

MEMS X線光学系の開発

生田 昌寛¹、江副 祐一郎¹、三石 郁之¹、小川 智弘¹、垣内 巧也¹、佐藤 真袖¹、大橋 隆哉¹、
満田 和久²、中嶋 一雄³、森下 浩平³、前田 龍太郎⁴、廣島 洋⁴、池原 毅⁴、倉島 雄一⁴、金森 義明⁵、山口 ひとみ⁶

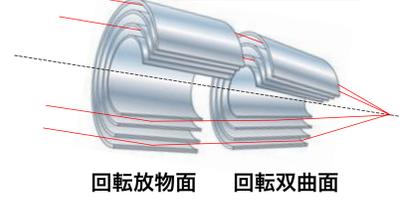
¹首都大学東京、²ISAS/JAXA、³京都大学、⁴産業技術総合研究所、⁵東北大学、⁶フロリダ大学

宇宙観測において天体から発生する微弱なX線を集光し結像する光学系が不可欠である。しかし、天体からのX線は人工衛星によって観測する必要があるため、軽量かつ高性能な宇宙X線光学系が求められている。そこで我々はマイクロマシン(MEMS)技術を用いて独自の軽量かつ高角度分解能が達成可能な宇宙X線光学系の開発を行っている。

1. 宇宙X線光学系

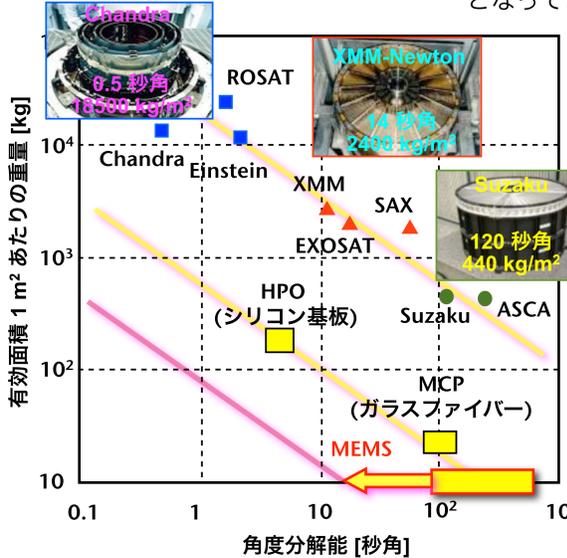
X線(0.1-10 keV)に対する物質の屈折率は1よりもわずかに小さいため、宇宙X線光学系には全反射を用いた斜入射光学系が広く用いられる。

天体からのX線 Wolter I型光学系



X線反射鏡にはX線を効率よく反射させるために、X線の波長(1 keV = 1.24 nm)程度の滑らかさが要求される。また全反射の許される臨界角は数度以下と小さいため有効面積を大きくするには、多数の鏡を正確に配置する必要がある。このように従来の宇宙X線光学系では大きな手間と重量が必要となってきた。

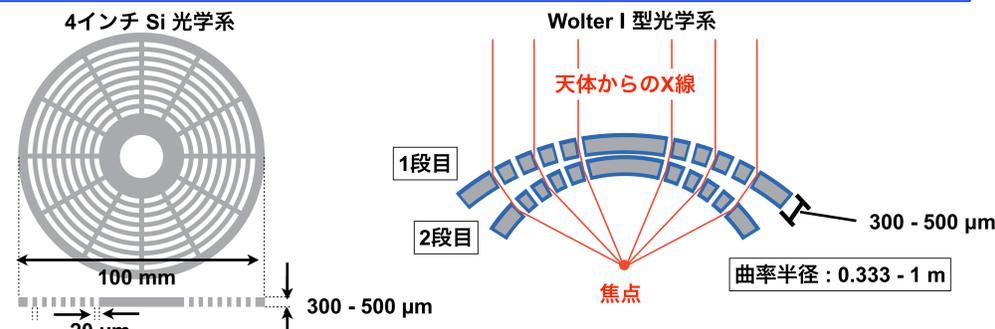
光学系の重量と性能はトレードオフな関係であるが、我々が開発しているMEMS X線光学系は軽量かつ高角度分解能が達成可能な究極の宇宙X線光学系を目指す。



