

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101
 研究種目：研究活動スタート支援
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23860001
 研究課題名（和文） 硬 X 線汎用光学系構築のための集光用形状可変ミラーの開発
 研究課題名（英文） Development of hard deformable focusing mirror
 for general-purpose hard X-ray optics.
 研究代表者
 木村 隆志（KIMURA TAKASHI）
 北海道大学・電子科学研究所・助教
 研究者番号：50531472

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、回折限界集光を実現可能な変形精度を有する硬 X 線用形状可変ミラーを開発することである。フィゾー型干渉計を用いた印加電圧フィードバックシステムを構築することにより、形状可変ミラーを数 nm の精度で非球面形状へ変形させることに成功した。SPRING-8 において集光性能評価を行い、形状可変ミラーを深さの異なる非球面形状に変形させることによって、回折限界条件下で様々なサイズの集光 X 線ビームを形成可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）：In order to realize diffraction-limited focusing of hard X-rays with a size less than several hundreds of nanometers, a deformable mirror which can be bent into an aspherical shape with a depth of several micrometers and an accuracy better than a few nanometers was developed. The accuracy of the mirror surface shape was guaranteed and maintained by a feedback system with a Fizeau interferometer. Hard X-ray focusing performance of the mirror was tested at the BL29XUL of SPRING-8. We confirmed that beam size was controllable in a range from micrometer to nanometer scale under diffraction-limited focusing condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：X 線光学、超精密加工、超精密計測、計測工学

1. 研究開始当初の背景

硬 X 線を用いた微細構造計測技術は、硬 X 線の持つ短波長性・高透過性といった特徴と、光電子分光や蛍光 X 線分光といった分析手法を組み合わせることにより、可視光顕微鏡や電子顕微鏡などでは不可知な情報を得ら

れる手段として、大きな可能性を有している。特に近年、SPRING-8 に代表される大型放射光施設を利用した高輝度 X 線源の登場により、その性能は飛躍的な向上がなされており、材料・医学・生物など幅広い分野で、数多くの科学的知見をもたらしている。

しかし放射光施設で使用可能なビームラインの数には限りがあるため、使用を望むユーザーに対して与えられるビームタイムは限られたものになっており、各実験に応じた専用の光学系を設置するのは困難である。そのため、実験に応じて X 線ビームの集光径や焦点距離といったパラメータを容易に調整可能な、汎用性の高い光学系を設置することが強く求められている。

この要求を満たすものとして現在、圧電素子やアクチュエータによる変形を利用した形状可変ミラーの開発がなされているものの、その変形精度は rms で 50 nm、集光ビームサイズで 1~2 μm 程度であり、放射光で得られる X 線の高可干渉性や低エミッタンスといった品質を十分に活用できているとは言い難い。さらに測定対象の微細化・高精度化により、ユーザーからは数百 nm 以下の分解能での計測と、波長オーダーでの位相分布の制御が求められており、形状可変ミラーの更なる性能向上がひっ迫した課題として挙げられている。

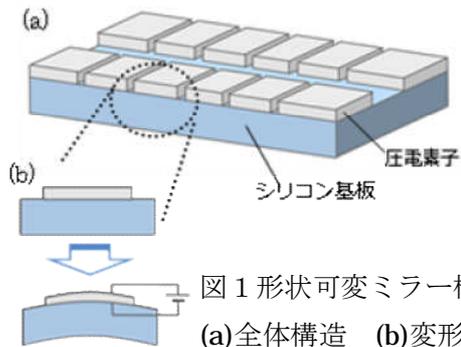
2. 研究の目的

高輝度放射光を利用した硬 X 線計測技術は様々な領域で活用されているものの、使用可能なビームラインは限られているため、実験目的に応じた最適な X 線ビームを供給できる、高精度な形状可変ミラー光学系の開発が求められている。本研究では、圧電素子を利用した高精度形状可変ミラーと形状フィードバックシステムを組み合わせることにより、波長オーダーでの X 線波面制御性を有し、試料位置での集光径をマイクロメートルサイズからナノメートルサイズまで連続的に調整できる形状可変ミラーの開発を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、図 1 に示す圧電素子を用いた形状可変ミラーと変形状補正フィードバックシステムの開発がメインとなる。更に形成した集光ビームの評価手段として、位相回復法を用いた波面誤差算出法も同時に開発する。

