軟 X 線回転体ミラーのマンドレル作製システムの開発 (第 2 報) *

— 複数の変位計を用いた自由曲線形状の計測装置開発 —

武井良憲** 三村秀和***

System Development for Fabricating Mandrel of Soft X-ray Rotating-Body Mirror (2nd Report)
- Development of Measurement Machine for Free-Form Shape Using Multiple Displacement Sensors -

Yoshinori TAKEI and Hidekazu MIMURA

The ellipsoidal mirror for X-ray nano-focusing is a key device in X-ray analytical methods. The ellipsoidal mirror is fabricated by replicating a mandrel. The surface accuracy of the mandrel should be extremely high to obtain the high-quality replicated products. The accuracy is mainly determined by the metrology used in the fabrication process. In this study, we developed a surface profiler using multiple displacement sensors and reference mirrors, in which one sensor is used for measuring the mandrel surface and the others are used for in-situ monitoring motion errors of scanning stages. The spatial resolution and the repeatability was confirmed to be 0.05 mm and 0.14 nm (σ), respectively. The system error originated from the figure errors of the references is calibrated using flat mirror with peak-to-valley of 1 nm level. Then, the positioning error of the scanning stage was compensated using a tilted flat mirror. The measured profiles were well coincided with 0.41 nm (σ) reproducibility even when the mandrel position was shifted on the profiler. Finally, by combining the developed profiler and EEM (Elastic Emission Machining) system, the figure accuracy of 1.8 nm in RMS was achieved on the longitudinal profile of the mandrel, which will be actually used for fabricating X-ray mirrors.

Key words: Ellipsoidal mirror, Soft X-rays, Focusing optics, Multiple displacement sensors, Aspheric surface, EEM, Shape correction processing.

1. 緒 言

可干渉性の高強度軟 X 線が大型放射光施設などで発振されている。その軟 X 線を利用した顕微鏡において、解析の空間分解能や感度を向上させるために、集光素子が不可欠である。その中でも、軟 X 線の利用効率が高いことや色収差がないことから、ミラーの導入が期待されている。本研究では、図 1 に示す、開口が大きく単体で軟 X 線を 10 nm サイズに集光可能な回転楕円ミラーの開発を目的としている¹⁾³⁾。そのサイズに集光するためには、ミラー内面にシングルナノメートルの形状精度が要求される。ミラー内面を直接高分解能・高精度に計測・加工することは非常に困難であるため、型となるマンドレルを作製しその表面を転写するという、2段階のプロセスでミラーを作製する¹⁾²⁾。本プロセスにおいて、ミラー内面の形状精度はマンドレル外面のそれに依存しており、高精度マンドレルの作製がミラー開発のための最も重要な課題の一つである。

マンドレル形状はミラー形状を反転したものであり、その外観は図 2 に示す通りである。回転体であることから、真円度測定機を利用することでその周方向の形状プロファイルの計測が可能である。これまでに、計測結果に基づく超精密加工プロセスを開発し、マンドレルの周方向をシングルナノメートルの形状精度で作製可能にした⁴⁾。一方で、マンドレルの長手方向は図 3 に示すように急峻な楕円形状であり、それを目標とする精度で計測する手法は確立していない。

変位計もしくは計測対象を走査して形状を測定する手法では、任意の大きさや形状の対象を比較的容易に測定可能である。その際、走査に伴うステージの運動誤差の影響を考慮する必要がある。一般に、変位計を 1 つだけ利用する形状計測装置では、予め形状誤差の十分に小さい参照面を計測することで、この誤差を校正している。もしくは反転法に代表されるマルチステップ法を用いて補正可能である。しかし、ステージの運動誤差の再現性は外乱・複雑な運動機構・環境の変化に依存しており、シングルナノメートルの精度を達成することが困難である。ステージの運動誤差に依存しない手法として、角度センサや複数の変位センサを用いた形状計測手法が報告されている⁵⁾⁹⁾。それらの手法では、参照面を必要とすることなく、計測対象の形状偏差を積分処理や漸化式計算から算出可能である。そのため、計測対象が大きく参照面の準備が困難な場合や、参照面の形状偏差の評価が困難な場合に有益である。