2. MEMS X線光学系

半導体加工技術であるマイクロマシン(MEMS)技術によって加工された微細な穴構造体の側面をX線の反射面として利用する。以下5つのステップによって製作される (Ezoe+2010 MST, Mitsuishi+2012 Sens.act.A, Ezoe+2012 Opt.Let)。

- (1) シリコンドライエッチングによって数 μm の薄い基板に微細な曲面穴構造体を作る。
- (2) X線を効率よく反射させるため、アニールや磁気研磨によって側面の平滑化を行う。
- (3) X線を一点に集光させるため、高温塑性変形によって球面変形を行う。
- (4) X線の反射率を上げるため、原子層堆積法(ALD)によってX線の反射率が高くシリコンに成膜しやすいIrの膜付けを行う。
- (5) 異なる曲率で変形した2枚の基板を重ねる事で Wolter I 型光学系が完成する。



* 搭載を目標とする衛星

我々は2020年代に予定されている木星探査ミッションや、2020年頃に提案予定の地球磁気圏観測衛星に向けて、本望遠鏡を用いた超軽量X線撮像分光装置を提案中である (Ezoe+2013 Adv. Space Res.)。

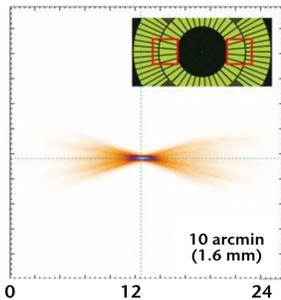
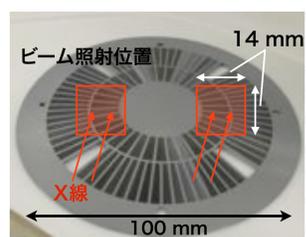
光学系への要求値

有効面積 > 3 cm²、角度分解能 < 5 分角、重量 10 kg、焦点距離 25 cm、視野 4° Φ 、反射角 0.9 - 2.7°、エネルギー 0.3 - 2 keV



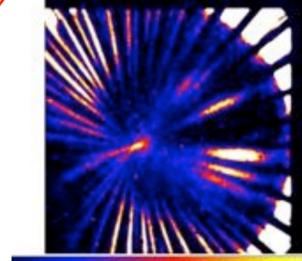
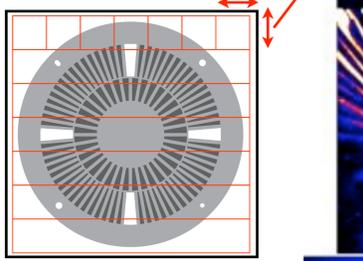
3. 開発：~2012年度 (X線照射試験)

* 1段階X線照射試験



宇宙科学研究所 30 m X線ビームラインにて Al K α 1.49 keV のX線照射試験を行い、角度分解能 14 分角 (FWHM)を達成した (Ezoe+2012 Opt.Let, Mitsuishi+2012 Sens. Act.A)。

* 2段階X線照射試験



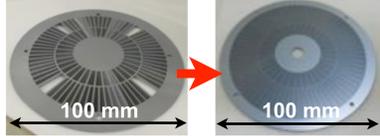
2段階光学系のX線結像に初めて成功。7x7のイメージを合成して全面照射イメージを取得に成功したが、角度分解能 13 分角 (FWHM) であり、また集光強度は予想と比べて約1桁以上弱かった (Mitsuishi+2013 IEEE OMEMS)。

4. 開発：2013年度 (角度分解能、有効面積の改善)

