

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21146

研究課題名（和文）X線顕微鏡のためのアダプティブ反射レンズの開発

研究課題名（英文）Development of adaptive reflective lenses for X-ray microscope

研究代表者

松山 智至（Matsuyama, Satoshi）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10423196

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：X線は高透過力・短波長であるため、これを用いて顕微鏡を構築できれば、物質科学・生物学などの分野でブレイクスルーが期待される。しかし、その性能を決定づけるX線レンズはまだ開発の余地が多く、世界各国で研究開発が行われている。本研究では、反射型のX線レンズに注目し、その高性能化のために、専用の高精度形状可変ミラーを設計・シミュレーション・試作・性能評価を実施した。試作した形状可変ミラーは、1nm以下という高い精度で形状を変形することができた（可視光干渉計に計測）。実際にX線集光光学系に組み込んで、その性能を評価したところ、 $1/4$ 程度まで波面収差を修正することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、X線顕微鏡の性能を大幅に向上可能な形状可変ミラーを開発した。本ミラーをX線顕微鏡の反射レンズに組み込むことで、空間分解能をさらに小さくすることができる。これまで見るができなかった様々な試料・現象を高精細に観察することができるようになり、例えば、触媒や電池、半導体デバイスの内部観察に力を発揮できる。これらの観察を足掛かりに高性能な触媒・電池半導体デバイスなどを開発することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：High-performance X-ray microscopes are capable of providing breakthroughs in scientific fields such as materials science and biology because of the high penetrating power and short wavelength. However, there is still much room for development of X-ray lenses, which determine the performance of such microscopes, and research and development is being conducted in many countries around the world. In this study, we focused on reflective X-ray lenses to improve its microscope performance. We designed, simulated and fabricated deformable mirrors, and evaluated the performance. The developed deformable mirror was able to deform its shape with an accuracy of less than 1 nm, which was evaluated with an optical interferometer. The performance of the mirror was also evaluated by incorporating it into an X-ray focusing optical system, and it succeeded in correcting the wavefront aberration with an accuracy of $1/4$.

研究分野：X線光学

キーワード：X線 X線顕微鏡 形状可変ミラー X線結像

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線顕微鏡は透過力が高いため、厚い試料の内部や水中・ガス中などの実環境下での観察(2Dや3D)に威力を発揮する。また、X線は波長が短いため原理的に高分解能を実現できる。さらに、その高いエネルギーを活かして局所分析しながらイメージングすることも可能である。電子顕微鏡が苦手とする領域をカバーできるため、その開発が期待されている。一方で、X線は短波長であるという点は致命的なデメリットとしても作用する。波長が可視光の数千分の一であるため、X線光学素子作製に必要な精度がこれに比例して厳しくなる。また、分解能向上のためにはレンズの開口数を大きく設計する必要があるが、開口数に比例して光学素子作製に要求される精度は厳しくなっていく。これらのために、X線用の高分解能結像レンズ(屈折レンズ、回折レンズ、反射レンズ)の開発は技術的な限界に到達しつつある。

2. 研究の目的

本研究では、アダプティブ反射レンズ(形状可変ミラーで構成された結像光学システム)を用いることで、この限界を突破する。10nm以下の空間分解能を持つ高分解能X線顕微鏡を実現するため、アダプティブ反射レンズの試作を行い、その基礎技術の獲得を目指している。

3. 研究の方法

研究・開発は以下の順に進めた。はさらに未来を見据えた研究である。

有限要素法を用いた形状可変ミラーの変形シミュレーション

有限要素法を用いて、試作候補としてデザインした形状可変ミラー(バイモルフ式)の変形特性をシミュレーションした。形状可変ミラーの駆動はチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)を用い、ミラー基板として合成石英ガラスを用いた。PZTとミラー基板は接着剤を用いない接合とし、モデルを構築した。

形状可変ミラーの試作

設計した形状可変ミラーを実際に試作した。試作形状可変ミラーが正しく動作することを確認するために、可視光干渉計を用いた動作試験を行った。それぞれの電極に電圧を印加しながら、形状の変化を計測した。動作試験後、ミラー表面に多層膜をコーティングし、X線反射面を形成した。

SPring-8における性能評価実験

SPring-8 BL29XUにて試作した形状可変ミラーと凸ミラーを組み合わせることで、集光光学系を構築した。焦点下流に回折格子と高性能なX線カメラを配置することで、X線干渉計を構築した。形状可変ミラーの形状をわずかに変形させることで、反射後のX線波面が変化する。X線干渉計で波面の歪みを計測することで、X線照射下における形状可変ミラーの性能を評価した。

単結晶圧電素子を用いた形状可変ミラーの試作

これまでに開発した形状可変ミラーはPZTを用いたバイモルフ式(surface-parallel式)のものであった。これは構造上、変形形状の空間周波数を短くすることが難しい。そのため、単結晶圧電素子を用いたSurface-normal式の形状可変ミラーを試作した。

機械学習を用いた波面推定

形状可変ミラーの制御のためには波面を計測する必要がある。回折格子を用いたX線干渉計は高い性能を有しているが、一方で拡大結像光学系に組み込むことが難しい。そのため、拡大結像光学系にも適用できる新しい手法の開発も進めた。収差のあるレンズで試料を結像した場合、像は歪む。機械学習を用いて、波面収差と画像の歪みの関係を学習させることで、画像から波面収差を予想できるニューラルネットワークの作成を試みた。