一方で、本研究では長さ 40 mm のマンドレルを計測対象としており、参照面を容易に準備可能である。参照面と計測対象の比較計測にすることで、ステージの運動誤差を補正でき、また、温度ドリフトや振動等の外乱の影響を受けにくい計測が可能である。さらに、形状プロファイル間の比較であるため、変位計の出力誤差などの偶発誤差の累積が生じない。そこで、本稿では、置換測定法^{10) 11)}を参考に、複数の変位計と参照面を利用した形状計測法と装置を開発した。また、その装置を用いて、マンドレルの長手方向を計測した。さらに、前報の超精密加工システム⁴⁾を用いて、その計測結果に基づいたマンドレル長手方向の形状修正加工を行った。

* 原稿受付 平成 28 年 9 月 29 日

掲載決定 平成 29 年 2 月 15 日

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)

*** 正会員 東京大学大学院工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)

Fig. 1 Designed ellipsoidal mirror to focus soft X-rays.

Fig. 2 Appearance of the master mandrel for fabricating the mirror.

Fig. 3 Mandrel cross-sectional profile in longitudinal direction.

2. 本研究の計測手法

変位計のプロブをマンドレル表面上で走査した際に得られる測定結果には、マンドレルの形状プロファイルだけでなく、ステージの運動誤差や外乱の影響が含まれている。その影響を取り除く方法として、置換測定法^{10), 11)}を参考に、複数の変位計を走査方向と垂直に並べた計測手法を利用した。その手法と、X軸方向に走査した際に生じるステージの6自由度の運動誤差の概略を図4に示す。複数の変位計は治具に付き当てで設置され、一体となって走査される。計測対象であるマンドレルの長手方向形状を $f_3(x)$ 、2つの参照面の形状をそれぞれ $f_1(x)$ 、 $f_4(x)$ とした。この方法では、変位計 S_3 を用いて $f_3(x)$ を測定し、同時に変位計 S_1, S_4 を利用して $f_1(x)$ 、 $f_4(x)$ を測定する。これにより測定結果 $S_1(x)$ 、 $S_3(x)$ 、 $S_4(x)$ が得られる。

X方向に複数の変位計を走査した際に生じる6自由度の運動誤差と外乱のうち、Y軸方向の誤差は、マンドレルの稜線や平面ミラーの表面の形状偏差計測に影響しない。また、変位計先端のレンズとマンドレルやミラー表面間の距離は ~ 0.3 mmと短いため、複数の変位計のレーザー間のわずかな光軸のずれやステージの運動誤差などによる姿勢誤差も影響しない。一方で、Vertical・Pitch・Roll・外乱によるZ軸方向の変位誤差は考慮する必要がある。

ここで、変位計の各軸方向の設置誤差の計測結果に及ぼす影響は十分に小さいため、3個の変位計 S_1, S_3, S_4 は直線上に配置されているとみなせる。その場合、図5に示す概略のように、走査中のX軸上の任意の位置で、Rollの誤差成分は各変位計のY軸上の位置に応じて線形に影響し、Vertical・Pitch・外乱の誤差成分は一律に影響する。変位計 S_1-S_3 間の距離 a と S_3-S_4 間の距離 b は、アライメント用手動ステージや参照面の大きさの都合上、それぞれ150 mmと90 mmとした。変位計 S_1 に含まれる、ステージの運動誤差や外乱による、変位誤差成分の大きさの和を $\alpha(x)$ とし、ローリングがY軸方向1 mmの距離に対してZ軸方向に及ぼす誤差の大きさを $\beta(x)$ とした場合、 S_3 と S_4 に含まれる誤差の大きさはそれぞれ $\alpha(x) + a \times \beta(x)$ 、 $\alpha(x) + (a+b) \times \beta(x)$ となる。そこで、変位計 S_1, S_3, S_4 の出力は式(1)~(3)で表せる。

