

高精度 X 線ミラー技術の展望



三村 秀和
Mimura Hidekazu

1 はじめに

国内における放射光施設 SPring-8 や X 線自由電子レーザー-SACLA は、強力な X 線を発生する大型施設であり、X 線を用いた最先端の材料分析が行われている。こうした最先端の X 線光源を有効に活用するためには、X 線を取り扱う光学素子が必要である。例えば、図 1 では、様々な X 線分析において照射する X 線の強度をいかに強くかつ小さくするかが、X 線分析法の性能を決定する。

一方、天文学の分野でも X 線による天体観測が行われている。太陽を含む様々な天体から放射される X 線の波長を調べることで、天体の温度や構成

する元素等、様々な情報を得ることができる。X 線による天体観測では、天体が光源となるが、シグナルが弱いため、遠方から来る X 線を集める必要がある。ここでも、X 線集光素子の性能（大きさや精度）が分析能力を決定する重要な要素となる。

X 線用と可視光用の光学素子の大きな違いは、X 線の波長が短いため、極めて高い精度が光学素子に要求されることである。そのため、X 線光学素子の開発は、現在なお研究開発のテーマになっている。特に筆者は、X 線光学素子として重要な、X 線ミラーに関する研究を長年行ってきた。本稿では、X 線顕微鏡や X 線望遠鏡に不可欠な X 線ミラーについて展望する。

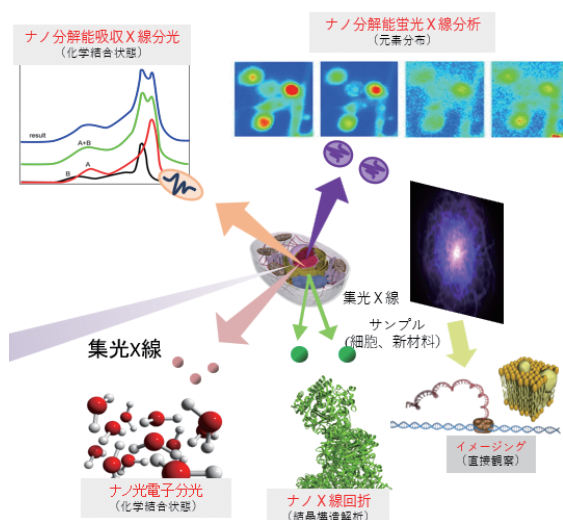


図 1 集光 X 線による材料分析技術

2 X 線ミラーについて

X 線は波長が極端に短いですが、ミラー表面に対して、すれすれで入射（斜入射）することで全反射する。また、多層膜をコーティングすることで、入射角度を増加させることもできる。この性質を利用して、X 線ミラーの形状を楕円面形状にすると、楕円関数の性質から 1 つの焦点から発した光がミラー表面を反射し、もう一方の焦点に集光することになる。また、結像条件に必要なアッペの正弦定理を満たすためには、2 回反射が必要であるが、楕円面形状と双極面形状を隣り合わせに配置し、2 回反射させることで X 線の結像の縮小や拡大が可能となる。

