

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18752

研究課題名（和文）新規構造を持つ高精度形状可変鏡の開発

研究課題名（英文）Development of high-performance deformable mirror with novel structure

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線光学では、波長が10～0.01nmの光を主に扱うため、理想的な実験をしようとする
と、非常に高い形状精度を持つ鏡が必要である。しかし、現在の最先端技術をもってしても鏡の作製には2nm前
後の誤差が生じてしまう。この問題を解決するために、単結晶圧電素子を用いたモノリシックな形状可変鏡を提
案した。有限要素シミュレーションを使って設計を検討し、これを試作した。実際に可視光干渉計やX線干渉計を
用いて性能を評価したところ、高い安定性と再現性を持つことが分かった。実際のX線実験に応用できる性能を
有していることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発された高性能な形状可変鏡は、様々な領域で波面収差の補正を実施できるポテンシャルを有してい
た。例えば、X線顕微鏡、X線望遠鏡、X線ナノビーム、X線（EUV）リソグラフィにおいては、残存する波面収差
によって性能劣化が引き起こされている。安定かつ再現性良くこれを補正することが可能となり、これらの性能
向上へとつながることが予想される。X線光学における技術向上が次世代のX線光学を拓くために必要であり、本
研究で得られた形状可変鏡はその一助になると考える。

研究成果の概要（英文）：X-ray optics mainly handles light with wavelengths from 10 to 0.01 nm, so
mirrors with extremely high shape accuracy are required for ideal experiments. However, even with
current state-of-the-art technology, there is still a fabrication error of around 2 nm in the
mirror fabrication. To solve this problem, we proposed a monolithic deformable mirror based on a
single-crystal piezoelectric element. The design was carefully considered using finite element
simulation, and a prototype was fabricated. The performance was evaluated using visible light
interferometry and X-ray interferometry, and was found to have high stability and reproducibility.
It was confirmed that the performance of the proposed device can be applied to actual X-ray
experiments.

研究分野：X線光学

キーワード：X線ミラー 形状可変鏡 X線光学

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線光学では、波長が10~0.01nmの光を主に扱うため、理想的な実験をしようとする、非常に高い形状精度を持つ鏡が必要である。しかし、現在の最先端技術をもってしても鏡の作製には2nm前後の誤差が生じてしまう。また、鏡の保持等によって1nmレベルの変形が生じる可能性がある。このような鏡の形状誤差は、X線の波面を歪めるため、集光や結像などの高度な実験を困難にする。このような状況は昨今発展が期待されているX線顕微鏡、X線望遠鏡、X線ナノビーム、X線(EUV)リソグラフィにおいても致命的な性能低下を引き起こし、問題になっている。

2. 研究の目的

本研究では自由かつ高精度に変形できる鏡(形状可変鏡)を実現し、その形状をX線照射下でその場調整することでこの課題を克服する。高い完成度でX線領域の補償光学を実現すべく、全く新しい構造を持つ形状可変鏡を提案し、オーダーの精度と安定性の実現が本研究の目的である。これによって、X線顕微鏡やX線ナノビーム、その他アプリケーションへ応用できる完成度の高い形状可変鏡の実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、単結晶圧電素子を用いたモノリシックな形状可変鏡を提案した。単結晶圧電素子を用いることで、通常よく用いられるPZTで発生するヒステリシスやクリープを大幅に抑制することができる。また、接着を用いないモノリシックな構造とすることで、接着剤による意図しない変形や膨潤などの影響を抑制できるうえ、熱膨張の観点からも単一材料で構成することで、熱変形をなくすことができると期待される。

始めに、単結晶圧電素子の材料選定やカット角に対して検討した。様々な結晶のカット角を検討することで、効率的に変形できる材料を探索した。有限要素法を用いて様々な構造や電極配置を検討した。圧電単結晶の研磨性の調査を行った。次に、有限要素計算で得られた有望な構造を実際に作製し、その性能を可視光干渉計で評価した。SPring-8にてX線照射耐性や変形テストを実施した。

4. 研究成果

単結晶圧電素子の材料とカット角の探索

本研究では、圧電素子であること、単結晶であること、比較的高い圧電定数を持つこと、入手難易度が低いこと、分極構造がシングルドメインであること、からニオブ酸リチウム単結晶を用いることにした。また、電界方向に対して最大値付近の圧電定数が得られ、容易に入手できる36°Yカットを採用した。36°Yカットでは、面内方向の伸び縮みが少なることから、本形状可変鏡における理想的なカット角の一つである。

