

極薄バイモルフミラーによる X線ビームサイズ制御技術



井上 陽登
Inoue Takato



松山 智至
Matsuyama Satoshi

1 はじめに

形状可変ミラーは、圧電効果、静電力、熱応力、電磁力といった多様な駆動機構により反射面形状を調整することで、電磁波の局所的な進行方向を制御できる光学素子である。形状可変ミラーは当初、天文学分野において、大気ゆらぎにより歪んだ恒星光を補正する目的で開発され、現在では網膜イメージングや高出力レーザーにおける高強度場形成等、幅広い用途に用いられている¹⁻³⁾。そして近年では、X線光学分野にも利用が拡大している。X線は高い透過能と空間分解能を有しているだけでなく、原子の内殻電子と相互作用する十分な光子エネルギーを持つ。更に大型放射光施設等X線源の発展により、半導体回路や生体試料の三次元構造観察だけでなく、機能性材料の化学状態をナノスケールで可視化することに成功している⁴⁻⁷⁾。これらの観察・分析の性能を向上させるためには、X線をナノ集光することが不可欠であり、これまでに形状可変ミラーを導入することで、X線を世界で初めてサイズ 10 nm

以下へと極限集光することに成功している⁸⁾。

形状可変ミラーは、X線光学素子としてもう1つ重要な役割を有している。それは、実験の自由度を大きくすることである。高度なX線分析・イメージングは限られた大型放射光施設でしか実施することできないため、焦点距離やビームサイズ等、光学系のパラメータを、観察試料や計測手法に応じてその場で変更することが求められる。これまでに、形状可変ミラー等を用いたパラメータ可変光学系が開発されてきた⁹⁾。それらの中でも特に、原子オーダーの高い変形精度と μm オーダーの大きな変形量を両立できる圧電駆動型のバイモルフミラーが広く用いられている⁹⁻¹¹⁾。しかし、従来型のバイモルフミラーでは変形量を大きくすることに限界があるため、光学パラメータを大きく変えることができなかった。この原因はバイモルフミラーの構造にある。変形の駆動源である圧電素子をミラー基板に接着する必要があるため、ミラー全体の厚みを極限的に薄くすることができない。バイモルフミラーの変形量は厚みの2乗に反比例するため¹²⁾、変形量の増大に限界

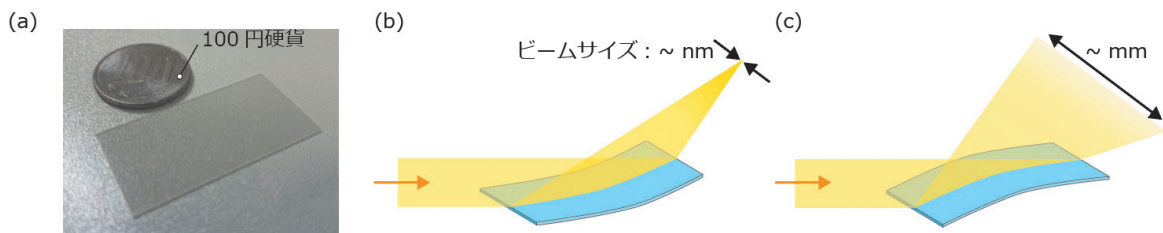


図1 (a) 極薄バイモルフミラーと100円硬貨の比較写真。(b) ミラーを凹面に変形させてX線ビームサイズを縮小している。(c) ミラーを凸面に変形させてX線ビームサイズを拡大している

があった。また、接合に起因した問題は他にもあることから、接合フリーのバイモルフミラーが求められている。

この問題を解決するために筆者らは、ニオブ酸リチウム (LN) に基づき、モノリシックで大変形が可能な極薄のバイモルフミラーを提案している (図 1)。本稿では開発した形状可変ミラーを SPring-8 に導入し、ビームサイズ制御実験を行った結果について記す。

