

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654053

研究課題名(和文) 太陽観測に向けた超高精度 X 線ミラーの開発

研究課題名(英文) Development of Ultra-Precision X-ray Mirror towards Future Solar Observations

研究代表者

坂尾 太郎 (Sakao, Taro)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：00225781

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000 円、(間接経費) 870,000 円

研究成果の概要(和文)：将来の宇宙からの太陽 X 線観測に必要な、1 秒角を切る、サブ秒角の空間分解能でのイメージングを実現するため、高精度の斜入射 X 線ミラーを国内製造する上での技術的基礎を獲得する。このため、サブ秒角分解能を目指す斜入射ミラーを試作し、研磨時の課題の抽出を行なった。ついで、SPring-8 放射光施設にて 8 keV の X 線で集光性能の評価を行ない、計測された集光強度分布と、研磨時のミラー形状測定結果から波動光学的に求めた強度分布とが整合していることを確認した。試作ミラーではサブ秒角分解能を直ちに達成するには至らなかったが、この研究により、今後の本格的なミラー製作に向け鍵となる知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：This research aims to acquire key technology elements for developing high-precision grazing-incidence X-ray mirrors that are needed for performing sub-arcsecond resolution imagery of the solar corona in X-rays. For this purpose, an engineering Wolter mirror was fabricated and technical issues during the course of high-precision surface polish of the mirror were identified. X-ray focusing performance of the mirror was then measured at SPring-8 synchrotron radiation facility with 8 keV X-rays. It was confirmed that the measured intensity profiles of the focusing X-rays are in good agreement with those synthesized through wave-optical calculation of X-rays from the surface figure profile measured during the high-precision polish. Although sub-arcsecond resolution was not fully achieved with the engineering mirror, critical pieces of knowledge were successfully acquired towards the subsequent fabrication of sub-arcsecond Wolter mirrors for astrophysical applications.

研究分野：X 線太陽物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽物理学 X 線結像光学 超精密計測 量子ビーム 精密研磨 宇宙科学

1. 研究開始当初の背景

(1) 「ようこう」・「ひので」衛星による太陽コロナの X 線撮像観測が明らかにしたように、コロナは、磁化した高温プラズマが示すダイナミックな活動現象(磁場の大規模な構造形成やプラズマ粒子の加速・加熱)に満ちあふれている。しかし、これら活動現象のエンジンである磁気リコネクションの素過程の理解やコロナ加熱機構の特定は、いまだ未解決の問題である。これらに決着をつけるには、コロナ撮像観測に今まで以上の空間分解能が必要であることが「ひので」の観測を通じて明らかになってきた。例えば「ひので」によるコロナ磁気ループの足元部の観測から、コロナにおいても空間スケールで数 100 km の、「サブ秒角」の構造を分解することが、コロナプラズマの加熱や活動現象を理解するための鍵を握ることが認識され始めている。波長 1-10 Å の軟 X 線波長域は、特に 500 万 K をこえる高温のコロナプラズマを温度の抜けなく観測できる唯一の波長窓であるが、一方、この波長域で太陽のように広がった対象を結像できる光学系は、Wolter 型斜入射光学系に限られる。

(2) サブ秒角の空間分解能を持つスペース用 Wolter ミラーはこれまで Chandra 衛星(プレートスケール 0.5 秒角/CCD ピクセル)でしか実現していないが、高い空間分解能と、X 線散乱を抑えるための低いマイクロラフネスをあわせもつ Wolter ミラーは製作が難しく、従来、数年以上にわたる長期の製作時間、従って膨大なコスト、を必要とした。しかも、「ようこう」・「ひので」や Chandra 衛星など、1 秒角前後の空間分解能を持つスペース用 Wolter ミラーを製作可能であった唯一の米国メーカーはミラー製作から撤退し、高精度の Wolter ミラーは世界的に製造できない状況となっていた。

2. 研究の目的

(1) 将来の太陽ミッションにおけるサブ秒角空間分解能での X 線コロナ観測を実現するために、高精度 X 線 Wolter ミラーの国内製造技術の基礎を獲得することを目的とする。

