



X線顕微鏡の現状と今後の期待 —X線1ナノイメージングは可能か

青木貞雄 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1

要旨 高分解能X線イメージングは様々な光学素子や光学系を用いて開発が進められている。軟X線領域（～3 nm）ではおよそ20 nm、硬X線領域（～0.1 nm）ではおよそ50 nmの分解能のイメージングが実用化されている。最先端の研究では10 nmを越える分解能を持つイメージング技術も現れ始めている。1 nm分解能に向けての可能性を述べる。

1. はじめに

X線は可視光に比べ桁違いに波長が短いにもかかわらず、光学顕微鏡の分解能を超えることが難しかった。その最大の理由はX線領域では物質の屈折率が1に極めて近く、「X線レンズ」の実現が困難な点にあった。X線が可視光の仲間であることが認識されたのは、その発見後しばらくしてからのものであり、当初はその正体がつかめず、「X線レンズ」の考えは生まれてこなかった。X線に対して、物質の屈折率が1よりわずかに小さいと言う事実は1923年 Comptonの実験によって初めて示された¹⁾。しかしながら、その値は極めて小さく、光学素子によるX線の結像は半世紀近く陽の目を見ることはなかった。加えて、X線回折やレントゲン撮影などで使われる波長は0.1 nm以下と短く、当時の技術では光学素子の加工も不可能だった。

本格的な結像光学系の提案は、1948年 Kirkpatrick と Baez が斜入射全反射を利用した直交クロス円筒ミラー（K-Bミラー）が最初である²⁾。その後、1952年 Wolterによる2段の軸対称ミラー光学系の提案があり³⁾、X線望遠鏡光学系として開発が始まった。この方式に類似した軸対称トロイダル型顕微鏡は1978年坂柳と青木によって軟X線領域（波長0.83 nm）で初めて実現した⁴⁾。その後、1990年レーザープラズマ軟X線源を用いて青木らはWolterミラー顕微鏡で250 nmの分解能を達成した⁵⁾。

一方で、回折を利用したゾーンプレートは、1963年 Mollenstedt らによって試作が始まり、その後 Schmahl らによって開発が本格化した。1976年彼らのグループのゾーンプレートは波長4.6 nmの放射光軟X線を利用して200 nmの分解能を実現し、X線顕微鏡の新たな段階を迎えた⁶⁾。

X線結像光学素子の開発と並行して、X線の位相を直接記録できるホログラフィー技術にも研究の芽が現れた。

ホログラフィーは電子顕微鏡の収差補正を目的として1948年 Gabor が提案し、可視光で実証実験を行った⁷⁾。ホログラムは波動の3次元情報の記録が可能で、レンズの役割を果たす新しい媒体として注目を集めた。実際には、可視光レーザーの出現により3次元画像技術として実用化が先行した。Gaborの考え方をX線結晶解析に適用しようという試みはいくつか見られたが、光源の干渉性の制約から困難さが認識され、別な発展の経路をたどることになった。1972年、菊田らはマイクロフォーカスX線発生装置を利用し、ヤングの干渉実験に類似したレンズレスフーリエ変換X線ホログラムの撮影に成功、レーザーによって像再生を行った⁸⁾。また、同年、青木らはほぼ同じ光学系を放射光に適用してX線ホログラムの撮影に成功し、X線ホログラフィーの可能性を示した⁹⁾。ホログラフィーの特徴である3次元位相情報の記録はその2年後、青木らによってGabor型のX線ホログラフィーで実現した¹⁰⁾。その後、アンジュレーター光の利用によって分解能も向上していった。一方で、構造解析を目指した新しい位相回復画像再構成法の研究も出始めた。1999年、Miaoらは、1952年に Sayre が提案したX線フラウンホーファー回折パターンから像を再生する方法を初めて実証した¹¹⁾。この手法は光学系の簡便さから多くの研究者の興味を引き急速な進展を見せ始めている。X線顕微鏡開発初期のまとめを Table 1 に示す。