2 極薄バイモルフミラー

極薄バイモルフミラーの基盤要素は、①圧電単結晶と②分極反転特性にある。まず①について、従来型のバイモルフミラーでは、駆動源としてチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) を用いていた。圧電定数が大きいため大変形を実現できる一方、圧電セラミックスであることから表面を研磨することが難しい。そのため、X線ミラーとして用いるためには、超平滑化されたシリコンやガラス基板を接合することが不可欠であった。これに対して、LNは圧電単結晶であるため、表面を超平滑化することができる。すなわち、LNそのものがX線を反射できることから、異種材料を接合することなく、モノリシックな形状可変ミラーを構築することができる¹³⁾。そして②について、LNはキュリー点近傍の高温で加熱されると、基板厚みの半分まで分極方向が反転するという、ユニークな特性を有している (図 2)^{14,15)}。これにより、モノリシックであるにも関わらずバイモルフ構造が形成されるため、極限的に薄い (すなわち大変形が可能な) バイモルフミラーを実現することができる。

3 実験結果

実際に極薄バイモルフミラーを作製した (図 3(a))。結晶カット角が 127.86° Y-cut で厚みが 0.5 mm の LN ウエハを $40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の大きさに切り出し、マッフル炉の中に入れ、 1150°C で 5 時間加熱した。その後、ミラー面に厚み 50 nm の白金膜を付与し、X線反射膜と複数電極を形成した。複数電極のサイズは $2\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ で、電極間の隙間は 0.5 mm とした。まず、これら複数電極のすべてに同じ電圧を印加し、変形形状を計測した (図 3(b))。電圧値に対して変形量は線形的に変化し、 800 V 印加時の変形曲率は 0.1 m^{-1} を上回っていた。この結果は、機械曲げ構造も含めたすべての X線形状可変ミラーの中で最大の変形量である^{16,17)}。

次に SPring-8 BL29XU にて、ビームサイズ制御システムを構築した。X線エネルギーは ^{31}Si 二結晶分光器により 10 keV に単色化されていた。ミラーの直前に 4 象限スリット、焦点付近に X線カメラと直径 $200\text{ }\mu\text{m}$ の金ワイヤーをセットした。スリットと焦点カメラを用いた X線ペンシルビーム法により、ミラー形状のラフ調整を行った。金ワイヤーは、集光強度プロファイルの精密計測のために用いた。更に、焦点下流には回折格子と 2 台目の X線カメラを設置し、X線グレーチング干渉計を構築した。グレーチング干渉計による波面収差の計測結果を元にミラー形状を精密に制御し、回折限界集光状態を形成した。そして、実際にミラーに電圧を印加して、ミラー形状を凹面から凸面に変化させたときのビームサイズの変化を計測した。このとき、数 μm オーダーと大きなミラーの変形を、 3 nm の高い精度で制御していた。その結果、ビームサイズは $200\text{ nm} \sim 683\text{ }\mu\text{m}$ まで 3400 倍変化した (図 3(c), (d))。

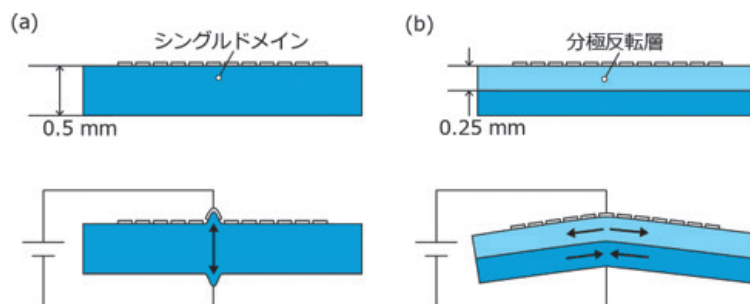


図 2 (a)分極反転前の LN の変形の様子。電圧が印加された場所が基板厚みと平行方向に伸縮することで、ミラーの形状が nm オーダーで変化する。(b)分極反転後の LN の変形の様子。電圧が印加された場所が基板厚みと垂直な方向に、上下部で逆向きに伸縮することで曲げモーメントが発生し、大きく変形する

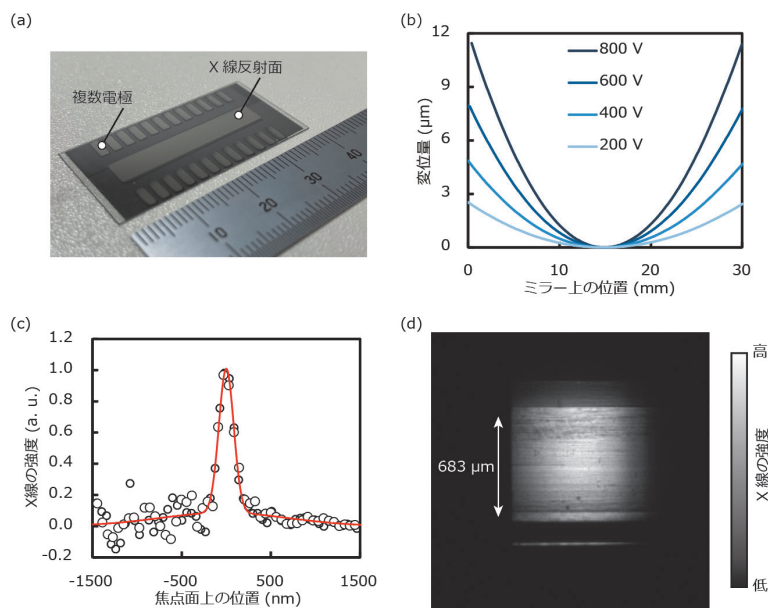


図3 実験結果

(a) 作製された形状可変ミラーの写真。(b) ミラー変形の計測結果。(c) ミラー形状が凹面のときに計測された X 線ビームプロファイル。黒丸が実測値で赤線がフィッティング曲線であり、赤線の半値幅が 200 nm である。(d) ミラー形状が凸面のときに焦点カメラで撮影された X 線画像

4 展望

本研究のバイモルフミラーは、基板厚みを更に薄くすることができる。既に厚み 0.25 mm のミラーを試作し、 0.6 m^{-1} の曲率変化を実現しており、更なるパラメータ自由度の向上が期待できる。本ミラーの応用先は多岐に渡り、X 線のサイズだけでなく位置も変える X 線スキャナーや、その薄さを活かした新規光学系の開発に着手している。

また、極薄バイモルフミラーは大変形が可能であることから、X 線領域だけでなく、可視光のような長波長領域にも対応できる。そして、ミラー基板である LN はキュリー温度や抗電界が高いことから、 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の高温でも動作可能である。これらの特性から、例えばレーザー核融合発電用の補償光学素子等、高出力レーザー応用の可能性を有している。

謝辞

本研究は数多くの共同研究者と共に遂行されたものです。特に、理化学研究所放射光科学研究センター 矢橋牧名グループディレクターに深く感謝申し上げます。また本研究は、JST 創発的研究支援事業、JSPS 科研費「研究活動スタート支援」の支援の下、遂行されました。

参考文献

- 1) H. W. Babcock, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **65**, 229-236 (1953)
- 2) J. Liang, *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. A* **14**, 2884 (1997)
- 3) J. Zuo, *et al.*, *Laser Photonics Rev.* **16**, 2100741 (2022)
- 4) T. Aidukas, *et al.*, *Nature* **632**, 81-88 (2024)
- 5) C. Bosch, *et al.*, *Nat. Methods* **22**, 2631 (2025)
- 6) F. Lin, *et al.*, *Chem. Rev.* **117**, 13123-13186 (2017)
- 7) M. Hirose, *et al.*, *Commun. Chem.* **2**, 50 (2019)
- 8) H. Mimura, *et al.*, *Nat. Phys.* **6**, 122-125 (2010)
- 9) S. Matsuyama, *et al.*, *Sci. Rep.* **6**, 4-11 (2016)
- 10) R. Signorato, *et al.*, *J. Synchrotron Radiat.* **5**, 797-800 (1998)
- 11) Y. Ichii, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **90** (2019)
- 12) K.A. Goldberg, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **94**, 073101 (2023)
- 13) T. Inoue, *et al.*, *Optica* **11**, 621 (2024)
- 14) S. Miyazawa, *J. Appl. Phys.* **50**, 4599-4603 (1979)
- 15) K. Nakamura, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **50**, 1413-1414 (1987)
- 16) H. Jiang, *et al.*, *J. Synchrotron Radiat.* **26**, 729-736 (2019)
- 17) R. Barrett, *et al.*, *Adv. X-Ray/EUV Opt. Components VI* **8139**, 813904 (2011)

(名古屋大学大学院工学研究科)