$$S_1(x) = f_1(x) + \{\alpha(x)\} \quad (1)$$

$$S_3(x) = f_3(x) + \{\alpha(x) + a \times \beta(x)\} \quad (2)$$

$$S_4(x) = f_4(x) + \{\alpha(x) + (a+b) \times \beta(x)\} \quad (3)$$

式(1)~(3)を連立して、 $\alpha(x)$ と $\beta(x)$ を除去することで式(4)が得られる。

$$\begin{aligned} S_3(x) - \left\{ \frac{b}{a+b} \right\} S_1(x) - \left\{ \frac{a}{a+b} \right\} S_4(x) \\ = f_3(x) - \left\{ \frac{b}{a+b} \right\} f_1(x) - \left\{ \frac{a}{a+b} \right\} f_4(x) \\ = f_3(x) + r(x) \end{aligned} \quad (4)$$

なお、参照面の形状誤差に由来する計測誤差を $r(x)$ と表した。計測対象 $f_3(x)$ を左辺に移項すると式(5)が得られる。

$$f_3(x) = \left[S_3(x) - \left\{ \frac{b}{a+b} \right\} S_1(x) - \left\{ \frac{a}{a+b} \right\} S_4(x) \right] - r(x) \quad (5)$$

このように、マンドレルプロファイルの測定結果からステージの運動誤差や外乱の影響を除去することが可能である。

一方で、本手法は比較計測であるため計測結果に $r(x)$ が含まれる。平面に対しては40 mmの長さに対してPV 1 nmレベルの作製精度が実現されているため¹²⁾、優れた基準面を容易に入手可能である。本研究では、超平坦ミラーを利用することで参照面の形状誤差の影響である $r(x)$ を校正した。その後、マンドレル長手方向の形状計測を行った。

3. 計測装置

3.1 計測装置開発

設計開発した計測装置の外観を図6に示す。本装置は、レーザー変位計、それを走査するための自動ステージ、マンドレルや平面ミラーのアライメント用の手動ステージから構成されている。変位計には、キーエンス社の“レーザー変位計、型番: SI-01”を採用した。出力の変位分解能とサンプリング周期はそれぞれ1 nmと5 kHzである。また、変位計のレーザーのスポット径は0.05 mm程度であり、走査方向に高分解能な計測が可能である。なお、計測は ± 0.1 度で温度制御された環境下で行われた。

Fig. 4 Schematic drawing of the measurement system. XYZ axis and motion errors were defined as described. One sensor is used for measuring the mandrel surface profile and two sensors placed both sides are used for monitoring the motion errors. These sensors were installed on the mounting fixture and scanned as a unit.

Fig. 5 Displacement errors in output value of the each sensor. The output value of $S_1(x_1)$, $S_3(x_1)$ and $S_4(x_1)$ includes displacement errors apart from the shape deviation of $f_1(x)$, $f_3(x)$ and $f_4(x)$. The errors are caused by roll, vertical, pitch and disturbances. Vertical, pitch and disturbances influence uniformly and roll does linearly with the distance in Y direction.

Fig. 6 Developed measurement machine.

3.2 静止状態における本手法の再現性の評価

本手法の達成可能な精度を見積もるために、静止状態における計測誤差と繰り返し性を評価した。図7に示すように、1つの超平坦ミラーに対向するように3つの変位計を設置し、ステージを走査することなく、182秒間の変位を計測した。なお、本実験では、超平坦ミラーやレーザー変位計取り付け治具の大きさの都合上、変位計間の距離 a' と b' のどちらも15mmとした、また、後述の計測条件と合わせるために、10回繰り返して計測し、その計測プロファイルの平均を1回の計測プロファイルとして取り扱った。図8(a)にその結果を示す。各変位計の出力値には温度ドリフト等の外乱の影響が含まれるが、本手法を用いることでその影響は計測結果から除かれている。式(4)の演算を行った後の計測プロファイルの誤差はRMS 0.11 nmであった。また、定量的な再現性評価のために、同様の計測を繰り返し5回行い、横軸の各位置の標準偏差の平均値を算出した。図8(b)に示すように、静止状態において0.11nm(σ)の十分に高い繰り返し性が得られることを確認した。

Fig. 7 Experimental setup when the stability of the method in stationary state was measured.

