

蛍 光 X 線 顕 微 鏡

——位置走査を必要としない元素イメージング技術を中心に——

X線発見から100年以上の年月を経て、いま蛍光X線顕微鏡が面白い。この技術は、簡単には元素を識別する能力のある顕微鏡として知られているが、シンクロトロン放射光の登場と進化により、その姿を大きく変えつつある。これまで蛍光X線画像と言えば静止画が当たり前であったが、最近ではリアルタイムに高画素数の画像を取得できる顕微鏡が姿を現している。また、近い将来、透過電子顕微鏡なみの高空間分解能の顕微鏡をはじめ、様々な高付加価値の蛍光X線顕微鏡も登場するかもしれない。

桜 井 健 次, 江 場 宏 美, 水 沢 ま り

1 はじめに

分析化学の世界は、20世紀半ば頃^{ころ}、登場したばかりのエレクトロニクス技術の影響を強く受け、機器分析、特に遠赤外線からγ線まで、広い波長範囲にわたる電磁波を用いる分光分析法が大きな発展を遂げた。これらの分光分析法は、周知のとおり波長別に機器開発が進み、計測・解析の手法が網羅的に確立されていった。中でも、顕微分光法（micro-spectroscopy または spectro-microscopy）は、様々なレベルの微小領域分析のニーズに刺激され、どの波長領域においても独立性の高い一つの分野を形成し、さらにその二次元または三次元的な画像化（イメージング）を伴うことにより、高付加価値の技術として、広く世の中で受け入れられるようになった。今日では「○○顕微鏡」や「○○イメージング装置」という名称の分析装置が、多数製造され使用されている。

画像は、見る人の視覚と直感の助けを借りることができるためであろうか、通常データよりも情報量が豊富でその質も洗練されている。時に複雑な内容さえ含むことがあるにもかかわらず、「わかりやすい」とよく言われる。見かけのわかりやすさだけではない。定量的なデジタル画像処理が信頼性向上につながっている。コンピュータの進歩のおかげで、画像をちょうど数値と同じように取り扱うことができる時代が来ており、物質に関する情報を扱う学問の典型である分析化学では、今後ますます画像を活用する研究手法が発展するのではないかと筆者らは感じている。

さて、電磁波の一種であり、原子のサイズと同じスケールの波長を持つX線の分野では、1980年代よりシンクロトロン放射光（以下、放射光と略す）が世界中で活発に利用されるようになり、分析技術の水準は飛躍的

に高まった。1990年代後半にはアンジュレーターと呼ばれる挿入光源による高輝度光の利用が始まっている¹⁾。さらに2010年前後には、自由電子レーザーやエネルギー回収型直線加速器等により、短パルス・コヒーレントなナノサイズビームの放射光利用も可能になると言われている²⁾。光源技術のめざましい進歩に支えられ、X線分析法はいま急速に進化しつつある。

本稿では、現在進行形で発展を続けるX線分析法の技術の一つである蛍光X線顕微鏡³⁾⁴⁾について、特に筆者らが関与してきている走査を必要としない技術^{5)~11)}を中心に、現状と将来展望を概観したい。

2 蛍光X線顕微鏡の現状

2.1 走査型顕微鏡と非走査型（投影型）顕微鏡

図1および表1に蛍光X線顕微鏡を実現するための二つの方法を示す。本誌読者には、走査型の蛍光X線顕微鏡はなじみ深いのではないだろうか。電子顕微鏡の中で電子ビームにより発生する蛍光X線を分析する装置は市販されており、大抵の研究機関でルーチン分析等に利用されている。電子ビームの代わりに、図1の左図のように小さく絞った放射光を照射して蛍光X線を発生させる方法を採用すると、低バックグラウンドのため微量成分の検出が可能であり、またチャージアップのような効果も生じない。非破壊的であることから、より高度の応用を広範囲に適用することが可能になる。この技術は、まず顕微分光法としての性能、特に空間分解能を競う形で発展を遂げ、既に100 nm前後に到達している、細胞1個の内部を観察することもできるようになってきている¹²⁾。しかし、個々の点での測定結果を寄せ集めて画像化しようとする走査型蛍光X線顕微鏡では、その走査に時間がかかるために、高画素数の画像を容易に得ることはできないという問題を宿命的に抱えている。

