表面に熱伝導のよい金属をコートした方が表面の熱変形を小さく抑えられて有利であることを示唆している。

BL-28の分岐ミラーの形状変化(図3)とテストミラーの形状変化(図6)を比較すると、前者の方がはるかに小さい。これは、それぞれのミラーが受ける正味の熱負荷の大きさの違いもあるが、主として入射角が前者では $86^\circ$ 、後者では $45^\circ$ であるため、ミラー上の単位面積が受けるパワーが前者が後者の約1/10であることによる。

#### 4. おわりに

我々が開発したミラーの表面形状測定装置の概略を示し、それを使って行ったKEK-PFでのい



くつかの実験の例を紹介した。放射光照射によるミラーの表面形状の変化を、上に述べたような形で定量的に「その場」観測した例は少ない。アンジュレータ光照射によるミラーの表面形状の変化を、備え付けの SiC 分岐ミラーと SiC テストミラー (SiC 表面と Rh を蒸着した表面) について測定した例について言えば、前者では表面形状の変化は小さいが、後者では約 240 Watt の放射光の照射によって中心部が 1~2  $\mu\text{m}$  膨張すること、照射中の表面形状は複雑な変化の過程をとることがわかった。

実験例はまだそれほど多くはないが、試作した表面形状測定装置は十分に機能することを示している。放射光ミラーの素材の探索や光学素子のホルダーの形状、冷却機構等の開発研究に当たっては、このような測定データは、ミラーの変形量や表面変形の特徴についての重要な目安を与えることになり、大変有益なものであろう。その他に、平面、球面や非球面の表面形状の測定、あるいは実際にビームラインに組み込まれている光学素子の放射光熱負荷による表面変形量のモニターの開発等の分野に本稿が少しでもお役に立てれば幸いである。

## 謝辞

この研究は文部省科学研究費補助金・重点領域研究「X線結像光学」(代表者:波岡武現東北大学名誉教授)によって推進された。この研究を進めるに当たっては、東北大学佐藤繁教授から終始激励とご助言を頂いた。また KEK-PF での実験に当たっては、高エネルギー物理学研究所宮原恒昱教授にご援助頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

## 文献

- 1) 佐藤 繁:放射光 4, 11 (1991).
- 2) 山岡人志:放射光 9, 131 (1996).
- 3) P. Z. Takacs, S.-N. Qian and J. Colbert: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **749**, 59 (1987).
- 4) S. Sato, Y. Higashi, S. Haya, M. Otsuka and H. Yamamoto: Rev. Sci. Instrum. **63**, 1490 (1992).
- 5) J. Susini, R. Baker and A. Vivo: Rev. Sci. Instrum. **66**, 2232 (1995).
- 6) S.-N. Qian, W. Jark, P. Z. Takacs, K. J. Randall and W. Yun: Opt. Eng. **34**, 396 (1995).
- 7) J. Susini, R. Baker, M. Krumrey, W. Schwegle and A. Kvick: Rev. Sci. Instrum. **66**, 2048 (1995).
- 8) E. Ishiguro, H. Sugawara, M. Okuyama, N. Waku, S. Sato and T. Takigawa: to be published as Proc. 11th Int. Conf. Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (Rikkyo Univ., Tokyo, 1995).
- 9) H. Sugawara, M. Yanagihara, S. Asaoka, M. Okusawa and H. Maezawa: the same as 8).