

# Readout

HORIBA Technical Reports

特集 X線ではかる

August 1994 ■ No.9

---

生物体内の元素を生きたままではかる  
—蛍光X線元素マッピング装置による分析—

In-Vitro Elementary Measurement of Living Samples  
-Analysis by X-ray Fluorescent Element Mapping Spectrometer-

福本夏生・柏原孝造

Natsuo FUKUNMOTO, Kozo KASHIHARA

(Pages23-31)

---

株式会社 堀場製作所



# 生物体内の元素を生きたままではかる — 蛍光X線元素マッピング装置による分析 —

## In-Vitro Elementary Measurement of Living Samples — Analysis by X-ray Fluorescent Element Mapping Spectrometer —

福本 夏生\*・柏原 孝造

Natsuo FUKUMOTO\*, Kozo KASHIHARA

### 【要旨】

中空ガラス製X線導管(XGT)により細いビームに絞った蛍光X線元素マッピングを開発して、さまざまな生体試料について非破壊計測の可能性について検討した。マメ科草本植物であるセイヨウミヤコグサの葉中元素分布の経時変化、脳石灰化病患者解剖標本の分析、水棲昆虫体内の金属元素分布などを実測例として示す。また、これらの研究を通して、より高感度、高分解能な分析装置に必要な要素技術課題についても検討した。

### Abstract

X-ray fluorescent element mapping spectrometer with a fine beam excitation by a hollow X-ray guide tube (XGT) of glass was developed and a possibility of non-destructive measurement for various biological samples has been studied. Time drift of the elemental distributions in the leaf of the bird's-foot trefoil, which is a herbaceous plant of the legume family, analysis of an anatomical specimen of a Fahr's disease patient, metallic elemental distributions in the body of an aquatic insect, etc. are shown as actual examples of measurement. In addition, elemental technology to achieve higher-sensitivity, higher-resolution analyzers have also been studied during our research.

### 1. はじめに

蛍光X線分析法は、励起・検出ともにX線を使用するため、各種の試料を何ら前処理を施さずに、ほとんどダメージを加えることなく元素の定性・定量分析が可能であるという長所を有している。とくに、エネルギー分散形検出器を使用すると、試料中のほとんどの元素を同時に短時間で分析することができるため、生産現場での品質管理などに広く用いられている。また、電子線やイオンのような荷電粒子を利用する手法と違い、通常は大気中で分析ができるというのも大きな利点である。

一方、生命現象に関する研究の分野では、生体になるべく外乱を与えず、生きたままで分析を行いたいという要望が非常に強い。とくに、生体に何らかの刺激

\*工業技術院物質工学工業技術研究所

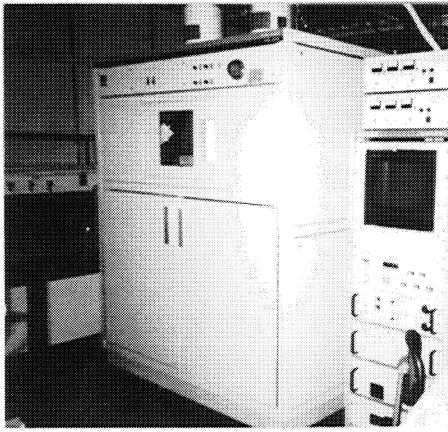


図1 蛍光X線マッピング装置 (MESA-2000K)  
X-ray fluorescent element mapping spectrometer  
(MESA-2000K)

を与えたとき、それに対応して生体内で物質移動する状況などを実時間で観測することができれば、刺激応答や生体の防御機構の解明にきわめて有用であることが知られている。このニーズを満たす分析手法は未だに十分開発されているとはいえない。このため、1988年度より6ヶ年にわたり、科学技術庁の科学技術振興調整費により「生体の分子レベルにおける高感度・高分解能、非破壊計測技術の開発に関する研究」がおこなわれた。本プロジェクトでは、NMR法、および赤外線からX線までの各波長の分光法を用いた生体の非破壊計測技術に関して研究がなされ、多くの先進的な成果をあげることができた。本稿で紹介する蛍光X線元素マッピング装置による研究はその一端である。

## 2. 蛍光X線元素マッピング装置の開発

本研究はガラス製のX線導管(X-ray Guide Tube:XGT)を使った蛍光X線マッピング装置(MESA-2000K)を開発して行った(図1)。

### 2.1 X線の集束

X線は荷電粒子ではないため、電子線やイオンビームのように電場や磁場を用いて収束させることはできない。また、極めて波長の短い光であるため、通常の光学レンズや反射鏡を用いて集束することもできない。従来、このような理由から、蛍光X線分析法は微小領域の分析を行うにはあまり適していないと考えられてきた。したがって、市販の分析装置の多くは、直径1cm以上の試料全体の平均組成を分析することを前提に設計されている。金属製のコレリメータを用いた微小領域用蛍光X線分析装置が販売されてはいるが、励起X線を集束していないため、得られる信号強度がX線ビーム径の二乗に反比例して弱くなり、高分解能化と高感度化を同時に達成することが困難である。