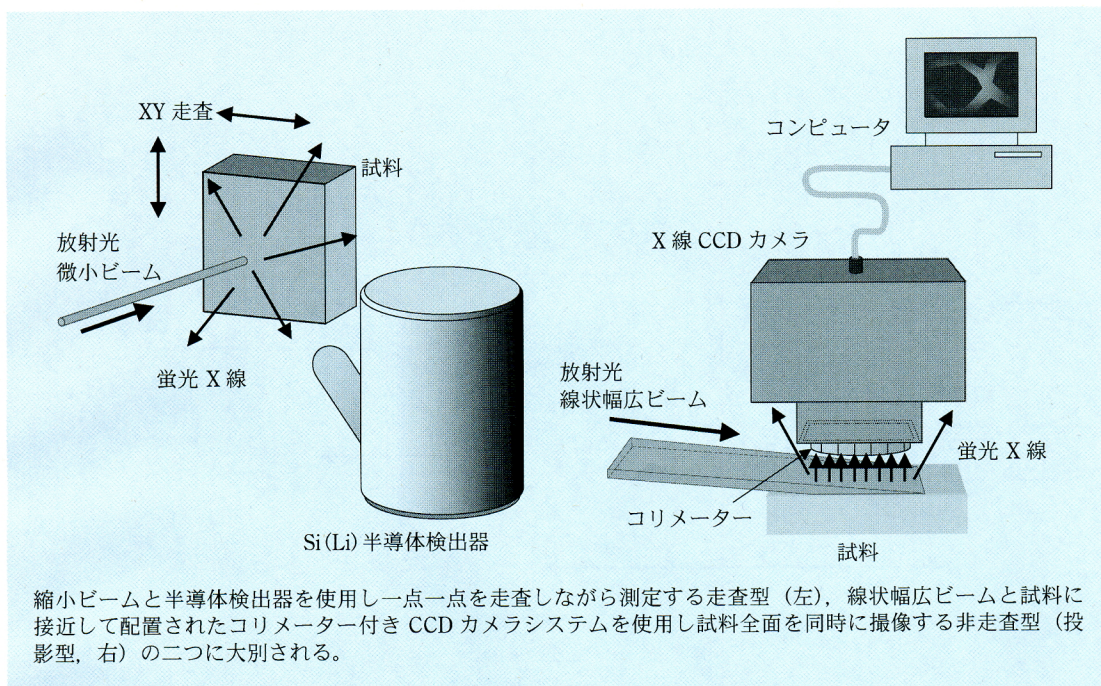


図 1 蛍光 X 線顕微鏡の概念図

表 1 走査型と非走査型（投影型）蛍光 X 線顕微鏡の主な特徴の比較

	走査型	非走査型(投影型)
試料の置き方	たいてい垂直置き (放射光利用の場合)	水平置き
典型的な入射ビーム サイズ	0.1~2 μm 角	8~12 mm (水平) $\times$ 0.4 mm (垂直)
空間分解能	0.1~2 μm	15~20 μm
典型的な視野サイズ	数 10~数 100 μm 角	8~12 mm 角
入射ビーム集光の有 無	必ず集光	垂直方向の集光が 望ましい
信号対バックグラウ ンド比の観点で理想 的な偏光状態	水平偏光	垂直偏光
典型的な画素数	100 $\times$ 100 程度	1000 $\times$ 1000 以上
1 枚の画像データを 得るのに必要な典型 的な時間	数時間~1 日	0.1~数秒

画像化という点で注目されるのは、もう一つの顕微鏡である非走査型（投影型）の技術である。そもそも、なぜ走査型の顕微鏡技術が先行したのであろうか。主な理由は、発散光である蛍光 X 線を結像するための適切な光学系を設けることが技術的に容易ではないということだと考えられる。しかし、レンズのような結像要素を用いることなく、平行光学系によっても類似の効果を得ることは可能である。筆者らは、1997~1998 年頃、金属材料技術研究所（現物質・材料研究機構）において、図 1 の右図に示すようなコリメータープレート（内径 1~10 μm ，厚さ 0.5~1 mm のコリメーターの集合体，試

料上の各点から発生する X 線角度発散をできるだけ抑える）と CCD カメラの極端な密接配置（広がる前に撮像する）を組み合わせた技術の研究を開始した⁵⁾⁶⁾。図 2 に、筆者らが 2002 年以来、高エネルギー加速器研究機構放射光研究施設の BL-16A1 で行っている実験のレイアウトを示す⁹⁾。小さく絞られたビームを使うのではなく、8~12 mm（水平） $\times$ 0.2 mm（垂直）の幅の広い線状の 5.5~13.0 keV の単色または準単色 X 線を使用し、ほぼ水平に置かれた試料全体を低角で照射して、撮像を行っている。

2.2 非走査型顕微鏡によるイメージングの魅力

(1) 高画素数の元素イメージング

画像情報の質として重要なのは、なんといっても、まず画素数である。この技術では、走査型とは異なり、画素数と測定時間の間には直接の関係はない。1 枚の画像の画素数は検出器である CCD カメラの持つ画素数で決まる。従って、かなりの高画素数のイメージングも容易に達成できる⁸⁾⁹⁾。図 3 は、プリント配線のなされた基板を 1000 $\times$ 1000 の画素数で観察した画像である。ここで計測しているのは、主に銅からの蛍光 X 線である。この基板では配線の上から塗料が塗られており、光学顕微鏡では塗料の濃淡や印字により配線の様子が正確には把握できないが、蛍光 X 線顕微鏡では表面に露出していない部分も含めた形状や断線等の状況を観察・評価することができる。配線部分やスルーホール近傍のエッジで、コントラストが際立って見えている（例えば R76 という文字の下にある縦 3 本の配線のうちでは、一番右の配線が明るく、それも配線内の右端が際立ってい