2012年度の課題(角度分解能、有効面積)を改善するため、製作プロセスの見直しを行った。

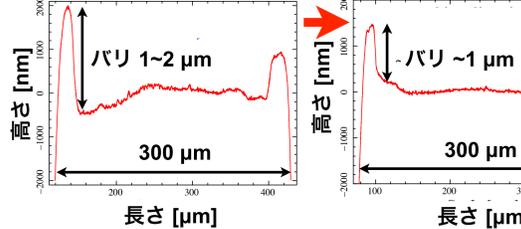
- ① 光学系のデザイン変更 (有効面積 UP)
- ② ドライエッチング → 最適化 (角度分解能、有効面積 UP) (Ikuta+2013 IEEE OMEMS)
- ③ アニール → 最適化 (角度分解能 UP)
- ④ 高温塑性変形 → 最適化 (現在実験中)
- ⑤ 重金属(Ir)膜付けの導入 (有効面積 UP) (Ogawa+2013 Appl.Opt.)
- ⑥ 高性能アライメント装置によるアライメント → 自動軸の追加 (測定時間の短縮)

光学系のデザイン変更 2012年 → 2013年

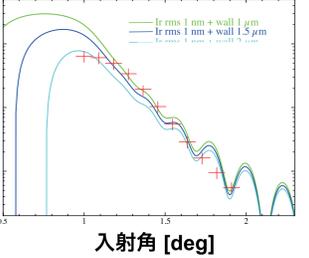


①可視光測定時の回折防止用の穴をなくし、梁の幅を 0.75 mm → 0.15 mm に変更する事で、光学系の開口率を 18% → 31.4% まで広げた。中心の穴は高温塑性変形時の光学系パターンと治具の位置合わせに使用した。

触針計による側壁の形状 2012年 → 2013年



Ir成膜後の反射率測定結果

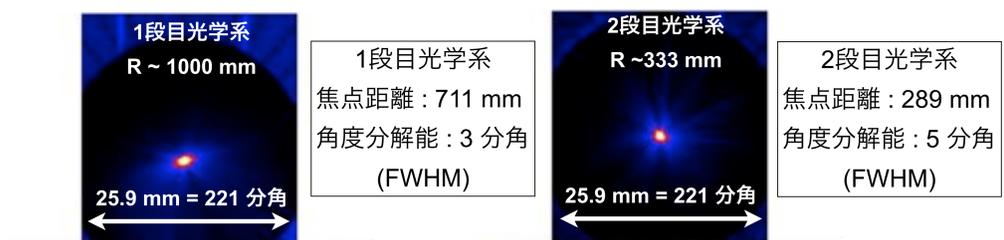


- ②、③ドライエッチングの最適化により、今まで両端に発生していたバリの片面を除去する事に成功した。これにより入射角の小さなX線を多く取り入れる事ができるようになった。更にアニールの最適化により、反射面が約3倍滑らかになり粗さから角度分解能は 3 分角が予想される。
- ⑤また、今回はX線照射試験用の光学系に Ir を成膜し、宇宙研 5 m ビームラインにて Ti K α 4.51 keV の測定を行い、反射率の改善に成功している。

5. 開発：2013年度 (X線照射試験 10月~11月実施)

試作した光学系を宇宙研 30 m ビームラインにて測定した。今回の測定では、始めに1段階目、2段階光学系の単体測定を行い、最適な焦点距離と光学性能を測定し、その後微動台を用いた組み立て装置で角度・並進位置を微調整しつつ、2枚の光学系が最適な位置で合わさるように調整した。得られた像が下の図の通り、それぞれ角度分解能は、1段階目 3 分角 (FWHM)、2段階目 5 分角 (FWHM)、2段階型 4 分角 (FWHM) を達成し、また予想値に近い強度を得る事ができた。今回の試験によって2段階光学系の組み立て手法を実証する事ができた。ただし課題として、デザイン通りの焦点距離にならなかったこと、HPD が悪い事があり改善が必要である。

* 1段階X線照射試験 (7x7のイメージを合成して全面照射イメージを取得)



* 2段階X線照射試験 (7x7のイメージを合成して全面照射イメージを取得)

