

令和 2 年 4 月 30 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18775

研究課題名(和文) Si 高温塑性変形技術を用いた革新的なX線全反射鏡への挑戦

研究課題名(英文) Development of hot plastically deformed Si X-ray mirrors

研究代表者

江副 祐一郎 (Ezoe, Yuichiro)

首都大学東京・理学研究科・准教授

研究者番号：90462663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では Si 基板の高温塑性変形を用いた新しい軽量X線全反射鏡を開発した。Si を高温でプレスすることで結晶面のずれを生じ、自由な形状に変形する日本発祥の手法である。剛性が高く、軽量の Si 基板を用いることで、従来の日本のX線天文衛星に搭載されてきたフォイル方式の鏡の軽量性を保ったまま、角度分解能の向上が期待できる。我々は本手法で世界で初めて円錐治具での変形を行った上でX線照射を行い、最も形状の良い基板中央部で角度分解能として約30秒角を達成した。治具の改良と変形条件出しでさらなる向上が期待できる。さらに Si 表面への原子層堆積法による Pt 膜付けも開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は将来のX線天文衛星に向けて、軽量かつ解像度の良い新たな望遠鏡を開拓することである。日本独自のSi 基板を高温でプレス変形する手法で、本研究で世界で初めて本手法で円錐鏡を試作して、角度分解能で基板中央部で約30秒角という、一つの目標である<1分角を達成した。基板端では治具の噛み合わせが悪く改良を要するが、形状を改善した治具の製作にも企業の協力により成功しており、近い将来の衛星搭載に向けて大きな期待が持てる結果である。また Si 表面への原子層堆積法を用いた膜付けも世界に先駆けて行った。宇宙用だけでなく、X線レントゲンなどの医療や微量分析などの地上応用も可能と考えている。

研究成果の概要(英文)：We have developed hot plastically deformed Si X-ray mirrors for future X-ray astronomy missions. A thin Si wafer is ideal as an X-ray mirror substrate because of its stiffness and lightness. How to bend the fragile Si wafer has been an issue. We deformed Si wafers into a conical shape using hot plastic deformation method. A Si wafer was pressed between convex and concave dies at high temperature near melting point of Si above 700 deg C. For the first time with this method, we have succeeded to shape a Si wafer into the conical shape and to demonstrate X-ray imaging with the single mirror. The measured angular resolution was about 30 arcsec in the central part of the mirror but more than 1 arcmin at edges. By improving the shapes of the dies and deformation conditions, further improvements can be expected in the near future. Furthermore, we have established smooth Pt coating on the Si wafer using atomic layer deposition method.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線望遠鏡 シリコン 高温塑性変形

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線天文学は惑星、恒星からブラックホール、銀河団まで宇宙の高温プラズマ、粒子加速といった高エネルギー現象を探る手段として発展してきた。観測を支える最重要技術の一つが集光結像のための望遠鏡であり、世界の中大型衛星で1000平方cmを越える面積と、10秒角を切る高い角度分解能をできるだけ軽量に実現する手法が求められている。従来のX線望遠鏡では鏡は直接研磨、母型のレプリカ、Alフォイル熱変形で製作されてきたが、角度分解能を上げるには基板の剛性が必要で重くなる問題があった。そこで次世代の鏡基板として大きな注目を集めているのがSiである。Al並の密度(2.3g/cm³)でありながら、剛性が高く、sub μmに平坦で表面粗さ<1nm rmsが可能であり、理想的な全反射鏡となる。欧米ではSi基板を弾性変形する手法や、Siインゴットを研削・研磨して1枚ずつ鏡を製作する手法が開発されているが、前者は温度や振動による形状変化がリスクとなり曲率にも限界がある。後者も1枚の製作コストが高くなり、製作時間がかかるという課題がある。

2. 研究の目的

本研究では秒角とAlフォイル並の軽量製を両立することが可能な新たな方式として、Si基板の高温塑性変形の基礎開発を行った。高温下で凹凸治具に挟んでプレス変形することで、結晶面がずれて、塑性変形となる。自由な形状に変形が可能であり、塑性変形であるため戻りもない。プレス変形のため大量生産も可能であるため、従来方式の弱点がなく、まさに理想的な手法となる。これまでに我々のグループでは、球面変形した基板の表面での全反射を世界で初めて実証し、全反射鏡として使用できることを示してきた。

3. 研究の方法

秒角のSi高温塑性変形全反射鏡の実現を目指して、我々は(1)本手法で世界初の円錐型変形鏡の製作とX線性能評価、(2)原子層堆積法を用いた反射用膜付けを行った。鏡形状は変形に用いる治具の形状を転写すると考えられるため、(1)では高精度治具の製作と、それを用いた変形時の温度、圧力、プレス時間などの条件出しを行った。そして製作した鏡をJAXA 30mビームラインにてX線照射試験を行って、角度分解能、反射率を定量的に評価して、結果に基づき、治具精度の向上を行った。(2)では気相化したガスを導入して、被覆性の良い膜付けが可能な原子層堆積法による高X線反射率のためのPt膜付けを世界に先駆けて開発した。