まず初年度は、有限要素法による解析や試



作ミラーのテストを行い、大曲率の変形が可能なミラー形状の設計と圧電素子への最適な電圧印加方法の検討を行うとともに、フィゾー型干渉計を使用したミラー形状フィードバックシステムの構築を行う。

そして次年度は、前年度に作製した形状可変ミラーを使用した集光ユニットを作製し、SPring-8 にて放射光を使用した集光実験により、形状可変ミラーの集光性能評価を行う。

4. 研究成果

(1) X 線集光用形状可変ミラーの開発

本研究では、ミラー基板に圧電素子を貼り付け、圧電素子に電圧を印加した際に生じる曲げモーメントを利用することにより、ミラー形状を変形させる手法を採用した。作製した形状可変ミラーを図 2 に示す。長さ 150 mm のガラス基板上に、18 個の圧電素子を二列貼りつけた構造になっている。各圧電素子に個別の電圧を印加することにより、任意の非球面形状に変形させることが可能であり、有限要素法を用いた解析により、深さ数 μm の変形形状を実現できる設計となっている。また X 線反射時の散漫散乱を低減するため、ミラー表面は Elastic emission machining による加工を施し、表面粗さ rms 0.42 nm という十分に低い値を実現した。

図 3 に、作製した形状可変ミラー表面を三種類の非球面形状に変形させた結果を示す。変形精度は、20 keV の硬 X 線に対して使用したと仮定して $\lambda/13$ 以下であり、一般的に回折限界集光を実現するのに必要とされる $\lambda/4$ の精度を十分に満足していることを確認した。



図 2 作製した形状可変ミラー外観

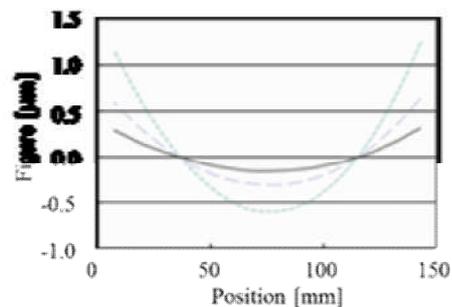


図 3 形状可変ミラーの変形形状

(2) 硬 X 線集光実験の実施

作製した形状可変ミラーを使用し、SPring-8、BL29XUL において硬 X 線集光システムを構築し、その性能評価を行った。図 4 にシステムの外観を示す。形状可変ミラーの変形形状を維持するために、フィゾー型干渉計をミラー対面に設置し、常に形状をモニタリングするシステムを構築した。フィゾー型干渉計による形状計測結果からミラーの変形誤差を算出し、各圧電素子に対する印加電圧を補正した。図 3 に示した 3 種類の非球面形状を使用し、 $1.5 \mu\text{m}$ から 350 nm まで集光径を回折限界条件下で変化させることに成功した。位相回復計算を用いた集光ビームの波面誤差の算出も行い、回折限界を実現するのに十分な精度を達成できていることを確認した。

また本形状可変ミラーは、理想非球面形状に誤差を加える事により、意図的に波面を制御することが可能である。図 5 に波面制御実験の結果を示す。 $\lambda/2$ の段差を持つ波面形状を光学系に与えた場合、集光ビームが二本に割れることが波動光学シミュレーションから想定されるが、実際に計測した集光プロファイルにも同様の変化が確認され、硬 X 線領域において波動光学が適応可能な精度で集光ビームの波面制御が行われていることを確認することができた。