(2) 本研究では、(a) わが国の産業界に蓄積のある精密ナノ加工技術、および、(b) 近年、わが国のシンクロトロン放射光の集光用ミラー(Kirkpatrick-Baez (KB) ミラー)を対象に急激に技術開発の進んでいる、コヒーレント X 線ビームを用いた精密な斜入射鏡面計測技術を導入することでミラーを試作・計測し、これまで海外メーカーでしか手がけられてこなかった、1 秒角を切る高空間分解能の X 線 Wolter ミラーを、はるかに短工期・低コストで国内製作できる可能性を追求した。

3. 研究の方法

(1) サブ秒角の空間分解能を持つ Wolter ミ

ラーには、非球面形状をしたミラー全面にわたって 10 nm 程度の形状精度(理想的な形状からのミラー表面の高さ誤差)が必要となる。このように高い形状精度を確実に実現するには、ミラー研磨時の光学的あるいは機械的な形状計測だけでは不十分であり、実際の観測波長である X 線波長域での集光能力検証が不可欠である。

(2) そのため、研究を進めるにあたって、ナノメートルレベルでの表面創成・計測による X 線 KB 集光ミラーの開発に圧倒的技術を有する大阪大学・大学院工学研究科・精密科学グループおよび、光学素子のナノ加工に実績を持つ、精密光学機器の国内トップメーカーとの協力関係を構築し、精密研磨の実施、研磨後の X 線集光性能の確認、および X 線測定によるミラー形状の計測、を可能とする体制を構築した。

(3) この体制をふまえて、回転放物面と回転双曲面からなる精密 Wolter I 型ミラーを試作研磨した。ミラーは、「ようこう」・「ひので」X 線ミラーで採用された円環型ではなく、研磨時の光学的・機械的計測のアクセスを容易とする、(円環の一部分からなる)「部分円環型」とした。このミラーに対して、研磨における課題の抽出を図るとともに、SPring-8 シンクロトロン放射光施設で利用できる、平行度およびコヒーレンシーの高い X 線を用いて、(a) X 線結像性能の検証と、(b) 本計測に向けて阪大グループが新たに開発した X 線ペンシルビームによる形状計測(下記「学会発表」の項目③)の実施、および、X 線計測結果と研磨時の形状測定結果との比較・検討、を行うこととした。

4. 研究成果

(1) ミラーの試作：試作した部分円環型ミラーの外観形状を、図 1 に示す。熱膨張によ



図 1 試作 Wolter ミラーの外観形状。

る変形を抑えるために、Zerodur ガラス材を用い、奥行き(光軸)方向(図の上下方向)に 10.5 cm、横方向(図の左右方向)に 8.5 cm 程度のサイズの Zerodur 材に対して、回転放物面と回転双曲面からなる Wolter I 型鏡面を成形した。図 1 のミラー上半分が回転放物面、下半分が回転双曲面形状をしている。X 線はミラーの上半分の領域で反射した後、下半分の領域で反射し(2 回反射)、焦点面に向かう。焦点距離は 4 m。また、この試作ミラーの部分円環の円弧角は 40° である。

X 線の反射率を高めるために、研磨後に、ミラー面に Binding Layer としてクロム 10 nm、その上に白金 100 nm、を蒸着によって金属コーティングした。全反射によって 10 keV 付近まで X 線の反射率を確保するよう、斜入射角は 0.45° としている。

(2) 研磨時の表面形状計測：研磨時の試作ミラーの表面形状残差(理想的な Wolter 表面形状からの高さ方向の形状残差)プロファイルの測定例を図 2 に示す。形状残差の大きさは、10 - 数 10 nm (P-V) 程度ではあるが、残差プロファイルに 1 mm 程度の空間スケールでのリップルが見られる結果となった。

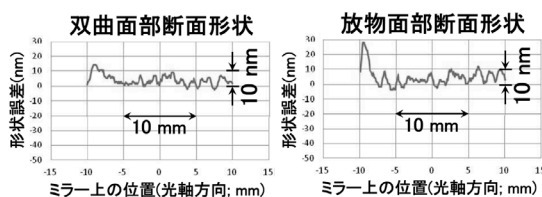


図 2 放物面部、双曲面部それぞれの領域での、試作ミラーの表面形状残差の測定例。

(3) X 線計測と得られた知見：試作ミラーに対し、平行度およびコヒーレンシーの高い X 線ビームを提供できる SPring-8 BL29XUL X 線ビームラインを用いて、評価計測を行った。計測コンフィギュレーションを図 3 に示す。水平面内に設置した試作ミラーに対して、8 keV のシンクロトロン X 線が図中左側より入射し、ミラーで 2 回反射した後、4 m (=焦点距離) 下流に設置した焦点面検出器に入射す