4. 研究成果

(1)円錐型変形鏡の製作: 図1に設計と試作品を示す。

4インチSi基板から横30mm、縦60mmに基板をダイシングカットして、凹凸治具に挟んでプレス変形する。治具の曲率は母線中央で100mmであり、変形後に反射角が0.63°になるように僅かに傾斜が付いている。凹凸治具の曲率は鏡基板の厚さ300μmを考慮して、差を付けており、凸治具に比べて凹治具の方が曲率が基板の厚さ分大きい。鏡の焦点距離は1回反射で4550mmと従来の大型X線天文衛星並(5-10m)の長焦点とした。

治具は高精度加工によって、設計曲率約100mmに対して、+0.030-0.040mm程度に抑えた。我々はこの治具を用いて温度、圧力、プレス時間などの条件出しを行って、鏡を円錐変形した。変形後の鏡の曲率半径は設計曲率に対して+0.080-0.100mm程度、大きめに出ており、変形後のスプリングバックによる影響と考えられる。戻り方は基板内ではほぼ同様のため、これは変形治具の曲率形状に戻り方を考慮する、あるいは鏡の固定方法で改善できる。

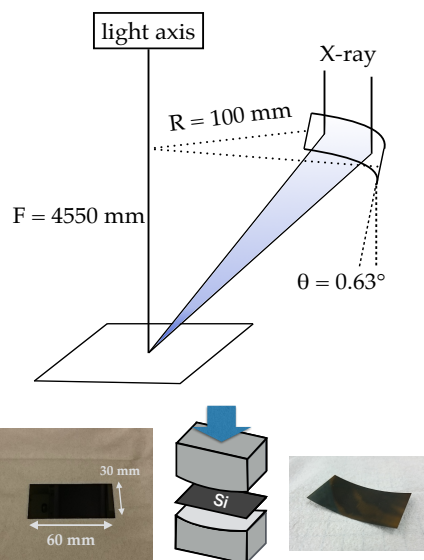


図1. 円錐型変形鏡の設計と試作品。

変形後の鏡のX線性能を評価するため、我々は基板をJAXA 宇宙研 30mビームラインにて評価した。図2のように円周方向と光軸方向に領域を分割し、全168領域にAl Kα 1.49 keVのX

線ビームを照射して、各箇所での X 線結像性能を Half Power Width (HPW) によって評価した。

得られた HPW の場所毎の依存性を図 3(上)に示す。中央部で 30 秒角程度であるのに対し、端部では 1 分角を超過しており、基板全体の積算では約 110 秒角であった。母線方向の各ラインに対して積分したイメージから求めた HPW が図 3(下)である。ここからも基板中央が形状が良く、端ほど悪い傾向が見て取れる。これらの HPW の値は鏡表面の母線形状評価から見積もられる値とほぼ一致しており、鏡形状そのものに場所依存性があることを示している。

この鏡形状の場所依存性の主な原因として考えられるのが、凹凸治具およびそれによる変形後の基板の形状の設計からのずれである。基板自体の厚みが 300 μm と薄いため、表面に残った僅かな残差が変形に影響をおよぼしうる。実際に用いた凹凸治具はどちらも中央部が設計値に対して超過した形状をしていた。すなわち、変形時に中央部に応力が集中し、端部は力が加わりにくい形となっていたことが分かった。

我々はそこですぐに治具加工メーカーと共に治具の形状改善に取り組み、切削工程の機械特性を μm オーダーで抑えることでこの中央部の突起構造を除去することに成功した。この新治具を用いた条件出しを進めることで、基板全面で秒角の角度分解能が可能になると期待できる。

(2) 原子層堆積法による Pt 膜付け : Si は X 線全反射鏡の基板として理想的な機械特性を持つが、反射率においてはより重元素の Au や Pt に劣るため、膜付けが必要となる。我々は世界に先駆けて Å オーダーでの膜厚制御と高い被覆性が可能な、原子層堆積法による Pt 膜付けを Si 基板に対して行った。気相化したガスを導入することで、原子層 1 層毎に膜付けする手法である。

図 4 に膜付けした 4 インチ Si 基板と X 線反射率を示す。Si 表面への親和性を高めるため、10 nm の Al_2O_3 膜の上に 20 nm の Pt を膜付けした。Si 表面に膜付けした Pt 化合物を酸化によって Pt とする方法であり、我々は酸化時に用いる酸素分子の反応性を高めるため、プラズマ化することで、従来の熱を用いた反応に比べて、表面粗さの改善に成功した。図 4 に示す通り、X 線反射率カーブと予測値の比較から求まる表面粗さは 1.0 nm rms 程度であり X 線反射鏡として用いることが可能である。膜付け後の Pt 膜の高温アニールによってさらなる改善が期待できることも分かった。

以上、本研究では革新的な秒角かつ軽量の X 線望遠鏡を目指して、Si 高温塑性変形を用いた新方式の基礎開発を行った。そして、本手法で初となる円錐変形鏡による X 線反射結像の実証と、原子層堆積法を用いた Pt 膜付けの開発に世界に先駆けて成功し、本手法の有効性を示すことができた。成果は論文として発表・投稿しつつあり、JAXA 宇宙科学技術ロードマップで「獲得すべきキー技術」に選出され、また学会での講演奨励賞を受賞するなど反響は上々である。今後の本格的な開発の道筋を付けることができたと考えている。本研究費の支援に深く感謝致します。

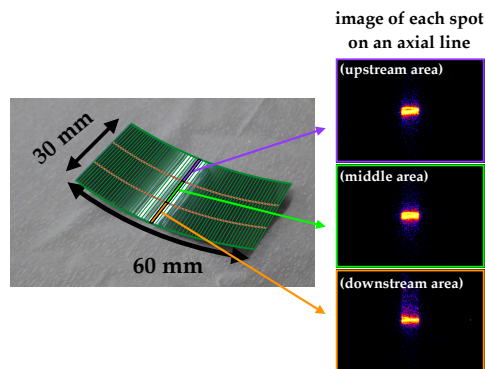


図 2. X 線照射位置と得られた像の例。

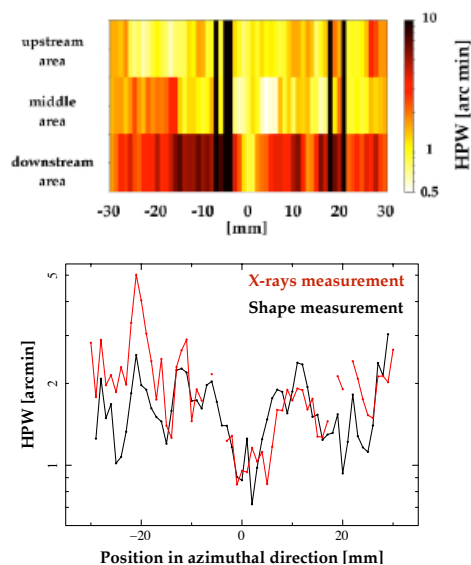


図 3. 鏡の各領域の HPW と円周方向に対する依存性。

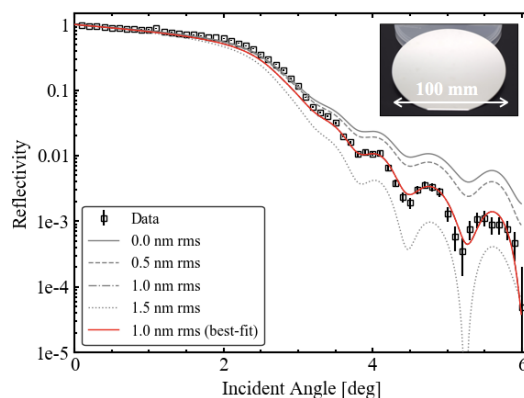


図 4. Si 基板表面への Pt 膜付けと $\text{Al K}\alpha$ 1.49 keV に対する X 線反射率。

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 0件）

1. 著者名 K. Takeuchi, Y. Ezoe, K. Ishikawa, M. Numazawa, M. Terada, D. Ishi, M. Fujitani, M.J. Sowa, T. Ohashi and K. Mitsuda	4. 巻 52
2. 論文標題 Applied Optics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Pt thermal atomic layer deposition for silicon X-ray micropore optics	6. 最初と最後の頁 3237-3243
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1364/AO.57.003237	査読の有無 有
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 N. Nakaniwa, et al.,
2. 発表標題 Development of X-ray mirror using hot plastic deformation process
3. 学会等名 Astronomical X-ray Optics（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Nakaniwa, et al.,
2. 発表標題 Development of X-ray mirror using hot plastic deformation process
3. 学会等名 X-ray imaging optics（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福島碧都ほか
2. 発表標題 プラズマ原子堆積法を用いたX線光学系のPt膜付け加工
3. 学会等名 応用物理学会 秋季年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

・JAXA 宇宙科学技術ロードマップの「獲得すべきキー技術」に選出。また応用物理学会 秋季年会にて原子層堆積法 Pt 膜付けの関連研究が講演奨励賞に選出。
・Si 高温塑性変形鏡のX線照射試験結果について Applied Optics 誌に査読付き論文1本投稿予定。原子層堆積法 Pt 膜付けについて Applied Physics Express 誌に査読付き論文1本投稿済み。

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