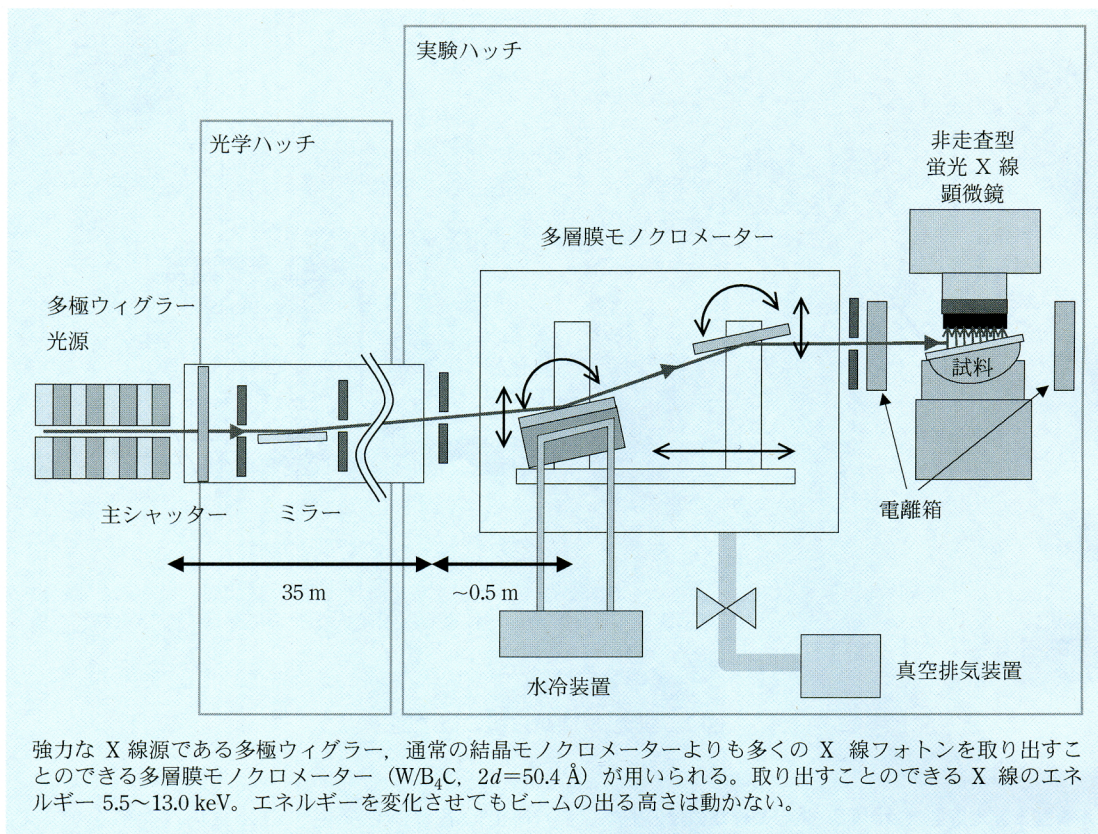


図 2 高エネルギー加速器研究機構・放射光研究施設 BL-16A1 における蛍光 X 線顕微鏡の実験配置

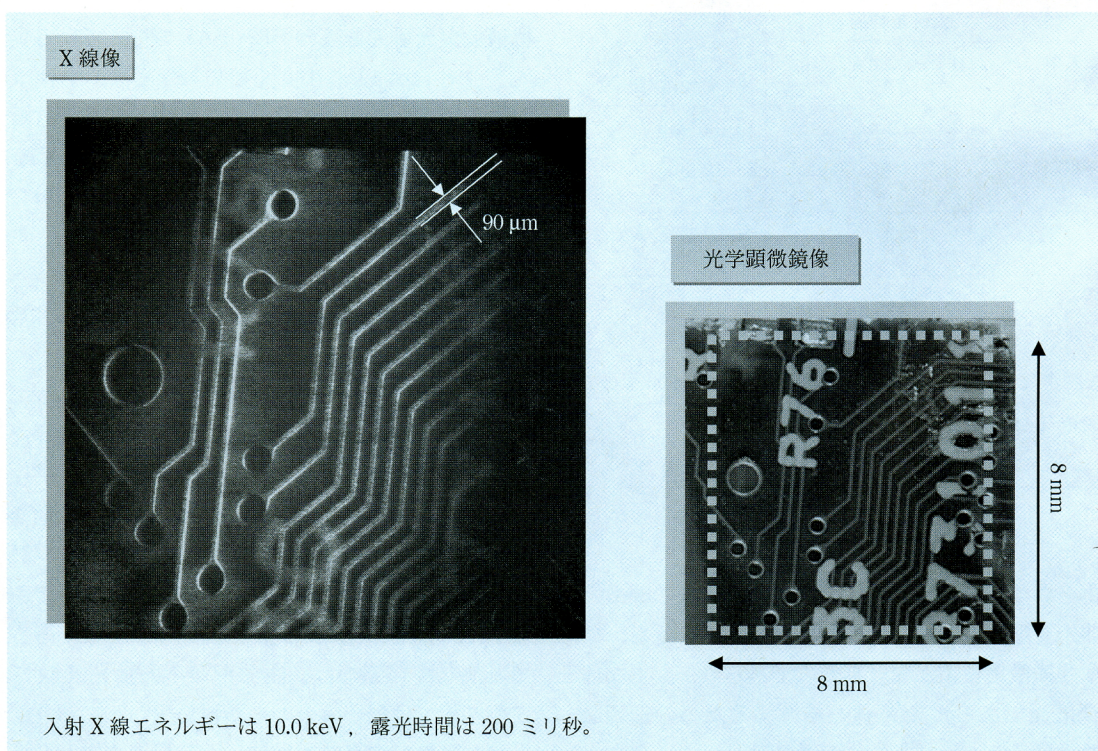


図 3 非走査型蛍光 X 線顕微鏡によるプリント配線基板の X 線像（左）および観察対象視野の顕微鏡観察結果（右）

る) のは、ある種の立体的な形状効果である。散乱 X 線に起因するものも含まれており、元素イメージングの観点からは本来バックグラウンドであるが、補正・分離

して解析すれば、三次元的な形状情報として利用し、元素分布との関係を検討できる。高画素数の画像データであるからこそ、画像の細部を詳細に議論することが可能

になるのである。

顕微鏡画像としてのもう一つの重要な要素は、空間分解能である。解像度チャート等を用いて評価した空間分解能は $15\sim 20\ \mu\text{m}$ である（ここでは、コリメーターの平行度が $6\ \text{mrad}$ 、試料表面と検出素子の間の距離が約 $3\ \text{mm}$ であるので、その積とよく対応する）。この空間分解能はさらに改善できると好ましく、筆者らも分解能向上の努力を継続している。しかし、図3の画像において、より注目していただきたいのは、撮像時間である。 $8\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$ (1000×1000 画素) の撮像に要した時間はわずか 0.2 秒であった。微小ビームを用いる走査型顕微鏡の思想のままで、同様のことを行おうと思った場合は、1点あたりの測定時間を走査に要する時間も含めて 200 ナノ秒程度にまで短縮する必要がある、今後いかに順調に技術が進歩したとしても、そう容易ではないだろう。

非走査型の技術は、広い視野を高画素数で、しかも迅速に測定する分析手法として非常に優れている。従って、不安定な試料を短時間で評価したり、動的变化を追跡するのに適している。測定に際して試料を連続的に走

査する操作が不要であるから、特殊環境下の試料や、振動に敏感な試料の観察も可能となる。

(2) 動画イメージング

前述のとおり、非走査型の技術では、高画素数の撮像を短時間で達成できるため、撮像を連続的に繰り返すことにより、試料中の元素分布の時間変化に対応する動画を得ることができる。蛍光X線の動画イメージングは、非走査型顕微鏡によって初めて可能になった技術である。図4は、亜鉛樹枝状晶が電解によって成長する過程を撮像した連続画像 ($12\ \text{mm}\times 9\ \text{mm}$, 1000×750 画素, 600 枚) から一部を抜き出したものである。この実験では、中心に負極、外周に正極を持ち、 $0.36\ \text{M}$ 濃度の硫酸亜鉛水溶液を薄い層として満たした電解セルを用いた。亜鉛のK吸収端より少し上のX線を入射して、電圧をかけ始めると同時に撮像を開始し、 0.1 秒の露光と読み出し・転送を繰り返して連続的に記録を行った。BL-16A1の多極ウィグラーに多層膜モノクロメーターを組み合わせた(図2)高輝度光源によって、このような短い露光時間でも十分鮮明な像が得られ、樹枝状

