

機関番号：84502

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760106

研究課題名（和文） 高精度ステッチング干渉法に基づく硬X線ナノ集光ミラー用表面形状計測法の開発

研究課題名（英文） Development of surface figure metrology system based on stitching interferometric method for hard x-ray nano-focusing mirrors

研究代表者

湯本 博勝（YUMOTO HIROKATSU）

財団法人高輝度光科学研究センター・光源・光学系部門・研究員

研究者番号：20423197

研究成果の概要（和文）：本研究では、ミラー型光学素子による硬X線ナノ集光実現を目的とし、本X線集光ミラーを作製するために必要となる形状精度を保証可能な表面形状計測システムの構築を行った。可視光位相シフト白色顕微干渉計を利用しミラーの部分的な表面形状計測を行うと同時に、各計測領域間の相対角度決定型の高精度ステッチング干渉法を開発した。これにより、ミラー全体形状に関して1nm単位の高精度なデータ算出が可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed at the realization of hard-x-ray nano-focusing beam using mirror optics. We developed a surface figure metrology system to measure nano-focusing mirror surface. We built a stitching interferometric system by using a white light microscopic interferometer. In this system, the microscopic interferometer measures local surface area of mirror surface, and at the same time, relative angle between local surface areas is measured by using another interferometer. This enables to measure entire mirror surface profile with an accuracy of a nanometer level.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：X線光学素子，超精密加工，表面形状計測

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：表面形状計測，X線ミラー，ステッチング干渉計，X線光学素子，X線ナノ集光

1. 研究開始当初の背景

X線を利用した分析技術は、医学・生物学・材料科学など、あらゆる分野の研究の進展に不可欠な存在となっている。さらに、SPring-8に代表される第3世代放射光X線源が実用に供され、高輝度X線光源を利用したナノスケールX線分析への期待が急速に高まっている。

硬X線領域のナノ分解能顕微鏡を実現するためには、様々な集光光学素子の中でも、大開口、高集光効率、長焦点距離（長ワーキ

ングディスタンス）の確保が可能な、2枚の独立した楕円筒面ミラー（長手方向は楕円形状、短手方向は平面形状）により水平方向と垂直方向の独立した集光を行う Kirkpatrick-Baez (KB) 型ミラー光学配置が最も有効である。現在までに、KBミラーや回折を利用したゾーンプレートやラウエレンズ、屈折レンズなどを利用したX線集光光学素子が開発され、集光径において50nmオーダーが実現されている。しかしながら、ゾーンプレートやラウエレンズ、屈折レンズは原理

的に集光効率が低く、高々数十%程度である。また、ワーキングディスタンスは数 mm 程度と、X線ナノプローブとしての使用が大きく限定される。これに対して、ミラー光学系は、原理的に高い集光効率(80%以上)を 100mm レベルのワーキングディスタンスをもって実現できる。これを硬X線顕微鏡用光学素子に応用することにより、最先端の科学分野において革新的なナノ分解能X線分析手法を提供できる。

本課題開始までの研究で確立したX線光学素子開発プロセス(高精度X線ミラー加工法, 表面形状計測システム RADSI, At-wavelength 形状計測法など)により, 15keV の硬X線において世界最小の 36nm×48nm の2次元集光や25nm の1次元集光(半値幅)に成功した。

2. 研究の目的

本研究では, 1枚のミラーにより2次元集光可能な集光光学素子である回転楕円面形状ミラーによる硬X線ナノ集光実現を目的とし, 本X線集光ミラーを作製するために必要となる形状精度を保証する形状計測システムを開発する。形状計測システムとして, 可視光位相シフト白色顕微干涉計を利用した高精度ステッチング干渉法に基づく表面形状計測システムを構築する。さらに, 回転楕円面形状ミラーによる集光光学系の設計・評価に必要な波動光学的集光シミュレーション手法を開発する。

3. 研究の方法

回転楕円面形状ミラー(図1)を開発するために挙げられる研究開発項目には, X線集光ミラーのための, 表面形状計測法, 表面形状加工法, 集光シミュレーション手法, 集光プロファイル計測・評価装置等がある。

本課題では主に, X線集光ミラーのための表面形状計測法と, 波動光学的集光シミュレーション手法の開発を行った。一方で, X線ミラーのための表面形状加工法と集光プロファイル計測・評価装置の開発に関して進めている。波動光学的集光シミュレーションにより, 光源の波動場とミラー表面形状から集光プロファイルを計算可能であるばかりでなく, X線ミラーに必要な表面形状精度やミラーの姿勢調整許容精度を検討することが可能となる。さらに, これを進展させることで, ミラー表面形状を用い, 順問題で集光プロファイルを計算するだけでなく, 集光プロファイルの強度分布から, 逆問題でミラーの表面形状を計算(At-wavelength 形状計測)することが可能になる。これにより, 表面形状計測法に対して, 計測精度の評価につながられ, 計測法の精度向上や校正法としてフィードバックするなどの応用が期待でき

る(図2)。Spring-8等の第3世代放射光施設で利用可能なコヒーレントX線の挙動を予測するためには, 従来用いられてきた光線追跡シミュレーション手法では不十分であり, 波動光学的シミュレーション手法の開発が必須となる。

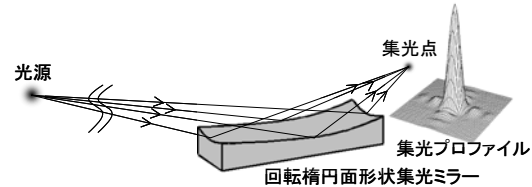


図1 1枚の回転楕円面形状集光ミラーによる硬X線2次元集光

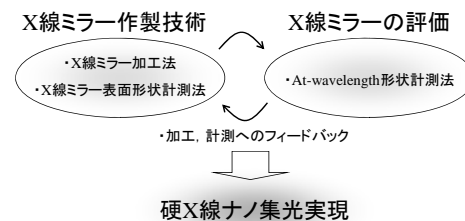


図2 X線ミラー作製プロセス

(1) X線ミラーのための表面形状計測法を構築するために, 本研究では, 可視光位相シフト白色顕微干涉計を利用した高精度ステッチング干渉法に基づく表面形状計測システムの確立を目指した。図3に作製したステッチング干渉法概念を示す。本手法では, 位相シフト顕微干涉計によりX線集光ミラーのローカルな領域を計測し, 計測した形状データをつなぎ合わせる, すなわち, ステッチングすることでX線ミラーの全体形状を算出する。

従来のステッチング手法では, つなぎ合わせるデータ間の相対関係はつなぎ合わせしる基準であった。本研究では, つなぎ合わせるデータ間の相対関係の自由度について, “つなぎ合わせ角度成分”を高精度に決定する。これにより, データのつなぎ合わせによって蓄積するステッチング誤差を最小に抑えることが可能になる。

隣り合った形状データ間の相対角度の取得は, 形状データの取得と同時に進行。相対角度の測定には, 被検ミラーと同じステージ上に設置した基準平面ミラーを利用する。被検ミラーを形状計測する位相シフト顕微干涉計とは独立に, 大型フィゾー型干渉計により, 本基準平面ミラーを計測することで, 基準平面ミラーの測定データから傾き成分を抽出し, 被検ミラーの姿勢情報とする。被検ミラーのローカルな領域の形状データ取得時に基準平面ミラーの姿勢を計測することで, 隣り合った形状データ間の相対角を得る。

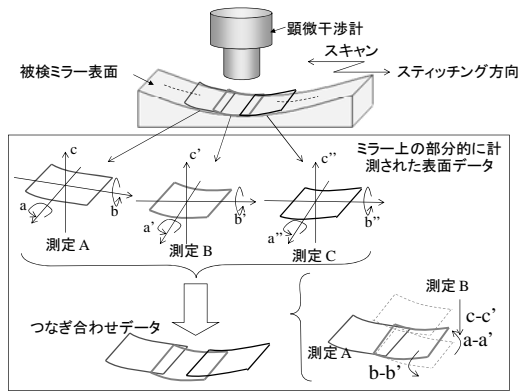


図3 スティッチング干渉法概念

(2)回転楕円面形状ミラーによる2次元の波動光学集光シミュレーター開発では、以前に開発した1次元の楕円筒面ミラーによる波動光学集光シミュレーターで利用したフレネル・キルヒホッフの回折積分理論を応用した。図4に2次元波動光学集光シミュレーションで用いた光源、ミラー、集光面の配置を示す。このように、仮想光源スリット、ミラー表面、集光面をメッシュに分割し、仮想光源上で定義した波動場をミラー面上に伝搬させ、次に、集光面上の波動場を計算する手順で集光プロファイルを計算した。