Fig. 8 Experimental results in stationary state
(a) Output value profiles of the each displacement sensor and measured result. (b) Measured results and the repeatability

Fig. 9 Experimental setup when the linearity of the displacement sensors was estimated.

Table 1 Measurement conditions

Parameter	Value
Scanning speed	0.25 mm/s
Number of moving average	1024
Distance between probe and sample	~ 0.3 mm
Spatial resolution of measurement	< 0.1 mm
Measuring number for each profile	10 times

Fig. 10 Measured profiles when the extremely flat mirror was tilted at each angle.

Fig. 11 Experimental setup when the system error was measured using the extremely flat mirror.

3.3 変位計の直線性の評価

変位計の直線性が計測結果に及ぼす影響の評価として、図 9 に示す配置で計測実験を行った。まず、表 1 に示す条件で超平坦ミラー表面を計測した。次に、傾斜ステージを利用して超平坦ミラーを敢えて 4.2 mrad, 9.7 mrad 傾けた後に再度計測を行った。図 10 に示すように、いずれの場合においても同様の計測結果が得られた。このことから、直線性は本実験条件において十分に高く、図 3 に示すマンドレル長手方向のプロファイルを目的とする精度で計測可能である。

3.4 超平坦ミラーを用いたシステムエラーの校正

超平坦ミラーを、図 11 のようにマンドレル設置予定位置に設置し、本計測手法の実証と計測再現性の評価を行った。計測条件を表 1 に示す。ステージの移動速度は 0.25 mm/s とし、レーザー変位計からは 0.2 s 間隔で 1024 回移動平均した値を出力した。繰り返し 10 回計測しその平均プロファイルを一回の計測プロファイルとして扱った。図 12(a)に走査方向の各位置における各センサの出力結果 $S_1(x), S_2(x), S_3(x)$ を、図 12(b)に式(4)に示す演算を行った結果得られたシステムエラープロファイルをそれぞれ示す。図 12(b)には同様の計測を繰り返し 5 回行った結果を重ねて示している。補正によりステージの運動誤差や外乱の影響を除去できていることがわかる。計測プロファイルの各位置の標準偏差を平均した値は、0.12 nm (σ)であった。このように、十分に高い繰り返し性で計測が可能である。

ここで、図 12(b)の計測結果は式(4)に示すように、対象である超平坦ミラーの形状プロファイル $f_3(x)$ と、参照ミラーの形状に由来するシステムエラープロファイル $r(x)$ の和である。そのシステムエラーの大きさを見積もるために、超平坦ミラーの設置位置のみを X 方向に 0 mm, 3 mm, 7 mm と変えて、再度計測を行った。その結果、図 13 に示すように 0.32 nm (σ)の再現性で同様の計測プロファイルが得られた。このことから、超平坦ミラーの形状プロファイル $f_3(x)$ は 1 nm レベルで平坦であり、計測されたプロファイルは実質的にシステムエラープロファイル $r(x)$ であると見なせることを確認した。

Fig. 12 Experimental results in measuring the surface profile of the extremely flat mirror.

(a) Output value profiles of the each displacement sensor. (b) The system error of the measurement setup which was obtained by calculating the output value profiles according to the equation (4).

Fig. 13 Reproducibility of the system error measurement under the conditions that the extremely flat mirror was placed at three different positions.

3.5 ステージの位置決め精度の補正

計測プロファイルの勾配が小さい場合には、図4に示す位置決め誤差プロファイル $p(x)$ は計測結果に影響しない。しかし、本研究の対象であるマンドレルのような急峻に湾曲した形状を計測する場合、図14に示すように、走査方向の位置決め誤差が変位方向の計測誤差を生じさせる。例えば、マンドレル表面の最も勾配が急峻な位置を計測する際に100 nmの計測位置誤差がある場合、1 nm以上の変位計測誤差が生じる。そのため、目標精度を達成するためには、マンドレル計測結果からステージの位置決め誤差の影響を補正する必要がある。