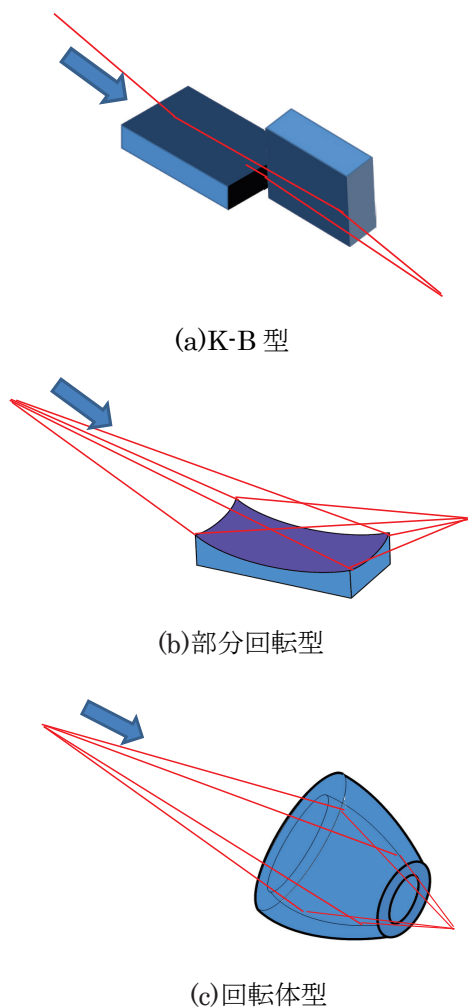


図2 形状から見たX線集光・結像ミラーの種類

こうした性質を利用することで、放射光施設やX線自由電子レーザー施設において様々なX線顕微鏡が実現されている。X線天文分野においても、近年、国産初の大型X線ミラーが実現し、高い空間分解能を持つX線望遠鏡が開発されている。

X線ミラーの種類を形状の観点で分けると、図2に示すように3種類に分けることができる。

図2(a)は、縦横を独立に集光や結像を行うK-B型配置のX線ミラーであり、形状は一方向のみ湾曲し、ほぼ平面形状である¹⁾。主として、入射角度が小さい硬X線領域で利用されている。このタイプの光学系では、2枚のミラーをお互いに直角に配置する。ミラー形状は作りやすく、理想的なX線ミラーが実現されている。

図2(b)は、形状が2次的に湾曲しているミラーである。回転楕円や回転放物面の一部の形状となっ

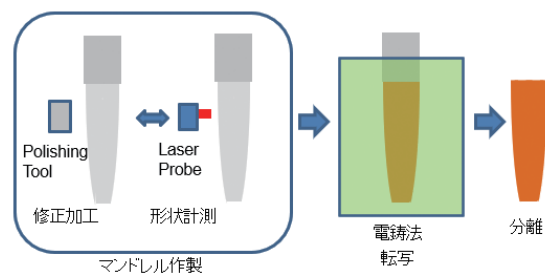


図3 回転体X線ミラー作製プロセス

ている。2次的に湾曲しているため作製が難しく、理想的なX線ミラーは実現されていない。しかしながら、近年、湾曲対応のミラー加工技術や形状計測技術が開発され、放射光施設で使用が始まっている。

図2(c)は、回転体型のミラーであり、楕円形状等を光軸中心に対して1回転して得られる形状を持ち、筒状の内面をX線が反射する。このタイプのミラーは、X線天文学では、X線望遠鏡用のウォルターミラーとして知られている。近年、図3に示すように、マンドレル作製と電鍍による形状転写により、小型の回転体型ミラーが実現しており、X線望遠鏡以外にも、波長1~10 nmの軟X線領域において、顕微鏡用の集光、結像素子として利用が始まっている²⁾。

この20年、筆者らが本分野を国内で立ち上げてきたが、各形状のX線ミラーにおいて日本が圧倒的にリードしている。本稿では、各X線ミラーのタイプごとに現状と今後の展望を説明する。

3 各タイプのX線ミラーの最先端と今後の展望

(1) K-B型X線ミラー

図2(a)のK-B型X線ミラーに関して、最近、*Nature Photonics* と *Nature Communications* に論文が掲載されていた。

前者は、X線自由電子レーザーを最新のWolter III型配置による集光光学系で、硬X線において7 nmの極限集光に成功したという内容の論文である³⁾。世界で最もパワー密度が高い 10^{22} W/cm^2 のX線領域の強光子場が実現している。また、Crの薄膜に照射し発光スペクトルを観察した結果、電子が少ない水素やヘリウムの電子が励起されて生成するスペクトルと同等のものが観察されており、ほぼ