構造と電極配置の検討

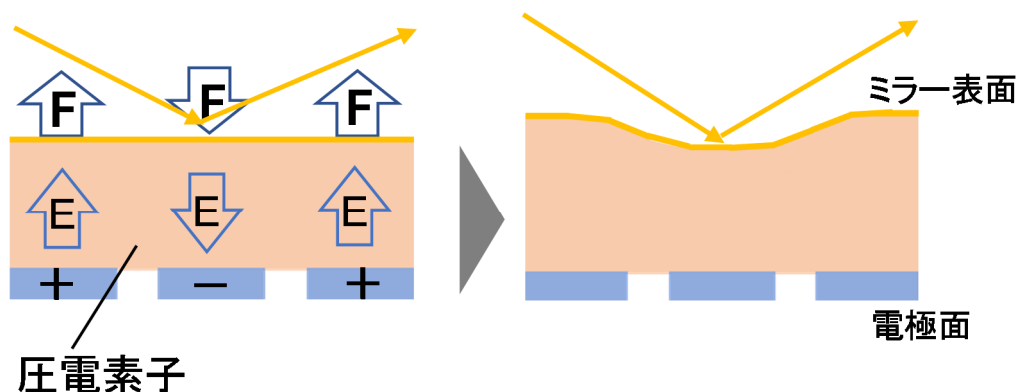


図1 提案した surface-normal タイプの形状可変鏡

形状可変鏡の構造として、曲げモーメントを利用して曲げるバイモルフ構造がX線領域では用いられる。これは、比較的大きな変形と精度を両立できるためであるが、精度面では究極の性能とは言い難く改善の余地があった。このため、X線領域では前例のない surface-normal 駆動の形状可変ミラーを提案した。図1に実際の構造を図示した。電極間に電圧を印加すると、その方向に圧電素子が伸び縮みする。大きな変形量は得られないが、20nmまではサブオングストロームの精度が得られるポテンシャルがある。本研究で目指す形状可変鏡は、作製誤差やホールドによる意図しない変形を補正することを目指しているため20nm程度の変形があれば十分である。

この構造では、圧電素子のアース電極面自体を X 線反射面として利用することがポイントとなる。この結果、本ミラーはモノリシックかつ単一の材料のみで構築可能であり、高い安定性を発揮できるポテンシャルを持つ。

有限要素法を使って、実際の駆動を計算した。いくつかの結晶の形と電極サイズ、電極ピッチを計算で探索したところ、電場のにじみがないように、電極サイズと厚みを同程度とすると、電極による形状制御が十分な精度で実施しできることが分かった。より高空間周波数(例えば、1mm 以下)な形状制御は非常に薄い結晶が必要となり、この構造では難しいが、通常の X 線鏡の作製で問題となるような 5~10mm 程度の空間周波数の形状誤差に対しては十分な修正能力を有することを確認できた。

ニオブ酸リチウム単結晶の研磨特性

いくつかの研磨手法 (CMP, EEM, 特殊研磨など) をもちいて、ニオブ酸リチウム単結晶表面の研磨特性を調査した。詳細な実験手順やパラメータはノウハウであるためここでは伏せるが、0.2nm RMS 程度の良い平滑面を得ることに成功した。この表面粗さは X 線実験で良好な反射率特性が得られる十分に平滑とみなせる表面粗さである。

形状可変鏡の試作と可視光干渉計による変形テスト

シミュレーションによって実用的な設計であると確認できた構造を実際に作製し、その変形性能を可視光干渉計 (フィゾー干渉計) によってテストした。実験セットアップを構築し、高圧電源によって電圧を印加した。電圧印加前後の変形を計測し、得られた結果とシミュレーションの結果を比較した。良い精度で一致したことから、形状可変ミラーの試作に成功したと結論付けた。また、本ミラーは安定に動作することを長時間にわたって変形を測定することによって確認することができた。

SPring-8 における X 線照射耐性テストと変形テスト

SPring-8 の BL29XU にて X 線照射耐性テストを行った (図 2, 実験セットアップ)。10keV のアンジュレタ光をフルパワーで照射した前後の形状変化を X 線干渉計で測定した。X 線干渉計は Talbot 効果を利用したもので、波面収差を高精度に測定することができる。この結果をもとにミラーの変形量に変換した。なお、事前のテストで十分な精度で変形量を測定できることを確認している。照射テストの結果、優位な変化は生じておらず、十分な放射線耐性を持つことを確かめることができた。また、と同様の実験を X 線干渉計を使っても実施することができる。その結果、と同様の結果を得ることができ、改めて、試作した形状可変ミラーの有用性を示すことができた。

