

# 蛍光 X 線による元素のスナップショットおよび動画イメージング

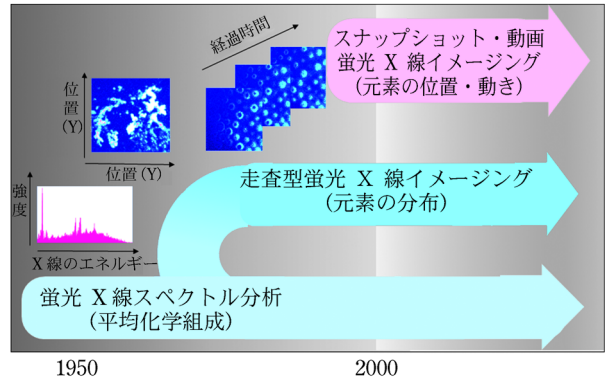
桜井 健次, 趙 文 洋

## 1 はじめに

蛍光 X 線スペクトル分析は、ほぼ均一とみなせる試料についての化学組成を調べる技術である。これに対し、蛍光 X 線イメージングは、試料に含まれる元素の不均一な分布を画像として提供する方法である。シンクロトロン放射光が本格的に利用されるようになった1980年代以後に急速に普及し、今日では、蛍光 X 線による元素イメージングは広く行われるようになっている。この技術は、試料を XY 走査する自動ステージと入射 X 線を試料上で小さくするための集光光学系（実験室系ではポリキャピラリ、放射光では KB ミラー等）を組み合わせるところが重要で、試料からの蛍光 X 線を検出する検出器には、蛍光 X 線スペクトル分析の場合と同じ検出器が用いられる。

一方、21 世紀に入る少し前くらいから、試料の XY 走査を行わずに蛍光 X 線イメージングを行おうとする新たな技術の潮流が出現している<sup>1)2)</sup> (図 1)。この方法は従来の蛍光 X 線イメージングではほぼ不可能とされていたスナップショットおよび動画の元素イメージングを行うことができ、新たな応用分野の拡大が期待されている。表 1 に示すとおり、このイメージングの方法では、入射 X 線を試料上で小さくするための集光光学系を使わずに、試料から出てくる蛍光 X 線を検出器の位置で画像にするための結像光学系を使用する。また、二次元の X 線検出器を用いることが必須の要件になる。技術としては、従来の蛍光 X 線分析・イメージングに対して上位互換性を有しているとも言え、試料の蛍光 X 線スペクトルを取得することも、元素別の画像を得ることもできる。

本稿では、スナップショットおよび動画の元素イメージングの具体的な測定例をまずご覧いただくこととする。その後、そのような画像を取得する原理や、装置・方法などを解説する。



20 世紀後半、半導体検出器の登場により多元素同時の蛍光 X 線スペクトル測定が可能になり、さらに集光光学系と試料の XY 走査を組み合わせることによりイメージングも可能になった。その後、二次元の X 線検出器の登場により、XY 走査を行わずにスナップショットや動画の元素イメージングができる技術が登場した。

図 1 蛍光 X 線による元素分析技術の変遷

表 1 蛍光 X 線技術の比較

	スペクトル分析	走査型イメージング	スナップショット・動画イメージング
得られる特長的情報	元素の種類と量 (平均化学組成)	試料内の元素分析	試料内の元素の位置・動き
光学系	必須ではない	集光光学系 (集光ミラー・キャピラリ等) を用いることが多い	結像光学系 (ピンホール、コリメータプレート、結像ミラー等) を用いる
検出器	半導体検出器 (注 1)	半導体検出器	二次元ピクセル検出器
典型的な空間分解能	なし	0.05~2 μm (放射光) 10~100 μm (実験室系)	10~50 μm
典型的な画素数	なし	高々 100×100	1000×1000 以上
典型的な測定時間	数秒~10 分	半日~1 日以上	10 ミリ秒~数分

(注 1) 分光結晶による回折を利用して蛍光 X 線スペクトルを取得するのに波長分散型の方法が知られており、こちらのほうが歴史ははるかに古い。XY 走査法によるイメージングでは、半導体検出器を用いるエネルギー分散型とのマッチングが圧倒的に優れている。

## 2 元素のスナップショットおよび動画イメージングの実例

### 2.1 イオン交換

図2は、ポリスチレン系のイオン交換樹脂（粉末状、100~200メッシュ）に水溶液中のニッケルイオンが取り込まれていく過程を動画の元素イメージングで捉えたものである<sup>3)4)</sup>。この実験では、露光時間を1分とし、イオン交換の進行に応じて1~5分ごとに読み出し・転送を繰り返し、合計60枚の連続的な動画として記録されている。ニッケルイオンが樹脂の表面から徐々に取り込まれてゆく過程が蛍光X線画像として詳しく観察されている。また、ニッケルのK吸収端の低エネルギー側（8.015 keV）で撮像すると、樹脂の形状等を反映した散乱X線像も得られる。

### 2.2 電解析出する金属結晶

図3は、溶液から電解析出によって成長する結晶を動画の元素イメージングで捉えたものであり、大強度のシンクロトン放射光が用いられた<sup>5)~7)</sup>。この実験で用いられた電解セルは、中心に負極、外周に正極をもち、硫酸亜鉛水溶液を薄層として満たしたものである。直流電圧を印加することにより亜鉛樹枝状結晶が負極から成長する。この実験では、露光時間0.1秒で1.5秒ごとに読み出し・転送を繰り返し、合計600枚の連続的な動画として記録されている。一連の画像から、周りを取り囲む電解液中の亜鉛イオンの濃度分布とパターン形成過程との関係を理解することができる。また、数10~100 μmの太さの金属亜鉛の針状結晶が枝分かれを繰り返しながら成長していく過程が定量的に理解できる。

以上の2例は、2000年代の初頭にシンクロトン放射光を用いて取得されたものである。変化を追うには強いX線強度が必要であることから、強力X線源の代表選手であるシンクロトン放射光に目を向けることは別に不思議なことではない。だが、それは必ずしも必須の要件ではない。通常のX線管（東芝製、銅ターゲット、1.5 kW）を用いて取得されているスナップショットおよび動画の元素イメージングの例を次に示そう。

### 2.3 ケミカルガーデン

図4(a)は、ケイ酸ナトリウム溶液中にカルシウムと鉄の無機塩の混合物を置いた際に生じるケミカルガーデンと呼ばれる化学反応の光学顕微鏡下での動画である<sup>8)</sup>。どちらの塩も淡黄白色であり、光学顕微鏡では区別はつかない。試料の表面にできるケイ酸金属塩の半透膜への水の出入りと、その結果生じる圧力変化による物質移動がこのような樹状の形状をもたらすと言われている。反応初期に白色の突起状の成長が顕著に起き、その後、元の粉末の塊がやや体積膨張して、その周辺部で色

調が変化している。

図4(b)は、この反応過程を動画の元素イメージングで捉えたものである。ここでは、カルシウムと鉄の画像を同時に取得している。初期には試料内で均一に分布していた鉄が、時間とともに中央部から周辺部へ移動している。カルシウムは、このフレームに含まれていない非常に早い段階で突起状の移動を生じるものの、その後は、顕著な移動を生じていない。

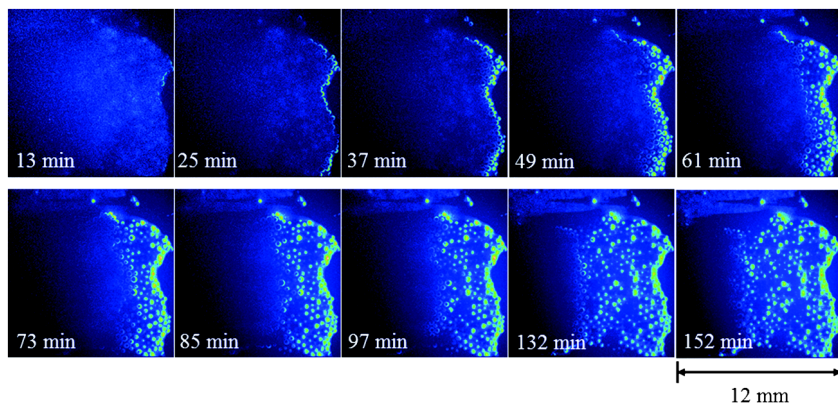
光学顕微鏡写真（図4(a)）と見比べると、原料がもつた場所の周辺部、色が濃くなっている部分に鉄が多く濃集し、カルシウムは突起状の場所やもとの原料のあった場所に分布していて、結果的に、光学的な色の違い、元素の分布、濃集と対応していることがよく理解できる。このようにX線画像を元素で色分けすることにより、ケミカルガーデンの成長が元素の個性を強く反映したものであることが明らかになった。

図5は、得られたX線の元素別の動画像を用い、鉄とカルシウムの移動挙動の違いを半定量解析したものである。光学顕微鏡写真に示された原料の周辺部の色の濃い領域A、原料中心部に近い淡黄白色の領域Bについての蛍光X線スペクトルの時間変化を示した。鉄の蛍光X線強度（図5(d)はカウント数を稼ぐためにK $\alpha$ 線とK $\beta$ 線の総和をとっている）は、時間とともに、周辺部であるAでは増加し、9時間程度でほぼ一定値に飽和するのに対し、中心部に近いBでは減少し、やはり9時間後には安定した値になっている。これに対し、カルシウムの蛍光X線強度（図5(e)、同じくK $\alpha$ 線とK $\beta$ 線の総和）は、A、Bいずれの領域でも鉄のような顕著な時間変化が見られていない。以上のように動画像を検討することで、移動挙動をさらに明瞭に理解することができる。図4(b)は1時間を単位とするゆっくりとした反応の動画であるが、原論文<sup>8)</sup>では3分程度の短い時間の変化もまた追えることが示されている。