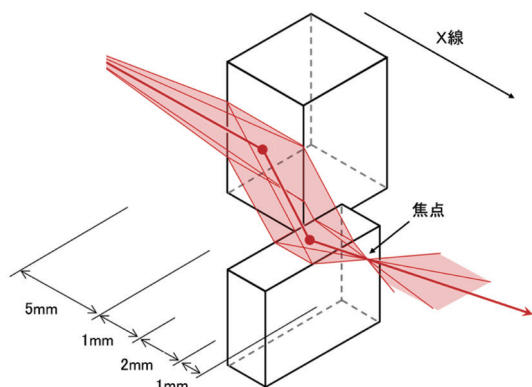


図4 小型X線ミラーによる軟X線の微小集光

すべての電子が一瞬で励起されたことが示された。今後、硬X線領域における広範な光物性物理学分野において多くの成果が期待できる。

筆者らの研究である後者については、軟X線のミラーによる究極の集光に関する論文である。波長が1 nmレベルの軟X線をミラーにより微小集光するためには、前述の硬X線用の集光光学系に比べて数値開口(NA)を大幅に向上させる必要があるが、ミラーの長さそのものにより焦点距離を短くすることができなかった。そこでこの研究では、図4に示すようにミラー長を2 mmと極端に短くすることで短焦点距離を実現し、高NA化を達成し、1 keVの軟X線を50 nm以下のサイズに集光することに成功した⁴⁾。また、集光システムだけでなく、蛍光X線のディテクターを装着し、軟X線顕微鏡システムとして完成させ、100 nm以下の空間分解で神経細胞の観察に成功した。この顕微鏡は全体でも直径200 mm以下と極めてコンパクトであるため安定しており、また、全反射ミラーであるため、軟X線集光の主体であるゾンプレートによる集光に対して、波長を数倍変化させても同一焦点に集光可能であることから、軟X線顕微鏡としては究極的なものであり、今後の広がりが期待できる。

(2) 部分回転型X線ミラー

K-B型が最先端のサイエンスを開拓する超最先端な光学系の開発が進んでいるのに対して、図2(b)の部分回転型のX線ミラーは、1 μmサイズの汎用集光用として用いられている。例えば、SPring-8においては、軟X線用の部分回転型のウォルターミラーを用いることで、高効率かつアライメントフリーで1 μm集光を実現しており⁵⁾、東京大学では、

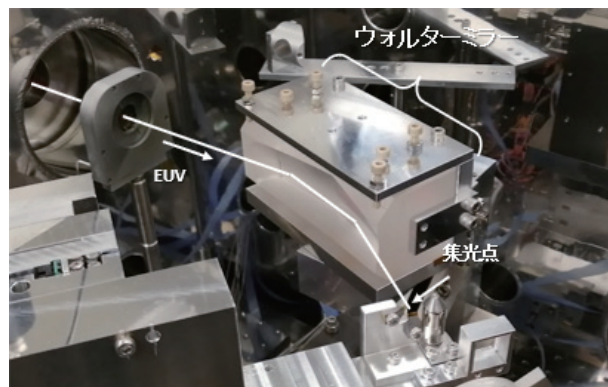


図5 ウォルターミラーによる高次高調波により発生したEUVパルスの1 μm集光光学系

図5に示すシステムによりEUV(極紫外線)領域の高次高調波を500 nmサイズにまで集光することに成功している⁶⁾。硬X線領域においてもウォルターミラーによる集光が試みられている。

K-Bミラー型に対して、本ミラーは2次元的にX線の波面を制御するため、ミラーの反射回数が半分になる。そのため、放射光施設等で多く用いられる汎用的な集光には、K-Bミラー型から部分回転型にシフトしていくと考えられる。

(3) 回転体型X線ミラー

回転体型のX線ミラーについては、近年、SACLAやSPring-8において、軟X線顕微鏡用の光学素子として利用されており、様々な応用研究が報告されている。回転体ミラーの高NAを利用し、位相回復法の1つであるタイコグラフィ法と組み合わせることで、50 nmの空間分解能での顕微観察が報告されている⁷⁾。また、SACLAにおいては、ウォルターミラーが導入され、ウォータウインドウの軟X線により、シングルショットでの生きた細胞の観察に成功している⁸⁾。ミラー製造においても従来のニッケル製のミラーに加え、非磁性の銅製のミラーが開発された。ニッケルは磁性材料であるため、光電子分光等への利用が不可能であったが、銅製のミラーにより可能となった⁹⁾。

