

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20394

研究課題名（和文）非対称的集光を実現する自由曲面X線ミラーの開発

研究課題名（英文）Development of free-form mirror for X-ray focusing with arbitrary astigmatism

研究代表者

竹尾 陽子（Takeo, Yoko）

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：50910155

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：斜入射ミラーは高強度かつ波長の短いX線を集光・成形する上で不可欠な基盤技術である。現在X線領域で実用化されているミラーの多くは円錐曲線に基づいて設計されており、このことが光学系設計の自由度を制限している。

本研究では、鉛直方向と水平方向で異なる集光特性を持つ全く新しい斜入射ミラーの開発を目的として、3次元自由形状の設計手法・形状計測・光学系内でのin-situ評価の3点に取り組んだ。その実証として、長手と短手で10倍の縮小倍率の比を持つミラーを作製し、設計通りの機能を持つことをSPRING-8軟X線ビームラインで確認した。本研究は軟X線放射光施設をはじめとする様々な応用展開が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光学系を設計する際に、円形ビームが点光源から発するという仮定を用いることは多いが、実際の光源特性には必ずしも当てはまらない。物性研究や製薬の領域で欠かせない役割を果たす放射光軟X線光源はその一例である。このような光源を持つ鉛直・水平方向の非対称性を考慮に入れたうえで、それらを解消あるいは付加する光学技術が必要とされている。

本研究で開発した技術によって、これまで斜入射ミラーが2枚必要だった上述の光学系を、1枚で実現することができるようになった。これにより、多様な軟X線解析手法に最適化した照明ビームを低コストで生成可能となり、新たな物質の発見や現象の解明につながると期待される。

研究成果の概要（英文）：Grazing incidence mirrors are an essential fundamental technology for focusing and shaping X-rays with high intensity and short wavelength. Most mirrors currently in practical use in the X-ray field are designed based on conic curves, which limits the degree of freedom in designing optical system.

In this study, we addressed the following three points to develop a new grazing incidence mirror with different focusing characteristics in the vertical and horizontal directions: a three-dimensional free-form design method, figure measurement, and in-situ evaluation in an optical system. As a demonstration, we fabricated a mirror with a 10x different reduction ratio between longitudinal and sagittal focusing, and confirmed the functions as designed at the soft X-ray beamline of SPRING-8. This research would be deployed in various applications including soft X-ray synchrotron radiation facilities.

研究分野：X線光学

キーワード：精密計測 精密加工 X線ミラー 光学設計 軟X線集光

1. 研究開始当初の背景

光学系を設計する上で最も単純な仮定は、円形ビームが点光源から発するというものである。しかしながら、光源から広がるビームのサイズや波面中心が鉛直と水平で異なることは往々にしてある。また、ビームを線状に成形するなどの特殊な要求も存在する。例えば、物性研究や製薬の領域で欠かせない役割を果たす放射光軟 X 線は、光源における鉛直方向の発散角が水平方向の数倍程度大きい。一方で、軟 X 線を用いた計測には完全に円形のビームまたは 10:1 以上のアスペクト比を持つビームが好まれるため、光源の持つ非対称性を解消あるいは付加する光学系が必要とされている。

現状、軟 X 線ビームの非対称性の解消あるいは付加には 2 枚以上の斜入射ミラーが必要とされ、運用やコストの面から敬遠されている。1 枚で非対称的な集光性能を示す軟 X 線ミラーが実現すれば、ビームラインの簡略化をもたらすだけでなく、各種軟 X 線解析手法に最適化したプローブ光の生成が可能となり、新たな発見や現象の解明につながるも期待される。

しかしながら、1 枚で鉛直と水平で異なる集光性能を持ちつつ sub- μm の集光サイズを示すミラー光学系はこれまで実現されていない。その理由として、

- ① 理想的な性能をもたらす設計手法の不在
- ② 1 nm という極めて厳しい要求精度
- ③ 達成された集光性能に対する定量的な評価手法の不在

の三点があげられる。①は、自由曲面ミラーの実現に対する諦めから、深く議論されてこなかった。②は、波長 1 nm 程度の軟 X 線を対象とするために必然的に要求されるが、長手方向と短手方向で異なる曲率を持つ自由曲面形状に対しては極めて厳しい要件である。③は、ミラーの作製技術と実性能を関連付けて議論する上で必要となる。