## 3 元素のスナップショットおよび動画イメージングの方法について

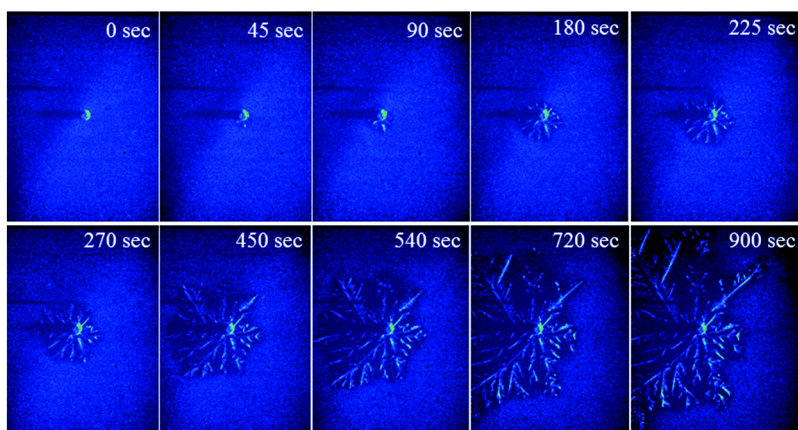
### 3.1 なぜこれまで動画が得られなかったのか

従来の蛍光X線イメージングでは、XY走査の開始点と終了点では測定の時刻が違うため、動画の取得は困難である。すなわち、動画を得るには、試料のXY走査を行うことなく、いわゆる投影型の方法で蛍光X線の画像を得る必要がある。この違いを確認するために、表1を再度見ていただこう。投影型の蛍光X線イメージングでは、第一に分析視野全体にX線を広く照明すること、第二に二次元コリメータ板やピンホール、あるいは非球面ミラー等の結像光学系を用いて、試料の元素分布に対応するX線像を作りだすこと、第三に、そのX線像をデータとして取得するために、二次元のX線検出器を使用することを特色とする。



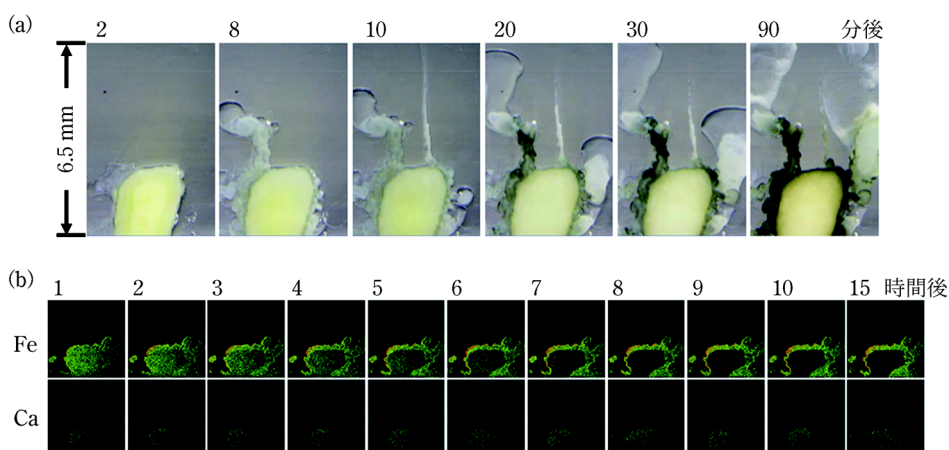
放射光施設の偏向電磁石ビームラインで 8.5 keV の単色 X 線使用（ニッケルの K 吸収端の高エネルギー側）。イオン交換樹脂（Dowex A-1）に、濃度 2 M の塩化ニッケル水溶液を濾紙を介してゆっくり供給し、その間の蛍光 X 線画像の変化を観察している。画像に映っている多数の球状の粒子がイオン交換樹脂であり、最初は外周部が明るく内側が暗いように見えるが、時間の経過とともに内部も含めて明るくなっており、ニッケルイオンが樹脂の内部深くまで侵入していることがわかる。放射光は画像の右側から左側に向かって照射されている。

図 2 イオン交換樹脂に捕捉される元素の動画イメージング



多極ウィグラーの放射光ビームラインで多層膜モノクロメータ使用（入射 X 線エネルギー 9.8 keV の準単色 X 線（亜鉛の K 吸収端の高エネルギー側））。硫酸亜鉛の初期濃度は 360 mM、印加電圧は DC 2.5 V。0 秒の画像で見えている中央の丸い形状の部分が負極である。放射光は画像の右側から左側に向かって照射されている。

図 3 電解析出する元素の動画イメージング



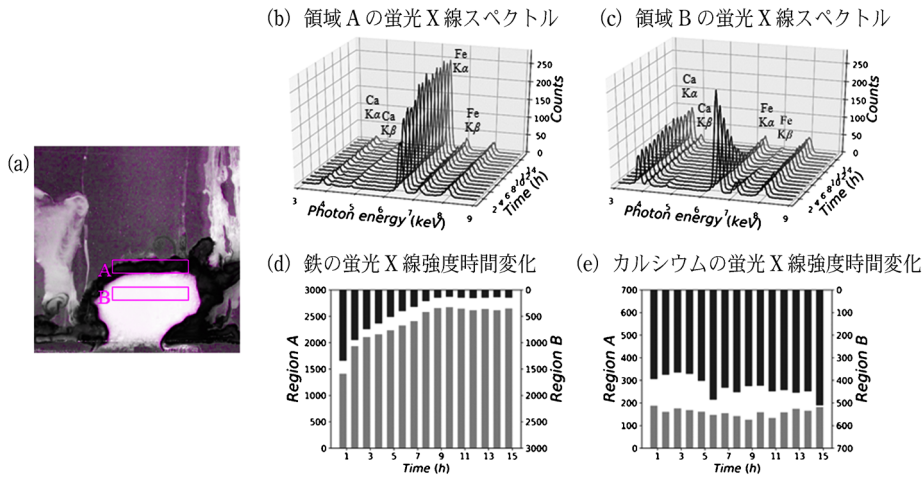
実験室系の X 線源（1.5 kW Cu の X 線管）と結晶モノクロメータ使用（入射 X 線エネルギー 8.04 keV）図 6 のセットアップを用いた。

(a) ケイ酸ナトリウム溶液中にカルシウムと鉄の無機塩を置いた際に成長するケミカルガーデンの連続光学顕微鏡写真。

(b) 集めたデータを 1 時間 / フレームとして編集した 2 元素同時の動画イメージング。上段が鉄、下段がカルシウム。

図 4 ケミカルガーデンの動画元素イメージング





光学顕微鏡写真 (a) に矩形で示した注目領域 A, B についての蛍光 X 線スペクトルの時間変化 (b), (c)。領域 A, B についての鉄とカルシウムの蛍光 X 線強度 (K $\alpha$  線と K $\beta$  線をあわせた面積強度) の時間変化 (d), (e)。

図 5 X 線元素動画を用いたケミカルガーデンの反応解析

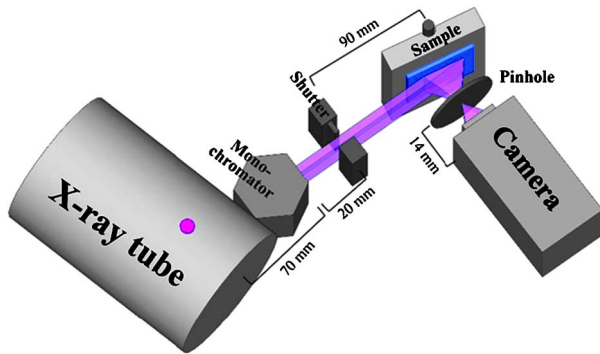


図 6 元素のナップショットおよび動画イメージングを取得できる蛍光 X 線分析装置

実質的なところでは、結像光学系と二次元検出器の二つの技術要素が必要なだけである。しかも、現在では、そのどちらも入手しにくいものではない。図 6 に装置構成の模式図を示す。図 4 (b) や図 5 のデータは、このようなセットアップを用いて取得された。

### 3.2 蛍光 X 線の結像を行う方法

試料上で蛍光 X 線を発生している部位を投影像として検出器上に記録するには、例えば次のような方法がある。二次元コリメータ板を試料に非常に近いところに置くと、1:1 の正立像が高い効率と良好な空間分解能で得られる<sup>9)</sup>。図 2, 図 3 に示した動画イメージングでは、この方法を用いている。二次元コリメータ板は石英製キャピラリを集合させた板が市販されている。6  $\mu\text{m}$  径の穴で、1 mm 厚さの板を使うと角度発散を 6 mrad におさえることができる<sup>1)~3)</sup>。個々の管の壁を X 線が透過しないように内部は金やロジウムなどの金属でコーティングすると、4~12 keV の蛍光 X 線に対して使用

することができる。概念図が似て見えるために誤解されることがあるが、X 線の集光素子の一つであるポリキャピラリとは異なる。二次元コリメータ板は薄いもので、コリメータ板内部の管壁面での X 線全反射は利用しない。

また、ピンホールカメラの原理を利用すると、拡大または縮小した倒立像を得ることができ、空間分解能はほぼピンホールの径で決まる。図 4 (b) に示した動画イメージングでは、この方法を用いている。ピンホールも市販されているが、金属タングステン箔にレーザー等で穴あけ加工することでも容易に得られる。上記の方法では、空間分解能は 10~20  $\mu\text{m}$  程度に達するが、特にピンホール法の場合は、試料によっては蛍光 X 線強度の損失を避け、あえて 50~100  $\mu\text{m}$  程度の分解能で画像を取得する選択肢も考えられる。さらに、高価ではあるが、非球面ミラー等を用いた結像光学系では、1  $\mu\text{m}$  もしくはそれ以下の空間分解能も得られる。