本稿では、「ナノ集光・結像」をキーワードとしたX線顕微鏡光学系を概観し、光学的な分解能を念頭において、1ナノイメージングの可能性を探る。

2. X線の結像と集光

2.1 分解能と集光スポットサイズ

光学素子を用いた結像型X線顕微鏡像の分解能は、一般に Fig. 1 に示すレーリーの定義から導かれる¹²⁾。良く知

Table 1 Early History of X-ray Microscopy

年代	世界の歩み	年代	日本の歩み
1895年	X線の発見		
1948年	Kirkpatrick and Baez		
	直交クロス円筒ミラー結像光学系		
1952年	Wolter		
	2段軸対称ミラー光学系 (提案)		
1963年	Möllenstedt, Grote and Jönsson	1972年	菊田惺志, 青木貞雄, 小崎茂, 高良和武
	ゾーンプレート X線顕微鏡		レンズレスフーリエ変換
			X線ホログラフィー
70年代	放射光の利用本格化	70年代	放射光の利用本格化
1976年	Niemann, Rudolph and Schmahl (独)	1978年	坂柳義巳, 青木貞雄
	放射光ゾーンプレート X線顕微鏡		軸対称タンデムトロイダルミラー
			軟 X線顕微鏡
1980年	Rarback, Kenny, Kirz 他 (米国)	1986年	青木貞雄, 籠島靖, 覚知正美, 他
	走査型ゾーンプレート X線顕微鏡		放射光ゾーンプレート X線顕微鏡

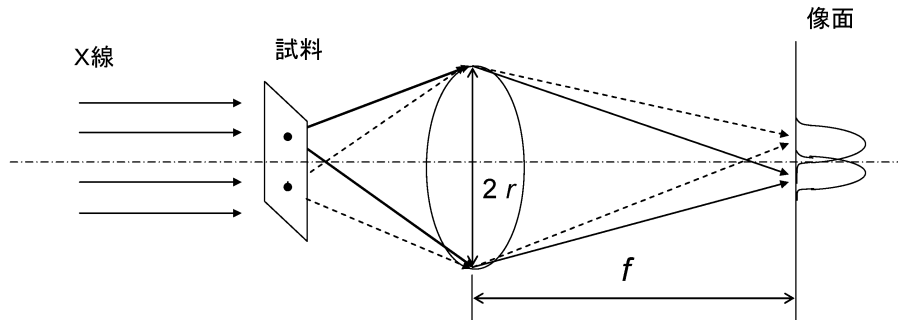


Fig. 1 Rayleigh's criterion for spatial resolution.

られているように、単色平行光はレンズ（対物素子）の開口による回折の点像分布（エアリーパターン）を形成する。光軸付近の点物体の像も近似的にこの点像分布を持つ。今、ふたつの点物体が光軸を挟んで距離 Δ だけ離れて配置され、像面でそれぞれの第1極大と第1極小の位置が図のように一致したとする。この時、ふたつの像はそれぞれ広がりを持つが、分離して認識される。この条件を使ってレーリーの分解能が定義される。対物素子の開口形状が円形の場合、分解能 Δ は

$$\Delta = \frac{0.6\lambda}{NA} \approx \frac{0.6\lambda f}{r} \quad (1)$$

で表される。ここで、 NA は開口数 (Numerical Aperture) で、光軸上の物点から対物素子の開口を見込む半角の正弦値と物体空間屈折率の積で表される。 λ は波長、 f は焦点距離、 r は開口（レンズ）の半径である。X線では屈折率

が近似的に1とおける。この式から分解能は波長の短いX線ほど良くなることが分かる。現状では、軟X線（ ~ 3 nm）光学素子（ゾーンプレート；後述）で $NA = 0.1$ 程度なので、 Δ は 6λ （ ≈ 18 nm）前後、硬X線（ ~ 0.1 nm）光学素子（同上）で $NA = 0.001$ 程度なので、 $\Delta = 600\lambda$ （ ≈ 60 nm）前後が得られている。

一方、X線の集光の場合はどうなるであろうか。基本的には上に述べたような議論から集光ビームサイズの限界が求められるが、この場合は光源のコヒーレンシーの度合いがビームサイズに影響を及ぼす。一般的な議論は計算が煩雑になるので、ここでは定性的な説明をする。Fig. 2に示すように、光源に大きさ（ 2ρ ）がある場合、光源から素子までの距離を L とするとコヒーレントに照明される領域（ $2r$ ）は

$$2r = \frac{0.16L\lambda}{\rho} \quad (2)$$

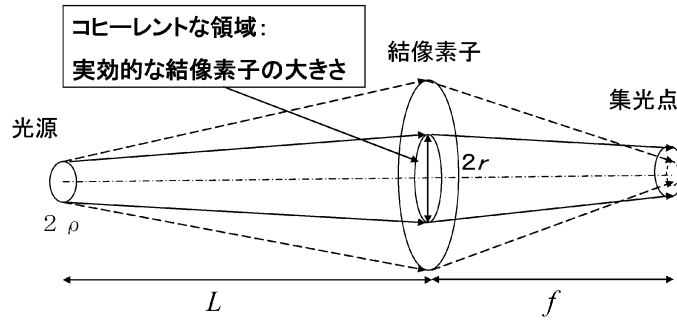


Fig. 2 Coherently illuminated area by a quasi-monochromatic, uniform source.