4. 研究成果

有限要素法にて変形をシミュレーションしたところ、空間周波数25mmの形状誤差であれば、3nm(peak-to-valley, PV)から0.5nm(PV)へと高精度に修正できることが分かった。これ以上の空間周波数では、どれだけ電極を細かく配置したとしても高空間周波数の形状を再現できなかった。これはバイモルフ式形状可変ミラーのデメリットの一つである。

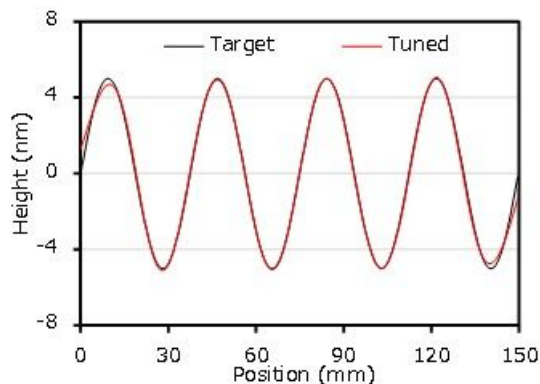


図1 有限要素シミュレーションの一例．空間周波数 37.5mm，振幅 5nm のサイン波状の形状（Target）へと変形できるか調査したところ，誤差 0.5nm 以下で変形（Tuned）することができた．

電極に電圧を印加しながら可視光干渉計で変形を測定した．実験で得られた応答関数と有限要素法で得られた応答関数を比較したところ，リーズナブルに一致した．この結果より，形状可変ミラーの試作に成功したと結論付けた．

SPring-8 にて X 線を用いた波面制御のテストを実施した．初めに，各電極への電圧印加に対する変形の関係を実測した．これを使って任意の波面を作るための電圧パターンを計算した．変形前に残存する波面収差をゼロにするための電圧印加パターンを印加したところ，波面収差は $1/4$ 程度まで修正することができた．

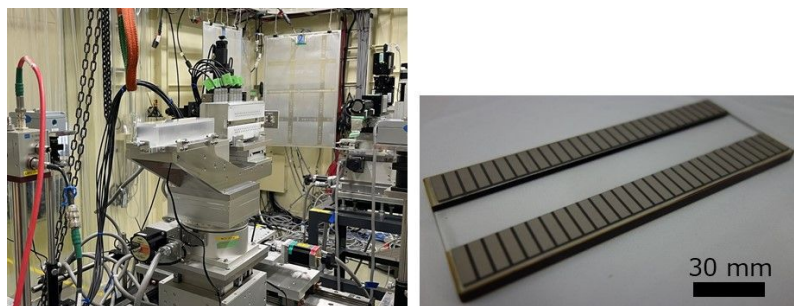


図1 SPring-8 にて構築した集光光学系と試作した形状可変ミラー

単結晶圧電素子に基づいた形状可変ミラーの試作を行った．単結晶圧電素子の表面と底面に電極層を形成した後に，ガラス基板上に単結晶圧電素子を固定した．電極に対して電圧を印加したところ，有限要素シミュレーションの結果とよく一致した．バイモルフ式の約半分の空間周波数（約 12mm）で形状を制御できることを可視光干渉計によって確認することができた．

フーリエ光学に基づくシミュレーションによって，機械学習用の学習データを多数作成した（レンズの波面収差をランダムに生成し，このレンズで結像したときの像を計算した）．Convolution neural network (CNN) にこの学習用データと正解波面収差を入力し学習を進めた．学習済み CNN モデルに対して，学習に使用していないデータをインプットしたところ，高い精度で波面収差を予想することができた．一方，この学習済みモデルに実験で得たいくつかの像を入力したが，いくつかの実験データでは波面収差を正しく予想することはできなかった．ショットノイズやカメラボケ，実験のミスアライメントなどの学習データには考慮していなかったノイズが影響した可能性がある．さらなる研究が必要である．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamada Jumpei, Inoue Takato, Nakamura Nami, Kameshima Takashi, Yamauchi Kazuto, Matsuyama Satoshi, Yabashi Makina	4. 巻 20
2. 論文標題 X-Ray Single-Grating Interferometry for Wavefront Measurement and Correction of Hard X-Ray Nanofocusing Mirrors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 7356 ~ 7356
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20247356	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田中優人, 松山智至, 井上陽登, 中村南美, 山田純平, 香村芳樹, 矢橋牧名, 表和彦, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 結像型 X 線顕微鏡における in-situ 波面計測手法の開発
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田純平, 松山智至, 井上陽登, 中村南美, 田中優人, 大坂泰斗, 井上伊知郎, 犬伏雄一, 湯本博勝, 小山貴久, 大橋治彦, 山内和人, 矢橋牧名
2. 発表標題 Wolter III 型 advanced KBミラーによる XFEL sub-10 nm 集光光学系の開発
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上陽登, 松山智至, 一井愛雄, 山田純平, 佐野泰久, 山内和人
2. 発表標題 X線ミラーを用いたsub-5nm集光システムの開発
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上陽登, 松山智至, 田中優人, 二村浩平, 一井愛雄, 山田純平, 佐野泰久, 香村芳樹, 矢橋牧名, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 圧電素子駆動型形状可変ミラーを用いたX線sub-5nm集光システムの開発
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中優人, 松山智至, 井上陽登, 中村南美, 山田純平, 香村芳樹, 矢橋牧名, 表和彦, 石川哲也, 山内和人
2. 発表標題 結像型X線顕微鏡における波面計測手法の開発
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋大学松山研究室 https://x-ray.mp.pse.nagoya-u.ac.jp/

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
---------	---------