### 3.3 可視光用冷却 CCD/CMOS カメラの利用

ナップショット&動画の元素イメージングを行うためには、通常の蛍光 X 線分析に用いられる半導体検出器を、エネルギー分解能のある二次元 X 線検出器に置き換える必要がある。そのような最先端のピクセル検出器は、世界中でいろいろな研究機関によって熱心に開発されており<sup>10)11)</sup>、それらを利用することも、もちろん将来は有望である。だが、その代りに、はるかに安価で、誰もが手軽に購入することができ、最良とは言えないまでも、すぐに利用できる製品がある。それらを用いて実際に蛍光 X 線の動画イメージングができることを示そう。冷却 CCD カメラ<sup>12)</sup>、冷却 CMOS カメラ<sup>13)</sup> (いずれもモノクロ) は、科学用途では光学顕微鏡等に

表 2 元素のスナップショットおよび動画イメージングに利用できる二次元検出器

	タイプ A	タイプ B	タイプ C
センサー素子	TC215 (Texas Instruments) CCD	CCD47-10 (e2V) CCD	CIS2521 (Fairchild Imaging) Scientific CMOS
画素数	1000×1018	1024×1024	2560×2160
ピクセルサイズ	12 μm×12 μm	13 μm×13 μm	6.5 μm×6.5 μm
総有効面積	~150 mm <sup>2</sup>	~170 mm <sup>2</sup>	~230 mm <sup>2</sup>
有感厚さ	なし	~10 μm	~10 μm
カメラ	C4880-01 (Hamamatsu)	C4880-50 (Hamamatsu)	pco edge 5.5 (PCO AG)
A/D 変換器	10 bits/14 bits	16 bits	16 bits
電子冷却	-30 °C (水冷)	-30 °C (水冷)	5 °C (空冷)
フレームレート	4 fps/0.25 fps	0.25 fps (slow mode)	33.6 fps
エネルギー分解能 (@MnK $\alpha$ 5.9 keV)	エネルギーの識別を省略	150 eV	220 eV

取りつけて使用されているが実はほぼそのままで蛍光 X 線スペクトル分析やイメージングを行うことができる。

表 2 に利用可能な二次元検出器の例を示す。図 2, 図 3 の動画データは、タイプ A のカメラで取得された。この CCD 素子は、速度を落として読み出せば、通常の半導体検出器と比較しても遜色のないエネルギー分解能も得られるが、図 2, 3 の測定では、高速での読み出しを行い、エネルギー分解能、すなわち元素識別能力のない状態で使用されている。この場合、元素の識別は、入射 X 線のエネルギーが可変な放射光の利点を利用して行うことができるが、多元素同時のイメージングができないのは不満が残る。タイプ B, タイプ C では、多元素同時のイメージングを行うことができる。図 4 (b) の動画は、タイプ B の検出器によって取得されたものである。

### 3.4 元素情報 (エネルギー) と位置の両方の読み出し

結像光学系を経て形成される X 線像を冷却 CCD や冷却 CMOS カメラで記録する場合、単純に蓄積を続けると X 線の強度の像は得られるが、元素の情報は得られない。半導体検出器の場合でも、低いエネルギーから高いエネルギーまでの全スペクトル領域の面積強度を求めると一つの強度値が得られるが、上記の画像は、そのような強度の場所による違いを画像化したものになる。

元素の情報を得る方法は、半導体検出器と基本的に同じであり、一つの X 線光子が作り出す電荷量を計測する必要がある。このために、短時間で画像を取得する単一光子計数モードが用いられ、CCD に関してはわが国

の常深、林田らの 1980 年代からの X 線天文学における先駆的研究<sup>14)15)</sup>が知られている。また、CCD を用いた X 線イメージングでは青木らの研究が知られている<sup>16)</sup>。

他方、現在ではピクセルサイズが小さいカメラが主流の時代になっており、高い空間分解能を得やすくなる条件が広がった半面、X 線光子によって生じる電荷が複数ピクセルに分散する (電荷分割)、X 線のエネルギー情報の判定が難しくなる問題が容易に生じる。すなわち、この電荷分割の補正方法が確立できるかどうか、スナップショット・動画の元素イメージングの成否を分ける重要ポイントである。空間情報とエネルギー情報同時に得るという文脈で単一光子計数法が語られることが多いが、単一光子計数自体は、通常の半導体検出器とほとんど変わらない操作であり、生じた電荷収集の過程に画像検出器が備えている専用読み出し回路を使うという点が違うにすぎない。それよりも、単一光子計数条件と見なせる状況下で、生じた電荷が複数の画素に別れてしまう事象は、まさに二次元検出器固有の問題である。機械的な単一光子計数法の画像処理によってこれまでに報告されてきた蛍光 X 線像がなぜ必ずしも品質がすぐれないのかという疑問は、この点を考慮すると明らかになると言ってよいだろう。この問題は、高画素数、高解像度の検出器であればあるほど顕在化する。さらに、最近の CMOS 技術を用いているカメラの場合には、素子のすぐ下に配線がなされており、そのような配線の影響も受ける。可視光用に設計、開発、使用されているカメラ、特に冷却 CMOS カメラをエネルギー分散型の二次元 X 線検出器として使用するのが容易ではなさそうだと信じられてきたのには、そのような理由があった<sup>13)17)</sup>。実際のところ、表 2 のタイプ C のカメラでは、ほぼ全部のイベントにおいて電荷分割が起きる。それほど小さな素子サイズである。この補正方法がわかっていなければ、こうしたカメラを使いこなすことはまずできない。基本、分割された電荷の本来の総和を求めることで情報の復元を目指す、分割のタイプを識別し、特定の場合にしか採用しない、というある種のフィルタリングを行うことで、この問題は解決できる<sup>13)17)</sup>。

タイプ B のカメラでは、そこまで激しい電荷分割は生じない。そのため、一光子によって発生した電荷が一つのピクセルにほぼおさまる、孤立したイベントを発見することは難しくない。その場合でさえ、周囲のピクセルへのわずかな散逸を監視することは大きな効果があり、良好で安定したエネルギー分解能 (元素識別能力) を得ることができる<sup>12)</sup>。ただし、多くの場合、読み出し速度に制約があり、速い動画には向いていない。将来を考えるとタイプ C が元素のスナップショットおよび動画イメージングにはよいだろう。

結論から言えば、一見ノイズ画像のようにさえ見える X 線像を連続収集し、その 1 枚 1 枚について、電荷分

割を考慮した解析を行い、元素別、もしくはX線エネルギー別に用意した空の画像を二次元カウンターとして用いることで、多元素同時のスナップショットの分析ができ、その際に、実際に起きている元素分布の変化の速度に見合った時間積分を行うことで、多元素同時の動画イメージングを達成することができる。

### 3.5 冷却 CMOS カメラによる蛍光 X 線スペクトル取得

実際に市販の冷却 CMOS カメラ（例えば表2のタイプC）を買ってきて目の前にあるとして、それをどうすれば、蛍光 X 線の実験に使用できるのかを説明しよう。こうしたカメラは可視光用途を念頭に置かれているので、ガラス窓があり、その外側にレンズをとりつけるマウントがある。まず、こうした部品は外し、代わりにアルミニウムを蒸着したマイラー膜やベリリウム箔といった X 線用の窓（X 線にとっては容易に透過できるが、可視光は通らない窓）をはりつける。最近の CMOS センサーのなかには素子上にポリマーレンズや近赤外線フィルターが実装されているものもある。X 線を、吸収し損失があるので望ましいものではないが、経験上、数 keV 以上のほとんどの蛍光 X 線の測定にはたいした影響はない。

図7は、表2のタイプCのカメラによって取得した絵皿の表側と裏側の蛍光 X 線スペクトルを示している<sup>13)</sup>。カリウム、カルシウム、バリウム、鉄などが観測され、表側のみ、コバルトのピークが得られている。この絵皿の表側は青い塗装がなされていた。その青がコバルトに由来するものであることが、この分析で明らかになった。実際の実験は、ただ多数の X 線像を短い時間間隔で収集するだけである。それを1枚ずつ、全ピクセルについて電荷分割の状況をサーベイし、補正された電荷量（明るさ）を元素の情報（蛍光 X 線のエネルギー）にひもづけ、全ピクセル位置について、そのヒストグラムを記録することで、元素別の画像が得られる。

あらかじめ決めた時間フレームで、そのデータを整理し直すと動画になる。

### 3.6 放射光を用いたスナップショットがそれほど美しい理由

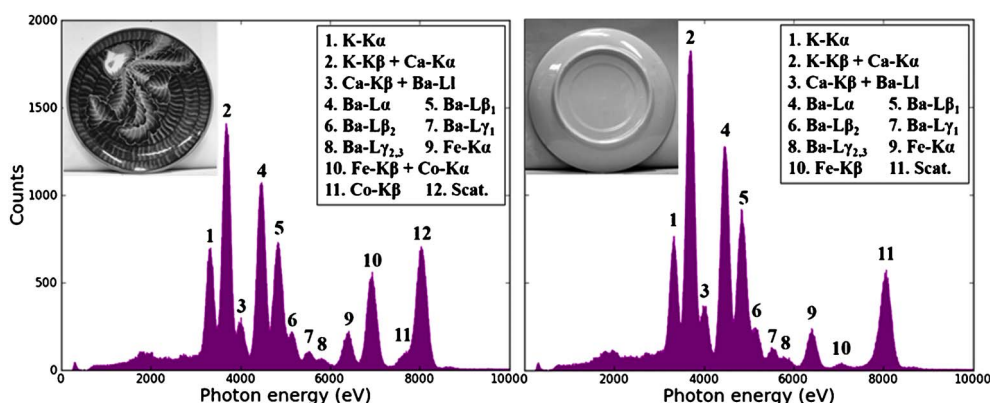
最後に、実験室系の X 線管に比べ、一見圧倒的に有利そうに見えるシンクロトロン放射光を動画イメージングに使う場合の注意事項について述べよう。

放射光は通常水平方向に長く、垂直方向に狭い。また水平方向に直線偏光している。この偏光性に着目し、検出器を 90 度方向、つまり偏光方向と同じ向きに設置して、散乱 X 線バックグラウンドの少ない蛍光 X 線スペクトルを得ることはよく行われている<sup>18)</sup>。この配置のまま、投影型蛍光 X 線イメージングを行なおうとしたらどうだろうか。垂直方向には狭いので、得られるのは正方形のような画像ではなく、横方向にだけ長く細い線状の強度プロファイルである。初期の偏向電磁光源では、サジタル集光のような技術があり、太い帯状の画像を得ることはでき、数枚撮像してつなぎ合わせるということもできたが<sup>3),4),6)</sup>、最先端の高輝度放射光では、そのような余地はほとんどない。つまり、放射光を普通に使うと、2次元的な像ではなく1次元のラインになってしまう。だからといって、カメラの設置の方向を 90° 変えてしまうと画像はとれるがこれでは、放射光の偏光性のために、散乱 X 線バックグラウンドは最強になってしまう。このため、主成分、高濃度の元素の高速動画イメージングは問題ないとしても、そうでない場合は、美しい画像は容易には得られない。

この問題を解決するためには、偏光方向と垂直な方向のビームサイズを拡大するなどの工夫が必要である<sup>19)</sup>。

## 4 おわりに

蛍光 X 線による元素のスナップショット・動画イメージングの事例と原理・方法および装置について解説した。今日では、蛍光 X 線の多元素同時の動画イメー



絵皿の表側（左）と裏側（右）の蛍光 X 線スペクトル。光学顕微鏡用の CMOS カメラでも通常の半導体 X 線検出器と比べて遜色ないスペクトルが得られる。図中の写真もまた同じカメラで撮影された。

図7 CMOS カメラによる絵皿の蛍光 X 線分析



ジングは、どこでも実行に移すことができ、決して難しくない。この動画イメージングの時間スケールは見ようとする化学反応の速度に合わせて設定することができる。入射 X 線の強度や注目している元素の濃度にもよるが、実験室系では、おおむね秒~数分を単位として変化するのが適用の目安になるのではないだろうか。空間分解能は二次元コリメータ板やピンホールを使用する限り高々10~20 μmにとどまるが、非球面ミラーなどを用い1 μm以下を目指すことも有望である。

この技術の拡張性についても言及しておく。試料の視野のすべての点の元素の情報を同時に取得している点は、動画以外の計測にも応用できる。多層膜の界面に分布する不純物元素を分析する方法として X 線定在波法が知られている。ブラッグ条件近傍での蛍光 X 線スペクトルの角度依存性から原子レベルの元素分布を解明できるが、面内に平均をとったような情報にとどまっていた。最近、本稿で述べたスナップショットの技術を活用した X 線定在波イメージングが用いられるようになった<sup>20)</sup>。またもう一つの明らかに重要な方向はモバイルユースである。電池などで駆動できる超小型 X 線源をカメラと一体化させることにより、X 線実験室の外へ測定対象を拡大することができる。また、様々な機器に組み込み、リアルタイムの観察に使用することも重要である。例えば高温での反応による元素移動の観察への応用等、興味深い応用である。どのように X 線を通し、どのように蛍光 X 線を検出するか、カメラはどこにどのように設置するか、といった設計が重要である。

多元素同時のイメージングではないが、試料と 2 次元検出器の間にゾンプレート<sup>21)</sup>や分光結晶<sup>22)</sup>のような分散素子を設置する手法もある。それぞれ空間分解能やエネルギー分解能を非常に高いものとする効用がある。21 世紀後半に向け、蛍光 X 線イメージングは更に発展することが期待される。

## 文 献

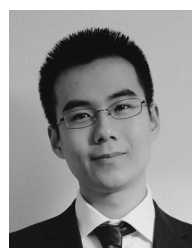
- 1) T. Wroblewski : *Synchrotron Rad. News*, **9**, 14 (1996).
- 2) K. Sakurai : *Spectrochimica Acta*, **B54**, 1497 (1999). [http://dx.doi.org/10.1016/S0584-8547\(99\)00071-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0584-8547(99)00071-3)
- 3) K. Sakurai, H. Eba : *Anal. Chem.*, **75** 355 (2003). <http://dx.doi.org/10.1021/ac025793h>
- 4) 桜井健次, 江場宏美, 水沢まり : *まてりあ*, **41**, 616 (2002). <https://doi.org/10.2320/materia.41.616>
- 5) K. Sakurai, M. Mizusawa : *AIP Conference Proceedings* **705** (Synchrotron Radiation Instrumentation 2003, San Francisco), p.889 (2004). <http://doi.org/10.1063/1.1757938>
- 6) 桜井健次, 江場宏美, 水沢まり : *ぶんせき*, **2003**, 644.
- 7) 江場宏美, 桜井健次 : *X 線分析の進歩*, **38**, 331 (2007).
- 8) W. Zhao, K. Sakurai : *ACS Omega*, **2** 4363 (2017). <http://dx.doi.org/10.1021/acsoomega.7b00930>
- 9) 桜井健次 : *X 線分析の進歩*, **33**, 245 (2002).

- 10) T. Tsuboyama, Y. Arai, K. Fukuda, K. Hara, H. Hayashi, M. Hazumi, J. Ida, H. Ikeda, Y. Ikegami, H. Ishino, T. Kawasaki, T. Kohriki, H. Komatsubara, E. Martin, H. Miyake, A. Mochizuki, M. Ohno, Y. Saegusa, H. Tajima, O. Tajima, T. Takahashi, S. Terada, Y. Unno, Y. Ushiroda, G. Varnerg : *Nucl. Instr. Meth.*, **A582**, 861 (2007).
- 11) L. Struder, S. Epp, D. Rolles, R. Hartmann, P. Holl, G. Lutz, H. Soltau, R. Eckart, C. Reich, K. Heinzinger, C. Thamm, A. Rudenko, F. Krasniqi, K.-U. Kuhnel, C. Bauer, C.-D. Schroter, R. Moshhammer, S. Techert, D. Miessner, M. Porro, O. Halker, N. Meidinger, N. Kimmel, R. Andritschke, F. Schopper, G. Weidenspointner, A. Ziegler, D. Pietschner, S. Herrmann, U. Pietsch, A. Walenta, W. Leitenberger, C. Bostedtf, T. Moller, D. Rupp, M. Adolph, H. Graafsma, H. Hirsemann, K. Gartner, R. Richter, L. Foucar, R. L. Shoeman, I. Schlichting, J. Ullrich : *Nucl. Instr. Meth.*, **A614**, 483 (2010).
- 12) W. Zhao, K. Sakurai : *Rev. Sci. Instrum.*, **88** 063703 (2017). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4985149>
- 13) W. Zhao, K. Sakurai : *Sci. Rep.*, **7** 45472 (2017). <http://dx.doi.org/10.1038/srep45472>
- 14) H. Tsunemi, K. Mizukata, M. Hiramatsu : *Jpn J. Appl. Phys.*, **27**, 670 (1988). <https://doi.org/10.1143/JJAP.27.670>
- 15) H. Tsunemi, S. Kawai, K. Hayashida : *Jpn J. Appl. Phys.*, **30**, 1299 (1991). <https://doi.org/10.1143/JJAP.30.1299>
- 16) 青木貞雄, 鬼木 崇, 今井裕介, 橋爪惇起, 渡辺紀生 : *X 線分析の進歩*, **46**, 124 (2015).
- 17) W. Zhao, K. Sakurai : *Journal of Synchrotron Radiation*, **26**, 230 (2019). <https://doi.org/10.1107/S1600577518014273>
- 18) K. Sakurai, A. Iida, Y. Gohshi : *Anal. Sci.*, **4**, 3 (1988). <https://doi.org/10.2116/analsci.4.3>
- 19) W. Zhao, K. Hiano, K. Sakurai : 投稿準備中(2019).
- 20) W. Zhao, K. Sakurai : *Physical Review Materials*, **3**, 023802 (2019). <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevMaterials.3.023802>
- 21) W. Yun, K. W. Nill : アメリカ合衆国特許 (2002)
- 22) K. Tsuji, T. Ohmori, H. Yamaguchi : *Anal. Chem.*, **83**, 6389 (2011).



桜井健次 (Kenji SAKURAI)

国立研究開発法人物質・材料研究機構先端材料解析研究拠点 (〒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>埋もれた界面の X 線・中性子解析。<主な著書>“新版 X 線反射率法入門” (講談社)。<趣味>味噌、梅干し、ジャムづくり。  
E-mail : sakurai@yuhgiri.nims.go.jp



趙 文洋 (Wenyang ZHAO)

筑波大学大学院数理物質科学研究科物質・材料工学専攻在学中 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)。筑波大学大学院数理物質科学研究科博士前期課程修了。工学修士。<現在の研究テーマ> X 線イメージング。  
E-mail : wenyang@yuhgiri.nims.go.jp