



X線結像光学ニューズレター

No. 52 2020年12月発行

最近の超軽量 MEMS X線望遠鏡の開発状況

東京都立大 江副祐一郎

宇宙科学研究所 石川久美

国立天文台 満田和久

はじめに

半導体の微細加工技術を用いた微細穴内壁でのX線反射への利用が、特に次世代の宇宙X線観測衛星を対象として大きく進展している[1]。これまで宇宙観測用のX線全反射鏡は、ガラス基板の表面研磨、電析

による母型のレプリカ鏡、アルミフォイルの熱成型のいずれかで製作されてきたが、微細穴X線光学系では原理的にこれらを上回る軽量性を、角度分解能を保持したまま実現できる。図1に従来の方式との比較を示す。

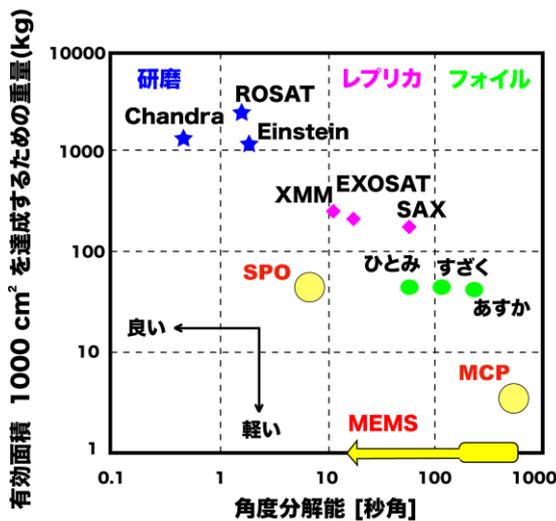


図1 宇宙X線望遠鏡の性能比較。縦軸は1 keVで1000 cm²の有効面積を実現するために必要な重量。横軸は角度分解能。星、菱形、小丸が従来方式とそれぞれが用いられた宇宙X線観測衛星の名前に対応する。丸が微細穴X線光学系の期待される性能[3]。

微細穴X線光学系では従来のX線鏡のサイズをC倍縮小化することで、重量をC³倍に軽量化する。一方で有効面積を保つためには、サイズの縮小分を補うため、C²倍の鏡枚数を必要とするが、望遠鏡全体の重量としてはC⁻³⁺²=C⁻¹倍で重量が減ることになる。すなわち縮小すればするほど軽量となるのだが、縮小しすぎると穴幅とX線波長によって決まる回折によって像がぼける。例えば1 keVで20 μmの穴幅とした場合、13秒角が限界となるが、これは従来のレプリカ方式の鏡に匹敵する値であり、宇宙X線観測に十分に利用可能な性能である。

これまでに微細穴X線光学系としてはSi基板の表面に井桁構造を作り、基板を積層させたSPO (Silicon Pore Optics)方式[2]や、ガラスファイバー内壁での全反射を用いたMCP (Micro Channel Plate)方式[1]がある。しかし、前者は穴幅が積層する基板の厚みによって決まり100 μm程度が限界となるため、フォイル方式を越える超軽量性を実現することは難しい。後者は10 μmオーダーの微細穴

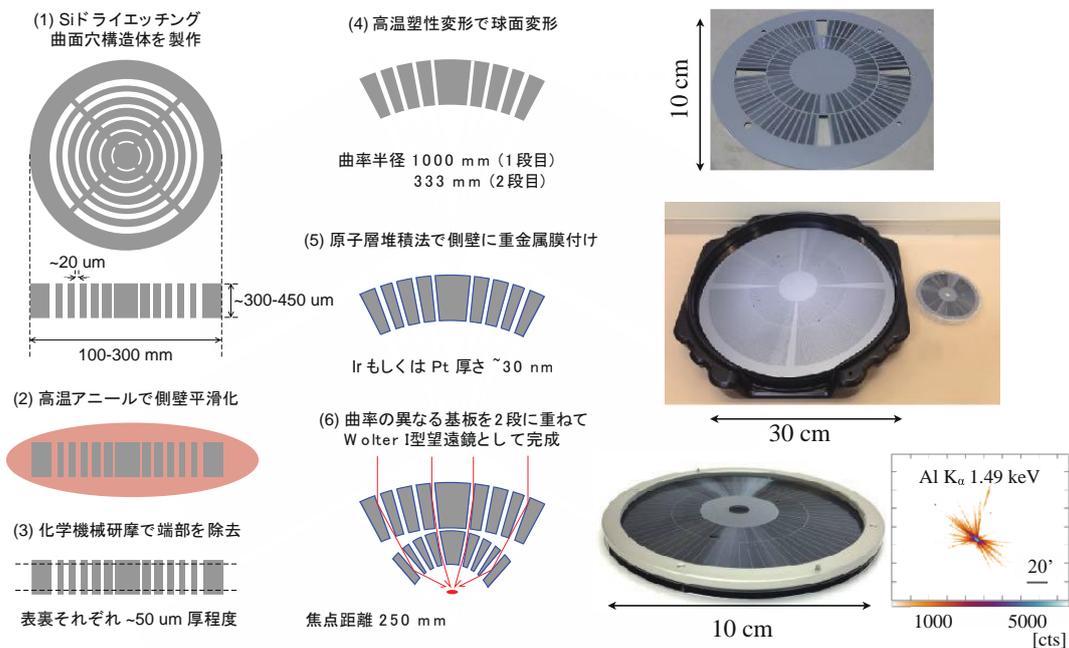


図2 我々の MEMS X線望遠鏡のプロセスフロー。口径は使用する Si 基板のサイズで決まり、焦点距離は高温塑性変形の曲率半径で決まる。パラメータは現在製作中の Wolter I 型望遠鏡の典型的な値。1 回反射型集光系 (口径 4 inch と 12 inch) と Wolter I 型望遠鏡(口径 4 inch)の試作品も示した。