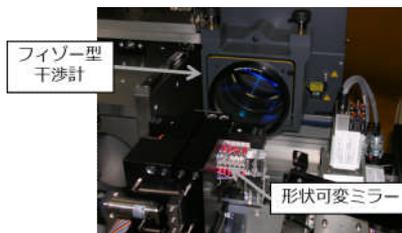


図 4 形状可変ミラーによる硬 X 線集光システム

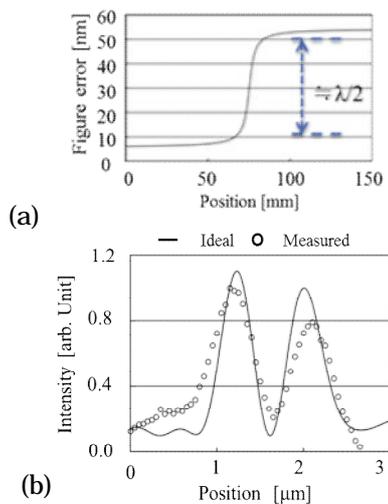


図 5 集光ビーム波面制御実験
(a) 与えた形状誤差 (b) 集光プロファイル

(3) X 線回折顕微法への応用の検討

開発した形状可変ミラーによる集光ビームの使用用途の一つとして、新たな X 線顕微法の一つとして近年注目されている、X 線回折顕微法への応用を検討した。X 線の回折パターンから試料像を数値計算により求める X 線回折顕微法では、使用する集光ビームに高い波面精度が求められるが、開発した形状可変ミラーはそうした要求精度を満たしている。

X 線回折顕微法では、回折パターンから試料像を再構成するためには、通常孤立した状態にある試料を計測する必要がある。しかしながら、この条件は計測可能な試料を大きく制限してしまう。そこで形状可変ミラーを利用し光学系を工夫することにより、空間的に広がりを持った試料を擬似的に孤立状態とみなすことができる、新規像回復アルゴリズムの開発を行った。新規アルゴリズムでは、2 個の集光点を持つ 4 枚の形状可変ミラーからなる光学系を仮定し、第一焦点に設置した空間フィルターにより X 線集光ビームの照射関数を制御する。図 6 にシミュレーション結果を示す。仮定した試料は空間的に広がりを有するため、従来手法では一つの回折パターンから試料像を得ることはできない。しかしながら、空間的に制御された強度分布を持つ X 線集光ビームの場合、孤立状態にない広がりのある試料であっても、試料像を再構成可能であることを示した。

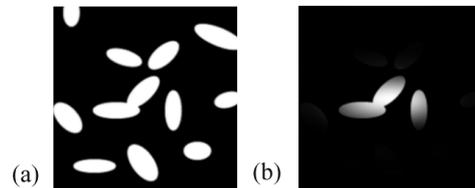


図 6 形状可変ミラー光学系を用いた X 線回折顕微法のシミュレーション
(a) 仮定した試料 (b) 再構成試料像

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 著者名：T. Kimura, S. Matsuyama, K. Yamauchi, Y. Nishino, 論文標題：Coherent x-ray zoom condenser lens for diffractive and scanning microscopy, 雑誌名：Optics Express, 査読：有, 巻：21(7), 発行年：2013, ページ：9267-9276.
DOI: 10.1364/OE.21.009267
- ② 著者名：H. Nakamori, S. Matsuyama, S.

