

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20407

研究課題名（和文）X線自由電子レーザーの極限集光に向けた高安定な形状可変ミラーの開発

研究課題名（英文）Development of highly stable deformable mirrors for extreme focusing of X-ray free-electron lasers.

研究代表者

井上 陽登（Inoue, Takato）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：40966777

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、X線自由電子レーザーを高い安定性の下極限的に集光することができるシステムの実現を目指し、形状可変ミラーの開発に取り組んだ。X線領域では、圧電素子駆動型形状可変ミラーが良く用いられる。印加電圧に対する変形量を大きくするために、積層構造を考案し、金属接合を用いることで実現した。これにより、変形量の増大に成功した。また、変形形状の微細化を達成するために、薄板接合構造を考案した。銀ナノペーストを用いることで作製に成功し、X線環境下において変形することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

X線自由電子レーザー（XFEL）を利用することで、試料の真の非破壊観察や、X線非線形光学の開拓が期待されている。これらを実現するためには、XFELを高い安定性の下、小さく高密度に集光する必要がある。すなわち、高い形状精度と安定性を有するX線集光素子が不可欠であり、本研究で開発する形状可変ミラーはそれらを満足する。

研究成果の概要（英文）：In this study, a deformable mirror was developed to create a system capable of focusing an X-ray free-electron laser with high stability. Piezoelectric-driven deformable mirrors are commonly used in the X-ray region. To increase the deformation in response to an applied voltage, we implemented a bonding structure using metal junctions, successfully enhancing the amount of deformation. Additionally, a thin-plate bonding structure was devised to achieve finer deformation shapes. This structure was successfully fabricated using silver nanopaste, and the deformable mirror exhibited successful deformation in an X-ray beamline.

研究分野：X線光学

キーワード：X線自由電子レーザー X線ミラー 形状可変ミラー 圧電素子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線自由電子レーザー (XFEL: X-ray Free Electron Laser) は、ほとんど完全な空間コヒーレンスと、第三世代放射光施設の10億倍のピーク強度をもつ、極短パルスX線レーザー (パルス幅: 数 fs) である。極短パルスX線であることから、試料が放射線損傷を受ける前に分析を完了する“Diffraction before destruction”戦略に基づく実験が広く行われ、蛋白質分子の真の構造が明らかになりつつある。また超高ピーク強度を利用することで、非線形X線光学分野の開拓が進みつつある。このような実験を実現するためにはXFELを小さく集光するX線レンズが不可欠である。その中でも、反射型レンズであるX線ミラーは、効率がよく損傷に強い点で非常に優れている。これまでに、超精密加工・計測技術を駆使して高精度なX線ミラーを開発することで、50nm集光が回折限界条件のもとに達成されており、X線領域での様々な非線形光学現象の観察に世界に先駆けて成功している。しかし、集光サイズのさらなる微小化を実現するためには大きな課題がある。それは、ミラー表面に求められる形状精度が非常に厳しいことである。極限的な集光サイズ5nm以下を達成するためには、1nm以下の形状精度を有するミラーが必要であり、既存の精密加工技術をもってしても対応することはできない。

この問題を解決するために、形状可変ミラーが必要不可欠である。特に、圧電素子駆動型の形状可変ミラーは、高い形状変形精度を有することからX線集光素子として取り入れられている。しかし、従来の形状可変ミラーには問題がある。まず、圧電セラミックスであるチタン酸ジルコン酸鉛を利用していることや、異種材料の接合を必要とすることから、安定性に難がある。XFELでの実験は統計的なデータの取得が不可欠であるため、安定性が低いことは致命的である。もう一つの問題は微細な変形ができないことにある。従来の形状可変ミラーは、シリコンやガラスなどのミラー基板に対して対称構造となるように圧電体を張り付けたバイモルフ構造が主流であった。この構造は、圧電体の面内方向の伸縮により生じる曲げモーメントを利用して変形しており、低次関数形状において大変形を可能とするが、一方で細かな周期構造の変形量はその周期長の2乗に比例して小さくなってしまふ。