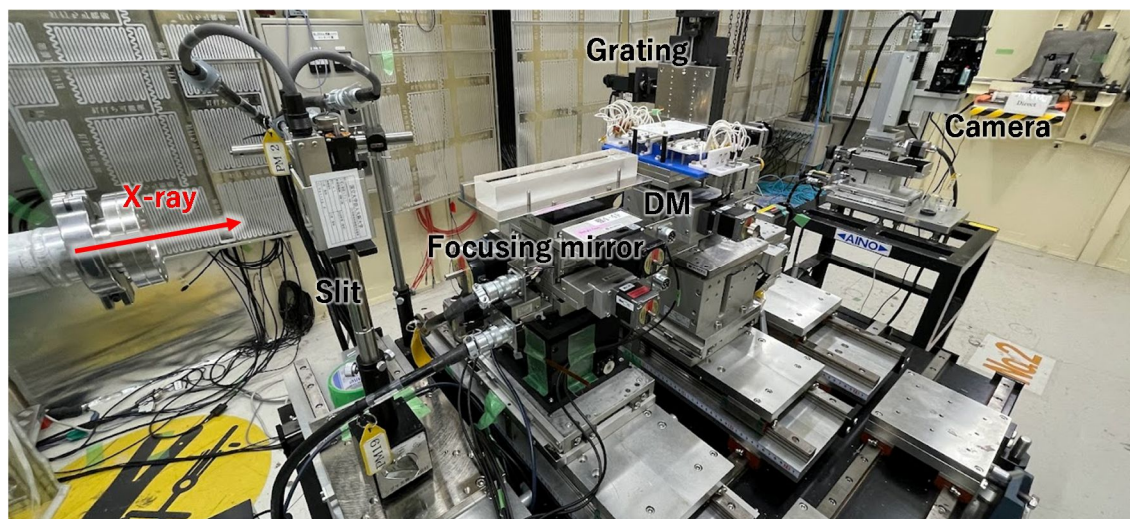


図 2 SPring-8 にて構築した X 線波面計測のためのセットアップ

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 Inoue Takato, Nakabayashi Sota, Uematsu Kota, Tanaka Yuto, Nakamori Hiroki, Kohmura Yoshiki, Yabashi Makina, Matsuyama Satoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Monolithic deformable mirror based on lithium niobate single crystal for high-resolution X-ray adaptive microscopy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 621 ~ 621
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/optica.516909	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10件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Sota Nakabayashi, Takato Inoue, Kota Uematsu, Yuto Tanaka, Yoshio Ichii, Yoshiki Kohmura, Makina Yabashi and Satoshi Matsuyama
2. 発表標題 Development of ultraprecise X-ray adaptive optical system for high-resolution full-field microscopy
3. 学会等名 8th International Conference on X-ray Optics and Applications 2023 (XOPT2023) in OPIC2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中林荘太, 井上陽登, 伊藤颯希, 香村芳樹, 矢橋牧名, 松山智至
2. 発表標題 単結晶圧電素子ベース形状可変ミラーを用いたアダプティブ結像型X線顕微鏡の開発
3. 学会等名 2023年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上陽登, 中林荘太, 田中優人, 上松航太, 加納愛彩, 香村芳樹, 矢橋牧名, 松山智至
2. 発表標題 超高分解能結像型X線顕微鏡のためのアダプティブミラー光学系の開発
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics and Photonics Japan 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Matsuyama
2. 発表標題 High-resolution Full-field X-ray Microscope Based on Multilayer Advanced KB Mirrors
3. 学会等名 15th International Conference on X-ray Microscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Nakabayashi, K. Uematsu, T. Inoue, and S. Matsuyama
2. 発表標題 Novel deformable X-ray mirrors based on lithium niobate singlecrystal
3. 学会等名 7th International Conference on X-ray Optics and Applications 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Nakabayashi, T. Inoue, K. Uematsu, Y. Kohmura, M. Yabashi and S. Matsuyama
2. 発表標題 Development of ultra precise adaptive X-ray optical imaging system for high-resolution X-ray microscope
3. 学会等名 Asia-Oceania Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中林 荘太, 井上 陽登, 上松 航太, 矢橋 牧名, 香村 芳樹, 松山 智至
2. 発表標題 ニオブ酸リチウムを用いた高精度形状可変ミラーの開発
3. 学会等名 第36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 2023年

1. 発表者名 田中優人, 井上陽登, 中林荘太, 上松航太, 伊藤颯希, 山田純平, 香村芳樹, 矢橋牧名, 山内和人, 松山智至
2. 発表標題 高空間分解能な結像型X線顕微鏡のためのX線ミラー補償光学系
3. 学会等名 第36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 2022年

1. 発表者名 中林荘太, 井上陽登, 上松航太, 香村芳樹, 矢橋牧名, 松山智至
2. 発表標題 ニオブ酸リチウム単結晶を用いたX線用形状可変ミラーの開発 - 第2報: アダプティブ Advanced KBミラー光学系の構築 -
3. 学会等名 2022精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上陽登, 中林荘太, 上松航太, 一井愛雄, 香村芳樹, 矢橋牧名, 山内和人, 松山智至
2. 発表標題 次世代X線顕微鏡のための高精度X線形状可変ミラーの開発
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>松山研究室【名古屋大学院工学研究科・物質科学専攻・量子ビーム物性工学】 https://x-ray.mp.pse.nagoya-u.ac.jp/</p>

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