

X線顕微鏡の展望

鈴木芳生

高輝度光科学研究センター/SPring-8

Hard X-ray Microscopy in ERL Light Source

Yoshio Suzuki

JASRI/SPring-8

<Synopsis>

Hard x-ray microscopy with sub-optical spatial resolution has been drastically developed since third generation SR light sources. Presently, hard x-ray imaging with 100 nm resolution is routinely carried out at SPring-8, and a few tens nanometer resolution is already attained in the user experiments. When these techniques are applied to ERL light source, a few nm resolution imaging with ms temporal resolution would be possible.

X線顕微鏡は第三世代放射光の出現以降長足の進歩を遂げており、現在では100nm以下の空間分解能が標準的な手法として使われ、実験的なレベルでは10nmオーダーの分解能が実現している。この分解能向上の基盤となっているものは光学素子技術であるが、それを実現するためには、X線による光学素子特性評価による素子加工へのフィードバックが必要であり、実用的なレベルの顕微鏡を実現する為だけでなく、光学素子の進歩にも第三世代光源が必要であった。次に目指すものは、10nmレベルの分解能を常用の技術とし、さらにnm分解能を実現することであるが、そのためには光学素子技術開発と同時に次世代光源が必要とされると考えられる。

現在のX線マイクロビーム/走査型顕微鏡に用いられている光学素子としては、全反射非球面鏡、多層膜非球面鏡、ラウエレンズ、屈折レンズ、フレネルゾーンプレート(FZP)等があるが、いずれの光学素子においても100nm以下の分解能が実現されている[1]。しかしながら、SPring-8の標準的なアンジュレータビームラインでは100nm集光時のフラックスは $10E10$ photons/s程度が限界である。蛍光X線や回折X線による構造解析等への応用を考えた場合、 $10E10$ cpsがおおよそ実用の目安であり(PFにおける10mm x 10mmサイズのビーム強度に相当)、10nm分解能の実用化を考えると更なる光源の進歩が必須である。

これに対して結像顕微鏡では集光光学系と異なりコマ収差が重要であるため、ほとんどの

場合、対物レンズとして FZP もしくは屈折レンズが使われている[2]。結像顕微鏡の場合は必ずしも照明光の空間コヒーレンスを必要とはしない。また、コヒーレント光では避けることのできないスペックルノイズが障害となる場合が多い。しかしながら、干渉顕微法や Zernike の位相コントラスト法等ではコヒーレント照明が必要になるため、最近ではコヒーレント照明での結像顕微鏡が重要になってきている。マイクロビームによる走査型顕微鏡では 2 次元マッピングが大部分（稀に 1 次元）であるのに対し、現在の SPring-8 におけるユーザー利用実験に限ってではあるが、硬 X 線結像顕微鏡においては CT による 3 次元計測が比較的大きな割合を占めており、2 次元の顕微鏡実験の比率は小さい。

全反射ミラー光学系では白色ビームの利用が可能であるが、FZP では色収差のために単色 X 線が必要になる。しかしながら、結晶分光器のエネルギー分解能は FZP 光学系に必要な分解能に比べて必要以上に高い（FZP に必要な分解能は FZP のゾーン数に等しく、通常 100～1000 である）。SPring-8 でも分光器の無い準単色アンジュレータ光を利用できるビームラインがあり、準単色光を用いたマイクロビームや結像顕微鏡のテスト実験が行われているが[3, 4]、まだ実用にはなっていない。ERL で空間コヒーレントかつバンド幅 1%以下の準単色光が可能となれば、イメージング実験では数桁高い効率が期待できる。

X 線顕微鏡をユーザー利用実験装置として考えた時の現状での大きな問題点は視野と分解能の両立である。多くの実験では試料のサイズ（大抵は 1mm 以上）に対して 100nm 以下の分解能が要求される。これに対応するためには任意の視野サイズ（任意の倍率）にズーム出来る光学系が望ましい。このような目的にかなう光学系のひとつが FZP 集光光学系を用いた球面波による拡大投影法（広い意味での Gabor holography）である。さらにこの手法では、空間フィルターと組み合わせることでスペックルの無いコヒーレントビームが可能となる[5]。このようにいくつかの手法を最適化して組み合わせることで技術的には空間で 10nm、時間で 1ms 程度の分解能が可能となると期待出来る。その場合、最後に問題となるのは放射損傷であろう。放射線損傷の程度は試料により極端に異なるが、サブミクロン分解能計測であっても放射線損傷が問題となる場合がある。クライオ条件で解決される場合もあるが、確実なものとは言い難い。今後の課題である。

1. Y. Suzuki, et al., X-Ray Optics and Instrumentation (2010) Article ID 824387.
2. Y. Suzuki and H. Toda, Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering, ed. J. Banhart, Oxford University Press, (2008) Section 7.1.
3. Y. Suzuki, et al., Rev. Sci. Instrum. 75 (2004) 1155.
4. Y. Suzuki, et al., Proc. of 8th Int. Conf. X-ray Microscopy, IPAP Conf. Series 7 (2006) 44.
5. Y. Suzuki and A. Takeuchi, AIP Conference Proceedings 1234 (2010) 453.