また、X線天文学の分野では、日米共同による太陽観察プロジェクトFOXSI-4に、日本製のウォルターミラーが採用された。図6に概要を示す。このプロジェクトでは、X線顕微鏡用の回転体型ミラーの製造技術を転用することで、φ60 mm、長さ200 mmの大型ミラーを作製することに成功した。望遠鏡としての空間分解能を示す角度分解能で

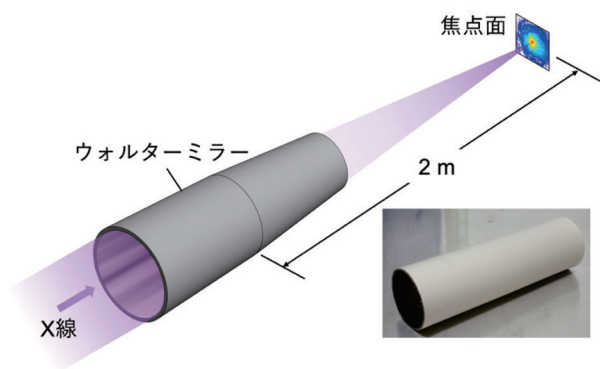


図6 太陽観察のための大型ウォルターミラー (φ 60 mm, 長さ 200 mm)

15 秒角を達成した¹⁰⁾。従来の国内で作製された X 線望遠鏡は分角オーダーであり、日本の X 線天文学の分野において初めて高分解能の X 線望遠鏡を実現している。

X 線顕微鏡用と X 線望遠鏡用の回転体型ミラーの両方において、大幅に形状精度を上げる余地があり、現在、筆者らを中心に精力的に研究を行っている。

4 今後の発展に重要なこと

図2で示したすべてのタイプのミラーの研究開発は、海外でも行われているものの、日本のグループが世界をリードし続けている。その大きな理由は、X 線ミラーの研究開発に取り組んでいるグループが超精密加工の研究を本業としており、その出口の1つが X 線ミラーにすぎなかったためである。K-B ミラー型から回転体型まで、ミラーの加工技術、計

測技術、転写技術、成膜技術に至るまで、すべての製造技術をゼロから開発している。実際の企業におけるミラー製造装置も設計から独自に行っているため、他機関が簡単に真似をすることはできない。

図2(a)の K-B 型の X 線ミラーは理想的な性能を有するミラーが実現されているが、図2(b)の部分回転体ミラーや図2(c)の回転体ミラーは、X 線の集光性能や結像性能の観点から理想的な形状精度を有するミラーを実現しているとは言い難い。性能向上の鍵を握るのは、やはり、ミラーの加工技術や計測技術等の製造技術である。今後も、国内のグループにおいて製造技術の向上に努め、X 線顕微鏡及び X 線望遠鏡共に世界をリードすることを期待している。

参考文献

- 1) Kirkpatrick, P., *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, 766-774 (1948)
- 2) Mimura, H., *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **89**, 093104 (2018)
- 3) Yamada, J., *et al.*, *Nat. Photon* (2024)
<https://doi.org/10.1038/s41566-024-01411-4>
- 4) Shimamura, T., *et al.*, *Nat Commun*, **15**, 665 (2024)
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-44269-w>
- 5) Senba, Y., *et al.*, *Journal of Synchrotron Radiation*, **27**(5), 1103-1107 (2020)
- 6) Motoyama, H., *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **16**, 016503 (2023)
- 7) Kimura, T., *et al.*, *Optics Express*, Vol. **30**, Issue **15**, 26220-26228 (2022)
- 8) Egawa, S., *Optica*, Vol. **11**, Issue **6**, 736-743 (2024)
- 9) Yamaguchi, G., *Rev. Sci. Instrum.*, **92**, 123106 (2021)
- 10) Yamaguchi, G., *Rev. Sci. Instrum.*, **94**, 124501 (2023)

(東京大学 先端科学技術研究センター)