そこで、本研究では、追加のレーザー変位計 S_2 と超平坦ミラーを利用して、ステージの位置決め誤差の逐次補正を行った。実験配置と本手法の概略をそれぞれ図15と図16に示す。まず、変位計 S_2 の出力プロファイルの1次関数成分が十分に小さくなるように手動ステージを用いて超平坦ミラーをアライメントす

る。その後、式(4)と同様に、参照面上の測定ライン $f_1(x) \cdot f_4(x)$ と比較計測を行うことで、式(6)が得られる。超平坦ミラーの形状を $f_2(x)$ 、 $f_1(x) \cdot f_4(x)$ の計測結果に与える影響を $r'(x)$ とした。また、 S_1 - S_2 間の距離 c と S_2 - S_4 間の距離 d をそれぞれ90 mm, 150 mmとした。

$$\begin{aligned} M_{\text{before}}(x) &= S_2(x) - \frac{d}{c+d} S_1(x) - \frac{c}{c+d} S_4(x) \\ &= f_2(x) - \left\{ \frac{d}{c+d} f_1(x) + \frac{c}{c+d} f_4(x) \right\} \\ &= f_2(x) + r'(x) \end{aligned} \quad (6)$$

次に、超平坦ミラーを敢えて角度 θ 傾けて計測する。この際、図14(a)に示すように、計測位置の誤差が計測対象表面の傾きにに応じて、変位方向の誤差を生じさせる。そのため、得られる結果は式(7)に示すように、超平坦ミラーの形状プロファイル $f_2(x)$ と参照面の形状誤差の影響 $r'(x)$ と $x \tan \theta$ 、そしてその傾きに対するステージのX方向の計測位置誤差 $p(x)$ の影響の和である。

$$\begin{aligned} M_{\text{after}}(x) &= S_2(x) - \frac{d}{c+d} S_1(x) - \frac{c}{c+d} S_4(x) \\ &= \{ f_2(x) + (x + p(x)) \tan \theta \} + r'(x) \end{aligned} \quad (7)$$

傾ける前後の計測結果の差分プロファイルから1次関数を除去したプロファイルが、その傾き θ に対して $p(x)$ が影響した結果である。差分プロファイルに $\arctan \theta$ を乗算することで、式(8)に示すように $p(x)$ が算出できる。

$$p(x) = \arctan \theta \times \{ M_{\text{after}}(x) - M_{\text{before}}(x) \} - x \quad (8)$$

本実験では、測定のサンプリング間隔 x は0.05 mmとした。計測された $p(x)$ を図14(b)に示す。また、同じく図14(b)に、図14(a)に示すマンドレルプロファイルを計測した際に $p(x)$ が及ぼす計測誤差プロファイルを示す。

本手法における計測位置誤差 $p(x)$ の計測の分解能は、超平坦面の傾斜角と変位計の分解能に依存する。本実験では、マンドレル計測の際に $p(x)$ の及ぼす誤差の影響を1 nmより高い精度で補正するために、超平坦ミラーを7.5 mrad程度傾けた。そして、マンドレルの長手方向計測の際に、傾けた超平坦ミラーを同時に計測することで、逐次位置決め補正を行った。本手法を用いることで、外乱やステージの他の運動誤差の影響を受けることなく簡便かつリアルタイムにステージの位置決め誤差プロファイルを計測可能である。

Fig. 14 Influence of the positioning error in measuring mandrel surface.

- (a) Schematic view of measurement error due to positioning error.
 (b) The purple line is the positioning error of the scanning stage used in this study. The green line is the measurement error caused by the positioning error.

Fig. 15 Experimental setup in measuring the surface profile of the mandrel. The reference mirrors, the tilted flat mirror and the mandrel are measured simultaneously.

Fig. 16 Method for detecting the positioning error

Fig. 17 Measured shape profile (red line) and shape error profile (green line) of the mandrel in longitudinal direction.

Fig. 18 Reproducibility of the mandrel measurement under the conditions that the mandrel was placed at three different positions.

Fig. 19 Schematic drawing of the processing central part. The shape correction processing of the mandrel is carried out by controlling processing time.