が可能だが、穴を形成する際のエッチング工程やファイバーを束ねる際の精度によって鏡面精度が制限される問題がある。本稿ではこれらの問題点を克服する MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)、いわゆるマイクロマシンの製造技術を用いた、我々独自の微細穴光学系の開発状況について述べる。さらにその将来衛星ミッションへの応用と、派生的に生まれた新たなX線光学系についても報告する。

我々の手法

微細穴X線光学系では穴を小さくするほど軽量となるが、鏡面となる細かい穴の側壁の研磨研削は困難となる。我々はフォイル方式を越える超軽量性と良好な結像性能を両立する新手法として MEMS の微細加工技術を応用した手法を開発してきた。図2に示すように 300-450 μm 厚程度の比較的薄い Si 基板にガスを使った反応性ドライエッチングによって垂直な曲面穴を形成する。深掘りには DRIE (Deep Reactive Ion Etching) と呼ばれるエッチングガスと保護ガスを交互に導入する技術を用いる。こ

れにより 20 μm 程度の穴幅の微細穴の貫通ができる。しかしエッチング後の側壁の表面粗さは、スキヤロップと呼ばれるでこぼこによって 10 nm rms を切ることは難しいため、平滑化プロセスが必要となる。

そこで高温アニールと呼ばれる Si 基板を 1100-1200°C 程度の高温下 (Si 融点 1410°C) に置き、清浄化ガスを絶えず流すことで、表面原子の拡散をうながして 1 nm rms を切る平滑な鏡面に仕上げる。さらに前段の長時間エッチングでどうしても避け得ない端部のバリ (高さ 1 μm 以下程度) を研削と化学機械研磨によって表裏面からそれぞれ 50 μm 程度削り取る。この際には微細穴を壊さないように穴に保護材を封入し、処理後に薬液で取り除く。

ここまでで側壁はX線全反射鏡として完成しているが基板自体は平面のため、宇宙X線の集光結像には使えない。そこでSi 高温塑性変形という日本発祥の高温プレス変形[4]によって、Si の結晶面の転位を利用した球面変形を行う。都立大では日本に数台しかないこのSi 高温塑性変形装置を発案者の東北大 中嶋先生から譲り受けて使用している。曲率半径

は変形時に用いるプレス治具で制御できるが、変形後のスプリングバックによって形状の戻りや、穴同士の間の梁の間隔や太さによって変形精度が影響を受けるので注意が必要である。

つぎに鏡面となる側壁に反射率を上げるために Ir や Pt などの重金属を膜付けする。高アスペクトの穴内部になるため、スパッタや電析では難しく、原子層堆積法(ALD, Atomic Layer Deposition)という複数の気相の化学反応の連続的な使用による膜付け方法を採用している。Pt などはSi には直接、膜付けできないあるいは非常に剥がれやすくなるため、バッファ層として Al_2O_3 などが必要となる[5]。nm order での一様な膜付けが可能だが、表面粗さはアニール後から若干劣化して 1-2 nm rms となる。<2 keV の軟X線での用途には使用可能であるが、今後の改善が必要な課題点である。

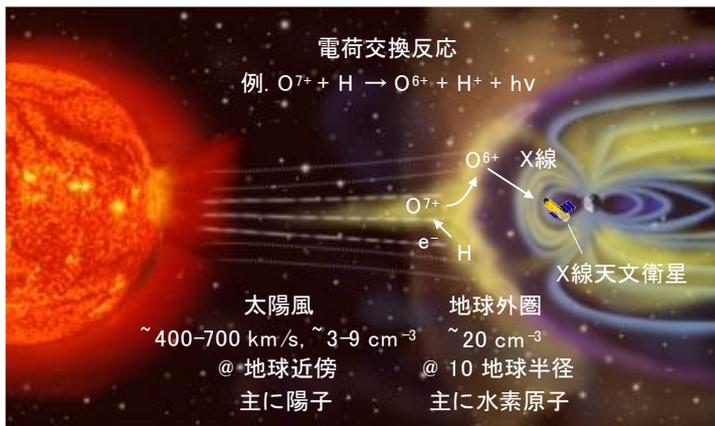
最後に異なる曲率半径で曲げた2枚の基板を重ねれば Wolter I型望遠鏡として完成する。側壁は基板に対して垂直な穴のため、理想曲面である回転放物面と回転双曲面の円錐近似となるものの基板が薄いため例えば300 μm 厚で焦点距離 250 mm といった短焦点でも近似の効果は約1秒角と極めて小さい。

本手法は穴幅を細かくできることから原理的に世界最軽量であり、同時に従来1枚ずつ製作していた鏡を一括して大量生産できるため低コストとなる。またエッチングと後工程を工夫することで、優れた角度分解能も実現可能であり、最新の試作品で、Al K α 1.49 keV の1回反射において部分照射であるが3分角を達成している。Wolter I型の2回反射では5-10分角程度と予想される。これは原理的には高温アニールの時間を延ばすことで、拡散長が時間の平方根に比例して増え、鏡面が平坦化されるため改善すると予想している。現在、10時間から50、100時間以上とアニール時間を徐々に延ばすことで平坦性が改善することを確かめられており、1分角を切る角度分解能に挑戦している。最終目標は穴幅とX線波長から決まる回折限界である13秒角(穴幅 20 μm 、1 keV を仮定)で、図1の矢印で示した性能となる。実現すれば、究極の超軽量X線望遠鏡となる。

なお、やや手前味噌になるが、この場を借りて宣伝させて頂くと、我々は共同研究機関やメーカーの方々とともに、ほぼインハウスで試作を進めて、試作光学系でのX線反射・結像の実証[6]、ALD で膜付けした Ir および Pt 膜付き光学系でのX線反射実証[7]に世界で初めて成功してきた。さらに微細穴X線光学系として知る限り世界最大の直径 300 mm (12 インチ)の試作とX線実証も行っており、製作評価のノウハウを蓄積してきた。微細穴光学系の難点は鏡の枚数が桁違いに多いことから、一部の鏡の形状測定では全体の角度分解能が推定しづらいことにある。そこで代表的な基板内の場所での側壁形状からの角度分解能推定の手法や、変形した基板全体の表面形状から内部の鏡の配置精度を見積もる手法を確立して、評価に用いている[8]。

宇宙応用

我々の MEMS X線望遠鏡は開発途上ではあるが、軽量性においては既に従来のあらゆる方式を約1桁以上、上回っている。たとえば口径 4 inch Wolter I型望遠鏡の重量は基板部分で約3g、支持するアルミフレームを含めても約30gと非常に軽い。同時に基板が薄く短焦点でも角度分解能の劣化が抑えられることから、X線観測装置の小型化に寄与する。そこで今、我々が計画しているのが地球磁気圏を世界で初めてX線で撮像する超小型衛星 GEO-X (GEOspace X-ray imager)である[9]。地球の周辺では太陽からの高速イオン流である太陽風に含まれる多価イオン(炭素、窒素、酸素など)と地球の超高層大気であり10地球半径(R_E)以上に広がる外圏に含まれる中性大気(主に水素原子)の衝突によって電荷交換反応を生じる。電子が足りない状態である多価イオンは中性大気から電子を奪い、奪われた電子がイオン中で基底状態に落ちる中でX線輝線を放射するのである。この現象は1990年代にドイツの宇宙X線観測衛星 ROSATが全天サーベイ中に偶然発見し、2000年代に入って日本の「すざく」衛星などの活躍によって



磁気赤道面, 50 R_E からの観測を仮定

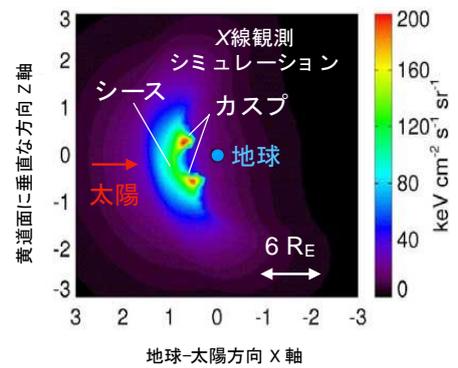


図3 地球近傍で生じていると考えられる太陽風電荷交換 X 線の描像および X 線空間分布シミュレーション[9]。地球磁気圏の衝撃波面の地球側で太陽風密度が高まるシース領域、地球の磁極に向かって磁場がすぼむカスプ領域において強い X 線発光が生じていると予想されている。

その描像が確立した、比較的最近になって分かってきた現象である。図3にその描像を示す。

このX線放射の空間分布は太陽風の電磁流体シミュレーションと地球外圏の密度モデルによって推定することが可能である。仮に地球磁気圏の外で、月付近(地球から約60 R_E)から観測した場合、異方的な分布を示すことが示唆されている(図3)。これは地球から見て太陽側、いわゆる昼側の磁気圏の方が太陽風の密度が高いことに起因する。太陽風フラックスはフレア等にもなって激しく時間変動するため、この現象は宇宙X線観測にとっては雑音の把握の観点で重要である。一方で、地球磁気圏観測にとっては昼側磁気圏境界面のイメージングという極めて大きな意義を持つ。というのも、従来、地球磁気圏のこれらの領域は、「その場」観測衛星と呼ばれる電磁場粒子計測器を搭載した衛星を一機ないし複数機飛ばして、点観測を繋ぐことで理解してきたのだが、X線を使えば一気にその全体像を捉えることができるためである。もちろん、「その場」観測ほどの高い時間分解能や空間分解能は、遠地点からの撮像では簡単ではないので、相補的と言える。

我々は「すざく」衛星を用いて太陽風電荷交換X線を調べる中で、地球惑星科学の研究者の方々との可能性に気が付いた。しかし、宇宙X線観測衛星は基

本的に地球の近傍を周回し、遠方天体を観測するため、放射源の中からの観測となり、視野も限られる。そこで我々はGEO-Xを提案した。放射源である地球近傍を脱し、遠方から俯瞰的な観測を行うことでX線による磁気圏撮像を実証しつつ、太陽風の変動に伴うシースやカスプ、衝撃波や磁気圏界面の動圧変化に伴う形状や移動を明確に捉えることを狙う。科学目的を絞り込んだある種の実証的かつ挑戦的な衛星であり、同時に太陽活動が上昇する2020年代前半にタイムリーに打ち上げる必要があるため、近年、発展著しい超小型衛星(50 kg 級, 50 cm 立方程度)での実現を目指している。

必要になるのが限られた衛星のスペースと重量、電力の制約の下で、高感度を実現するための超小型X線撮像分光装置であり、ここにMEMS X線望遠鏡を搭載して、世界初の宇宙実証を目指している。図4に示す。望遠鏡は MEMS Wolter I型で、口径 4 inch、焦点距離は 25 cm、視野 4 deg Φ の軟X線(0.3-2 keV)用途である。目的とする太陽風電荷交換反応は炭素や窒素、酸素のK輝線が主であるためエネルギーバンドは 2 keV 以下で十分である一方で、 20×10 deg 程度に広がると予想される昼側磁気圏

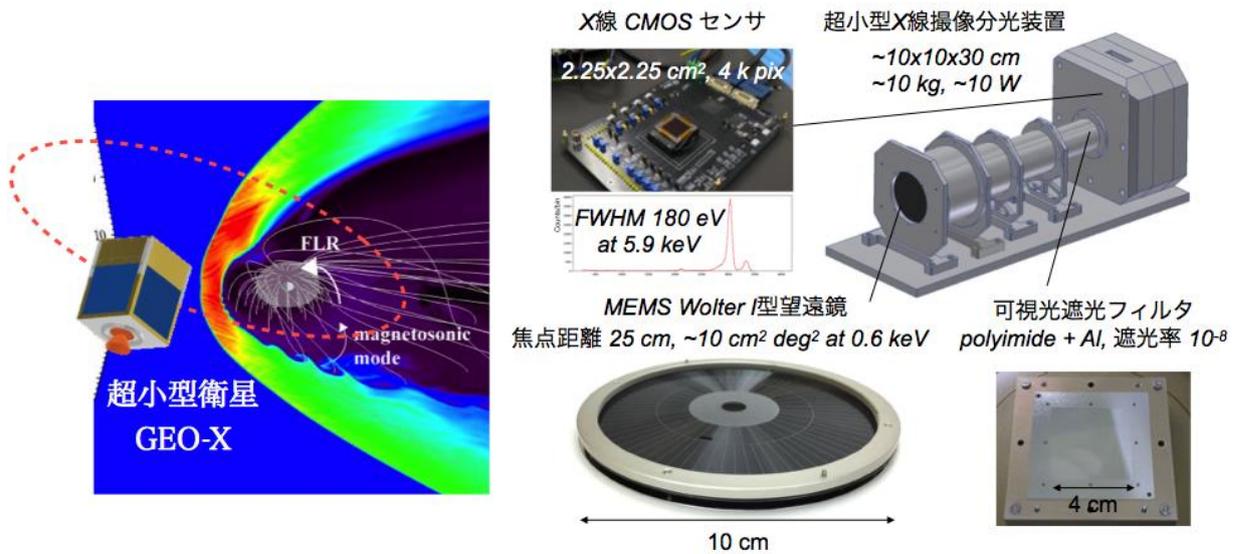


図4 GEO-X 衛星と搭載する超小型 X 線撮像分光装置。

X線放射をカバーするために広い視野が必要となる。角度分解能は構造が大きいため <10 分角で十分であり、現在の性能で十分達成しうる。

広がったX線放射への感度指標として Grasp (有効面積を視野内で積分した値)があるが、本装置の Grasp は「すざく」衛星に搭載したX線CCD+望遠鏡に匹敵する。光軸方向に対する有効面積は100倍程度小さいが、軟X線に特化して視野を大きく確保できるためである。衛星は最速2022年頃にH3ロケットの相乗りでの打ち上げを目指しており、現在、JAXA 宇宙科学研究所、東京大学、北海道大学、名古屋大学、関東学院大学、関西学院大学らと開発を進めている。なお、このような超小型X線撮像分光装置は、地球周回の超小型衛星に搭載して、特定天体(超巨大ブラックホールなど)の長時間観測を実現するというような使い方[9]や、これまで装置の重量制限で搭載が難しかった惑星探査機への応用[11]も考えられ、さまざまな発展性を秘めていると考えている。こうした将来の発展性が認められ、MEMS X線望遠鏡は 2019年 JAXA 宇宙科学技術ロードマップにて、「獲得すべきキー技術」に選出された。

派生的に生まれた新たな光学系

我々の MEMS X線望遠鏡は開発において様々な技術を試してきており、結果としていくつかの派生

的な新しい光学系が生まれた。ここに紹介する。いずれの手法も、X線反射あるいは結像に我々が世界で初めて成功したものである。

(1) 結晶異方性エッチングを用いた微細穴光学系：ドライエッチングを用いる前に我々が開発していた手法であり、Si 結晶面の KOH 等のアルカリ溶液へのエッチングレートの違いを利用して、Si (110) 基板に滑らかな Si (111) 側壁を加工する手法[12]。側壁は結晶面に沿うため平滑化が不要なほど表面粗さが低い(<1 nm rms)が、一方で結晶面に沿った直線的な側壁となるため、ドライエッチングのような曲面穴が難しく、直線的な穴で曲面を近似する必要がある。

(2) Focused Ion Beam を用いた微細穴光学系：微小試料の断面観察などに用いられる Focused Ion Beam を微細穴加工に用いた光学系[13]。平滑な側壁でかつ基板を傾けて加工することで斜めの穴も空けることが可能だが、加工速度に課題がある。

(3) MEMS Lobster eye 光学系：MEMS Wolter I型X線望遠鏡の加工技術を用いて、四角の微細穴を形成して Lobster eye 光学系として用いる手法[14]。Wolter I型に比べて広い視野が容易に実現できるが、

集光像は原理的に十字に広がるため結像性能は Wolter I型の方が優れているため相補的と言える。

(4) Si 高温塑性変形鏡：MEMS X線望遠鏡で用いている加工技術である Si 結晶の高温塑性変形を用いて Si 基板そのものを全反射鏡として用いる手法 [15-16]。微細穴光学系ではなく、従来のフォイル方式の Al 鏡を Si 鏡に置き換えたものだが、剛性が高く平滑な Si 基板を母材に用いることで角度分解能の大幅な向上が見込める。欧州が開発している SPO方式と似ているが、SPOは弾性変形を用いており、打ち上げ時の振動衝撃や温度変化による形状変化が懸念される。我々の手法は塑性変形なのでその心配がない。こうした独自性からMEMS X線望遠鏡と同じく JAXA 宇宙科学技術ロードマップにて「獲得すべきキー技術」に選出された。

この他にも我々はSi 高温塑性変形を利用した新しい集光可能なブラッグ反射型X線偏光計、MEMS Wolter I型の中性子望遠鏡など新しい光学系を考えて開発しており、さまざまな宇宙観測や地上の放射線計測に応用できればと思っている。

謝辞

本研究は東京都立大、JAXA 宇宙科学研究所、産業技術総合研究所、東北大学、京都大学、九州大学、東京大学、立命館大学、宇都宮大学、フロリダ大学、国立天文台およびメーカーの方々の共同研究による。また JSPS 科研費 20684006、23684009、26287032、18K18775、20H00177、JAXA 宇宙科学研究所 搭載機器基礎開発実験費、戦略的開発研究経費、稲森研究助成、東レ科学研究助成、首都大学 若手奨励経費、傾斜的研究費の助成を受けた。

References

[1] M. Bavdaz et al., X-Ray Pore Optics Technologies and Their Application in Space Telescopes, *X-ray Opt. and Instrum.*, 295095 (2010).

[2] M. Bavdaz, Silicon Pore Optics: modular high performance X-ray optics, *X線結像光学ニューズレター*, No.50, 1, (2019).

[3] Y. Ezoe et al., Ultra light-weight and high-resolution X-ray mirrors using DRIE and X-ray LIGA techniques for space X-ray telescopes, 16, 1633 (2010).

[4] K. Nakajima et al., Shaped silicon-crystal wafers obtained by plastic deformation and their application to silicon-crystal lenses, *Nature Materials*, 4, 47 (2005).

[5] D. Ishi et al., Enhanced X-ray reflectivity from Pt-coated silicon micropore optics prepared by plasma atomic layer deposition, *Appl. Phys. Express*, 13, 0870001 (2020).

[6] Y. Ezoe, et al., Large aperture focusing of x rays with micropore optics using dry etching of silicon wafers, *Optics Letters*, 37, 779 (2012).

[7] T. Ogawa, et al., Iridium-coated micropore X-ray optics using dry etching of a silicon wafer and atomic layer deposition, *Applied Optics*, 52, 5949 (2013).

[8] M. Numazawa, et al., Evaluation of arrangement error of micropore X-ray optic due to hot plastic deformation process, *J. Japan Appl. Phys.*, 57, 06HJ11 (2018).

[9] Y. Ezoe, et al., Ultra light-weight X-ray telescope missions : ORBIS and GEO-X, *J. Astron. Telescope Instrum.*, 4, 046001 (2018).

江副, 地球磁気圏外からのX線観測 GEO-X – X線天文と深宇宙探査の融合, *天文月報*, 7, 444 (2018).

[10] I.P. Robertson et al., X-ray emission from the terrestrial magnetosheath including the cusps, *J. Geophys. Res.*, 111, A12105 (2006).

[11] Y. Ezoe et al., JUXTA : a new probe of X-ray emission from Jupiter, *Advances in Space Res.*, 51, 1605 (2013)

[12] Y. Ezoe et al., Micropore x-ray optics using anisotropic wet etching of (110) silicon wafers, *Applied Optics*, 45, 8932 (2006).

[13] M. Numazawa et al., First demonstration of X-ray mirrors using focused ion beam, *J. Japan Appl. Phys.*, 55, 06GP11 (2016).

[14] R. Otsubo et al., First demonstration of Lobster eye X-ray optics fabricated with Deep Reactive Ion Etching, *International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2019)*, 31D-9-1

(2019).

[15] Y. Ezoe et al., Shaped Silicon Wafers Obtained by Hot Plastic Deformation : Performance Evaluation for Future Astronomical X-ray Telescopes, *Appl. Opt.*, 48, 3830 (2009).

埋め込みX線ターゲットを用いた高感度・高分解能透過型X線イメージング

大阪大学大学院工学研究科

志村 考功

1. はじめに

透過型X線撮像装置は物質の内部を非破壊で観察できることから様々な分野で活用されている。近年、医療分野では核磁気共鳴や超音波等による非破壊診断法の格段の進歩があったが、依然としてレントゲン検査に代表されるX線診断は、健康診断から精密検査の各レベルの診断で重要な役割を果たしている。また、最近では製品の安全、安心、信頼性への関心が非常に高まっており、製造者、販売者に対する責任も以前にも増して問われるようになっている。そのため、透過型X線撮像装置の生産現場や納入、出荷時における非破壊検査用機器としての需要が増している。特に食品や飲料品、乳幼児向け製品は抜き取り検査から全数検査へと進展すると考えられる。さらに、空港での携行品のセキュリティチェック、税関での麻薬などの違法物検査などもその精度の向上が求められている。安全・安心な社会の実現のためには、医療用としては低被爆線量と高精度診断の両立、非破壊検査装置としては検査精度の向上と低コスト化を両立し、多様な要求に答えていく必要がある。

ここでは我々が独自に検討を進めてきた埋め込みX線ターゲットを用いた透過型X線撮像法について報告する。

2. 埋め込みX線ターゲット

実験室系X線装置の光源はターゲット金属に電子線を照射することによりX線を発生する。ターゲット金属の熱負荷を低減するためにターゲット金属を回転したり、光源サイズを小さくするために照射する電子線を集光するなどの技術開発はあったもののその様態は数十年以上ほとんど変わっていない。一方、我々はダイヤモンド基板にターゲット金属を埋め込んだ埋め込みX線ターゲットを検討してきた

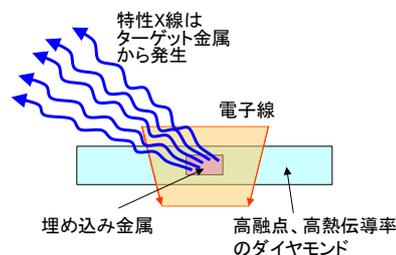


図1 埋め込みX線ターゲット

(図1)。このターゲットを用いた場合、実効的な光源形状は照射する電子線の照射形状によらず、埋め込んだターゲット金属形状で済む。通常、電子線のターゲット金属への侵入長は数 μm であるため、高アスペクト比の構造を用いないでターゲット金属の形状を μm のスケールで自由にデザインできる。ダイヤモンドは通常、ターゲット金属として用いられる銅、モリブデン、タングステン等と比べて、耐熱性では同等、熱伝導率は遥かに高い値を示す。これは電子線照射によるターゲット材の昇華を防ぐことができ、熱負荷で制限されていた励起電子線パワーを従来以上に増加させることができることを意味する。一方、希土類金属（ランタノイド）のような熱伝導率が低く、従来ターゲット材として用いることができなかった材料もダイヤモンド基板に埋め込むことによりターゲットとして用いることが可能になる。

3. X線タルボ・ロー干渉計への適用

透過型X線格子を3枚用いるタルボ・ロー干渉計は、空間的可干渉性に乏しい、光源サイズの大きいX線源を用いてもX線位相及び小角散乱イメージングを可能にする手法として注目されている(図2a)[1,2]。回折格子(G_1)の直前に試料を配置した場合、試料内部の位相シフトによってX線が屈折し、それに伴い自己像(G_1 の干渉像)がわずかに変

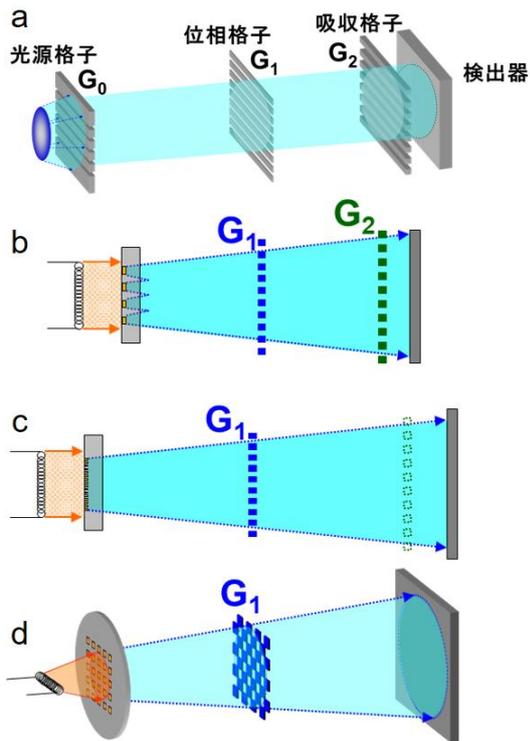


図2 (a)タルボ・ロー干渉計 (b-d) 埋め込みX線ターゲットを適用した光学系。

形する。また、小角散乱によって自己像のビジビリティが低下する。変形した自己像の位置に吸収格子(G_2)を重ね合わせることで、自己像の変形をモアレ縞として検出している。光源格子(G_0)をこれらの格子と光源の間に配置することにより、サイズの大きな光源でもX線位相イメージングを可能にしている。

光源格子(G_0)、吸収格子(G_2)は多数の微細な開口部(数 μm 幅)を有する一方で、非開口部で透過力の高いX線を遮蔽しなければならず(~50 μm 厚)、高アスペクト比の構造が必要(高コスト、視野制限)である。

我々は埋め込みX線ターゲットを適用することにより光源格子(G_0)を用いない光学系を実証した(図2b)。マルチライン状に金属を配置した埋め込みX線ターゲットにより、タルボ・ロー干渉計における光源と光源格子を置き換えた。埋め込み金属の厚さは励起電子線の吸収に必要な厚さ(数 μm 程度)でよいので、個々の金属ラインの幅を容易に狭くすることができ(図3a)、タルボ・ロー干

渉計の全長の短縮及び撮影時間を低減できることを示した[3]。8 keVのX線を用いれば光源から G_2 までの距離をわずか40 cmまで短縮することができるため、1.2 W (20 kV, 0.06 mA)の極端に低い投入電力でも良好な像を得ることができた(図3b)。

さらに埋め込みターゲットのライン幅を1 μm 以

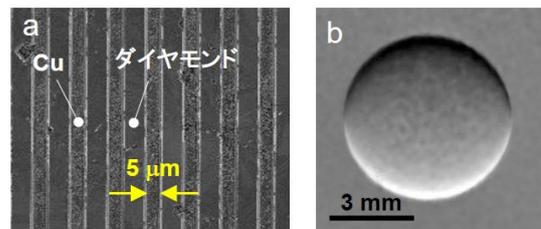


図3 (a) 埋め込みX線ターゲット (b) アクリル球の微分位相像

下に細くすることにより(図4a)、吸収格子も除いた自己像直接検出型の光学系を実現した(図2c)。通常、吸収格子を検出器直前に配置し、位相格子の自己像とのモアレを2次元検出器で検出する。これは自己像の周期が検出器の画素サイズよりも小さく、自己像を直接測定できないことによる。狭い線幅の埋め込みターゲットを用い、位相格子と光源の距離を数cmと短縮することにより、全長1 mの光学系での自己像直接検出光学系を実証した[4]。試料による自己像の変形やビジビリティの減少を直

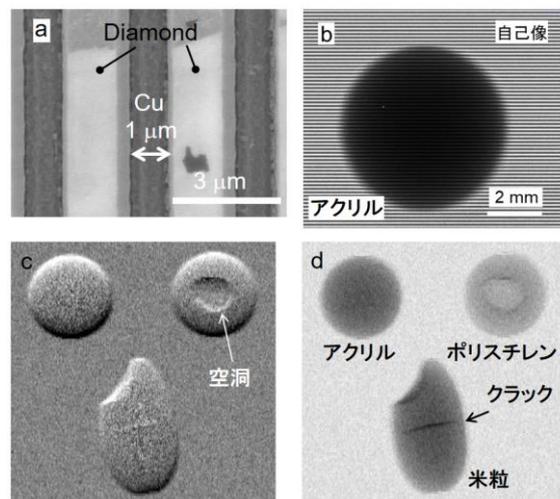


図4 (a) 埋め込みX線ターゲット (b) アクリル球の測定画像 (c) 微分位相像 (d) 小角散乱像。

接、画像として検出するため(図 4b)、1ショットでの撮影が可能となる。タルボ・ロー干渉計では吸収格子を走査しながら測定した複数枚の画像を用いて解析が行われることが多いが、1ショットでの測定は測定時間の短縮、被ばく線量の低減につながる。ポリスチレン球の空洞、米粒内のクラックが位相微分像や小角散乱像で鮮明に観測されていることを確認できる(図 4c,d)。

光源格子や吸収格子を用いる通常のタルボ・ロー干渉計でも2次元化は可能だが、画像取得手順が複雑になり、2次元格子によるX線強度の減衰も著しい。一方、自己像直接検出型の光学系では比較的容易に2次元化が可能である(図 2d)。埋め込みX線ターゲットの金属をドット状に配置し(図 5a)、位相格子をチェッカーボード状にすれば(図 5b)、2次元ドット状の自己像を形成できる(図 2c)。この

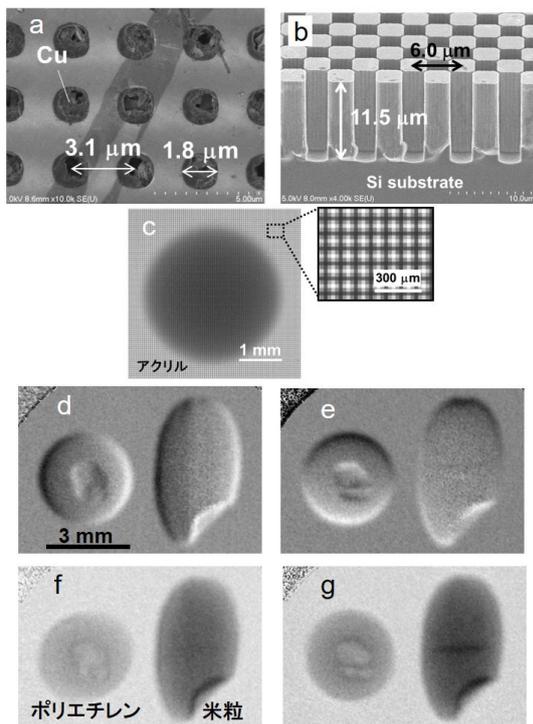


図 5 (a) マルチドット状埋め込みターゲット (b) チェッカーボード状位相格子 (c) アクリル球での取得画像とマルチドット状の自己像 (d) 左右方向の位相微分像 (e) 上下方向の位相微分像 (f) 左右方向の小角散乱像 (g) 上下方向の小角散乱像

2次元ドット状の自己像のドットの変位量やビジビリティを直接計測することで2次元の微分位相像や小角散乱像を1ショットで取得することができる[5,6]。米粒内のクラックは左右方向の小角散乱像では確認することが困難だが(図 5f)、上下方向の像では明瞭に観察されており(図 5g)、その有用性を示している。

3. 超解像X線イメージング

透過型X線撮像装置は電子線を金属ターゲットに照射することによりX線を発生し、試料(被写体)を透過したX線を2次元検出器で検出する。このとき像の空間分解能は光源サイズと2次元検出器の分解能で決まる。通常、X線の検出器のピクセルサイズは数十 μm と大きいため、数 μm の空間分解能を得るためには微小X線光源が必須である。一方で電子線を集光し光源サイズを小さくすると比例して投入電力も小さくしなければならず、空間分解能とX線強度のトレードオフはX線撮像装置の本質的課題として甘受されてきた。

一般に画像計測により得られる像は被写体からの実像に測定系に依存する関数(PSF: Point Spread Function)を畳み込み積分(Convolution)した像として得られる。PSFを何らかの方法により推定し、ボケのない元画像を得ようとする試みはあるものの、通常は、PSFが正確に得られないことや観察画像にノイズが含まれることから元画像の再構築は困難なものとなっている。

埋め込みターゲットを用いると多数の微細な金属ターゲットを正確に設計通りに配置することが可能となる。この場合、金属ターゲットの位置は正確に求められるので、その位置情報から再構築すると、元画像は得られないものの、再構築された像は微細な金属ターゲット1個で撮影した像と同じ解像度を有することになる(図6)[7]。

図6の場合、5×5個の金属ターゲットに電子線を照射することになるが、再構築された像は電子線照射領域の10分の1の大きさの光源で得られる像と

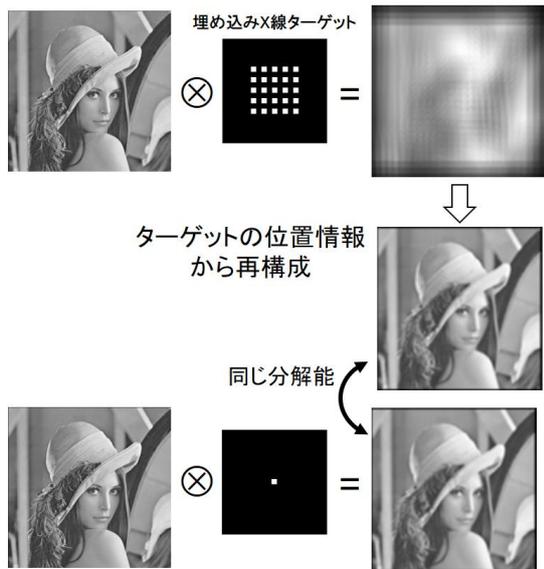


図6 埋め込みX線ターゲットを用いた超解像技術.

同等の解像度となる。この手法により高分解能と測定時間の短縮を同時に達成することが可能となる。

ひとつの光源で得られる画像を $f(x)$ とすると、マルチ光源で得られる画像 $g(x)$ は a_1, a_2, \dots, a_N を各光源ごとの画像のシフト量として

$$g(x) = f(x-a_1) + f(x-a_2) + \dots + f(x-a_N)$$

と表される。そのフーリエ変換 $F[g(x)](k)$ は

$$F[g(x)](k) = (e^{ika_1} + e^{ika_2} + \dots + e^{ika_N}) F[f(x)](k)$$

となり、光源の位置情報から逆フーリエ変換により、

$$f(x) = F^{-1} [F[g(x)](k) / (e^{ika_1} + e^{ika_2} + \dots + e^{ika_N})](x)$$

が得られる。光源の位置が図6のように完全に周期的だと $(e^{ika_1} + e^{ika_2} + \dots + e^{ika_N})$ の項がある周波数のときに0になる。これはその周波数成分の画像情報が欠落することを意味し、また、再構成の数値処理時の障害となるので、光源の配置の並進周期性はない方がよい。五角形状に配置した埋め込みターゲットを用いてX線チャートを測定したところ(図7b)、 $0.6 \mu\text{m}$ ピッチの 패턴の像を得ることができた(図7c)。

一つの光源サイズが直径 $1 \mu\text{m}$ にもかかわらず、光源サイズよりも小さい $0.6 \mu\text{m}$ ピッチの图案の像が得られたのは埋め込みX線ターゲットの光源形状の鮮明さによる。薄膜状の金属ターゲットに

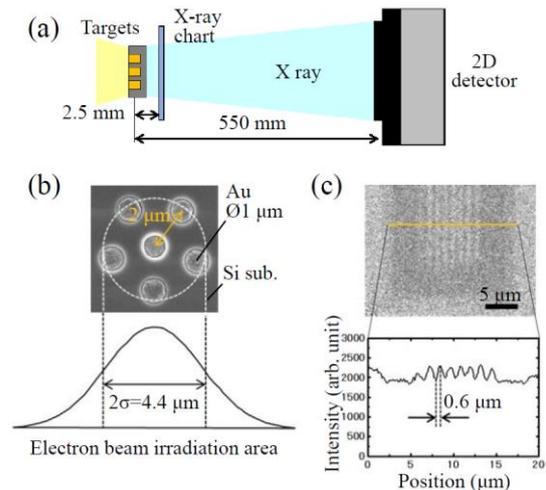


図7 (a) 測定光学系 (b) 埋め込みX線ターゲットと電子線照射領域 (c) X線チャートの測定結果.

電子線を集光して照射した場合、光源の強度分布は中央部から離れるにしたがって徐々に減衰する正規分布状になる。一方、埋め込みX線ターゲットでは金属とダイヤモンドの境界で急峻に減衰する。これらの強度分布をフーリエ変換すると急峻な境界をもつ埋め込みターゲットの方が強い高周波成分を有することになる。このため、直径 $1 \mu\text{m}$ の光源サイズでも $0.6 \mu\text{m}$ ピッチの图案の像を得ることができた。

ここで報告したタルボ・ロー干渉計関連の研究成果は森本直樹博士(現 島津製作所)が在学中に中心になって進めたものであり、学位論文にまとめられている。また、本研究は、原田仁平先生(名古屋大学名誉教授)、大嶋健一先生(筑波大学名誉教授)をはじめ、大阪大学工学研究科 渡部平司研究室の学生を含む多くの協力者によって進められた。本研究で用いた埋め込みX線ターゲットや位相格子は一部を除き、学内の施設で学生が作製したものであり、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業(課題番号 JPMXP09F20OS0038, JPMXP09F19S0015, JPMXP09F18OS0015, JPMXP09F17OS0008, JPMXP09F16OS0002)の支援を受けた。また本研究は、JST 先端計測プログ

ラム、科研費(18K18752, 16H00948, 15K13408)の支援を受けた。

参考文献

- [1] F. Pfeiffer *et al.*, Nature Phys. **2**, 258 (2006).
- [2] F. Pfeiffer *et al.*, Nature Mater. **7**, 134 (2008).
- [3] T. Shimura *et al.*, Opt. Lett. **38**, 157 (2013).
- [4] N. Morimoto *et al.*, Opt. Lett. **39**, 4297 (2014).
- [5] N. Morimoto *et al.*, Opt. Express **23**, 16582 (2015).
- [6] N. Morimoto *et al.*, Opt. Express **23**, 29399 (2015).
- [7] 特許第 6256941 号



X-RAY
IMAGING OPTICS



編集部より

原稿をご提供いただいた、江副先生、志村先生に感謝いたします。今年は COVID-19 の影響で、国際会議が軒並み中止・延期になってしまいました。特に、横浜で 6 月に開催予定であった宇宙観測用光学系・検出器の主要な国際学会である、SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation が、2020 年 12 月にオンライン開催になってしまいました。このため、今号ではやむを得ず国際会議報告の掲載をあきらめざるをえませんでした。ご容赦ください。次号が出る頃には COVID-19 の猛威も収まり、通常のニューズレターが発行できることを願っております。編集部一同、読者のみなさまのご健康を願っております。今後ともよろしく願いいたします。

(文責・松本浩典)

【メーリングリスト（登録メールアドレスの変更などについて）】

本ニューズレターは原則、メーリングリスト (xio-nl@prec.eng.osaka-u.ac.jp) によるメール配信となっております。メールアドレス変更などの際には、お手数ですが、編集部 (xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp) までご連絡ください。メーリングリストは、研究会のお知らせなど、会員全員に情報を配信したいときなどにも便利なので、積極的にご活用ください。

X線結像光学ニューズレター
No. 52 (2020 年 12 月)

発行 X線結像光学研究会
(代表 兵庫県立大 箆島靖)
編集部 山内和人 (大阪大)、齋藤彰 (大阪大)、矢代航 (東北大)、
高野 秀和 (東北大)、松本浩典 (大阪大)、
東口武史 (宇都宮大)、
E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp
