A brief description of the present state of optics for the x-ray microscope is made. X-ray optical elements, detectors and several types of x-ray microscopes are introduced. Prospects of new developments of x-ray microscopes with SPring-8 are mentioned.

x-ray microscope/synchrotron radiation/resolution/imaging

1. はじめに

X線顕微鏡の試みは比較的古い¹⁾。X線領域では、屈折率が1に極めて近く、可視域におけるような屈折型レンズの製作が困難であった。さまざまな工夫をして顕微鏡像を得ようとする試みがなされてきたが、つい最近まで光学顕微鏡の分解能を追い越すことができなかった。しかしながら、技術の進歩は、原理的な困難さを克服し、X線領域でも結像可能な素子を生み出すに至った。特に、軟X線領域（波長1～10nm）では、すでに光学顕微鏡の分解能を越えており^{2)～5)}、硬X線（0.1～0.3nm）でもサブミクロンにせまる分解能を得ている⁶⁾。X線の波長に比べればまだ不十分な分解能であるが、これまで困難と思われた領域に足を踏み込み始めている。

X線顕微鏡は物質科学や生命科学の基礎的な研究手段として期待が大きい。特に、生体観察用に開発の進んでいる軟X線顕微鏡は、従来困難であった溶液中の試料観察を可能にし、実用化をめざして精力的に開発が進められている。一方、硬X線を利用した顕微鏡は、光学素子加工の難しさから開発が遅れており、今後の進展が待たれている。

本報では、軟X線顕微鏡開発の現状を踏まえ、SPring-8が完成後期待されている硬X線領域での顕微鏡の可能性を探ってみる。

2. X線顕微鏡の基本要素

2.1 X線顕微鏡像コントラスト

X線を顕微鏡画像形成の手段として使う場合、信号

X-ray Microscopy—Present

State and Its Prospect with SPring-8

Sadao AOKI

Institute of Applied Physics, University of Tsukuba.

として何をとらえるかによって、光学系や検出器が異なってくる。X線顕微鏡を光学顕微鏡の単なる延長とみる見方もあるが、X線と物質との相互作用は、可視光と物質との関係と異なる信号もいくつか生み出す。X線顕微鏡に利用される主な信号を図1⁷⁾に示す。従来生体観察にはおもに吸収信号が利用されてきたが、X線の波長が短くなるにしたがい吸収が減少し、像コントラストが低下する。この問題の解決のために、透過X線の位相差を利用してコントラストを増大する試みが始まっている。もうひとつの有力な手段である蛍光X線は、短波長域ではますます重要な元素分析信号となりつつある。

2.2 X線顕微鏡の分類

前述の信号を顕微鏡像として画像化する方法は、結像作用を持つ光学素子によって、物体を通ったX線を結像拡大する結像型、微小に収束したX線マイクロビームを試料に当て、場所毎の信号を2次元的に配列して画像化する走査型がこれまでに開発されてきた。これに加えて、短波長X線の干渉性を利用したX線ホログラフィー、多数の方向からの投影像を重ねて断層像を得るX線マイクロトモグラフィーなど、軟X線では困難であった比

図1. X線顕微鏡に利用される主な信号

軟的厚い試料 (10~100 μm) の観察や 3 次元の結像が可能になる。

2.3 X線光学素子

光学素子の働きは、結像、反射、集光、分光、フィルター、偏光、ビームスプリットなど様々なものがある。X線顕微鏡光学系には結像素子を中心にしていくつかの素子が組み合わされて使われてきた。開発中のものも含めた光学素子の一覧とその特徴を表1に示す。硬X線領域で使われる結像素子の加工精度は、軟X線のものに比べて一段と厳しくなり、現在のところ分解能が低く、実用性の高いものはまだない。

2.4 X線検出器⁸⁾

検出器としては、主に結像型X線顕微鏡に使われる2次元の位置敏感検出器と、走査型X線顕微鏡に

使われる無次元検出器とに大別できる。主な検出器とその特徴を表2に示す。位置敏感検出器の空間分解能が低いこと、エネルギー分解能が小さいことなど、解決すべき問題点があるが、現状では目的に応じて上手に使い分けるのが賢明である。

3. X線顕微鏡の例

上に述べた光学系要素(素子・検出器等)を利用していろいろなタイプのX線顕微鏡が考えられる。これまでは軟X線用の顕微鏡システムが多く、本格的な短波長X線用は少なかった。SPRING-8では、開発的要素を含めた光学系が必要になる。

3.1 結像型X線顕微鏡

現在まで公表された結像型X線顕微鏡は、大半が生体試料の観察を目的とした軟X線利用の顕微鏡で

ある。硬X線領域での本格的な結像型は、実用的な光学素子を得ることが難しくまだない。硬X線は軟X線に比べ、放射線損傷を軽減できる点や試料の厚さに対する要求が緩和される等の利点があり、最近その利用が検討され始めた。光学素子として、斜入射ミラー(全反射、多層膜反射)、硬X線用透過型ゾーンプレート、反射型ブラッグフレネルレンズなどが候補に上げられる。ここでは斜入射ミラーを使ったシステムを示す。

X線領域では物質の屈折率が1よりわずかに小さいので、鏡面すれすれにX線を入射(斜入射)させると全反射がおこる。この原理を利用した高分解能のX線ミラー(ウォルター型ミラー)を図2に示す。ミラーの構成はひとつの焦点を共有した楕円面と双曲面からなる。このミラーは、入射角を適当に設計すれば0.1nm以下の短波長も結像可能になる。分解能は使う波長とミラーの開口数によって決まるが、0.15nmの波長で数nmが期待できる。放射光は平行ビームに近く、ミラーの開口中心部が開いているので、開口数を合わせた照明用素子が必要になるが、蛍光X線などの発光や散乱光の撮影には単独で利用できる。

3.2 走査型X線顕微鏡

走査型X線顕微鏡は、微小に収束したX線を試料に照射し、場所毎の信号を2次元的に配列して画像形成を行う方法である。

図2. ウォルター型斜入射ミラー。試料を照射したX線は2枚の反射鏡によって像を結ぶ。

表1. 主なX線光学素子

素子名	波長域 (nm)	特徴と主な用途
平面斜入射鏡	0.1 ~ 20	短波長より長波長がすべて反射。ビーム偏向、短波長除去。
非球面斜入射鏡	0.1 ~ 20	高分解能結像、集光。
平面結晶	0.02 ~ 2	ビームコリメーション、反射、分光、ビーム分枝、偏光。
湾曲結晶	0.02 ~ 2	分光集光。
平面多層膜鏡	0.1 ~ 20	超軟X線で直入射反射。分光、反射、ビーム分枝、偏光。
球面多層膜鏡	0.1 ~ 20	超軟X線で直入射反射結像、分光。
反射回折格子	0.5 ~ 20	斜入射軟X線用。高分解能分光。
透過回折格子	1.0 ~ 20	光学系が容易。低分解能分光、ビーム分枝。
透過型ゾーンプレート	1.0 ~ 20	軟X線高分解能結像、集光、分光。
反射型ゾーンプレート	0.1 ~ 1.0	硬X線結像、集光、分光。
ピンホール	0.02 ~ 10	ビームコリメーション、ピンホールカメラ。
フィルター	0.01 ~ 20	バンドパス。

表2. 主なX線検出器

機能	検出器の種類、分解能、主な利用波長域
位置検出 (半)固定	・フィルム、乾板、$\sim 1\mu\text{m}$、軟X線、X線 ・イメージングプレート、$\sim 100\mu\text{m}$、X線、軟X線も可 ・レジスト、$\sim 10\text{nm}$、軟X線
実時間	・蛍光板、$\sim 10\mu\text{m}$、軟X線、X線 ・マイクロチャンネルプレート、$\sim 20\mu\text{m}$、軟X線、X線も可 ・CCD、$\sim 20\mu\text{m}$、X線、軟X線も可 ・光電面検出器、$\sim 0.2\mu\text{m}$、軟X線、X線も可 ・X線テレビ、$\sim 10\mu\text{m}$、X線
計数	・比例計数管、軟X線で200eV以下、X線で1keV程度、軟X線、X線 ・シンチレーション検出器、X線で数keV ・半導体検出器、軟X線、X線で200eV以下
エネルギー分析不可	・電陰極、強度大の軟X線、X線 ・CMOS、X線 ・ホトダイオード、強度大のパルスX線

図3. 放射光斜入射走査型蛍光X線顕微鏡。非球面反射を利用したコンデンサーミラーでX線を集光し、対物ミラーでマイクロビームを形成する。

物理量の定量化が容易であり、2波長による吸収差分による特定元素の分布や光電子、蛍光X線の利用による化学状態の研究など、分光・分析的な画像が得られる。結像型に比べ比較的開発が進んでいる。分解能は、収束ビームのスポットサイズにほぼ等しい。マイクロビーム形成素子としては、斜入射ミラー、硬X線用透過ゾーンプレート、反射型ブラッグフレネルレンズ、キャピラリーチューブなどが利用できる。現在キャピラリーチューブで $0.1\mu\text{m}$ の分解能が得られている。図3にウォルター型ミラーを対物素子とした走査型蛍光X線顕微鏡⁹⁾の光学系を示す。マイクロビームの形成には、高輝度のアンジュレーターの利用が望ましい。

3.3 マイクロトモグラフィ

物体の3次元像を得る手軽な手法としてトモグラフィがある。放射光は波長を容易に変えることができるので、分光学的な情報が得易い。単なる3次元的な構造情報のみならず元素分布や化学結合状態まで知ることができる。残念ながら、これまで提案されてきたマイクロトモグラフィの手法では、分解能が検出器の解像力によって制限され飛躍的な値が期待できない。極微小発散点光源を利用した投影拡大や結像系による像拡大など、強度の制約からこれまであまり検討されなかった手法の導入も考えられる。参考例として図4に微小焦点X線発生装置を利用した投影拡大型マイクロトモグラフィの光学系を示す¹⁰⁾。分解能はほぼ光源の大きさで決まる。前述の光学素子を積極的に利用すれば、 $0.1\mu\text{m}$ 前後の分解能は比較的容易に達成されるものと思われる。

3.4 X線ホログラフィ

SPRING-8のアンジュレーターからのX線は干渉性が高い。特にビームが微小に集光された場合、物体の周期的な領域からの回折が著しくなる。干渉性を高める有力な手法として結晶の非対称性反射があり、 $100\mu\text{m}$ 四方をコヒーレントに照明することは比較的容易である。X線ホログラフィでは、微細な干渉縞の記録

図4. 拡大投影型X線マイクロトモグラフィ。電子ビームを集光して微小X線源を作り、発散X線を利用して試料の拡大像を1次元検出器で記録する。

が問題になるが、コヒーレントな領域が広がれば、レンズレスフーリエ変換法¹¹⁾などの利用も可能になり、かなり高分能の顕微鏡が期待できる。

4. まとめ

X線顕微鏡の光学系や利用形態には、上で述べた以外にも数多く考えられる。軟X線顕微鏡はほぼ実用化の段階に来ているが、硬X線顕微鏡はさまざまな困難から開発が遅れていた。SPRING-8の光源強度を生かす光学系の開発が急務の課題である。

文 献

- 1) E. F. Kaelble (1969) *Handbook of X-Rays*, Chap. 48. McGraw-Hill, New York.
- 2) D. Rudolph, G. Schneider, P. Guttmann, G. Schmahl and J. Thieme (1992) *X-Ray Microscopy III* (A. G. Michette ed.) 392-396, Springer-Verlag, Berlin.
- 3) S. Aoki, T. Ogata, S. Sudo and T. Onuki (1992) *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**, 3477-3480.
- 4) W. Meyer-Ilse, P. Guttmann, J. Thieme, D. Rudolph, G. Schmahl, E. Anderson, P. Batson, D. Attwood, N. Iskander and D. Kern (1992) *X-Ray microscopy III*. (A. G. Michette ed.) 284-289, Springer-Verlag, Berlin.
- 5) C. Jacobsen, S. Williams, E. Anderson, M. T. Browne, C. J. Buckley, D. Kern, J. Kirz, M. Rivers and X. Zhang (1991) *Opt Commun.*, **86**, 351-364.
- 6) S. Hayakawa, A. Iida, S. Aoki and Y. Gohshi (1989) *Rev. Sci. Instrum.*, **60**, 2452-2455.
- 7) 青木貞雄 (1987) 応用物理, **56**, 342-351.
- 8) 菊田惺志 (1992) X線回折・散乱技術 (上) p. 205-236. 東京大学出版会, 東京
- 9) Y. Gohshi, S. Aoki, A. Iida, S. Hayakawa, H. Yamaji, and K. Sakurai (1987) *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, L1260-L1262.
- 10) Aoki, S., Yoneda, I., Nagai, T., Ueno, N., Murakami, K. (1994) *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, L556-L558
- 11) 青木貞雄, 菊田惺志 (1976) 日本結晶学会誌, **18**, 236-240.