

高効率X線結像光学系の開発 ～硬X線望遠鏡の結像性能の向上と研磨加工の基礎実験～

小賀坂 康志（素粒子宇宙物理学専攻・宇宙物理学研究室（Ux））

1 硬X線望遠鏡の原理と薄板レプリカ鏡

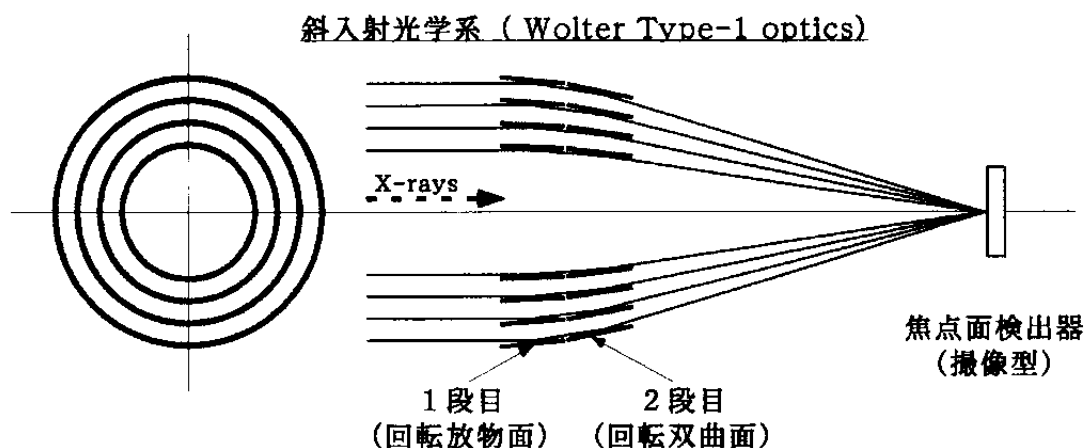
観測天文研究においては、天体の空間構造の情報が得られることが最低限の要請と言える。しかしX線より高エネルギー側では直入射光学系の利用が困難で、そのため光学系の実現は容易ではなかった。よく知られるように、X線の「反射」は斜入射における全反射が有効であり、これを用いて10 keVまでの領域でX線望遠鏡が実現されている。10 keV以上では全反射も有効な反射率を達成できないが、100 keVまでは多層膜によるブラッグ反射を利用した斜入射光学系が可能である。我々はこの原理に基いた硬X線望遠鏡を世界に先駆けて開発し、気球搭載観測実験などを通じて衛星搭載を目指した開発を進めている。

多層膜とは、重元素と軽元素を数nmの周期長で交互に積層した「人工周期構造」である。結晶によるブラッグ反射と同様に、各重元素層界面で反射されるX線の位相が揃った時に高い反射率が得られる。周期長を積層方向に変化させると、広いエネルギー帯域で反射率が得られ（スーパーミラー）、天体観測に適したものとなる。積層数は数10に及び、周期長は0.1nmレベルの精度を必要とするため、高度な薄膜積層技術が必要である。多層膜反射の利点は、全反射の臨界エネルギー及び臨界角を超えるエネルギー・入射角で実用的な反射率が得られることである。我々は硬X線領域での反射率を重視し、Pt/C多層膜を用いている。

多層膜の性能を十分に生かすためには、集光効率のよい光学系を用いなければならない。しかしながら、光学系のサイズ、重量に厳しい制限が課せられるスペース天文学観測分野では、結像性能と集光効率をいかに両立させるかが課題である。図1にX線望遠鏡の原理を示すが、斜入射光学系には「開口効率と結像性能の両立が難しい」という致命的な問題がある。すなわち、高結像性能は機械加工が可能かつ剛性の高い肉厚基板（数cm厚）を必要とするが、開口効率は逆に反射鏡を薄く（1mm厚以下）しなければ得られない。

結像性能を重視した直接研磨型X線望遠鏡は秒角レベルの空間分解能を発揮するが、開口効率が10%以下に制限され、天体スペクトルなど光子統計が必要な観測に向いていない。従って近年の望遠鏡開発は、高い有効面積を達成できる薄肉反射鏡を用い、この結像性能を向上させる方向で進んでいる。

薄肉反射鏡は基板を直接機械加工することが困難であるので、レプリカ成型により製作される。現在実用化されている薄板レプリカ鏡には、基板にアルミ薄板を用いるタイプ（ASTRO-E/E2衛星）と、ニッケル電鍍により基板を成長させるタイプ（XMM-Newton衛星）がある。いずれも同程度の開口効率を達成することから、結像性能の観点からは剛性が高いニッケル基板が優れている（結像性能15秒角）が、比重が高く、衛星搭載に困難を生じる。我々は現在、アルミ薄板レプリカ反射鏡に的を絞って開発を進めている。



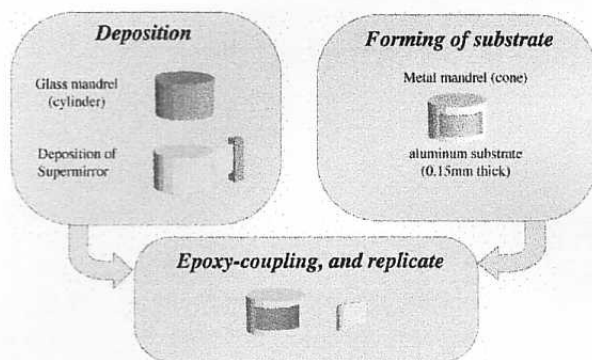


図 2: 薄板レプリカ反射鏡の製作工程

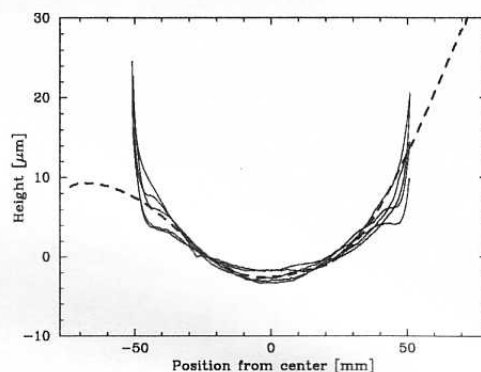


図 3: レプリカ反射鏡の表面形状と母型形状の比較

2 薄板レプリカ反射鏡の製作

アルミ薄板レプリカ鏡は、鏡面物質を成膜したレプリカ母型と、あらかじめ反射鏡形状に成形したアルミ薄板基板とをエポキシ接着材で接着し、硬化後に離型することで製作される(図2)。X線反射鏡の性能は、結像性能を反射率で評価される。結像性能は反射鏡の形状精度で決まり、レプリカ反射鏡の場合にはレプリカ母型の形状精度、反射鏡基板の形状精度・剛性、及び離型による反射鏡の変形が要因である。一方反射率は、多層膜の表面及び界面の粗さに最も大きく影響される。成膜基板がレプリカ母型であるので、その表面粗さが主要因である。

2.1 薄板反射鏡の形状

図3は、あるレプリカ母型の母線方向の表面形状を、装置開発室設置の非接触形状測定装置 NH-6 で測定したものである(破線)。同時に、この母型から離型した複数の反射鏡の、同じ箇所の表面形状の測定結果を比較している(実線)。図中、上向きが反射鏡面方向に相当する。反射鏡の形状精度はレプリカ母型の形状精度で制限される。基板がアルミ薄板であるので、レプリカ離型時に生じる負荷によって基板が塑性変形を生じる可能性もある。図から、 ± 30 mm 程度の領域では母型の形状をほぼ忠実に離型しており、これより外側では離型時の負荷によると思われる、母型形状からの逸脱が見られる。

現在のところ、母型の形状精度が支配的であるが、離型負荷による変形も見られるので、離型方法の改良の必要がある。しかし反射鏡の形状精度の極限は母型形状で決定されるので、母型の形状を向上させることが必須である。現在使用しているレプリカ母型は、市販のガラス・パイプを必要長さに切断したものである。表面粗さは熔融ガラス面と同程度で、 $0.3 \sim 0.4$ nm であるが、形状精度は十分ではなく、100 mm スケールで $5 \sim 10$ μm (PV) 程度のうねりを持つ。

現在、我々が製作している望遠鏡の結像性能は2分角程度であり、これは反射鏡の母線形状が支配的である。将来的に目標とする結像性能は30秒角であり、図3に示す形状は、少なくとも ± 0.1 μm 以下を達成する必要があると考えられる。この精度は機械加工によって達成可能であるが、次で述べるように、同時に表面粗さを十分に低くしなければならず、現在のところの懸案事項となっている。

2.2 多層膜の界面粗さ

多層膜によるX線の反射は、各界面からの反射が干渉することで高い反射率を持つので、界面において薄膜の光学定数が急峻に変化している必要がある。より具体的には、重元素と軽元素の界面において、両物質が混じわる(相互拡散)、または界面が幾何学的に平滑でない(幾何学的粗さ)、との界面の不完全さが反射率の低下を生じる。図4に、我々が製作した多層膜のTEM断層写真を拡大したもの、およびこれを解析して得られたPtとCの分布の深さ方向の分布を示す。ここで見られる界面の不完全さは、この測

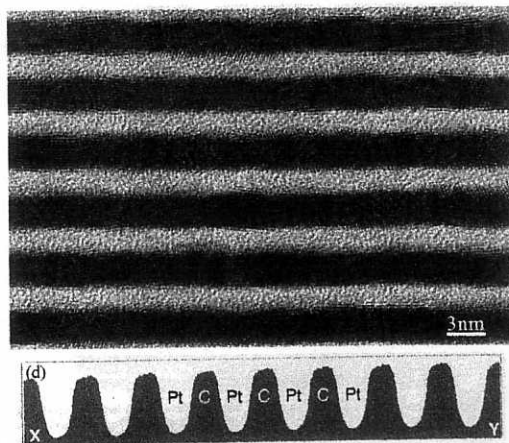


図 4: Pt/C 多層膜の TEM 断層写真 (大西 直之氏 (中部大) による)

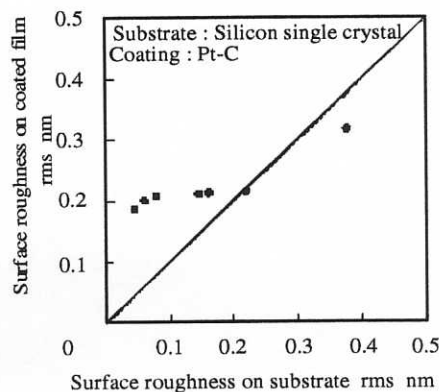


図 5: 基板粗さ (横軸) と多層膜の界面粗さ (縦軸) の関係 (難波 義治氏 (中部大) による)

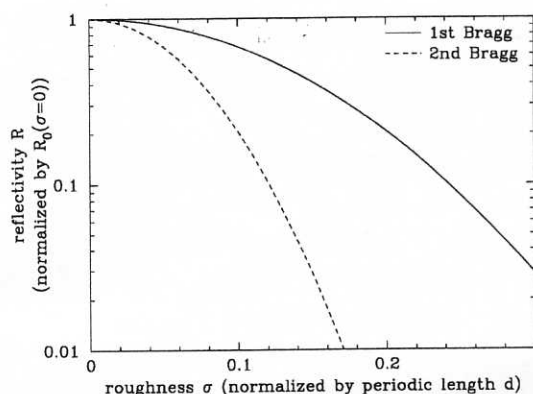


図 6: 多層膜の界面粗さと反射率の関係

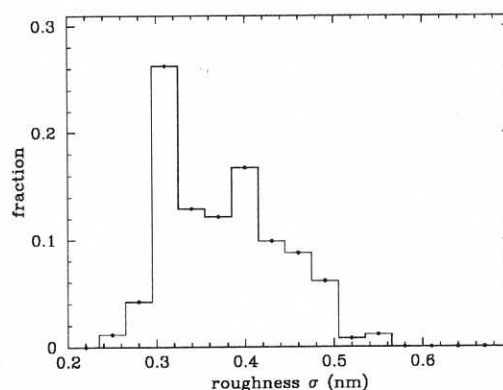


図 7: 多層膜の界面粗さの分布

定からは相互拡散によるものか幾何学的粗さによるものかは区別できない。しかしいずれが原因の場合でも、界面の不完全さは物質に固有の量に加え、成長させる基板の表面粗さに影響されることがわかっている (図 5)。Pt/C 多層膜の場合、図 5 より物質に固有の界面粗さは 0.2 nm 程度であり、基板の表面粗さがこれ以上の場合には、多層膜の界面粗さは基板粗さに支配されることがわかる。

図 6 は、多層膜の界面粗さによる反射率の低下を計算値で示したものであり、縦軸 (反射率) は界面粗さが 0 の場合で規格化し、また横軸 (界面粗さ) は多層膜の周期長で規格化しており、どの場合にも適用できる一般的な依存性を示している。図より、界面粗さをどの程度抑制すればよいかの指針が得られる。反射率の点からは粗さは低いほうが良いが、界面粗さの変化に対する反射率の変化が小さいこと、という要件からも指針が与えられる。今、 $\sigma/d=10\%$ を界面粗さの目安とすると、我々の多層膜スーパーミラーの周期長がおおよそ 3~10 nm であるので、界面粗さとしては 0.3~0.4 程度を目安とすればよい。研磨加工技術の観点からも、容易ではないが妥当な目標と言える。

図 7 に、現在製作している多層膜スーパーミラー反射鏡の界面粗さの分布 (測定値) を示す。概ね要求性能を満たしていることがわかる。すなわち、表面粗さが十分低い基板、すなわちレプリカ母型があれば、成膜には問題がないと言える。

3 研究課題「研磨加工の基礎実験」との関連

以上で述べたように、硬 X 線望遠鏡の開発を進める上で鍵となるのは、薄板レプリカ鏡の結像性能を向上させる技術であり、そのためには表面粗さ、表面形状の両方を備えたレプリカ母型を製作する必要がある。

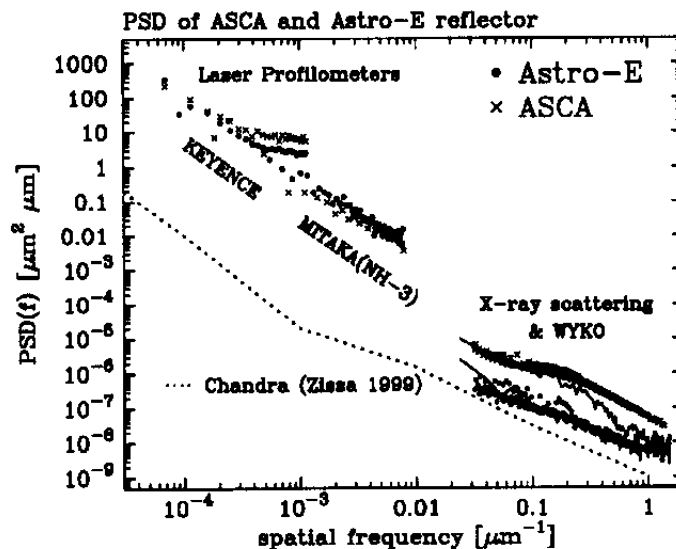


図 8: レプリカ反射鏡表面形状の Power Spectrum Density. (Misaki et al. 2003, *in preparation*)

前述の通り、現在のレプリカ母型は市販のガラス・パイプであり、熔融ガラスから製作するために表面粗さは大変優れているが、表面形状に問題がある。図 8 は、反射鏡の表面プロファイルの Power Spectrum Density を測定したもので、Astro-E についてのデータ点が我々と同様のアルミ薄板レプリカ反射鏡の性能である。表面波長 $0.1 \mu\text{m}^{-1}$ 以下は非接触形状測定装置及びレーザー測距計によるプロファイルの直接測定によるもので、表面波長 $0.1 \mu\text{m}^{-1}$ 以上の表面粗さの領域は、主に X 線散乱測定から求めたものである。

これに対して破線は、直接研磨により製作された Chandra 衛星搭載 X 線望遠鏡の反射鏡表面形状の PSD である。表面粗さについては Astro-E2 と大きな差はない。これは、熔融ガラス面が既に十分に低い粗さを持つためである。一方長波長側では非常に大きな差がある。我々の目的は、表面粗さを熔融ガラス面にできるだけ近いレベルに保ちつつ、かつ表面形状を現在の数 μm から $0.1 \mu\text{m}$ のレベルへ向上させることである。そのためには Wolter I 型光学系母型、すなわち円筒外面形状の研磨技術を確立する必要がある。

硬 X 線望遠鏡は、2010 年に打ち上げ予定の日本の X 線天文衛星 NeXT に搭載が決定しており、数年のうちにフライトモデルの製作を開始する必要がある。本稿で述べた基礎技術は計画の達成に必須のものであり、重点的に推進して行く必要がある。理学部装置開発室ではこのために平面研磨装置を導入し、基礎的な研究を開始した。同時に特別推進研究の枠内で、2004 年度に共同研究者である中部大学 難波研究室に超精密加工装置が導入される予定であり、この装置を用いた共同研究への装置開発室からの参加も予定されている。

本研究は、主に平成 7~14 年度特別推進研究（研究代表：山下 広順（名古屋大学））、及び平成 15~18 年度特別推進研究（研究代表：国枝 秀世（宇宙研））により推進されている。

多層膜の TEM 断面写真については大西直之氏（中部大学・工学部）、研磨基板を用いた多層膜の界面粗さの成長の解析については難波義治氏（中部大学・工学部）との共同研究の成果による。

アルミ薄板基板成型にあたっては、アルミ薄板の加工、基板成型母型の製作、形状評価について装置開発室の協力を得ている。レプリカ母型用ガラス・パイプの加工については、ガラス工作室の協力を得ている。多層膜成膜システムを用いた実験においては、治具設計・加工について物理金工室の協力を得ている。

なお、本稿に示した基礎データ等は、科研費特別推進研究「X 線観測による銀河団の構造と進化の研究」（研究代表者：山下 広順（理学研究科 教授））成果報告書（平成 15 年 5 月）により詳細にまとめられている。