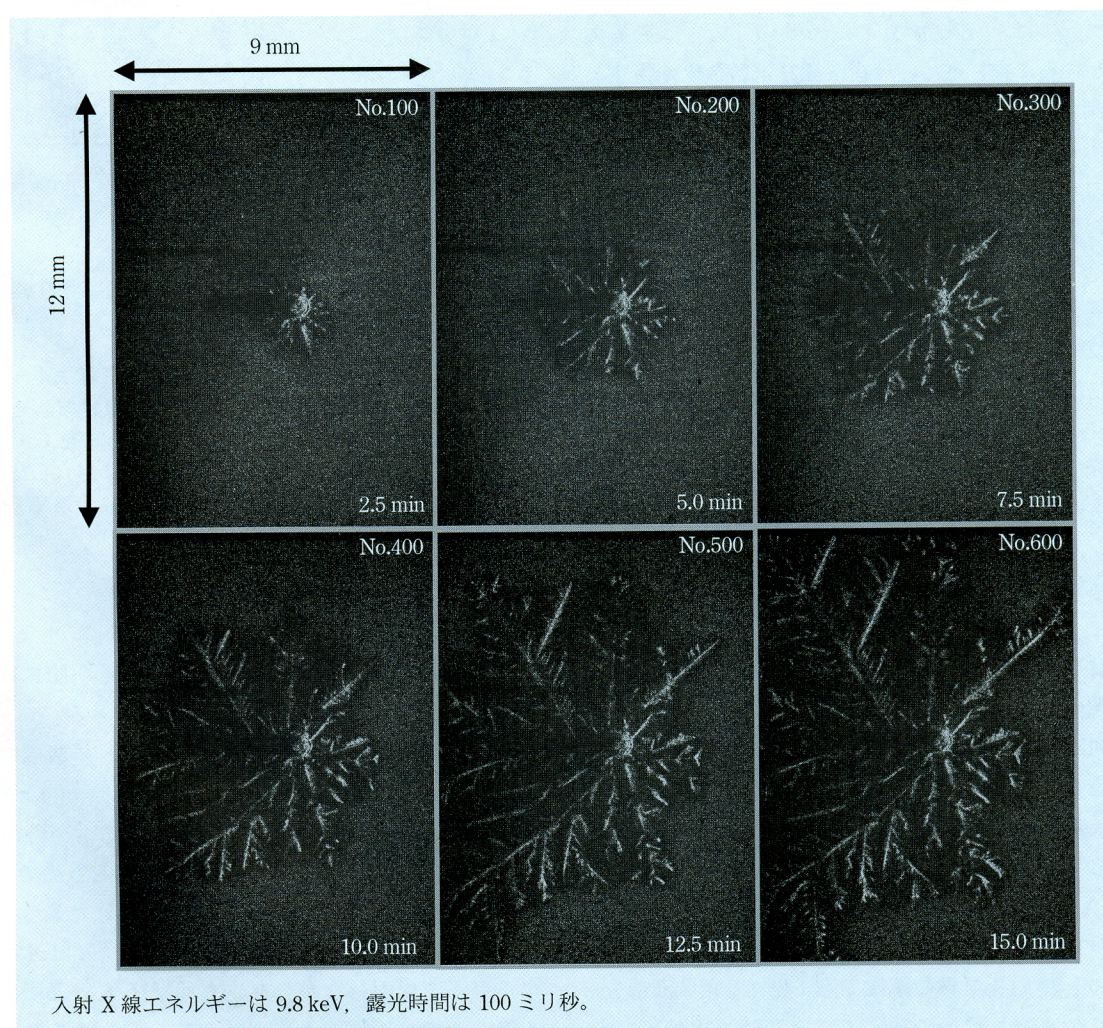


図4 亜鉛樹枝状晶の電解析出過程のX線像連続撮像結果

品の成長過程のリアルタイム観察が可能となった。この画像からは、100 μm 前後の太さの針状晶が枝分かれを繰り返しながら成長していく様子が観察される。電気分解により析出する金属の形状については、成長するランダムパターンを解釈する研究として多くの観察報告があり、この例で取り上げている亜鉛樹も、樹枝状晶成長様式の典型例としてよく研究されている。筆者らは特に、複雑さから研究例の少ない複数金属を含む系を取り上げ、元素識別のできる蛍光X線顕微鏡の特徴を生かし、組成によるパターン変化を詳細に研究している¹¹⁾。これまでこのような系を元素識別能力のある顕微鏡で研究することには困難が多くあった。溶液中の金属イオンの拡散過程は成長様式に影響を与えるため、金属イオン移動の全体状況を広範囲に評価することが重要である。さらに、微細な結晶の成長過程や枝分かれの詳しい様子を観察するために、高画素数（さらには高空間分解能）の画像を得ることが必要であり、それも短時間の連続撮像ができて、初めて輸送機構を考察することも可能になるのである。非走査型蛍光X線顕微鏡は、一般的な固体の試料のみでなく、ウェットな系やガス系等の試料も扱うことができ、広範囲・高画素数での物質輸送等の観察に威力を発揮する。

材料研究では、従来からの *in-situ* の分析・構造解析の概念をさらに推し進め、分析装置を試料合成や物性・機能評価の環境そのものと融合させ、様々な物質の合成・制御条件、あるいは外部より印加される電場、磁場、圧力、温度といった物理パラメーターの変化、光等による刺激に対する応答との関連の直接観察を重視する動きが強まっている。