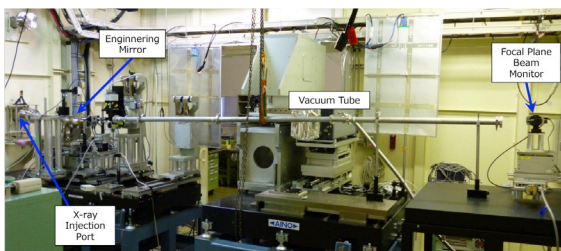


図 3 SPring-8 BL29XUL ビームラインでの、試作ミラーの計測コンフィギュレーション。

る。X 線の空気による減衰を抑えるため、X 線パス中に真空配管を挿入した。

このビームラインで得られる 8 keV の X 線を用いて、試作ミラーの結像性能を評価した。図 4 にミラーの焦点位置における集光 X 線強度分布の例を示す。

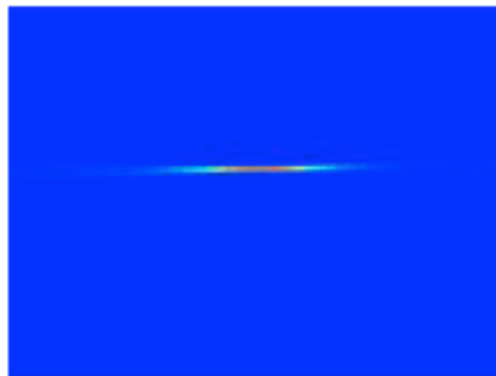


図 4 入射ペンシルビームに対する試作ミラーの X 線集光強度分布。図の左右方向が 2 次元検出器上の垂直方向、図の上下方向が検出器上の水平方向、にそれぞれ対応する。

平行な入射ペンシルビームに対して、ミラーの内面方向(sagittal 方向)へは 5 μm 程度にまで集光できている(角度スケールで 0.3 秒角以下)のに対し、ミラー面に垂直な方向(meridional 方向)では 200-300 μm 程度にまで集光像が広がってしまっていることが確認された。研磨時の表面形状残差データを用いて計算した波動光学的な集光プロファイルは、計測されたプロファイルと整合しており、この比較から、集光像の拡散は前述の空間スケール 1 mm 程度の形状リップルに起因するスロープエラーが主要因となっていることを特定した。これに続き、X 線計測結果と波動光学計算による評価から、単純な P-V 値による表面形状残差の規定は高精度の X 線ミラーに対しては適切でなく、ミラー表面の空間スケールに対する形状誤差のパワースペクトル密度(PSD)を規定して表面創成する必要のあること、また、課題として抽出した 1 mm 程度の空間スケールでは、表面形状の誤差振幅を試作ミラーに対して 1 桁低減する必要があることを特定した。

なお、ミラーの集光プロファイルが広がってしまっていたことにより、X 線計測で計画していた X 線ペンシルビームによる表面形状計測は、実施するに至らなかった。

(4) まとめ：今回の研究では、サブ秒角の空間分解能を持った Wolter X 線ミラーを直ちに実現するには至らなかったが、この研究を通じて、以下のような成果を得ることができた。

(a) Wolter ミラーの試作研磨・金属蒸着・X 線計測、の全過程を一度実践することで、各製作・計測ステップでの課題、および要注意

点の洗い出しを行なうことができたこと。
(b) 特に研磨にあたっては、精密研磨前の粗加工と精密研磨との加工レベルの切り分け(粗加工段階でどこまでの加工を行うか)を明確化できた。また、この試作・計測を通じて、所期の空間分解能・散乱性能を達成するための、空間周波数 $10^{-5} - 10^1 \mu\text{m}^{-1}$ (空間スケール $0.1 \mu\text{m} - 100 \text{mm}$) にわたる形状誤差のパワースペクトル密度の目標プロファイルを設定することができた。これにより、目標プロファイル実現のための精密研磨の内容構成の見直し(複数の研磨の適用)など、母材加工から最終的な表面創成を実現するまでの加工ストーリーを今後検討する上での基盤となる知見を獲得することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

① Sakao, T., Narukage, N., Shimojo, M., Watanabe, K., Suematsu, Y., Imada, S., and Ishikawa, S., "The soft X-ray photon-counting spectroscopic imager for the Sun", Proc. SPIE, 査読無, 8862, 88620T (12pp), 2013,

DOI: 10.1117/12.2024753

② Sakao, T., Narukage, N., Imada, S., Suematsu, Y., Shimojo, M., Tsuneta, S., DeLuca, E. E., Watanabe, K., and Ishikawa, S., "The X-ray/EUV telescope for the Solar-C mission: Science and development activities", Proc. SPIE, 査読無, 8443, 84430A (11pp), 2012,

DOI: 10.1117/12.926850

[学会発表] (計6件)

① Sakao, T., Narukage, N., Suematsu, Y., Watanabe, K., Shimojo, M., Imada, S., Ishikawa, S., and DeLuca, E. E., "The soft X-ray photon-counting telescope for solar observations", SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation (2014年6月23日; Montreal, Canada)

<http://spie.org/AS/conferencedetails/space-telescopes-and-instrumentation-uv-to-gamma>

② 坂尾太郎、渡邊恭子、成影典之、末松芳法、下条圭美、石川真之介、今田晋亮、E. E. DeLuca、J. W. Cirtain、ほか SOLAR-C X線望遠鏡検討グループ、「SOLAR-C X線/EUV望遠鏡の検討状況」、第14回宇宙科学シンポジウム(2014年1月9-10日; JAXA宇宙科学研究所)

http://www.ir.isas.jaxa.jp/sss14/files/SSS14_POSTER_Program_20140103.pdf

③ Kime, A., Matsuyama, S., Fukui, R., Sakao, T., Suematsu, Y., and Yamauchi, K., "Development of an X-ray slope profiler for Wolter mirror - Performance evaluation using wave-optical simulator -",

Metrology, Astronomy, Diagnostics and Optics Workshop (MEADOW) (2013年10月28-30日; ICTP, Trieste, Italy)

<https://www.elettra.trieste.it/Conferences/2013/MEADOW/index.php?n=Main.Posters>

④ 坂尾太郎、成影典之、渡邊恭子、下条圭美、末松芳法、石川真之介、常田佐久、今田晋亮、E. E. DeLuca、ほか Solar-C WG、「Solar-C搭載 X線望遠鏡の検討状況(IV)」、日本天文学会2013年春季年会(2013年3月22日; 埼玉大学)

<http://www.asj.or.jp/nenkai/2013a/html/M20a.html>

⑤ 坂尾太郎、成影典之、渡邊恭子、末松芳法、下条圭美、石川真之介、常田佐久、今田晋亮、E. E. DeLuca、ほか SOLAR-C X線望遠鏡検討グループ、「SOLAR-C X線/EUV望遠鏡の検討状況」、第13回宇宙科学シンポジウム(2013年1月8-9日; JAXA宇宙科学研究所)

<http://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/sss13/paper/P2-147.pdf>

⑥ 坂尾太郎、成影典之、渡邊恭子、末松芳法、今田晋亮、下条圭美、石川真之介、常田佐久、E. E. DeLuca、ほか Solar-C WG、「Solar-C搭載 X線望遠鏡の検討状況(III)」、日本天文学会2012年秋季年会(2012年9月19日; 大分大学)

<http://www.asj.or.jp/nenkai/2012b/html/W24a.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂尾 太郎 (SAKAO, Taro)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号: 00225781

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

末松 芳法 (SUEMATSU, Yoshinori)

国立天文台・ひので科学プロジェクト・准教授

研究者番号: 50171111

山内 和人 (YAMAUCHI, Kazuto)

大阪大学大学院・工学研究科・教授

研究者番号: 10174575

松山 智至 (MATSUYAMA, Satoshi)

大阪大学大学院・工学研究科・助教

研究者番号: 10423196

成影 典之 (NARUKAGE, Noriyuki)

国立天文台・先端技術センター・研究員

研究者番号: 50435806