2. 研究の目的

非対称的な X 線集光を実現するために、本研究では、新しい設計方式である非点収差制御ミラーを提案した。図 1 (a) にその模式図を示す。光源線と集光線を 2 本ずつ定義することによって鉛直・水平の異なるビーム特質を表現し、このような集光条件に最適なミラー形状を幾何光学的に求める。さらに、このミラーを同一基板上に 2 種配置することによって、図 1 (b) に示す二回反射ミラーが実現する。本設計では、上流側ミラーによって意図的に生じさせた非点収差を、下流側ミラーによって完全に解消し一点に集光しなおす。このような設計により、鉛直方向と水平方向で異なる縮小倍率を持ちつつ一点にビームを集光する、これまでにないミラーを与えられる。

本研究の目的は、本設計式を用いて設計された、非常に急峻な自由曲面である非点収差制御ミラーを実際に作製・作製し、最高の強度を持つ X 線光源である放射光施設で評価することである。そのために必要な、設計・形状計測・in-situ 性能評価という 3 種の基盤技術の開発に取り組む。

3. 研究の方法

本研究では第一に、設計手法の確立に取り組んだ。幾何光学と波動光学を組み合わせたシミュレータを開発し、設計するミラーの機能を放射ビームの部分コヒーレンス性も加味して検証した。

ミラーの作製プロセスにおける形状計測法として、接触式プローブを用いた高精度 3 次元形状計測装置 UA3P (Panasonic 製) を選択した。本装置で計測される形状誤差が集光性能に与える影響を前述のシミュレータにより定量的に評価し、より重要度の高い形状誤差を選択的に除去した。

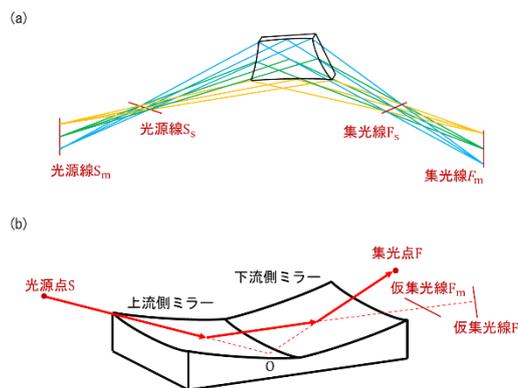


図 1 非点収差制御ミラーの概念図
(a) 一回反射ミラーの設計理念
(b) 二回反射ミラーの設計理念

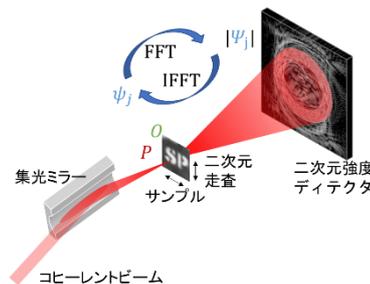


図 2 タイコグラフィ計測の概念図

作製されたミラーの実際の形状誤差及び集光性能を in-situ で評価するために、図 2 に示すタイコグラフィ計測法 (J. M. Rodenburg et al, Physical Review Letters, 2007) を選択した。本計測は可干渉性のある集光ビームを照明に用いる走査型顕微鏡の一種であるが、波動光学に基づく位相回復法の適用により照明ビームの波動場の情報を同時に回復できる。この波動場を解析することで、詳細な集光特性やミラーの形状誤差及びアライメント誤差を非接触で評価できる。

作製した軟 X 線集光ミラーの評価機構を、大型放射光施設 SPring-8 の軟 X 線ビームライン BL25SU-A に構築した。第一段階として一回反射の非点収差制御ミラーを、第二段階として二回反射の非点収差制御ミラーを、それぞれ設計・作製・導入した。図 3 に示すのは 2 回反射ミラーの形状である。上流側ミラーは長手・短手に凹のプロファイルを、下流側ミラーは長手に凸・短手に凹のプロファイルを、それぞれ持つ。一点から広がるビームを一点に集光させつつ、長手方向と短手方向の縮小倍率に 10 倍の比を与えるために、このような形状を試験的に設定した。図 4 に示すのは二回反射ミラーを BL25SU-A に導入した際の実験装置外観である。