2. 研究の目的

これまでの問題を解決できる、新規形状可変ミラーを開発する。具体的に、高い安定性を有し、微細変形可能な形状可変ミラーの実現を目指す。

3. 研究の方法

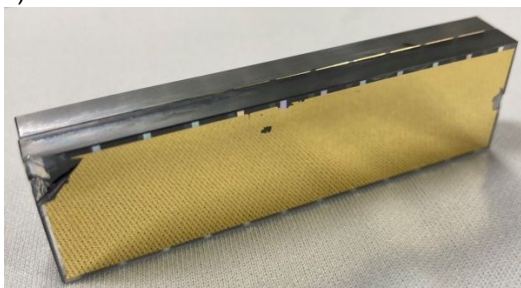
新規形状可変ミラーの材質として、ニオブ酸リチウム (LN) に着目した。LNはシングルドメインの単結晶圧電素子である。そのため、PZTと比較してクリープなどによる変形のドリフトが抑えられると期待される。また単結晶であることから、LN基板の表面を超平滑化できると考えられる。これはLN基板そのものをX線ミラーとして利用できることを意味しており、すなわち異種材料を組み合わせる必要がなくなり、安定性の問題を一気に解決できると考えている。さらに、LNミラーのもう一つの利点に駆動機構があげられる。LNミラーでは、反射面の直下に電極を設けることで、変形パターンを決定できる。この時の変形量は電極サイズに依存しない。すなわち、微細な構造においてバイモルフ構造より大きな変形量を獲得することができる。

一方で、LNミラーは圧電定数が小さいため、変形に必要な電圧が大きくなる。変形形状のさらなる微細化を目指すにあたり、高電圧の印加は避けなければならない。そこで本研究では、変形形状の増加とさらなる微細化を目指して、多層接合構造のミラーを作製した結果について報告する。

4. 研究成果

(1) Au 拡散接合を利用した接合型形状可変ミラーの作製

(a)



(b)

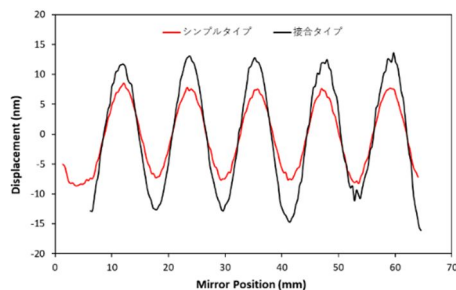


図1 (a)接合型形状可変ミラー。長軸が70mm。(b)形状可変ミラーの変形形状分布。LN単枚のシングルタイプと、図(a)の接合型の実変形量を比較している。

形状可変ミラーには高い安定性が求められる．そこでまず Au の拡散接合に着目し，接合ミラーを作製した（図 1(a)）．2 枚の LN 基板に Au をスパッタ成膜し，Au 薄膜が接触するように重ね合わせて均一に加圧した．それぞれの基板サイズは，幅 20mm，長さ 70mm，厚み 5mm であった．作製されたミラーに電圧を印加し，可視光干渉計で変形形状を計測したところ，LN1 枚のみで作製したシンプルタイプよりも大きく変形することを確認した．

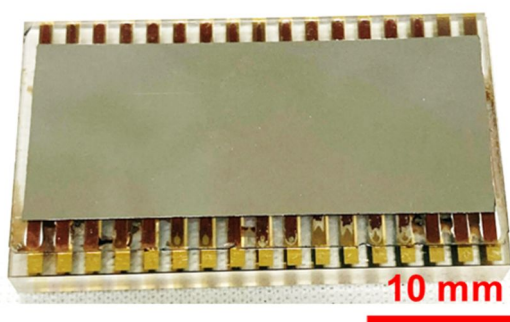
(2) 薄板接合型形状可変ミラーの作製

図 1 の接合型形状可変ミラーにおいて，変形形状の細かさは電極の幅に依存している．そのため変形形状の微細化は，単純に電極幅を小さくすれば達成されるように考えられる．そこで，有限要素法に基づき，電極幅と変形形状の関係を計算した．その結果，厚み 5mm を下回ったところで，変形量が小さくなることが分かった．この原因は，電極が小さくなるにつれて，LN 基板の厚み方向に均一な電界が生じ辛くなることにある．

この問題を解決するために，薄板接合型を検討した．これは，図 1(a) に対して，X 線反射面側の LN のみを薄板化した構造である．薄い LN であれば，電極サイズを小さくしても厚み方向に均一な電界が生じ，変形量が小さくならないと考えた．有限要素法に基づき，電極サイズ 1mm における従来型と薄板接合型形状可変ミラーの変形量を計算した．その結果，薄板接合型は従来型と比較して，変形形状が細かいにもかかわらず大変形が可能であることを確認した

実際に薄板接合型形状可変ミラーを作製した．ここで問題として，図 1 の接合型ミラーを作製した際に使用した Au 拡散接合では，接合の過程で薄板が割れてしまう問題があった．そこで本研究では，無加圧接合が必要であると考え，銀ナノペーストを使用してミラーを作製した（図 2(a)）．そして，作製したミラーの変形形状を，可視光干渉計で計測した結果を図 2(b) に示した．変形形状の幅は 1.5mm であり，X 線形状可変ミラーで報告された中で最も小さな値だった．最後に，作製したミラーの反射面を精密研磨し，SPring-8 の BL29XU に持ち込み，X 線環境下での変形テストを行ったところ，可視光干渉計と同様の結果が得られた．以上より，X 線環境下で動作する微細変形可能な形状可変ミラーの作製に成功した．今後，X 線照射下における安定性のテストなどを実施していく．

(a)



(b)

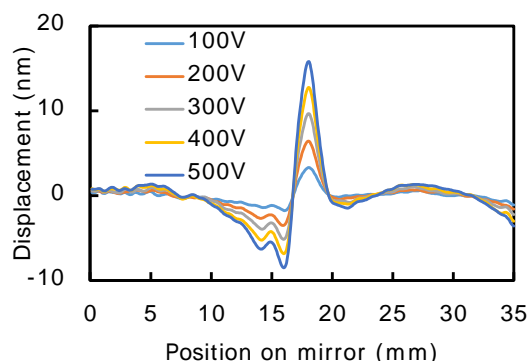


図 2 (a)実際に作製された薄板ミラーの外観写真．(b)薄板接合型形状可変ミラーにおける，印加電圧量と変形形状の関係図．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 吉水純弥, 井上陽登, 香村芳樹, 矢橋牧名, 松山智至
2. 発表標題 単結晶圧電素子を用いたビームサイズ可変光学系用形状可変ミラーの開発
3. 学会等名 第37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 2024年

1. 発表者名 加納愛彩, 井上陽登, 中林荘太, 香村芳樹, 矢橋牧名, 松山智至
2. 発表標題 高空間周波数形状制御可能な接合型形状可変ミラーの開発
3. 学会等名 第37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 2024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 吉水純弥, 井上陽登, 加納愛彩, 中林莊太, 香村芳樹, 矢橋牧名, 松山智至
2. 発表標題 ビームサイズ可変X線光学系のための単結晶圧電素子を使った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 Optics and Photonics Japan 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉水純弥, 井上陽登, 加納愛彩, 中林莊太, 香村芳樹, 矢橋牧名, 松山智至
2. 発表標題 ニオブ酸リチウムを用いた大変形可能なX線形状可変ミラーの開発
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 中林莊太, 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 Maaya Kano, Takato Inoue, Junya Yoshimizu, Toma Ueyama and Satoshi Matsuyama
2. 発表標題 Development of deformable mirror with bonded multiple piezoelectric substrates for high spatial frequency shape control
3. 学会等名 The 20th International Conference on Precision Engineering 2024(ICPE 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Junya Yoshimizu, Takato Inoue, Yoshiki Kohmura, Makina Yabashi and Satoshi Matsuyama
2. 発表標題 Development of monolithic bimorph mirror based on single crystal piezoelectric element for variable beam size optical system
3. 学会等名 9th International Conference on X-ray Optics and Applications 2024 (XOPT2024) in OPIC2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Junya Yoshimizu, Takato Inoue, Maaya Kano, Sota Nakabayashi, Yoshiki Kohmura, Makina Yabashi and Satoshi Matsuyama
2. 発表標題 Development of a novel deformable X-ray mirror based on a single-crystal piezoelectric element
3. 学会等名 The 10th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

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 加納愛彩, 井上陽登, 中林荘太, 上松航太, 香村芳樹, 矢橋牧名, 松山智至
2. 発表標題 高空間周波数形状制御可能な新規構造の形状可変ミラーの開発
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉水純弥, 井上陽登, 中林荘太, 上松航太, 松山智至
2. 発表標題 単結晶圧電素子を用いた大変形可能なX線形状可変ミラーの開発
3. 学会等名 2023年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2023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