- Imai, T. Kimura, Y. Sano, Y. Komura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 論文標題 : Experimental and simulation study of undesirable short-period deformation in piezoelectric deformable x-ray mirrors, 雑誌名 : Review of Scientific Instruments, 査読 : 有, 巻 : 83, 発行年 : 2012, ページ : 053701-1- 053701-6. DOI: 10.1063/1.4709499
- ③ 著者名 : H. Nakamori, S. Matsuyama, S. Imai, T. Kimura, Y. Sano, Y. Komura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 論文標題 : Development of an ultraprecise piezoelectric deformable mirror for adaptive X-ray optics, 雑誌名 : Key Engineering Materials, 査読 : 有, 巻 : 523-524, 発行年 : 2012, ページ : 50-53. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.50
- ④ 著者名 : K. Yamauchi, H. Mimura, T. Kimura, H. Yumoto, S. Handa, S. Matsuyama, K. Arima, Y. Sano, K. Yamamura, K. Inagaki, H. Nakamori, J. Kim, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, 論文標題 : Single-nanometer focusing of hard x-rays by Kirkpatrick-Baez mirrors, 雑誌名 : Journal of Physics: Condensed Matter, 査読 : 有, 巻 : 23(39), 発行年 : 2011, ページ : 394206-1-394206-9. DOI: 10.1088/0953-8984/23/39/394206
- ⑤ 著者名 : H. Mimura, T. Kimura, H. Yumoto, H. Yokoyama, H. Nakamori, S. Matsuyama, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 論文標題 : One-dimensional sub-10-nm hard X-ray focusing using laterally graded multilayer mirror, 雑誌名 : Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 査読 : 有, 巻 : 635(1), 発行年 : 2011, ページ : S16-S18. DOI: 10.1016/j.nima.2010.11.047
- [学会発表] (計 16 件)
- ① 発表者名 : T. Kimura, S. Matsuyama, Y. Nishino, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of Structure Analysis Method for Non-crystallized Sample using Focused X-ray Free Electron Laser, 学会名 : 13th RIES-Hokudai International Symposium, 発表年月日 : 2012/12/13, 発表場所 : CHÂTERAISÉ Gateaux Kingdom Sapporo (札幌).
- ② 発表者名 : H. Nakamori, S. Matsuyama, S. Imai, T. Kimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of an ultraprecise piezoelectric deformable mirror for adaptive X-ray optics, 学会名 : 14th International Conference on Precision Engineering (ICPE2012), 発表年月日 : 2012/11/08-10, 発表場所 : Awaji Yumebutai International Conference Center (兵庫).
- ③ 発表者名 : S. Imai, H. Nakamori, S. Matsuyama, T. Kimura, Y. Kohmura, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of an adaptive hard X-ray focusing system with deformable mirrors, 学会名 : 5th International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, 発表年月日 : 2012/10/22-24, 発表場所 : Osaka University Nakanoshima Center (大阪).
- ④ 発表者名 : H. Nakamori, S. Matsuyama, S. Imai, T. Kimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of ultraprecise piezoelectric deformable mirror for adaptive X-ray focusing, 学会名 : 5th International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, 発表年月日 : 2012/10/22-24, 発表場所 : Osaka University Nakanoshima Center (大阪).
- ⑤ 発表者名 : S. Matsuyama, T. Kimura, H. Nakamori, S. Imai, H. Yokoyama, J. Kim, R. Fukui, H. Mimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of piezoelectric deformable mirror for hard X-ray nanofocusing, 学会名 : SPIE Optics+Photonics, 発表年月日 : 2012/08/12-16, 発表場所 : San Diego Convention Center (USA).
- ⑥ 発表者名 : T. Kimura, S. Matsuyama, H. Mimura, H. Nakamori, S. Imai, H. Yokoyama, Y. Komura, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of Deformable Mirror for Hard X-rays Diffraction Limited Focusing with Controllable Spot Size., 学会名 : 11th International Conference on Synchrotron Radiation, 発表年月日 : 2012/07/09, 発表場所 : Lyon Convention Centre (France).
- ⑦ 発表者名 : T. Kimura, H. Mimura, H.