と近似される¹³⁾。そのため、条件によっては素子全体をコヒーレントに照明できない場合がある。その場合、実効的な集光素子の大きさはコヒーレント照明領域の広さに影響され、結果的に集光素子の開口によって決まるエアリーパターンのサイズ(式(1)で決まる値)まで集光ビームを絞ることが困難になる。例えば、 $2\rho = 10\ \mu\text{m}$ 、波長を $0.1\ \text{nm}$ 、 $L = 50\ \text{m}$ とすると、コヒーレント照明領域は $2r = 160\ \mu\text{m}$ となる。適当に設計したゾーンプレートであれば、ほぼ完全にコヒーレントに照明することも可能である。そのほか、光学系にピンホール等の空間フィルターを挿入してコヒーレントなビームを形成することもできるが、強度の減衰は免れない。

2.2 X線領域の屈折率と反射率

X線に対する物質の複素屈折率 n は一般的に

$$n = 1 - \delta + i\beta \quad (3)$$

と表される¹⁴⁾。 δ は位相に、 β は吸収に関係し、それぞれ

$$\begin{aligned} \delta &= Nr_0\lambda^2 f_1 / 2\pi \\ \beta &= Nr_0\lambda^2 f_2 / 2\pi \end{aligned} \quad (4)$$

と表される。ここで、 N は単位体積中の原子数、 r_0 は古典電子半径、さらに $f_1 + if_2$ は複素原子散乱因子である。空気中から反射面に直入射したときの反射率 R は、屈折率が 1 に近い場合、フレネルの反射率の式から近似的に

$$R = (\delta^2 + \beta^2) / 4 \quad (5)$$

で与えられる¹⁵⁾。比較的波長の長いアルミニウムの K 特性線(波長 $0.83\ \text{nm}$) を使い、反射面をシリコンにした場合、 $\delta = 2.2 \times 10^{-4}$ 、 $\beta = 8.6 \times 10^{-5}$ なので、反射率は $R = 2.0 \times 10^{-8}$ 程度となり、直入射ミラーは実用的ではなくなる。一方、屈折を利用する場合、曲率半径 r の球面レンズの焦点距離 f は

$$f = \frac{2r}{n-1} \quad (6)$$

で表される¹²⁾。上記の例にならって、シリコンの凹面レンズ(大気中では X 線に対して凸レンズ作用を示す)を考えると、焦点距離は $f = 10^4 r$ となり、曲率半径 $1\ \text{mm}$ の凹面レンズでもおよそ $10\ \text{m}$ の焦点距離になり、実用性は低い。

3. X線集光・結像光学素子の分解能

3.1 全反射斜入射ミラー¹⁵⁾

前述したように、X線領域では物質の屈折率が 1 より小さくなる。その性質を利用し、大気中あるいは真空中からミラーに X 線をすれすれ入射(斜入射)させるとある角度(臨界角)で全反射を起こす。この臨界角 θ_c (ラジアン) は近似的に

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} = 1.6 \times 10^{-2} \lambda \sqrt{\rho} \quad (7)$$

で表される。ここで ρ は密度 (g/cm^3)、 λ は nm 単位で表してある。反射面に密度の大きい白金 ($\rho = 21.5$) などの重金属を用いたとしても、波長 $1\ \text{nm}$ 以下の X 線に対して斜入射臨界角は数 $10\ \text{mrad}$ 以下になってしまう。

凹面ミラーを利用して X 線を斜入射角 θ で入射した場合、光軸を含む経線方向の焦点距離 f_m と緯線方向の焦点距離 f_e は著しく異なる (Fig. 3)。凹面ミラーの曲率半径を r とすると、それぞれ

$$\begin{aligned} f_m &= (r \sin \theta) / 2 \\ f_e &= r / (2 \sin \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

で表される。式からも明らかなように、 $\theta = \pi/2$ 以外は両者の焦点距離が一致しない。そのため凹面ミラーは、通常経線方向の 1 次元的な集光にのみ使われる。この場合の分解能 Δ は臨界角を用いて表すと、近似的に

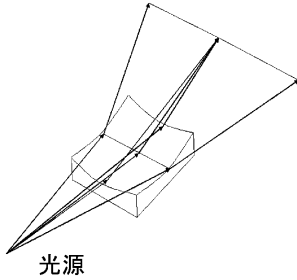


Fig. 3 Grazing incidence reflection of a concave mirror.

