

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23684009

研究課題名(和文) マイクロマシン技術を用いた革新的な宇宙X線望遠鏡の開発実証

研究課題名(英文) Development of a novel space X-ray telescope based on micromachining technologies

研究代表者

江副 祐一郎 (Ezoe, Yuichiro)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：90462663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円、(間接経費) 4,290,000円

研究成果の概要(和文)：高感度の宇宙X線観測には、天体からの微弱なX線を集光結像する望遠鏡が欠かせない。我々は世界最軽量のX線望遠鏡として、日本が世界をリードするマイクロマシン技術を用いた独自の手法を考案し、開発を進めてきた。厚み数百  $\mu\text{m}$  の薄い基板に、数十  $\mu\text{m}$  の微細穴を形成し、側壁を反射鏡として利用する。我々は本手法で世界で初めてX線反射と結像を実証してきた。本研究ではこれを発展し、1回反射型光学系の分解能と反射率の向上と、本手法で世界初の2段望遠鏡の製作に成功した。さらに側壁に重金属膜を膜付けする新プロセスの実証、世界最大の微細穴光学系となる12インチ光学系の製作、衛星搭載検討および提案も行った。

研究成果の概要(英文)：High sensitivity space X-ray observations need a large-aperture X-ray telescope. We invented and have been developing a novel space X-ray telescope based on micro machining technologies. Our method utilizes side walls of micropores made in a thin wafer for X-ray mirrors. A typical wafer thickness is hundreds micro meters, while the width of the micropore is tens micro meters. We verified X-ray reflection and imaging with this method for the first time in the world. In this research, we have succeeded to improve resolution and reflectivity with single-stage sample optics and to fabricate a 2-stage X-ray telescope. We also have verified a new process to coat the micropores with heavy metal and fabricated a 12-inch optic, which is to our knowledge the largest micropore optics ever fabricated. Furthermore, we have studied and proposed an X-ray imaging spectrometer using this telescope for future space missions.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：X線・線天文学 X線望遠鏡 マイクロマシン技術

### 1. 研究開始当初の背景

高感度の宇宙X線観測には、天体からの微弱なX線を集光結像する望遠鏡が欠かせない。大気圏外での観測が必要なX線天文では、高い分解能・大面積かつ軽量という困難な条件が課される。従来は、厚い基板を非球面に正確に研磨する方法、母型からレプリカを作る方法、薄いAlフォイルを変形する方法する方法が取られてきた。しかし、高い角度分解能を達成しようとする、鏡が厚くなり、望遠鏡が重くなるという欠点があった。

衛星計画の巨大化や中小型衛星のニーズの高まりとともに、軽量で分解能のよいX線反射鏡が、強く求められる。そこで注目されたのがマイクロポアオプティクス(微細な穴の光学系)である。10 μm-1 mm の大きさの微細な穴構造を作り、その内壁をX線反射鏡として利用することで鏡を縮小化し、軽量化する。欧州や米国では、表面研磨したシリコン基板を組んで穴構造を作る方法、ガラスファイバー内壁での全反射を利用する方法が提案され、開発されてきた。

### 2. 研究の目的

我々は世界最軽量のマイクロポアオプティクスとして、日本が世界をリードするマイクロマシン(MEMS)技術を用いた独自の望遠鏡を考案し、開発を進めてきた。厚み数百μmの薄い基板に、数十μmの微細穴を形成し、側壁を平滑化してX線反射鏡として利用する。我々は日本を代表するMEMSの研究者らとタッグを組んでin-houseで約1cm角のSiおよびNi鏡チップを試作して、X線反射の実証に成功した。さらに直径4インチ(100mm)の1回反射型Si光学系を試作し、X線結像にも成功した。どちらも世界で初めてであり、本方式の軽量性を実証した。

本研究ではこのMEMS技術を応用した独自の超軽量X線望遠鏡をさらに発展する。これまで1回反射型光学系で反射・結像の実証に成功してきたが、角度分解能は10分角を大きく上回り、また鏡面のμmスケールでの粗さも>1nm rmsと改善の余地がある。そこで本研究では、より高い角度分解能と高反射率を実現するための要素技術の改良と、本格的な宇宙X線望遠鏡として使うための多段望遠鏡の組み立てを行うことを目標とする。

### 3. 研究の方法

我々の手法は(1)シリコンドライエッチングもしくは(2)X線LIGAプロセスを用いて製作したX線反射用の微細な曲面穴構造を、(3)アニールにより側壁を平滑化した後に、(4)磁性流体を用いて側壁を研磨し、(5)基板を球面状に変形し、1回反射分とする。1回

反射では原理的に結像性能の良い望遠鏡とはならないため、(6)曲率半径の異なる基板を多段に重ねて望遠鏡として完成する。

我々は一連の要素技術、特にエッチング、アニール、変形の改良を行って1回反射光学系を用いて、角度分解能と反射率の改善を行った。同時に複数枚の基板を正確に位置合わせして多段望遠鏡を完成する部分について、専用装置を設計・開発して、本手法で世界初となる2段望遠鏡の組み立てとX線や可視光を使った評価を行った。

### 4. 研究成果

我々は本研究費を受領し、3年間で以下の成果を上げた。

(A) 2011年度：我々はまず(1)シリコンドライエッチングの改良に着手した。エッチングガスと側壁保護ガスを交互に導入して、垂直性の良い自由な形状の穴を掘る。以前の条件では、深さ300μm、幅20μmの微細穴に対して、反射率に影響する10μm以下の側壁粗さはアニールを加えることで1nm rms以下に抑えられていたが、結像性能に影響する100μmスケールの粗さは150nm rms程度と大きく、角度分解能を制限していた。そこでエッチングと保護のバランスを最適化することで、粗さを約20nm rmsと約8倍改善した。

さらに表面を平滑化するための(3)アニールの温度と時間も最適化し、100μmスケールでの表面粗さ14nm rmsを達成した。反射率に影響を及ぼす<10μmスケールでの粗さも1nm rms程度に抑えることができた。

これらの条件で試作した直径4インチの1回反射型Si光学系にJAXA宇宙研30mビームラインにてX線(Al K<sub>α</sub> 1.49 keV)を照射した所、角度分解能は14mm x 14mm x 2箇所の入射で14分角(FWHM)となり、2倍以上改善された。図1に示す。

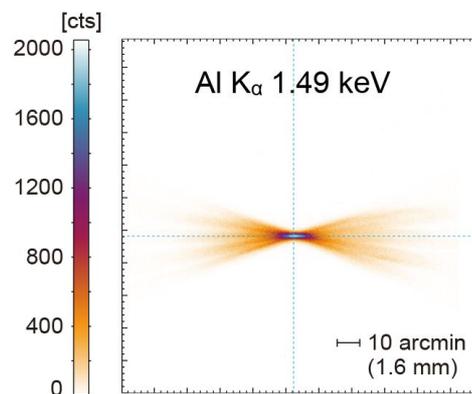


図1. 4インチ1回反射型Si光学系によるX線結像イメージ。

平行して(6) 2 段望遠鏡の組み立てのため、2 枚の基板を正確に位置合わせするためのアライメント装置を神津精機と協力して開発した。図 2 に示す。これを用いて、曲率半径 1000 mm と 333 mm で曲げた 2 枚の 4 インチシリコン光学系基板を用いて、まずは可視光で位置合わせを行った。望遠鏡の設計焦点距離は 250 mm である。その結果、微細穴での回折が見られるものの、本装置を用いて  $\mu\text{m}$ 、秒角オーダーの位置合わせが可能であることを焦点強度の変化から確かめた。

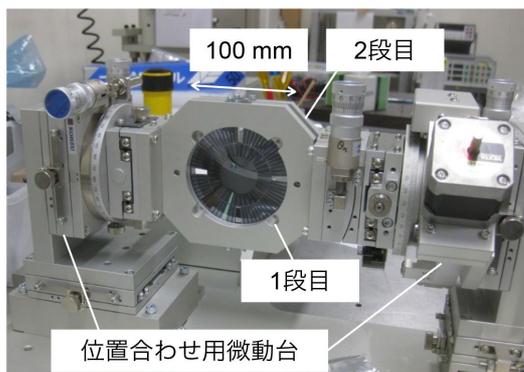


図 2. 2 段望遠鏡組み立て用アライメント装置。

さらに(2) X 線 LIGA を用いた 1 回反射型光学系の試作を行った。シンクロトロン光を用いたリソグラフィーと、Ni 電析を組み合わせて、微細穴構造体の製作が可能である。金属のため Si 光学系よりも高い反射率が期待できる。我々は電析中に気泡が入らないように現像から電積まで液浸で行うプロセスを確立し、望遠鏡 1 段分となる光学系を完成した。しかし、電析後の仕上げの研磨工程において光学系がゆがむ問題が見られた。また使用させて頂いているシンクロトロン露光装置の X 線ビームサイズによって、光学系サイズも 33 mm 程度が限界となっていた。これらから我々は、まずはドライエッチングを用いた Si 光学系を中心に開発することを決めた。

(B) 2012 年度：昨年度の 4 インチ 1 回反射型 Si 光学系の X 線測定結果から、角度分解能を制限している要因として、側壁の形状精度と基板全体の变形精度が寄与していることが分かった。そこで引き続き、要素技術の改善を進めた。(1) シリコンドライエッチングについては、エッチング時のマスクの材質が側壁形状に影響を及ぼすことを突き止め、従来の Al マスクからレジスト+Al マスクとすることで、エッチング時間を 150 min から 130 min へと短縮し、さらに側壁の両端に見られていたバリの一方を抑制することに成功した。バリの高さは 1-2  $\mu\text{m}$  程度であり、 $<1$  deg 入射時には反射光を遮蔽するため、低減が望まれる。またこの新プロセスで作った側壁では、従来よりも大きなスケールである 200  $\mu\text{m}$  で粗さを評価した所、従来 100 nm 程度であったものが、70 nm 程度と約 1.5 倍

改善することが分かった。すなわち分解能の改善が期待できる。この他に、側壁の平坦化を目指して、側壁への酸化膜付けと BHF エッチングを繰り返す方法や厚い金属膜をつける手法も試した。

(5) 变形精度の向上にも取り組んだ。シリコン基板を高温プレス変形する際には、基板の端ほど球面変形からの戻りが生じる、いわゆるスプリングバックによって、基板中心と端では光学系の焦点距離にずれが生じ、分解能を劣化させていた。そこで光学系のパターンにおける梁(ベアシリコン)の部分減らし、穴の面積を増やすことで一様変形となるか試した。開口効率は 18 % から 30 % へと向上したため、面積増加にもつながる。従来と同じ曲率半径 1000 mm の治具で変形した結果、表面形状は 1180 mm と従来よりもかえって大きく、穴の部分はより曲がりづらいことが分かった。すなわち高開口率を維持しつつ、変形精度を上げるには意図的に曲率半径を変えた治具が必要であることが示唆された。

さらに昨年度完成した初めての 4 インチ 2 段望遠鏡の X 線照射試験を JAXA 宇宙研 30 m ビームラインにて行った。そして世界で初めて本手法の 2 段望遠鏡全面照射 (Al K 1.49 keV) による結像の取得に成功した。角度分解能は 14 分角程度と 1 回反射型のものとほぼ同等であった。しかし、焦点強度は理論値よりも 2 桁以上低く、また線状の迷光が多く見られたことから、位置合わせが十分でないことが判明した。これは限られたビームラインの使用時間内で位置合わせが完了しなかったことが主原因であり、装置の自動化を推し進め、効率化が求められる。

さらに(3) 磁気流体研磨について 4 インチ用研磨装置の立ち上げを行ったほか、(5) と (6) の間に行く、新プロセスとして、原子層堆積法による Ir 膜付けをテストした。この手法では、20  $\mu\text{m}$  幅の微細穴の内壁に 20-30 nm 程度の Ir を sub nm order の膜厚精度で正確に成膜できる。我々は 1 回反射型 Si 光学系に Ir を膜付けし、世界で初めて本光学系での反射率増加を実験的に確かめた。すなわち、Si をベースとしたプロセスで重金属を膜付けした鏡を製作することが可能となった。

(C) 2013 年度：昨年度の結果から(1) シリコンドライエッチングについては、従来の装置 (JAXA 宇宙研所有、4 インチ基板対応) では条件だしに一定の目処がたったため、より最新の装置 (産総研所有、8-12 インチ基板対応) での条件だしに着手した。装置の基本原理は同じだが、プラズマソースが強化され一様かつ高速エッチングが可能となる。また従来よりも最大で 3 倍大きな光学系の試作もできる。

我々は4インチ基板のエッチング条件出しを進めつつ、12インチ1回反射型Si光学系をエッチングとアニールを用いて試作した。変形はしていないものの、これはX線マイクロポアオプティクスとして、我々の知る限り世界最大である。図3に示す。

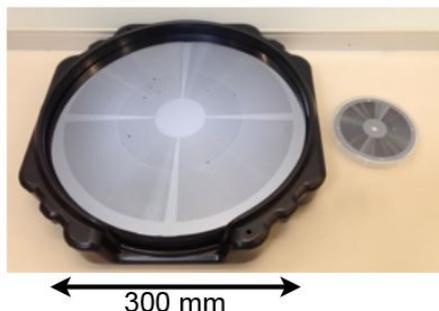


図3. 12インチ1回反射型Si光学系と従来の4インチ光学系の比較。

(5)高温塑性変形については、昨年度の結果から、変形治具に改良が必要と分かったため、意図的に曲率半径を小さくした治具や、外側ほど曲率半径を縮めた治具を新たに製作し、光学系を試作した。結果として表面形状は設計曲率1000mmからのずれを約10%以内に抑えることに成功した。

また(6)2枚の基板を位置合わせするアライメント装置を改良し、真空中でも位置合わせできる自動軸を追加した。これにより位置合わせに必要な全軸の自動化を完了し、真空中でのX線による位置合わせの効率化を可能にした。

以上の改善を踏まえ、我々は新たな2段望遠鏡用光学系を試作した。ドライエッチング装置は実績のある宇宙研のものを扱い、アニール時間の最適化も再度行った。完成した1回反射型光学系2種類はJAXA 30mビームラインでX線全面照射測定を行い、角度分解能として設計曲率1000mmのものでは3分角(FWHM)、333mmのものでは5分角(FWHM)を得た。これらは2011年度の値から3-4倍程度の改善である。一方で最適な焦点距離は、設計値よりも1.5倍ほど大きく、表面形状とはずれていることが分かった。治具形状に調整が必要である。

次にこれらの2枚の基板を用いて2段望遠鏡の組み立てを行った。望遠鏡に対してX線を全面照射し、焦点の像の強度・広がりを最適化する。結果として、角度分解能は5分角(FWHM)程度と1段分の結果とコンシステントとなった。また焦点強度も昨年度より1桁以上改善し、設計値の1/5程度となった。詳細なポイント照射測定の結果、角度分解能の劣化の主要因は変形精度であることが分かった。またHPD(Half Power Diameter)で評価す

ると角度分解能は10分角以上となり、変形による焦点位置のずれが効くこと、さらに強度の理論値からのずれの主原因は、側壁の平坦性(バリや溝)であることが分かった。これらは今後の課題である。

(D)その他の成果：これら一連の技術開発と平行して、我々はX線ビームラインでの結果の評価や光学系デザインのための光線追跡シミュレーションを開発し、完成させた。

また本望遠鏡を将来の惑星探査などに提案した。具体的には日本の木星探査衛星JMOや技術実証衛星DESTINYや磁気圏X線観測衛星GEO-Xである。過去のX線天文衛星の観測データや、光線追跡シミュレーションなどから、これらの衛星のサイエンス目標を達成するには、4インチ2段望遠鏡をベースとしたX線撮像分光装置(角度分解能要求5分角以下、0.6keVにおける面積3cm<sup>2</sup>以上)が必要であることを明らかにした。(A)-(C)で開発している2段望遠鏡はまさにこの目的に合致したものである。

まとめると、本研究によってMEMS技術を用いた独自の軽量X線望遠鏡を大きく発展することができたと言える。当初目的とした、より高い角度分解能と高反射率を実現するための要素技術の改良と、本格的な宇宙X線望遠鏡として使うための多段望遠鏡の組み立てを、行うことができた。さらに新しい膜付けプロセスを導入したことにより重金属鏡に目処が付き、エネルギーバンドと反射率の改善ができた。加えて、12インチの大型望遠鏡も試作可能となってきた。こうした実績を元に、将来衛星への搭載検討も平行して押し進めるなど、本研究は当初予定していた以上の成果が得られたと言える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計18件)  
一部を抜粋して示す

1. 江副祐一郎、木村智樹、笠原慧、山崎敦、三好由純、将来木星探査とX線観測、日本惑星科学会誌、査読有、2011、20、300-308
2. Y. Ezoe, T. Moriyama, T. Ogawa, T. Kakiuchi, I. Mitsuishi, K. Mitsuda, T. Aoki, K. Morishita, K. Nakajima, Large aperture focusing of X-rays with micro pore optics using dry etching silicon wafers, Optics Letters, 査読有、2012、37、779-781
3. R.E. Riveros, I. Mitsuishi, U. Takagi, Y. Ezoe, K. Mitsuda, H. Yamaguchi, T. Boggs, K. Ishizu, T.

Moriyama, Magnetic Field-Assisted Finishing of Silicon Microelectromechanical Systems Micropore X-ray Optics, J. Manufacturing Science and Engineering, 2012, 134, 051001

4. I. Mitsuishi, Y. Ezo, K. Ishizu, T. Moriyama, M. Mita, N.Y. Yamasaki, K. Mitsuda, Y. Kanamori, K. Morishita, K. Nakajima, Novel ultra-lightweight and high-resolution X-ray optics for space astronomy, Sensors & Actuators A, 査読有、2012、188、411-416

5. Y. Ezo, T. Kimura, S. Kasahara, A. Yamazaki, K. Mitsuda, M. Fujimoto, Y. Miyoshi, G. Branduardi-Raymont, I. Mitsuishi, T. Ohashi, JU X TA: a new probe of X-ray emission from the Jupiter system, Advances in Space Research, 査読有、2013、51、1605-1621

6. T. Ogawa, Y. Ezo, T. Moriyama, I. Mitsuishi, T. Kakiuchi, T. Ohashi, K. Mitsuda, M. Putkonen, Iridium-coated micropore X-ray optics using dry etching of a silicon wafer and atomic layer deposition, Applied Optics, 査読有、2013、52、5949-5956

7. その他、査読なし国際会議収録 12 本

〔学会発表〕(計 4 3 件)  
一部を抜粋して示す

1. 江副 祐一郎、マイクロマシン技術による高分解能 X 線望遠鏡、第 11 回 X 線結像光学シンポジウム、2011/11 (招待講演)

2. 江副 祐一郎、宇宙 X 線望遠鏡とシリコン高温塑性変形技術、JSPS 161 委員会 結晶技術の宇宙応用、2011/11 (招待講演)

3. 江副 祐一郎、SWC X のサイエンスと太陽系探査、宇宙の化学進化シンポジウム、2012/10 (招待講演)

4. Y. Ezo, Y. Miyoshi, S. Kasahara, GEO-X team, GEO-X : Imaging of Diffuse X-rays from the Earth's Magnetosphere, Magnetospheric Plasmas 2013, November 2013 (招待講演)

5. Y. Ezo, Planetary magnetospheres and their solar wind interaction observed in X-rays : Past, present and future, Geotail 20<sup>th</sup> workshop, December 2012, Tokyo, Japan (招待講演)

6. その他、国内学会 18 件(うち招待講演 1 件)、国際学会 20 件(うち招待講演 3 件)

〔図書〕(計 1 件)

1. 江副 祐一郎、砥粒加工学会誌、X 線天文における反射鏡の製作方法と将来技術、2012 年 7 号

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 1 件)

名称 : X 線反射装置及びその製造方法  
発明者 : 倉島優一、廣島洋、伊藤寿浩、前田龍太郎、高木秀樹、池原毅、江副祐一郎  
権利者 : 同上  
種類 : 特許  
番号 : 特許出願 2013-014320  
出願年月日 : 2013 年 01 月 29 日  
国内外の別 : 国内

〔その他〕

1. 首都大学東京 修士論文 3 件 (2011-13 年度、各 1 件)

2. ナノ・マイクロマシン展 2013 における「12 インチ Si-MEMS X 線望遠鏡レンズ」の展示 (産業技術総合研究所との協力)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江副 祐一郎 (EZO, Yuichiro)  
首都大学東京・大学院 理工学研究科・  
准教授  
研究者番号 : 9 0 4 6 2 6 6 3

(2) 研究分担者

なし ( )  
研究者番号 :

(3) 連携研究者

なし ( )  
研究者番号 :