- Yumoto, S. Imai, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Komura, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of wavefront characterization method for nearly diffraction-limited focused hard X-ray nanobeam, 学会名 : 4th international workshop on Metrology for X-ray Optics, Mirror Design, and Fabrication, 発表年月日 : 2012/07/04, 発表場所 : Investigadors Residence Hall (Spain).
- ⑧ 発表者名 : H. Nakamori, S. Matsuyama, S. Imai, T. Kimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of an ultra-precise deformable mirror for x-ray focusing, 学会名 : 4th international workshop on Metrology for X-ray Optics, Mirror Design, and Fabrication, 発表年月日 : 2012/07/04, 発表場所 : Investigadors Residence Hall (Spain).
- ⑨ 発表者名 : T. Kimura, S. Matsuyama, K. Yamauchi, Y. Nishino, 発表標題 : Computational Study of Novel X-ray Focusing Optics with Zooming Function for X-ray Diffraction Microscopy, 学会名 : Coherence 2012, 発表年月日 : 2012/06/18, 発表場所 : Hilton Fukuoka Seahawk (福岡).
- ⑩ 発表者名 : H. Nakamori, S. Matsuyama, S. Imai, T. Kimura, Y. Sano, Y. Kohmura, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of piezoelectric deformable mirrors for X-ray focusing, 学会名 : Coherence 2012, 発表年月日 : 2012/06/18, 発表場所 : Hilton Fukuoka Seahawk (福岡).
- ⑪ 発表者名 : H. Nakamori, S. Matsuyama, T. Kimura, S. Imai, Y. Kohmura, T. Ishikawa, Y. Nishino, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of an ultra-precise deformable mirror for hard X-ray nanofocusing, 学会名 : 7th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 発表年月日 : 2011/11/10-11, 発表場所 : Osaka University (大阪).
- ⑫ 発表者名 : H. Nakamori, S. Matsuyama, S. Imai, H. Yokoyama, T. Kimura, H. Mimura, Y. Sano, Y. Kohmura, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of an Adaptive X-Ray Focusing Mirror with Large NA -Evaluation of Reproducibility of Deformable Mirror, 学会名 : 4th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 発表年月日 : 2011/10/31-11/02, 発表場所 : Osaka University Nakanoshima Center (大阪).
- ⑬ 発表者名 : S. Imai, S. Matsuyama, H. Nakamori, T. Kimura, H. Yokoyama, H. Mimura, Y. Sano, Y. Kohmura, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of an adaptive hard X-ray focusing system with adaptive mirrors, 学会名 : 4th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 発表年月日 : 2011/10/31-11/02, 発表場所 : Osaka University Nakanoshima Center (大阪).
- ⑭ 発表者名 : H. Yokoyama, T. Kimura, H. Mimura, S. Imai, S. Matsuyama, Y. Kohmura, T. Ishikawa, K. Yamauchi, 発表標題 : Determination of Hard X-ray Focusing Mirror Aberration using Phase Retrieval with Transverse Translation Diversity, 学会名 : 4th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 発表年月日 : 2011/10/31-11/02, 発表場所 : Osaka University Nakanoshima Center (大阪).
- ⑮ 発表者名 : K. Yamauchi, H. Mimura, T. Kimura, H. Yokoyama, H. Yumoto, S. Matsuyama, H. Nakamori, Y. Sano, Y. Nishino, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, 発表標題 : Single-nanometer focusing of hard x-rays using novel adaptive optical system, 学会名 : ACTOP11, 発表年月日 : 2011/04/15-20, 発表場所 : Diamond Light Source (UK).
- ⑯ 発表者名 : H. Nakamori, S. Matsuyama, T. Kimura, S. Imai, H. Mimura, Y. Sano, K. Yamauchi, 発表標題 : Development of ultraprecise piezoelectric deformable mirror for adaptive X-ray focusing, 学会名 : ACTOP11, 発表年月日 : 2011/04/15-20, 発表場所 : Diamond Light Source (UK).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 隆志 (KIMURA TAKASHI)

北海道大学・電子科学研究所・助教

研究者番号 : 50531472

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし