X線望遠鏡*

山下広順**

X-ray Telescope / Koujun YAMASHITA

Key words: X-ray telescope, grazing incidence, normal incidence, multilayer, angular resolution, nested mirror, Wolter type I, X-ray astronomy satellite, X-ray reflectivity

1. はじめに

天体における極限状態の物理現象，宇宙の構造と進化をX線観測によって探るためには，広い波長域で高い感度を有し，集光力と解像力の優れたX線望遠鏡の開発が不可欠である。地上の光学望遠鏡と違って，X線領域では屈折率が1よりわずかに小さいため，X線望遠鏡にはレンズを用いることはできず，高い反射率が得られる極端な斜入射型反射光学系が用いられてきた。

斜入射型X線望遠鏡は1978年に初めてアメリカのアインシュタインX線天文衛星¹⁾に搭載され，3~100 ÅのX線で天体の撮像観測が行われた。それまでのX線天文衛星では検出器の前に視野を制限するコリメータを取り付け，天空を走査することによってX線源の位置を知り，その強度とスペクトルを観測した。結像光学系を用いずにX線源の位置・大きさを高い精度で知る方法としてすだれコリメータが考案され，X線天文学を大きく前進させた。

我が国においては1979年に最初のX線天文衛星「はくちょう」が，1983年に「てんま」が，1987年に「ぎんが」が軌道に乗り，X線天文学の分野で世界の一線に躍りでることができた。これらの衛星では光学系を用いずに検出器の有効面積を大きくし，雑音を少なくし，視野を狭くすることによって，天体のX線源のスペクトルあるいは強度の時間変動の観測を行ってきた。1993年には斜入射型X線望遠鏡を搭載したX線天文衛星（ASTRO-D）の打上げが予定されてい

る。

X線望遠鏡はX線を集光・結像する反射鏡とその焦点面でX線像を検出する2次元X線検出器より構成される。反射鏡の反射率と検出器の効率によって，観測できる波長域は1~100 Åとなる。波長が短くなるに従って反射面に対する入射角を小さくしないと高い反射率が得られない。特に多くの天体のX線源においては2 Å近傍に鉄の輝線が観測されるため，できるだけ短波長まで感度の優れたX線望遠鏡が望まれている。1 Åまで観測しようとするれば入射角は0.5°となり，集光力を大きくすることが難しくなる。そこでX線望遠鏡の製作には2つの考え方がある。1つは解像力を重視し，鏡面基板を必要な形状に直接研磨した方式であり，もう1つは集光力を重視し，極端に薄い非研磨基板を用いた多重薄板型の方式である。両者を同時に満たす方式が今後の大きな開発課題といえる。それには鏡面の超精密加工技術，反射面の薄膜形成技術，基板素材の開発等が大きな鍵を握っている。一方近年の先端技術の発展に伴って，30 Åより長波長側では多層膜反射鏡を利用することによって光学望遠鏡と同様な直入射型X線望遠鏡を製作することが可能になってきた²⁾。

本稿では斜入射型及び直入射型X線望遠鏡の現状と将来の発展の方向について述べる。

2. 斜入射型X線望遠鏡

X線望遠鏡には鏡の全反射（鏡面反射）を利用した斜入射型光学系が主に用いられ，反射面は超平滑（粗さ数 Å (rms)）な基板に金，ニッケル等の金属を数百 Å 蒸着することによって作られる。その反射率

* 原稿受付 平成3年3月4日

** 宇宙科学研究所（相模原市由野台3-1-1）

図1 全反射鏡 (T) と多層膜反射鏡 (M) の入射角と波長に対する適用範囲

曲線の右側の領域で高い反射率が得られる。図中の点は実測値

図2 ウォルターI型斜入射光学系の原理図

F_1 が放物面の、 F_1, F_2 が双曲面の焦点、 F_2 に像を結ぶ

は波長、入射角及び反射面の物質に依存し³⁾、全反射をする入射角の限界 (臨界角) と波長の関係を図1に示す。直線 (T) より右側で全反射により高い反射率が得られる。M は後で述べる多層膜によるブラッグ反射を利用すると入射角と波長の限界を広げることができることを示している。全反射領域では反射に寄与する表面からの厚さは $50 \text{ \AA}$ 程度であり、反射率は反射面物質の厚さあるいは表面の粗さにも依存する。

斜入射型 X 線望遠鏡は図2に示すウォルターI型の光学系に基づいて製作され、その概念図を図3に示す。これは回転放物面と回転双曲面の内面で入射 X 線を2回反射させ、焦点に集光・結像させるものである。これによ

り結像性能が向上し、焦点距離が短くなる。入射角は放物面と入射 X 線のなす角であり、2つの曲面の接合部から焦点までの長さを焦点距離と定義する。望遠鏡の性能は集光力と解像力によって表され、集光力は X 線の入射方向からみた口径内に占める反射面の割合 (開口効率) と反射率の積であり、解像力は焦点面における像の広がりであり、その大きさを入射角の変化で表したものを角分解能という。有効面積は口径内の幾何学的面積に集光力と検出器の検出効率を乗じたもので、X 線の波長及び入射角に依存する。

X 線望遠鏡を搭載する人工衛星の規模によって口径及び焦点距離が決まり、それによって入射角や波長領域も一意的に決められる。この境界条件のもとで、集光力と解像力を高くし、更に軽量化することが重要になる。X 線天文衛星に搭載された、あるいは今後予定されている X 線望遠鏡の性能を表1にまとめた。反射面には主に金薄膜 (厚さ数百 $\text{\AA}$) が用いられている。その特徴は解像力を重視した非球面型、集光力を重視した多重薄板型及び性能は少し劣るが両者の特徴を兼ね備えた非球面多重薄板型の3つに大別される。どの方式を取るかは観測目的あるいは衛星の規模によって決められる。

2.1 非球面型

この方式はウォルターI型の光学系に合うように鏡面基板を回転放物面と双曲面に直接研磨したもので角分解能を $1''$ 角程度まで良くすることができる⁴⁾。しかし鏡面基板 (石英ガラス、ゼロデュア) の厚さは $15 \sim 25 \text{ mm}$ と厚くなり、集光力を上げるために口径を大きくするとともにその中に複数の反射鏡を共焦点配置に設置する。そのため入射角が $1 \sim 2^\circ$ と大きくなって観測できる波長域が $3 \sim 6 \text{ \AA}$ 以上に制限されるし、開口効率は非常に小さくなる。これまでに口径 83 cm 、長さ 50 cm で形状精度 $800 \text{ \AA}$ (P-V)、表面粗さ $2 \text{ \AA}$ (rms) の鏡が製作され、角分解能 $3''$ 角 (HPD) が得られている。HPD (Half Power Diame-

図3 斜入射型 X 線望遠鏡の概念図

表1 X線望遠鏡の性能

衛星名	国名	打上げ	口径 (cm)	長さ (cm)	焦点距離 (m)	鏡の数	角分解能 (秒角)
アインシュタイン	アメリカ	1978.11	60	56	3.4	4	4
EXOSAT	ヨーロッパ	1983.5	28	20	1.1	2	10
ROSAT	ドイツ	1990.6	83	50	2.4	4	3.3
ASTRO-D	日本	1993.2	35	10	3.5	110	150
Spektr-X	ソ連	計画中	60	20	8	154	<120
AXAF	アメリカ	計画中	120	84	10	6	0.5
XMM	ヨーロッパ	計画中	70	30	8	58	30
DUET	日本	計画中	60	10	6	180	<60

図4 非球面型X線望遠鏡の構造図

ter) は入射強度の50%が入って来る焦点面での像の広がりを表している。これを決めるのは鏡面の形状精度、表面粗さ、真円度及び組上げ精度である。反射鏡を鏡筒に組み込んだ様子を図4に示す。

この型のX線望遠鏡には表1に示すようにアメリカのアインシュタイン衛星、ドイツのROSAT衛星⁵⁾があり、計画されているアメリカのAXAF衛星⁶⁾では焦点距離を長くすることにより1ÅまでのX線が観測可能になる。アインシュタイン衛星の概観図を図

5に、それによって観測された超新星の残骸(Cas A)の3~60ÅのX線像を図6に示す。これはおよそ300年前に爆発した超新星が広がって、現在数千万度で輝いている様子を示している。

2.2 多重薄板型

解像力は悪くても集光力を大きくするためにこの方式が考えられた。ウォルターI型の2つの反射面を非球面の代わりに直線で近似し、円すい面で置き換え、基板の厚さを0.1~0.3mmと極力薄くし、多数の鏡(100枚程度)を共焦点配置に設置する⁷⁾。鏡面基板は直接研磨せず、アルミニウム薄板にアクリルを塗布し、その上に金を蒸着し、表面粗さを小さくする。これによって開口効率を60%程度にまで大きくすることができるが、解像力は1~数分角にしかない。しかし、入射角を小さくすることができ、1Åの波長のX線まで観測できる利点があり、撮像というよりはスペクトルの観測に適している。解像力は多数の鏡の組上げ精度あるいは基板のうねりによって決められるが、X線の入射方向からみた反射面の幅がそのまま焦点面に投影されるため、基板の長さを短くすることによって改良することも可能である。

この型には1993年打上げ予定の我が国のASTRO-D衛星(図7にその望遠鏡を示す)、ソ連のSpektr-X

図5 アインシュタイン衛星の概観図

X線の分光・撮像のために焦点面には4種類の検出器が置かれている

図6 アインシュタイン衛星によって観測された超新星の残骸 (Cas A) のX線像

図7 ASTRO-D衛星に搭載予定の多重薄板型X線望遠鏡

鏡筒内に110枚のアルミフォイル基板の反射鏡が組み込まれている。X線は図の上部より入射する

衛星があるが、既にアメリカではこの型の望遠鏡をシャトルに搭載して1週間程観測をし、その有用性が確かめられた。

2.3 非球面多重薄板型

解像力が優れ、集光力を大きくするために考えられた中間的な方式である。すなわち、非球面に研磨成形された雄型の母型からレプリカ鏡を作り、基板を薄くする。これには離型法の確立と形状保持ができる薄い基板素材が必要になる。これまでに金を離型剤として炭素繊維で強化されたエ

ポキシ基板に写し取る方法が試みられている。基板の厚さは1mm程度が限界と思われるが、各種新素材が開発されているので薄くて剛性の大きい素材を探索する必要がある。解像力は30"角以下、開口効率30%以上が目標になろう。回転放物面と双曲面を一体にして製作したレプリカ反射鏡を図8に示す。

この型の望遠鏡は小型ではあるが既にヨーロッパのEXOSAT衛星⁸⁾に搭載され、更に今世紀末にはXMM衛星に搭載が予定されている。我が国ではASTRO-Dの次の衛星(DUET)にこの方式を採用することも検討されているが、まだ課題も多く今後の開発にかかっている。X線望遠鏡が大型化することによって、微弱な天体の精密観測が可能になり、解像力の向上は必須の条件になる。更に開発と同時に性能評価が観測データの信頼性を高める上で非常に重要になる。

3. 直入射型X線望遠鏡

光学望遠鏡と同様な直入射型X線望遠鏡(図9)は全反射のみでは300Åより長波長側に限られるが、重元素と軽元素を一定の厚さ(数十Å)で交互に積層した多層膜反射鏡によって図1から分かるように30Å以上の波長域でも可能になる。しかし、有効な帯域はブラッグ条件(反射面の深さ方向に周期構造をもたせると臨界角より大角度でも干渉効果により高い反射率が得られる)を満足する波長の1/10程度に制限される²⁾。この光学系は集光力・解像力の点では最も優れているし、広い視野での観測ができる。アメリカでは多層膜反射鏡によるカセグレン型のX線望遠鏡(口径6.4cm)をロケットに搭載して太陽像を波

図8 回転放物面と双曲面を一体として製作されたレプリカ反射鏡

図9 直入射型（カセグレン型）望遠鏡の構造図

X線は主鏡と副鏡によって反射され撮像管に集光・結像する

長 $173\text{\AA}$ で、角分解能 $1\sim 1.5''$ 角で観測した⁹⁾。我が国でも口径 25 cm の多層膜球面鏡による広視野での天体の撮像観測が試みられた。

多層膜反射鏡のX線望遠鏡への応用は直入射鏡のみならず、斜入射鏡の反射面にも用いることにより、波長域の拡大・入射角の増大が可能になる。

4. ま と め

X線望遠鏡の光学系とその性能について述べてきたが、集光力が大きく、解像力の優れた望遠鏡を製作

するにはまだ多くの技術的課題がある。それは超精密鏡面加工法、鏡面薄膜形成法、離型法、鏡面板素材等に大きく依存しており、先端技術の進歩が可能にするものと期待している。今後の開発の目標としては非球面多重薄板斜入射型及び直入射型X線望遠鏡を考えている。

参 考 文 献

- 1) R. Giacconi et al.: The Einstein (HEAO 2) X-ray Observatory, *Astroph. J.*, **230**, 2, (1979) 540.
- 2) 山下廣順: 多層膜の製作とX線光学系への応用, *レーザー研究*, **18**, 11 (1990) 898.
- 3) 山下廣順, 常深 博: X線光学系の最近の進歩, *レーザー研究*, **16**, 9 (1988) 535.
- 4) L. P. Vanspeybroeck and R. C. Chase: Design Parameters of Paraboloid-Hyperboloid Telescopes for X-ray Astronomy, *Appl. Opt.*, **11**, 2, (1972) 440.
- 5) B. Aschenbach: The Current Status of Grazing Incidence Optics, *Proc. SPIE*, **1140**, (1989) 483.
- 6) M. C. Weisskopf: The Advanced X-ray Astrophysics Facility: An Overview, *Astro. Lett. and Communications*, **26**, (1987) 1.
- 7) P. J. Serlemitsos, R. Petre, C. Glasser and F. Birsa: Broad Band X-ray Astronomical Spectroscopy, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-31**, (1984) 786.
- 8) P. A. J. de Korte et al.: EXOSAT X-ray Imaging Optics, *Appl. Opt.*, **20**, 6, (1981) 1080.
- 9) A. B. C. Walker, Jr., T. W. Barbee, Jr., R. B. Hoover and J. F. Lindblom: Soft X-ray Images of the Solar Corona with a Normal Incidence Cassegrain Multilayer Telescope, *Science*, **241**, (1988) 1781.

CAT/CAM 総合型加工システムの研究

(財)工作機械技術振興財団(東京都港区芝公園3-5-22, 機械振興会館別館, 電話 03-3433-2042)では、かねて標記の件について北海道大学工学部岸浪建史教授ら3名に研究依頼をしていたが、このほど加工面の形状測定法についての報告書がまとまって発表した。

機械部品の高精度な加工、品質管理のため、近年、加工システムにおけるCAT(Computer-Aided-Testing)の役割が重要視されている。すなわち、従来、工作機械はNC化による高機能化と高精度化を主目的として研究・開発がなされてきた。与えられた命令を忠実に実行する機械として工作機械は位置付けすることができるが、加工作業におけるあらゆる外乱をあらかじめ予測することは極めて困難であって、予期しない結

果を生ずることがある。

これは現状の工作機械が加工作業結果を検証する機能を一般には備えてなく、一部工具の代わりに測定センサを用いることで、加工対象の計測を行うin-process計測が試みられてはいるが、工作機械自体の熱変形、幾何学的誤差を回避することは困難である。また加工作業と計測作業はその性質の違いから同一の環境下で行うことは望ましいものではない。

そこで本研究においては加工機械と計測機器の分離を前提として、加工作業結果の計測をpost-processで行い、加工誤差の検証と誤差生成のプロセスの同定、誤差発生要因の推定を可能とするCAT/CAM統合加工システムの研究開発を行ってきた。(p.786へ続く)