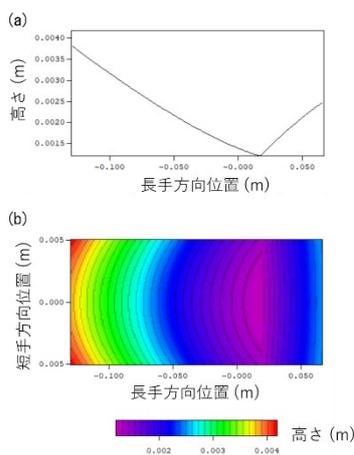


図 3 二回反射ミラーの設計
(a) 長手方向プロファイル
(b) 二次元高さ分布

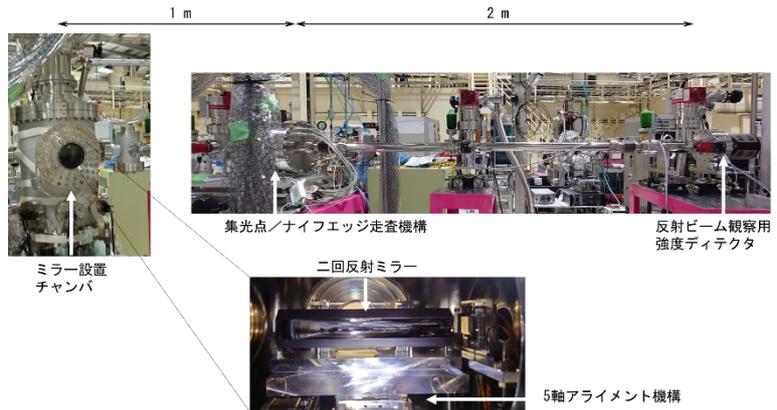


図 4 SPring-8 BL25SU-A における実験装置

4. 研究成果

<一回反射ミラーの原理検証>

まず、一点から広がるビームを長手・短手で異なる位置に集光するミラーを設計・作製し、BL25SU-A において 1 keV の軟 X 線を用いて評価した。2 箇所の集光点では、いずれもアスペクト比 1:1000 の線状の集光ビームが形成され、提案する設計手法の妥当性及び作製・計測精度の高さを示した。

<二回反射ミラーの原理検証>

続いて、2 種の一回反射ミラーを同一基板に配置したミラーを BL25SU-A に導入し、設計通り鉛直・水平で 10 倍の縮小倍率比を示すことを確認した。図 5 にタイコグラフィにより計測されたミラー面形状誤差の断面プロファイルを示す。長手方向よりも短手方向の形状誤差の方がより大きいことが明らかとなった。特にミラーの集光性能に影響を与えていたのは短手の 500 μm から 1 mm 周期の中周期うねりであった。事前の接触式プローブを用いた 3 次元形状計測結果ではこのような形状誤差を検知できておらず、作製工程での評価手法に課題を残した。

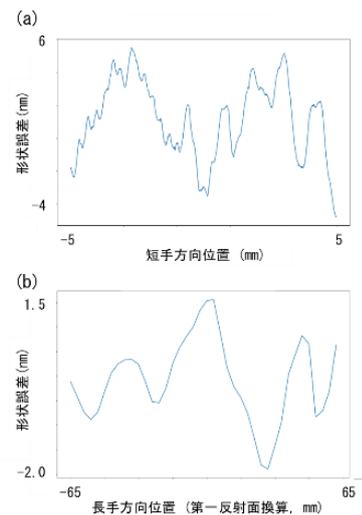


図 5 二回反射ミラーの形状誤差
(a) 短手方向プロファイル
(b) 長手方向プロファイル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Takeo, T. Tanaka, Y. Senba, H. Ohashi and H. Mimura
2. 発表標題 Wave-optical simulation for soft X-ray focusing optics using coherent mode decomposition
3. 学会等名 International Conference on X-ray Optics and Applications 2021 (XOPT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Takeo and H. Mimura
2. 発表標題 A design method of X-ray focusing mirrors capable of correcting arbitrary astigmatism
3. 学会等名 The 7th International Workshop on Metrology for X-ray Optics, Mirror Design and Fabrication (IWXM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------