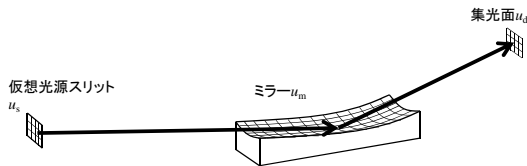


図4 2次元波動光学集光シミュレーション光学配置

4. 研究成果

(1)図5に示す形状計測装置を構築した。本装置は、恒温室内に設置され、装置環境は 0.1°C 以下の温度で安定化がなされている。本装置で行う角度計測において、基準平面ミラーと大型フィゾー干渉計を利用することで、角度の計測再現性について $1 \times 10^{-7}\text{rad}$ 以下を達成した。これは、顕微干渉計で計測したローカルなX線ミラーの表面形状データ間のスティッチング角度精度と同値であり、本手法はスティッチング干渉法のデータ算出精度向上において非常に有効であることが示された。

本装置を使用し、図6に示す形状のX線集光ミラーを計測した。本X線集光ミラーは、理想的な集光条件下において、 7keV のX線に対して 25nm (半値幅)の回折限界集光性能をもつ。本X線集光ミラーは、長手方向に約 5m 前後の曲率半径を持ち、従来の顕微干渉計を利用したスティッチング手法では、理想的な集光に許容されるX線ミラー表面形状精度(4nmPV (Peak to Valley))を満足して評価

することが困難であった。開発した形状計測装置を用いてX線ミラーの表面形状計測再現性について評価した。計測再現性は、3回連続計測し、得られた測定データの平均値からのばらつきをもって評価した。結果、図7に示すように計測再現性 4nmPV を達成した。

さらに、本装置を用いて形状計測し作製したX線ミラーにより 27nm (半値幅)のX線集光を 7keV のX線において達成した。これより、本装置の測定の確からしさに関して見積もった結果、 4nmPV 程度が得られていることが確認された。

以上のように、開発した形状計測装置により今までは不可能であった楕円形状X線集光ミラーの開発が可能となった。

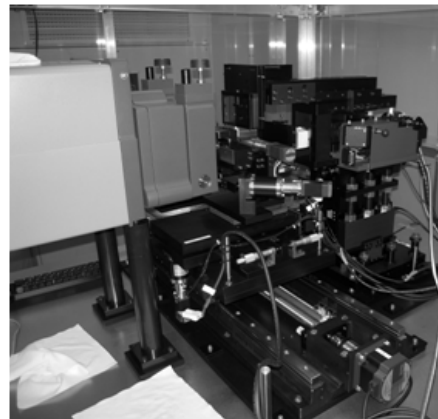


図5 形状計測装置外観写真

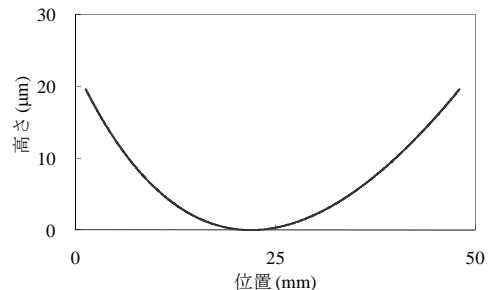


図6 計測形状

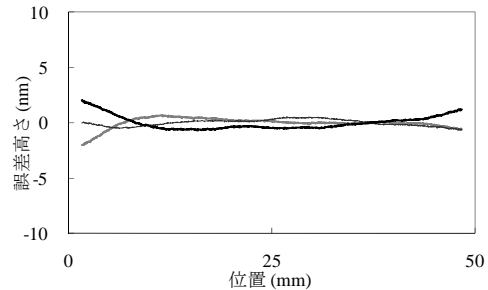


図7 計測再現性の評価結果

(2) 開発した2次元波動光学集光シミュレーターにより、集光面内の2次元平面内で波動場を計算することが可能となった。これにより、集光面内の強度分布だけでなく、位相分布の解析も行えるようになり、X線の可干渉性を考慮したシミュレーションができるようになった。別途開発した光線追跡法で得られた結果と比較検討し、開発した波動光学シミュレーターの確からしさに関して評価を行った。

開発した回転楕円ミラーによる2次元波動光学集光シミュレーターを使用し、表1に示す楕円の光学パラメータを持つミラーにより集光シミュレーションを行った。15keVの入射X線エネルギーについて計算した結果を図8と図9に示す。

図8では、X線ミラーの姿勢調整に許容される入射角誤差や面内回転誤差を検討するために、理想的な入射角と面内回転に対して誤差を与えて集光プロファイルを計算した。計算中、入射角と面内回転誤差を共に与える際には、入射角、面内回転の順番で誤差を与えた。これより、入射角と面内回転誤差に関して約0.2 μ radの精度で調整が必要であることが示された。

図9では、X線ミラーの表面形状に要する精度に関して検討した。図に示すようなRMS(Root-Mean-Square)1.65nmの仮想形状誤差を想定し、集光プロファイルを計算した。X線ミラーに形状誤差が含まれる場合に関しても開発したシミュレーターにより集光プロファイルの予測が可能となった。

表1 ミラー光学パラメータ

光源—ミラー中心間距離	50m
ミラー—集光点間距離	150mm
ミラー中心入射角	3.6mrad
ミラーの長手方向サイズ	100mm
ミラーの短手方向サイズ	500 μ m

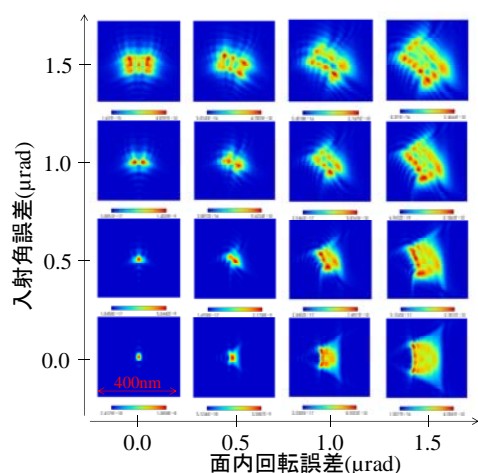


図8 集光プロファイルの入射角と面内回転誤差依存性

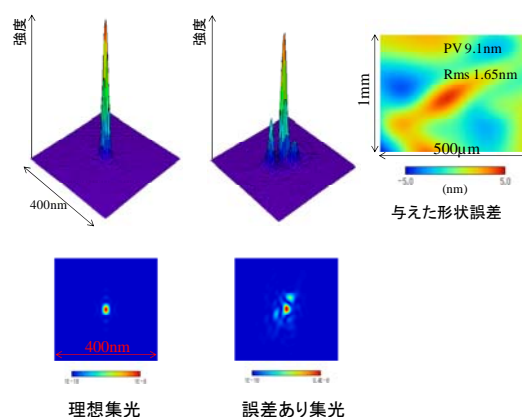


図9 集光プロファイルのミラー表面形状誤差依存性

入射角、面内回転、焦点距離、形状について任意の誤差を与えて集光プロファイルが計算可能であり、これらを予め検討することで集光調整時において、ミラーの姿勢調整時間の短縮化も期待できる。

(3) KB型光学配置と比べ、1枚の集光素子により2次元集光可能な回転楕円形状ミラーを使用することで、X線ナノプローブの取り扱いやすさは格段に向上する。これにより、X線の高い透過能力を利用した真空環境を必要としない非破壊かつ内部構造観察が可能なナノ分解能X線分析法は、電子顕微鏡やAFMの普及性に近づき、今までよりも汎用的な分析法となり、革新的な分析結果を提供できる。また、開発した形状計測技術そのものが超精密生産技術への大きな貢献になる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計2件)

- ① [Hirokatsu Yumoto](#), Hidekazu Mimura, Takashi Kimura, Satoshi Matsuyama, Yasuhisa Sano, Haruhiko Ohashi, Kazuto Yamauchi, and Tetsuya Ishikawa, "Surface figure metrology system for hard x-ray sub-10-nm focusing mirrors" 4th Workshop on Adaptive and Active X-ray and XUV Optics (ACTOP11), 4th-5th April 2011, Diamond Light Source, Oxfordshire, UK, Oral

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯本 博勝 (YUMOTO HIROKATSU)

財団法人高輝度光科学研究センター・光源・光学系部門・研究員

研究者番号：20423197