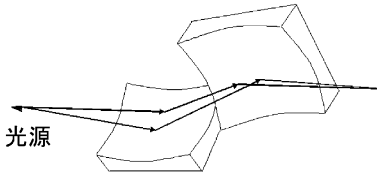


Fig. 4 Kirkpatrick-Baez type grazing incidence mirror.

$$\Delta \approx \frac{\lambda}{2\theta_c} \quad (9)$$

で表される値以下になってしまう。(7)式をこの式に代入して見ると分解能の限界は波長に依らず、反射面の密度に依存することが分かる。重金属を用いた場合でも、分解能は約10 nmが限度である。同様にして理想的に集光できたとしてもスポットサイズは10 nm程度に留まる。この限界を破るためには多層膜コーティングを施すなどして臨界面角を大きくする必要がある。2次元的に集光したい場合は、直角にタンデムに配置したFig. 4のようなKirkpatrick-Baez型の光学系を利用する。放射光施設での2次元集光はほとんどこの光学系を採用している。

単一のミラーで2次元的に集光するためには(8)式のふたつの焦点距離が一致するような曲率半径を選ばばよい。すなわち、曲率半径 r_m と r_e の間に

$$r_e/r_m = \sin^2 \theta \quad (10)$$

の関係を満たすトロイダル面にする必要がある。波長が1 nm以下では、臨界面角の値から曲率半径の比が4桁程度異なる極端な非球面形状になることが分かる。非球面ミラーの製作は容易ではないが、最近では精密加工技術によって高性能のミラーも手に入るようになって来た。

さらに一歩進んだミラーとして軸対称ミラーの開発も進んでいる。特に、軸対称の楕円ミラーや放物面ミラーは開口率が大きいので、集光を目的としたコンデンサーミラーとして使われることが多くなっている。しかしながら、斜入射領域での単一ミラーでは、光軸から離れた物点のコマ収差が大きく、結像用対物ミラーとしては不向きである。これを補うものとして2段連結型のウォルター型ミラー

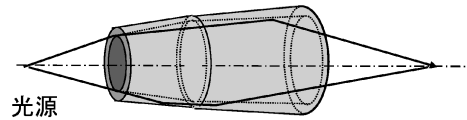


Fig. 5 Wolter type-1 mirror.

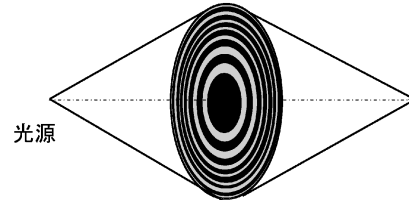


Fig. 6 Zone plate.

の開発が進んでいる。このミラーの概念図をFig. 5に示す。ミラーは双曲面と楕円面からなり、ひとつの焦点を共有している。像の拡大には双曲面を物体側に配置して使い、縮小光学系では逆の配置になる。この光学系は、近似的にアップの正弦条件を満たしており、コマ収差が小さいので比較的視野も広い。開口数もX線結像素子の中では比較的大きく、理論分解能 Δ も

$$\Delta \approx \frac{\lambda}{8\theta_c} \quad (11)$$

と表され、K-Bミラーの4倍以上が得られる¹⁵⁾。この場合も分解能の限界はミラーの面密度で決まり、数nmと計算される。現在、軟X線を用いた結像実験で50 nm前後の分解能が得られている¹⁶⁾。硬X線では、面形状精度の制約から数 μm に留まっている。

3.2 ゾーンプレート

ゾーンプレートはFig. 6に示すような、X線に対して透明・不透明の同心円状輪帯を繰り返した板状の結像素子である。透明部分同士の光路差(位相差)を 2π に設定するとこの板がX線に対してレンズ作用を示す。不透明部分を半透明にし、透明部分との位相差を厚みを調整して π だけずらした板にすると回折効率が最大40%程度に向上する。最近ではほとんどがこのタイプのものを採用している。ゾーンプレートの焦点距離はこの輪帯形状と位相差を考慮して求められる。中心からn番目の輪帯境界の半径 r_n は

$$r_n = \sqrt{n\lambda f} \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

で表される。 f はゾーンプレートの焦点距離で、 $f=r_1^2/\lambda$ で与えられる。分解能は波長に関係なく最外輪帯幅で決まるが、技術的にはプレートの厚さと帯幅との比(アスペク

ト比)が10程度のものが限界で、軟X線(〜2 nm)用では20 nm 前後、硬X線(〜0.1 nm)用では50 nm 前後が実用化されている。

3.3 多層膜応用光学素子

前述のように、全反射のみでは臨界角が極めて小さい。この問題を少しでも緩和するために、多層膜をコーティングして臨界角より大きな斜入射角で反射率を上げる方法がある。通常は軽元素と重元素を交互に重ねた2層構造が用いられる。それぞれの厚みを d_A , d_B とすると

$$2(d_A + d_B) \sin \theta = \lambda \quad (13)$$

を満足する斜入射角で反射が起こる。最近の製膜技術では各層1 nm 程度も可能になっており、比較的波長の長い軟X線(10 nm 前後)に対して直入射光学系が実現できる。

直入射にこだわらなければ、比較的短波長の硬X線領域までこの技術が利用できる。多層膜の仕様によって異なるが、臨界角より数倍大きな斜入射角で有意な反射が起こる。多層膜ミラーの反射率向上は、原理的にX線位相の強め合いを利用しているので、反射のスペクトル幅は層数に応じて狭くなる。結晶に比べて分光スペクトル幅が比較的大きいので光子数を多く必要とする場合には便利である。

3.4 その他の光学素子

X線領域では屈折率が極端に1に近いので、屈折レンズは不可能であると述べたが、透過率の大きな短波長X線では別な工夫によって屈折型レンズも可能になる。光学分野では良く知られた事であるが、複数のレンズを重ねて使うと複合焦点距離はその枚数に比例して短くすることができる。すなわち、1個のレンズの焦点距離を f とした場合、 N 個の複合焦点距離 f_N は

$$f_N = \frac{f}{N} \quad (14)$$

となる¹²⁾。X線領域では凹レンズが可視域の凸レンズに対応するので、通常はFig. 7のような凹レンズを数10枚以上重ねたタイプの複合屈折レンズが利用される。最近では微細加工を駆使した1次元タイプの複合屈折レンズが作られ、K-Bタイプの配置で2次元集光を試みている。集

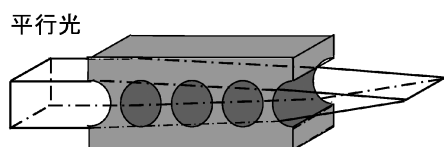


Fig. 7 Compound Refractive Lenses.

光サイズも10 keV 前後のX線に対して50 nm を切るものも作られている。屈折用の材料には吸収の少ないベリリウムやアルミニウム、シリコンなどが用いられる。

4. X線顕微鏡

4.1 X線顕微鏡画像信号

X線を介して得られる信号(物理量)は何らかの形で画像化が可能である。原子レベルで見れば、信号の発信源あるいは相互作用の要素はすべて個々の原子からのものであり、究極的には原子1個1個の情報が画像化可能である。主な信号情報をFig. 8に示す。光電子のようにX線の直接の結像ではないが、X線集光ビームを利用して信号を検出し、光電子分布を計測することもできる。X線の透過力は便利ではあるが、一方で観察対象が軽元素からなるような場合、吸収が少なくなり像コントラストが付きにくくなる。このような場合は、位相差法や干渉法を利用して位相情報を画像化してコントラストを得ている。この方法は吸収による照射損傷の低減にもつながり、最近急速に開発が進められている。

X線の特徴のひとつである透過性は物体内部の3次元画像化に適しているが、X線顕微鏡は分解能向上と共に焦点深度が浅くなる性質がある。一般に焦点深度 Δz は近似的に

$$\Delta z \approx \frac{\lambda}{(NA)^2} \quad (15)$$

で表される¹³⁾。現在使われているX線顕微鏡の NA は軟X線(波長3 nm)で0.1前後、硬X線(波長0.1 nm)で0.001前後なので、軟X線で300 nm、硬X線で100 μm 程度の焦点深度を示す。これらの数値から、軟X線では分解能の良い3次元情報が得られるのはかなり微小な物体に限られる。一方、硬X線では、分解能がやや低いと比較的大きな物体にも適用できる。いずれにしても、2次元のX線顕微鏡画像から3次元のCT(コンピュータトモグラフィ)像を再構成することは容易である。

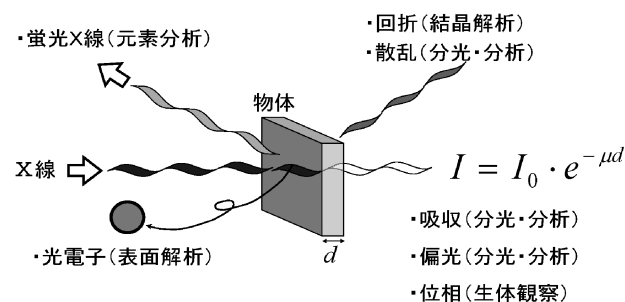


Fig. 8 X-ray induced signals from material.

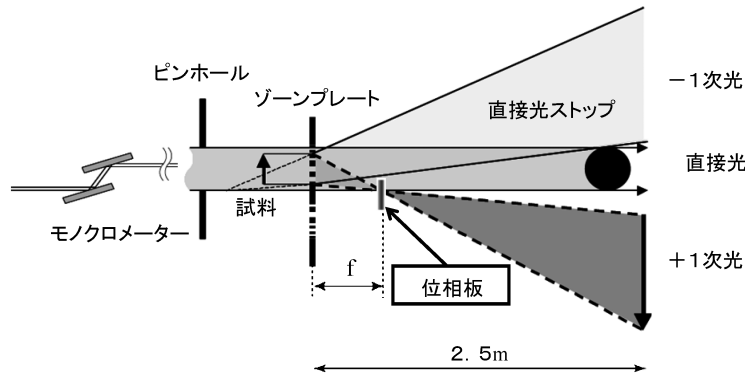
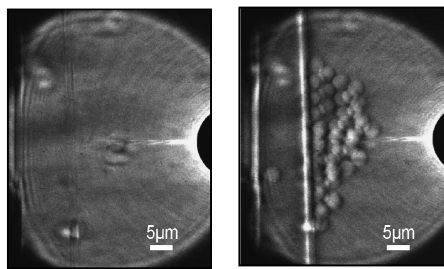


Fig. 9 Zernike-type phase-contrast X-ray microscope.



吸収コントラスト像 位相コントラスト像

Fig. 10 X-ray absorption and Zernike-type phase contrast images of latex spheres.

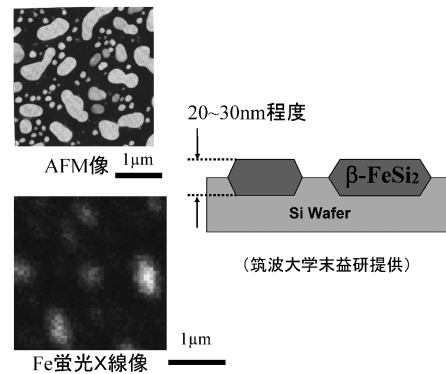


Fig. 12 X-ray fluorescence image of iron silicide (β -FeSi₂).

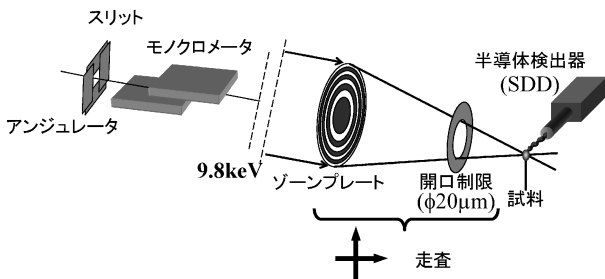


Fig. 11 Scanning X-ray fluorescence microscope.

4.2 X線顕微鏡光学系の例

最近では、結像型・走査型のX線顕微鏡光学系もバリエーションが増え、すべてを紹介しきれないので、ここでは我々が開発してきた2, 3の例を示す。Fig. 9はゾーンプレートを用いたツェルニケ型X線位相差顕微鏡光学系である¹⁷⁾。本来のツェルニケ型は集光照明用にコンデンサーゾーンプレートを利用するが、本光学系は放射光の平行性を利用したコンデンサーなしの簡易型になっている。この光学系は位相板がピンホールあるいはスポット板で機能を果たすので、位相板の準備が容易である。ガラスキャピラリーにラテックス (C₈H₈; $\rho=1.05 \text{ g/cm}^3$) を付着させた吸収像と位相差像を Fig. 10 に示す。ラテックスの透過率は5 keVのX線に対して99.5%であるが、位相差像

では十分なコントラストを示している。

次に、ゾーンプレートを用いた走査型蛍光X線顕微鏡の例 (Fig. 11) を紹介しよう。光源はSPring-8, BL20XUのアンジュレーター光である。このビームラインは光源から実験ハッチまでおよそ200 mもあり、コヒーレント領域が200 μm 程度あり、ゾーンプレートをはほぼ完全な形でコヒーレント照明している。最外輪帯幅100 nmのゾーンプレートを利用して9.8 keV X線を200 nm程度の集光スポットにした。シリコン基板に埋め込まれた鉄シリサイド (β -FeSi₂) の鉄マッピング結果を Fig. 12 に示す。AFM像中に見られるサイズの画像が得られている。蛍光X線は暗視野イメージングに近いので非常に微弱な信号でも画像化可能である。

特殊な光学系であるが、結像型の蛍光X線顕微鏡を紹介する (Fig. 13)¹⁸⁾。蛍光X線は励起されると全方向に発光するので、通常は走査型でイメージングが行われる。しかしながら、走査型では2次元の画像取得にも比較的長い時間を要する。まして3次元画像取得に至っては数10時間以上におよび、実用性が低い。この欠点はウォルター型ミラーによる蛍光X線の直接イメージングによってかなりの程度カバーできる。図に示したように放射光は水平方向に偏光しているので、結像系の光軸を入射励起光と垂直の位置に配置すると弾性散乱がほぼなくなり、蛍光X

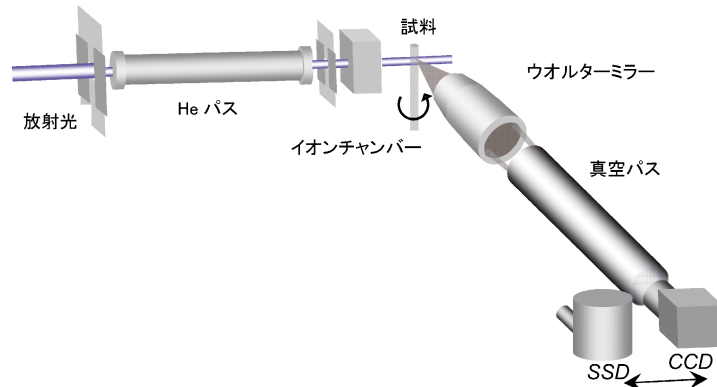


Fig. 13 Full-field X-ray fluorescence imaging microscope.

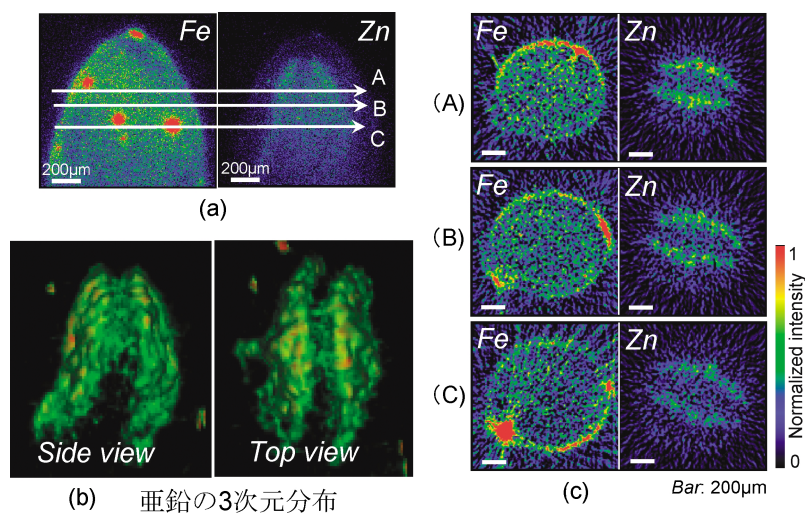


Fig. 14 3D element mappings of metal elements included in alfalfa seed. (a) Iron and zinc X-ray fluorescence images. (b) Cross sectional images of figures in (a). (c) 3D image of zinc distribution.

線像のコントラストが向上する。Fig. 14 にアルファルファ（牧草）種子の蛍光 X 線顕微鏡像を示す。局在した鉄の分布と広がりのある亜鉛分布が鮮明に映し出されている。結像型の蛍光 X 線顕微鏡では、走査型に比べて画像取得時間が短いので CT による 3 次元画像再構成が容易である。図中に亜鉛分布の 3 次元再構成像を示しておく。

5. X 線 1 ナノイメージングの見通し

上に述べた光学系と X 線顕微鏡は、現在世界中で活発に開発の進められている手法の一例である。しかしながら、開発の大きな流れに沿った部分も多い。分解能の点では軟 X 線領域では 20 nm、硬 X 線領域では 50 nm が実用的な水準である。いくつかの方法で分解能が 10 nm に迫っているものもあるが、適用対象がまだ限られており改善の余地は大きい。K-B ミラーに代表される斜入射ミラーは、従来の単層反射面では 10 nm 前後が分解能の限界であり、今後は多層膜反射面の導入が必須である。ウォルター

ミラーの理論分解能は、数 nm に迫るが、その実現にはもう一段の加工精度の向上が望まれる。このタイプのミラー内面に多層膜コーティングが可能になれば、1 nm の分解能も夢ではなくなる。一方、ゾーンプレートはこれまでの電子ビーム露光による方法では、10 nm 前後が限界と見なされている。それに代わる方法として、バウムクーヘン型の多層ラウエレンズが有望である。まだ開発途上であるが、工夫の余地は大きい。光学素子による直接的な結像や集光ではないが、それらの素子を利用して強度を補強した X 線ホログラフィーや X 線回折顕微鏡法は原子レベルの分解能の可能性を有している。

この特集号では新しい手法による最先端技術の研究結果が紹介されているので、それらを参照して欲しい。また、2008年夏にスイスで開かれた X 線顕微鏡国際会議のプロシエディングに X 線顕微鏡開発の歴史が詳しく解説されているので併せて参照願いたい¹⁹⁾。

謝辞

本稿で紹介したデータは、Photon FactoryのBL-3CおよびSPring-8のBL20XUで測定したもので、各研究施設のスタッフならびに筑波大学関係者の協力を心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) A. H. Compton: Phil. Mag. 45, 1121 (1923).
- 2) P. Kirkpatrick and A. V. Baez: J.O.S.A. 38, 766 (1948).
- 3) H. Wolter: Ann. Phys. 10, 94 (1952).
- 4) Y. Sakayanagi and S. Aoki: Appl. Opt. 17, 601 (1978).
- 5) S. Aoki and S. Sudo: X-ray Microscopy III (Springer-Verlag, Berlin, 1992) 114.
- 6) B. Niemann, D. Rudolph and G. Schmahl: Appl. Opt. 15, 1883 (1976).
- 7) D. Gabor: Nature 161, 777 (1948).
- 8) S. Kikuta, S. Aoki, S. Kosaki and K. Kohra: Optics Commun. 5, 86 (1972).
- 9) S. Aoki, Y. Ichihara and S. Kikuta: Jpn. J. Appl. Phys. 11, 1857 (1972).
- 10) S. Aoki and S. Kikuta: Jpn. J. Appl. Phys. 13, 1385 (1974).
- 11) J. Miao, P. Charalambous, J. Kirz and D. Sayre: Nature 400, 342 (1999).
- 12) 青木貞雄：光学入門，共立出版（2002）。
- 13) M. Born and E. Wolf: Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
- 14) A. H. Compton and S. K. Allison: X-rays in Theory and Experiment, (D. Van Nostrand, New York, 1935).
- 15) 青木貞雄：シンクロトロン放射光の基礎，大柳宏之編（丸善，1996）359.
- 16) M. Hoshino and S. Aoki: Jpn. J. Appl. Phys. 45, 989 (2006).
- 17) H. Yokosuka, N. Watanabe, T. Ohigashi, Y. Yoshida, S. Maeda, S. Aoki, Y. Suzuki, A. Takeuchi and H. Takano: J. Synchrotron Rad. 9, 179 (2002).
- 18) M. Hoshino, T. Ishino, T. Namiki, N. Yamada, N. Watanabe and S. Aoki: Rev. Sci. Instrum. 78, pp073706 1-7 (2007).
- 19) J. Kirz and C. Jacobsen: J. of Phys. Conference Series 186, 012001 (2009).

● 著者紹介 ●



青木貞雄

筑波大学大学院数理物質科学研究科研究員，同大学名誉教授

E-mail: aoki@bk.tsukuba.ac.jp

専門：X線光学，X線顕微鏡学

【略歴】

1974年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了，理学博士，1974年東京工業大学精密工学研究所助手，1976年東京教育大学光学研究所助手，1978年筑波大学物理工学系講師，1983年同助教授，1994年同教授，2004年同大学院数理物質科学研究科教授，2010年より現職。

Present status and future prospect of X-ray microscopes—Is it possible to realize X-ray 1 nm imaging?

Sadao AOKI Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba
1-1-1, Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573

Abstract High resolution X-ray imaging has been developed by using various optical elements and optical systems. In the soft X-ray region (~ 3 nm) about 20 nm spatial resolution has been obtained, while in the hard X-ray (~ 0.1 nm) about 50 nm. In the research frontier the spatial resolution better than 10 nm has been reported. The possibility to approach 1 nm spatial resolution is presented.