X線は、もとより真空や不活性な雰囲気が必要としないプローブであり、動画イメージングの技術を取り入れることによって、このような研究はかなり加速されることが期待される。特に反応初期過程における生成物の不均一な組成分布の時間変化等は、材料開発の観点で非常に有用な情報である。蛍光X線像は元素の濃度に関する情報を強度として含んでおり、定性的な分布観察だけでなく、定量的な画像解析によりさらに検討を進めることができる。

(3) 構造・化学状態イメージング⁸⁾¹⁰⁾

放射光の波長可変な単色X線を用いると、単なる元素の識別にとどまらず、構造や化学状態の情報を含む高付加価値のイメージングを行うことも可能である。図5は、茨城県の筑波山山頂付近で採取した^{かくせんせき}角閃石ハンレイ岩表面の非走査型顕微鏡による蛍光X線像(a)およびXAFS(X線吸収微細構造)イメージングによるスペクトル(b)である。Feの蛍光X線によるコントラストが観測される領域(光学顕微鏡像で黒く見える角閃石部分)で得られた蛍光X線像の積分強度を入射X線のエネルギーの関数としてプロットすることにより、XAFSに

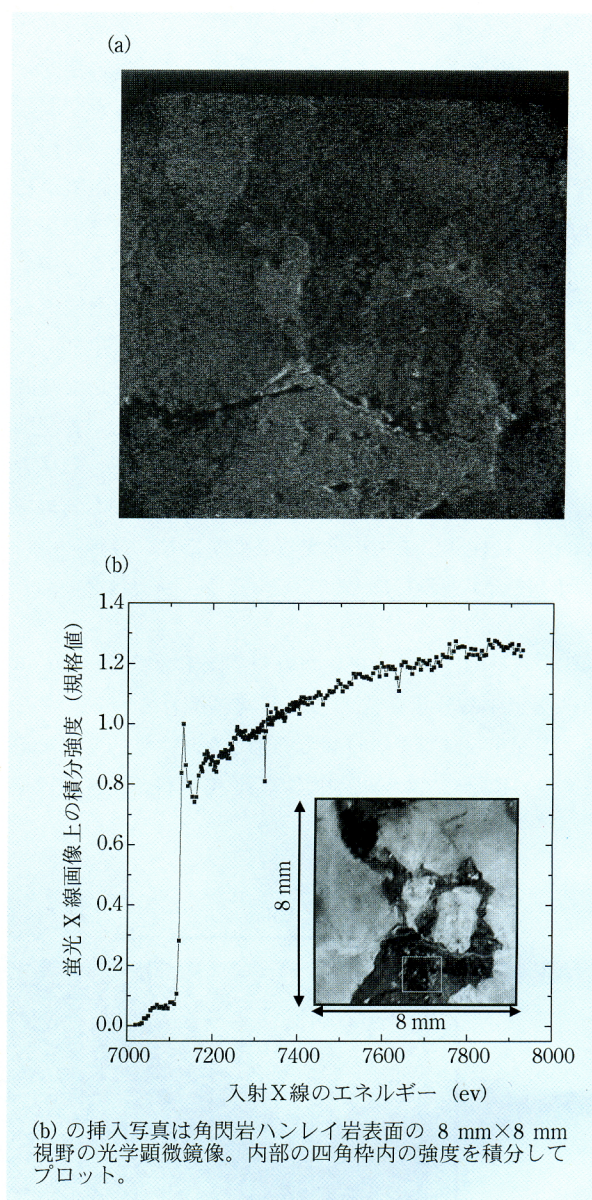


図5 角閃石ハンレイ岩のX線像(a) (入射X線エネルギーは7.2 keV、露光時間1秒) およびSi(111)結晶モノクロメーターを用いて照射X線エネルギーを1~2 eVステップで変えて250枚撮像(露光時間1秒)したときの照射エネルギーに対する角閃石部分の積分強度プロットによるXAFS(b)

対応するスペクトルが得られた。プリエッジや吸収端直上の鋭いピーク等、吸収端近傍の構造も^{めいりょう}明瞭に認められ、鉱物中に含まれる鉄化合物が推測できる。

XAFSは、吸収端近傍に認められるX線吸収スペクトルの特徴的な変化に着目するもので、標準的な透過法のほか蛍光X線法によっても測定されるが、粉末X線回折法等と同様、平均的な構造情報を得る方法であるという理解の下に、測定対象が均一に分布した適度なサイズの試料を準備することになっている。入射X線のエネルギーを掃引しながら非走査型蛍光X線顕微鏡による撮像を繰り返すと、荒っぽく言えば、蛍光X線法によるスペクトルを画素の数だけ、つまりは100万セッ

ト同時に測定したのと同じことになり、均一試料ではなく、異なる原子配列の物質が10～数10 μm サイズで分布し、共存・競合する系の観察も可能になる。また、吸収端のケミカルシフトに着目すると、同一元素の異なる化学状態のイメージングを簡便に行うこともできる。その一例を図6に示す。この例では、金属銅の表面の一部が錆びて緑青が出ているものを、銅の化学状態の違いとして検出している。当該領域 (Area 1) の積分強度をX線エネルギーに対してプロットしたグラフには、価数の違いによる吸収端シフトが明瞭に認められ、参照試料 (標準物質) の吸収スペクトルと対比させて詳しい状態分析を行うことが可能である。

筆者らの上述の測定では、1枚の画像の露光時間が1秒程度であり、通常の蛍光XAFSスペクトルを測定するのとあまり変わらない時間で、約100万画素のXAFSイメージングを実現している。他方、デジタル画像の輝度階調は、現時点の技術では、多くの場合10～14 bit程度しかなく、X線強度変化を定量的に議論するためには、複数枚の撮像・読み出しを行ったものをコンピュータ上で積算することによって高品位化を図ることも必要であるかもしれない。

入射X線のエネルギーとして特に吸収端を選んで掃引しながら蛍光X線強度を撮像するとXAFSイメージングになるが、本稿で述べている蛍光X線顕微鏡とは少し観点を換え、蛍光X線ではなく散乱X線に注目しエネルギー掃引範囲を適切に選ぶと、散乱角が約90度に固定された配置でのエネルギー分散型の回折イメージ

ング用としても非走査型蛍光X線顕微鏡の構成をそのまま利用できる¹³⁾。また、蛍光X線に注目する場合でも、ブラッグ条件近傍での蛍光X線強度の変化に着目するX線定在波イメージング、干渉効果による蛍光X線コントラストを応用する界面イメージング等、三次元的なナノ構造解析への応用もいろいろと考えられている。

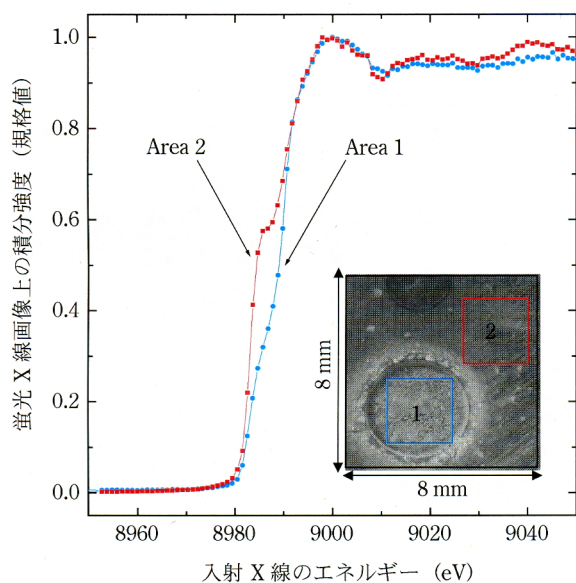
(4) 多元素同時イメージング (カラーイメージング)

蛍光X線分析法による元素の識別は、検出される蛍光X線のエネルギーを測定することにより行われる。非走査型蛍光X線顕微鏡では、蛍光X線によってCCD素子内で発生する電荷量がエネルギーによって異なることに注目する方法と吸収端コントラストを利用する方法が考えられる。後者は、吸収端の高エネルギー側と低エネルギー側で画像を撮像して、演算を行うことによって目的の元素の画像を得るというものである。先に示した画像データの多くは、実用上の簡便さ故に、この方法によって取得された。しかし、これでは、多数の元素を含む系の観察には不十分である。

多元素同時イメージングを行うためには、前者の方法、すなわち単一光子計数法¹⁴⁾が有望である。この方法では、信号の積算をほとんど行うことなく、頻繁に読み出しを行い、得られた各ピクセル値を、あらかじめ決めておいた閾値と比較することにより、着目している元素の信号であるか否かの判定 (0または1への2値化) 処理を行う。階調10 bitの蛍光X線像を1枚得るためには、1024回の撮像・読み出しを行う必要がある。すなわち、この方法では、高速の読み出し・画像転送・処理のハードウェアおよびソフトウェア技術がきわめて重要である。最近、筆者らは、高速の単一光子計数法が可能なシステムを完成させた。

3 蛍光X線顕微鏡の展望

蛍光X線顕微鏡は、新しい分析技術である。もとより一つの分析技術が、世の中で広く使われるようになり、空気のような当たり前の存在、汎用のツールになるまでには長い道のりが必要である。そのステップの一つ一つが、多くの研究者、技術者の貢献によって築かれて行く。当然、その過程で、また何か新しい発見・発明も生まれ出てこよう。そうでなくても、X線の分野は、放射光等の新光源の話題に事欠くことがなく、この先もしばらく新しい技術が続々と登場すると考えられる。筆者らは、非走査型の蛍光X線顕微鏡にかかわってきたが、世界中のX線・放射光の専門家は、むしろ微小ビームを作る研究を熱心に行っている。これは微小領域の分析としての顕微分光法とともに、走査型蛍光X線顕微鏡によるイメージングを目指したものである。放射光微小ビームによる顕微分光は、やがて次世代の新放射光源の登場により、電子顕微鏡に肉薄する空間分解能に



図中に光学顕微鏡像で示した8 mm×8 mmの視野について、Si (111) 結晶モノクロメーターを用いて照射X線エネルギーを1～2 eVステップで変えながら各点1秒露光で180枚の撮像を行った。

図6 銅板上の緑青部分 (青枠, Area 1) と銅部分 (赤枠, Area 2) の積分強度プロットによるXAFS

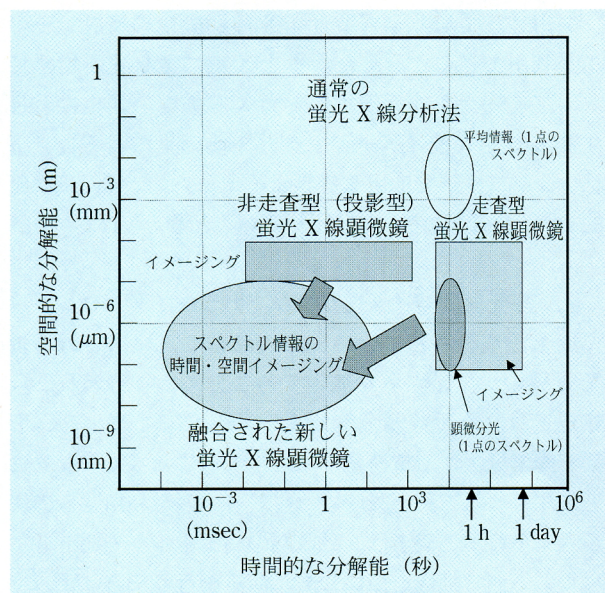


図7 蛍光 X 線顕微鏡のカバーする時間および空間スケール

到達し、実空間でナノ構造を議論する時代が到来するであろう。他方、高品位の画像化や広い面積の試料の観察は、そのような微小ビームによる走査型の技術ではかえって難しいのではないだろうか。

図7は、蛍光 X 線顕微鏡における空間的、および時間的なスケールを整理したものである。筆者らは、実用的な蛍光 X 線顕微鏡を実現するためには、走査型と非走査型の蛍光 X 線顕微鏡を融合、または単純に併用することが必要であると考えている。そのことにより、顕微分光とイメージングの両方、あるいは高い空間分解能と広い面積、あるいは時間分解能（速度）の全部を満足させることが可能になるであろう。必要とするビームが、一方は究極的な微小ビームであり、他方は広面積をいっぺんに照射できるだけのサイズの高強度ビームであり、これらを作り出す光学系は種類の異なるものである。従って、特に現存するビームラインを前提に考えると、全く同じ場所で、同時に両者を使おうとするのは、なかなか大変であるかもしれないが、複数のビームラインの併用や運用面での工夫を厭わなければ、近い将来に実現することは可能と考えられる。

また、元素イメージングと構造・化学状態イメージングとが同じ装置で同時または連続的に行われるような高付加価値な融合もいっそう進むのではないかと期待される。本稿でも XAFS イメージングの例を示したが、X 線回折像と蛍光 X 線像を同時に取得するようなイメージングも有力である。

表2に、筆者らが思い描く蛍光 X 線顕微鏡の機能や仕様の将来像の一部を列挙した。いずれも、それなりに技術的な課題があり、今日明日にもすぐに実現するというものばかりではない。イメージングについては、非走査型の技術が今後も伸張・拡大すると考えられる。あら

表2 蛍光 X 線顕微鏡の将来

近未来に新たに実現が期待される機能・仕様	備考
蛍光 X 線高分解能顕微鏡 (1~10 nm 領域の分光分析)	第4世代放射光源によるナノビーム実現
蛍光 X 線リアルタイム顕微鏡 (ミリ秒レベルの連続動画イメージング)	現状の非走査型顕微鏡の機能強化
蛍光 X 線過渡応答顕微鏡	極短パルス励起光源と一体利用
蛍光 X 線偏光顕微鏡	完全性の高い直線偏光または円偏光ビームの利用
蛍光 X 線三次元顕微鏡・断層顕微鏡	試料内での干渉効果や定在波の利用
シンクロトロン放射光を使用しない蛍光 X 線顕微鏡、光源内蔵型・一体型の蛍光 X 線顕微鏡	小型 X 線源や電子顕微鏡技術等との融合
光源を全く使用しない蛍光 X 線顕微鏡	ラジオアイソトープ標識物質等の観察
超高速・超高画素数の新しい X 線検出素子	CCD に代わる新技術