Fig. 20 Shape error profiles of the mandrel before and after the shape correction processing. The shape error was improved from 6.1 nm (RMS) to 1.8 nm (RMS).

4. マンドレル計測

4.1 マンドレルの計測準備

回転楕円マンドレルは、外径が急峻に変化するテーパ形状を有している。長手方向を計測する際の変位量を小さくする目的で、長手プロファイルの最小二乗の 1 次関数と一致するようにマンドレルを傾けて計測した。また、自重によるたわみ量を十分に小さくするために、図 6 に示すようにマンドレルの根元部と先端部の両持ち保持とした。

マンドレルの稜線を計測するために、根元と先端付近で、変位計を Y 方向に走査してマンドレルの周方向の頂点位置を検出した。その際、周方向の形状誤差の影響を受けないように、計測プロファイルの二次関数成分を算出し利用した。そして、走査 X ステージの測定ラインとマンドレルの稜線が平行になるように手動ステージを用いてアライメントした。

4.2 マンドレルの形状誤差計測

マンドレル長手方向の形状計測を、図 15 に示す実験配置と表 1 に示す条件で行った。その際、3.4 節および 3.5 節で計測した結果を用いて、 $r(x)$ と $p(x)$ の計測結果に及ぼす影響を補正した。5 回繰り返して計測したプロファイルの平均を図 17 に示す。また、その計測プロファイルから設計楕円プロファイルを除去することで得られた形状誤差プロファイルを、同じく図 17 に示す。その際、計測プロファイルと図 3 に示す楕円関数プロファイルの差の最小二乗和が最小になるように、除去する楕円関数プロファイルの傾斜角と X 方向の初期値をフィッティングした。本手法の計測の空間分解能はレーザーのスポット径と同程度であり、0.1 mm 程度の周期の表面凹凸も検出されている。標準偏差平均は 0.14 nm (σ) であり、マンドレル計測の場合であっても十分に高い繰り返し性が得られた。

さらに、走査ステージや参照面に対してマンドレルの位置のみを 3 mm, 7 mm ずらして同様の計測を行った。図 18 に示すように、いずれの場合もシングルナノメートルレベルで同様の結果が得られた。そして、データ上で各プロファイルの計測位置を合わせて比較した際の標準偏差平均は 0.41 nm (σ) であった。以上のように、マンドレルの長手方向の形状誤差計測において、目標とする 1 nm (σ) を達成した。

5. 形状修正加工

前報⁴⁾では、真円度測定技術を用いてマンドレルの周方向の形状プロファイルをシングルナノメートル精度で計測した。また、高精度マンドレル作製のために、超精密加工プロセスを開発した。その加工手法であるノズル型 Elastic Emission Machining (EEM) では、ノズル噴流直下の高速せん断流領域のみで加工が進行し、その加工量は加工時間に比例する。そのため、計測された形状誤差の大きさに応じて、マンドレル表面上での加工時間を制御することで、形状修正加工が可能である。複数回の形状修正加工の結果、周方向の形状誤差 2.7 nm (RMS) を達成した。

本稿で開発した計測装置を作製プロセスに導入することで、マンドレルの長手方向の形状誤差も RMS 1 nm にまで改善可能となる。数値制御加工の概略を図 19 に示す。高い空間分解能で加工するために、開口幅 0.1 mm のスリットノズルを利用した。また、周方向に均一に加工されるように、マンドレルを周方向に等速で回転させながら、長手方向の形状修正加工を行った。図 20 に、マンドレルの長手方向 1 ラインの加工前後の形状誤差プロファイルを示す。形状誤差を 6.1 nm (RMS) から 1.8 nm (RMS) に改善した。計測の再現性は十分に高いことから、計測と加工のプロセスをさらに繰り返すことでより高い精度でマンドレル長手方向の形状を作製可能である。

6. 結言

本稿では、ステージの運動誤差や外乱の影響に強い計測システムを開発した。マンドレルの長手方向の形状計測を行い、計測精度を評価した。また、その計測結果に基づく形状修正加工を行い、マンドレルの長手方向の形状プロファイルを高精度に作製した。下記に、本研究のまとめを示す。

- (1) マンドレルと参照面を同時に計測する、3 本の変位計を走査方向と垂直に配置した装置を開発した。ステージの運動誤差や温度ドリフトや振動などの外乱の影響を受けにくい計測が可能であることを実証した。また、超平坦ミラーを利用することで、参照面の形状誤差が計測結果に及ぼす影響を校正可能であることを確認した。
- (2) 4 本目の変位計と敢えて傾けた超平坦ミラーを利用することで、外乱やステージの他の運動誤差の影響を受けることなく簡便かつリアルタイムに、ステージの位置決め誤差の逐次補正が可能であることを実証した。
- (3) マンドレル計測において、0.14 nm (σ) の十分に高い繰り返し性が得られた。また、計測装置上でマンドレルの設置位置を変えて再計測したところ、0.41 nm (σ) の精度で同じプロファイルが得られた。このように、本装置を用いることで、マンドレル長手方向の楕円形状を高い再現性で計測可能となった。
- (4) 前報で開発したマンドレル加工システムを利用して、計測結果に基づくマンドレル長手方向の形状修正加工を行った。形状誤差を RMS 6.1 nm から RMS 1.8 nm に改善することに成功し、高精度マンドレル作製における本計測システムの有用性を示した。

謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費 JP26・8051, 科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発プログラムおよび文部科学省科学研究費補助金基盤研究 A の下実施された。

参考文献

- 1) J. Voss, H. Dadras, C. Kunz, A. Moewes, G. Roy, H. Sievers, I. Storzjohann and H. Wongel. "A Scanning Soft X-Ray Microscope with an Ellipsoidal Focusing Mirror." *Journal of X-Ray Science and Technology* 3, 85-108, (1992).
- 2) Yoshinori Takei, Takehiro Kume, Hiroto Motoyama, Kentarou Hiraguri, Hirokazu Hashizume, Hidekazu Mimura, "Development of a numerically controlled elastic emission machining system for fabricating mandrels of ellipsoidal focusing mirrors used in soft x-ray microscopy." *Proceedings of SPIE* Vol. 8848, 88480C (2013).
- 3) H. Motoyama, T. Saito, and H. Mimura, "Error Analysis of Ellipsoidal Mirror for Soft X-ray Focusing by Wave-Optical Simulation", *Jpn. J. Appl. Phys.* 53 (2014) 022503. 56-62(2006).
- 4) 武井 良憲, 三村 秀和: 軟 X 線回転体ミラーのマンドレル作製システムの開発 (第 1 報) - 周方向修正加工システムの開発 -, 精密工学会誌, 83 巻 3 号 (2017) .
- 5) Ralf D Geckeler: Optimal use of pentaprisms in highly accurate deflectometric scanning, *Measurement Science and Technology*, Volume 18, Number 1(2006).
- 6) Youichi Bitou and Yohan Kondo "High-lateral-resolution scanning deflectometric profiler using a commercially available autocollimator" *Measurement Science and Technology*, 25 (2014).
- 7) 清野 慧: 基準のいない精密測定法 多点法, 精密工学会誌, 61, 8 (2010) 165.
- 8) 伊藤 直幸, 外川 一仁, 柳 和久, 清野 慧, 田中 秀岳 "参照平板の横シフトおよび逐次二点法を用いた真直度輪郭測定" 精密工学会誌, Vol. 80 (2014).
- 9) 遠藤 勝義 "非接触走査型ナノ形状測定法の開発" 精密工学会誌, Vol. 80 (2014).
- 10) Thwaite, E.G. "A method of obtaining an error free reference line for the measurement of straightness. *Messtechnik*, 10, 317-318 (1973)..
- 11) 艾 曉庸, 清水 毅, 小尾 誠. "改良型置換測定法による真直度測定" 日本機械学会論文集 C 編 66(646), 2010-2015, (2000).
- 12) 三村 秀和, 湯本 博勝, 松山 智至, 佐野 泰久, 山内 和人 " X 線ミラー用ナノ精度表面創成法の開発" 精密工学会誌, Vol. 76 (2010) No. 3.