ゆる蛍光 X 線画像データが動画であるようなことは当たり前になり、ピークパワーの大きな短パルス光源と組み合わせ、もっと高速の化学反応を観察しようとする研究も行われるようになるであろう。X 線の偏光やコヒーレンスを利用する蛍光 X 線顕微鏡も将来のテーマである。また、もっと基本的なこととして、今までよりも大きな試料の大きな視野を見、その同じ試料の特定の狭い領域をズームアップして観察するようなことも、早く実現して活用したい機能である。筆者らは、放射光を利用した実験研究を行ってきたが、より広い分野で活用されるためには、放射光以外の光源を用いて使用できる技術として発展させることも必要である。X 線源内蔵型あるいは X 線源一体型の新しいカメラシステムの開発も大きな課題であるし、カメラ側の技術としても CCD に代わるさらに高速・高画素数の素子が求められる。

蛍光 X 線顕微鏡を利用する科学研究は、非常に広範に考えられる。元素に敏感な動画計測技術は、化学反応等による物質移動を直接的にとらえることが可能であり、外界から印加される刺激等に対する応答を研究するのに有用であると考えられる。筆者らも、このような外からのアクティブオペレーションと結合させた動画計測による材料研究に取り組むとともに、多くの応用分野で活用できるような技術に育てあげたいと願っている。また、元素イメージングにとどまらない構造・化学状態イメージングも、付加価値の高い画像データとして本格的に利用されるのではないだろうか。小さな基板上に組成や合成条件の異なる微小試料を大量に並べ、そのすべての評価を一度に行うことにより、優れた材料の探索を行おうとするコンビナトリアル材料合成等への応用も大いに期待され、迅速な評価手段として有用性が確認されて

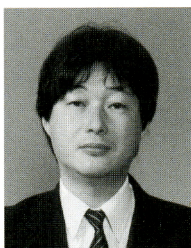
いる¹⁵⁾。

最後に、筆者らの蛍光 X 線顕微鏡に関する研究は、平成 13 年度より科学技術振興調整費「アクティブ・ナノ計測基盤技術の確立」(代表 藤田大介)の支援のもとに行われていること、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリーにおいて、高い優先度のビームタイム配分を受けることのできる S2 型課題 (2002S2-003) として採択され、飯田厚夫教授 (BL-4A)、澤 博助教授、若林祐助助手、内田佳伯技官 (BL-16A1) の協力を得ていることを記して感謝する。

文 献

- 1) D. Mills: "3rd Generation Hard X-Ray Synchrotron Radiation Sources: Source Properties, Optics, and Experimental Techniques", (2002) (John Wiley & Sons, London).
- 2) G. K. Schenoy: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **B199**, 1 (2003).
- 3) K. Janssens, F. Adams, A. Rindby: "Microscopic X-Ray Fluorescence Analysis", (2002), (John Wiley & Sons, London).
- 4) 飯田厚夫: X 線分析の進歩, **33**, 1 (2002).
- 5) K. Sakurai: *Spectrochimica Acta B*, **54**, 1497 (1999).
- 6) 桜井健次, 江場宏美: 特願平 10-229180; 特願 2002-138834.
- 7) 桜井健次, 江場宏美, 水沢まり: まてりあ, **41**, 616 (2002).
- 8) K. Sakurai, H. Eba: *Anal. Chem.*, **75**, 355 (2003).
- 9) K. Sakurai, M. Mizusawa: AIP Conference Proceedings (SRI 2003), in press.
- 10) M. Mizusawa, K. Sakurai: submitted to *J. Synchrotron Rad.*
- 11) H. Eba, K. Sakurai: submitted to *Phys. Rev. E*.

- 12) S. Bohic, A. Simionovici, A. Snigirev, R. Ortega, G. Deves, D. Heymann, C. G. Schroer: *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3544 (2001).
- 13) 桜井健次, 水沢まり: 特願 2003-318922.
- 14) 常深 博: 応用物理, **62**, 718 (1993).
- 15) 江場宏美, 桜井健次: 特願 2003-345930.



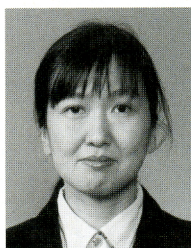
桜井健次 (Kenji SAKURAI)

(銻物質・材料研究機構材料研究所高輝度光解析グループ (〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1)。東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。◀現在の研究テーマ>X 線・放射光による新しい材料化学の開拓。◀主な著書>“X 線分析最前線”(分担執筆)(アグネ技術センター)。E-mail: sakurai@yuhgiri.nims.go.jp



江場宏美 (Hiromi EBA)

(銻物質・材料研究機構材料研究所高輝度光解析グループ (〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1)。東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。博士(理学)。◀現在の研究テーマ>複合酸化物ナノ結晶の合成法の開発と構造解析。



水沢まり (Mari MIZUSAWA)

(銻物質・材料研究機構材料研究所高輝度光解析グループ (〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1)。総合研究大学院大学数物科学研究科後期博士課程修了。博士(工学)。◀現在の研究テーマ>X 線反射率法による薄膜・ナノ粒子の構造解析。