しかし、近年になってX線の全反射効果\*1を利用した斜入射型反射鏡や、湾曲結晶モノクロメーターを用いたX線の集光技法が注目され、それらを用いた微小ビームX線源の開発も行われてきている。初期の研究例は、シンクロトロン放射(Synchrotron Radiation:SR)光源を使用したものが多かった。SRの場合は、光源自身が高輝度である上に発散角が小さいために、斜入射型反射鏡を用いると比較的効率の高い微小X線光源を得ることができる。高エネルギー物理学研究所(つくば市)のSR光源を用いて、東大の合志、筑波大の青木、高エネルギー研の飯田らは、高分解能の蛍光X線分析などに利用できる光学系<sup>1)</sup>を開発した。

しかし、現在のところSRはきわめて限られた施設でしか使用できず、必要ときにいつでも身近で使える光源となるのは、まだかなり先のことであろう。このため、実験室で使用可能な封入管や、回転対陰極型X線源を用いて微小ビームを発生する方法が注目されており、世界のいくつかの研究グループがそれらの研究にとりくんでいる。たとえば、スウェーデンのレルソンらは、図2のように、封入型X線管球の窓部に水銀を満たしたX線シールドを介してX線導波管を接続することで高強度を達成した<sup>2)</sup>。また無機材質研の中沢は微小結晶の構造解析への応用を意図してXGTの開発を行い、ピンホール型のコレリメーターと比較して20~30倍の強度が得られることを示した<sup>3)</sup>。

\*1 全反射効果

固体表面にすれすれの角で入射したX線は全反射をおこす。その臨界角は $\theta_c = 2(1-n)$ となる。 $\theta_c$ はふつう3~10mrad程度で、X線の波長が長く、表面組成原子の原子番号が大きいほど大きい。

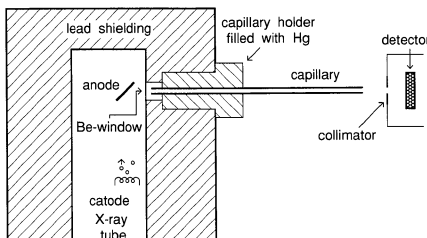


図2 X線管球とX線導波管の接続例

XGTを可能な限り窓面に近接させられるようシャッター等の安全装置は全て取り外しており、X線の漏洩を防止するため水銀を満たした金属容器を使用している。

Example of connection of X-ray bulb and X-ray guide tube

All the safety devices, e.g. the shutter, have been removed to enable to approach the XGT to the window surface closest proximity possible. A metallic vessel filled with mercury is used to prevent X-ray leakage.

## 2.2 XGTの開発

XGTは、X線の全反射を利用したX線光学素子の一つである。X線は、滑らかな固体表面に非常に小さい角度(数mrad以下)で入射すると、固体内部で吸収されることなく全反射する。したがって、中空のガラス細管にX線を軸方向に沿って入射させると、内壁で全反射を繰り返し、減衰することなく出射端まで導くことができる。

ところで、X線を効率良く伝えるためにはXGTの内面の形状が重要になる。内部形状が回転放物面型の場合には、出射ビームをある一点に集光でき、高い輝度が得られる。そこで筆者らはXGTの開発にあたり、最適形状をコンピュータによるシミュレーションと実験により求めた。XGTの製作方法は、基本的には一般のファイバーの製作方法に準じているが、温度管理など形成工程のより厳密な制御が必要となる。図3にXGTの形状と出射強度の関係を示す。XGTの形状が理論曲線に近づくにつれてX線出射強度が増大することがわかる。

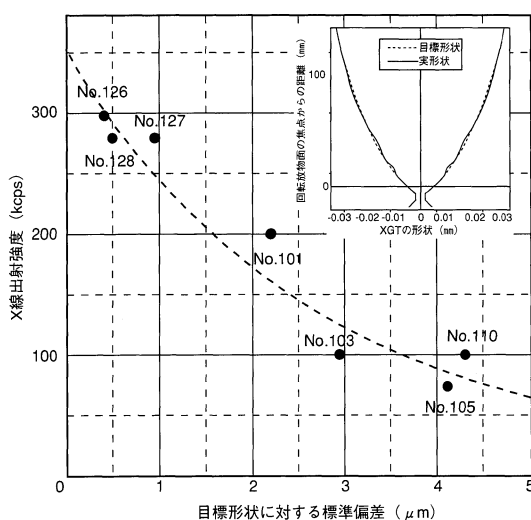


図3 XGTの形状とX線強度  
Shape of XGT and X-ray intensity

## 2.3 蛍光X線マッピング装置の動作原理

本装置の基本機能は、試料へのX線の照射、照射位置の制御、および蛍光X線の測定である。X線管から出射されたX線を、新たに開発したXGTによって細いX線ビームに絞って試料に照射すると、微小な照射点の元素に固有な蛍光X線が発生し、この蛍光X線を測定・記憶する。さらに、試料を2次元面内を移動させ、各測定点の位置情報と対応させて蛍光X線を測定・記憶する。測定対象領域すべてを測定した後、各測定点の測定値と位置情報とから蛍光X線マッピング画像として、試料の元素分布図を得ることができる。

装置は分析部、制御部、およびデータ処理部とから構成されている。分析部は、X線発生機、X線集束部、試料ステージ、X線検出器などから構成されており、それぞれX線の発生、集束、試料の移動、試料からの蛍光X線の検出を行っている。制御部は高圧電源と透過X線検出器の回転操作コントローラとから構成されている。データ処理部は、パルスプロセッサ\*2、マルチチャンネル波高分析器\*3、コンピュータなどから構成されており、分析部から送られてくるデータを画像情報としてCRT上に表示する。

\*2 パルスプロセッサ(pulse processor)  
前置増幅器からのパルス信号を整形して、マルチチャンネル波高分析器の入力範囲に整合するように十分な増幅処理を行なう比例増幅器

\*3 マルチチャンネル波高分析器(multichannel analyzer: MCA)  
パルスプロセッサからのパルス信号の波高を一定区間(チャンネル)毎に計数し、波高の分布を計数する装置

画素数	128×128, 64×64, 32×32を選択
測定時間	最小1秒 最大100秒 (1点あたりのスペクトル測定時間)
X線管	封入型ファインフォーカスX線管 最大60kV, 35mA ターゲット 銅
X線集光部	直管型XGT 出射ビーム径 16 μm (X線管電圧 30kV印加時の半値幅)
検出器	Si (Li) 半導体検出器 (×3) 有効面積 80mm <sup>2</sup>
試料ステージ	ストローク 50mm 最小移動量 2 μm
高圧電源	最大出力電圧 60kV 最大出力電流 50mA

表1 MESA-2000Kの主な仕様  
Major specifications of MESA-2000K

## 2.4 MESA-2000Kの特長と仕様

本装置は、とくに生体試料へのX線照射によるダメージを避けるため、少ないX線で短時間に蛍光X線マッピング像が得られるように、X線検出器を試料ステージの上部に2個備えている。さらに、透過X線および回折X線の測定用として、試料ステージの下部に1個備えている。MESA-2000Kの構成を図4に、表1に主な仕様を示す。

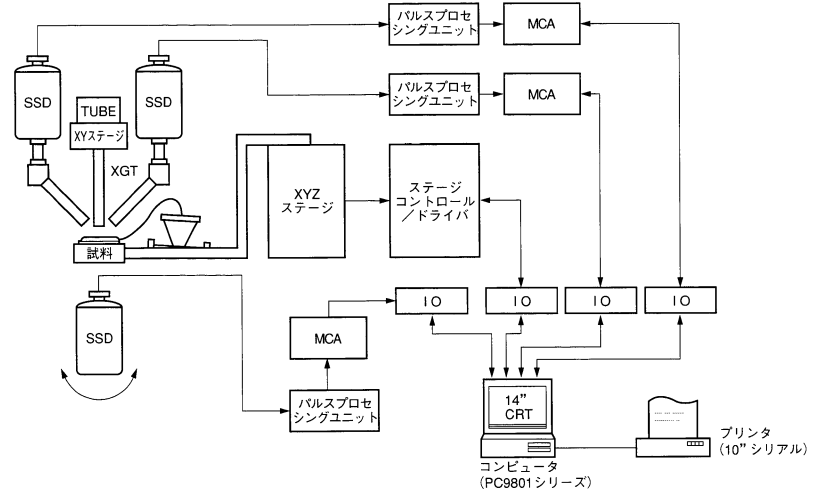


図4 MESA-2000Kの構成  
Schematic diagram of MESA-2000K

## 3. 生体非破壊分析への応用

生体中元素分布の計測には電子線マイクロアナライザ (Electron Probe Microanalyser: EPMA) が広く用いられている。EPMAは、真空中で測定するため、生体試料のように水分を多く含んだものは、あらかじめ十分乾燥しなければならない。そのため、生きたままの生物体を測定することは困難で、また試料によっては乾燥時の元素移動が問題となる。

一方蛍光X線法は、水分を含む試料を大気中でそのまま分析することが可能である。X線の照射は、生物体に対して完全には無害であるとはいえないが、一定量以下の照射線量であれば、少なくとも短期的にはその影響は無視して差し支えない。蛍光X線元素マッピング法では各測定点の照射時間は数秒以内であり、ビーム強度もそれほど強くないため生体に対するX線照射のダメージについては通常考慮する必要はない<sup>4)</sup>。

これらの点から、本手法により従来EPMAでは不可能であった同一個体・同一部位における多元素マッピング観察を、生物の生育期間を通して継続的かつ反復的に行うことが可能となった。

また本手法は、生きたままの生体以外に、貴重な標本試料などを簡便かつ非破壊的に観察するのにも適している。以下にそれらの応用例のうちいくつかを紹介する。

### 3.1 植物試料への応用例

近年大気汚染による酸性雨の被害が世界各地で大きな問題となってきている。酸性雨は、動植物や建造物に直接被害を与えるほか、土壌中の金属の溶出を促進するため、金属過剰による植物の生育障害が発生することが知られている。通常土壌およびマンガン過剰土壌でマメ科草本植物のセイヨウミヤコグサを栽培して、それらの葉中元素分布の経時変化を蛍光X線マッピング法を用いて観察した。本

研究は前述の科学技術振興調整費による課題で、農林水産省農業環境技術研究所・資材動態部の渡辺久男、川崎晃、越野正義の各氏らとの共同研究として行われたものである<sup>9)</sup>。

図5に発芽約2ヶ月および3ヶ月後の正常及びマンガン過剰の場合のセイヨウミヤコグサ葉中元素分布の例を示す。マンガン過剰の場合ネクロシス斑点と呼ばれる褐色の斑点が葉面に多数見られ、その部分では極めて高いマンガン濃度を示したが、斑点部位以外では正常土壤の場合よりもマンガン濃度は低くなっていた。

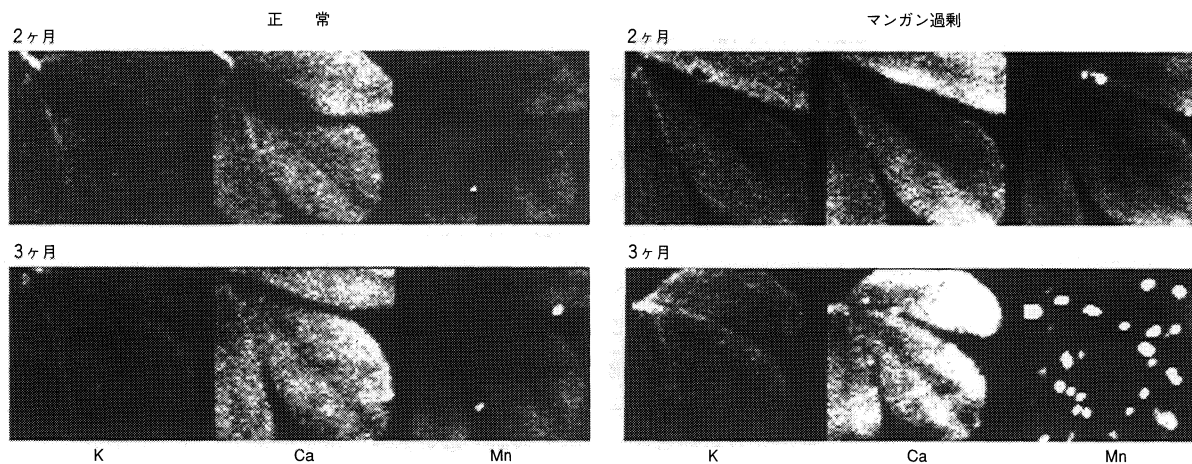


図5 発芽約2ヶ月および3ヶ月後の正常及びマンガン過剰の場合のセイヨウミヤコグサ葉中元素分布の例  
 マンガン過剰の場合には、ネクロシス斑点という褐色の枯死部が生じており、マンガン濃度が非常に高くなっている。それ以外の部位では、マンガン濃度が正常な場合よりも低くなっている。  
 Examples of elemental distributions normal bird's-foot trefoil leaves and bird's-foot trefoil leaves with excessive manganese respectively 2 months and 3 months after budding  
 The leaves with excessive manganese have been affected by brown withered and dead parts called necrotic spots, where the manganese concentration has become very high. In other parts, the manganese concentration has become lower than when normal.

また土壤酸性度の影響を調べるためMn過剰土壤(Mn0.4%を添加)でセイヨウミヤコグサを栽培し、炭酸カルシウムを0.3%添加してほぼ中性に調整した土壤の場合と、カルシウムを添加しない土壤の場合との、それぞれその元素分布を観察した。図6がそれぞれの土壤で栽培したセイヨウミヤコグサ葉の、発芽後約80日目の元素分布である。カルシウム未添加の場合にはマンガン及びカルシウム等の集積斑点が顕著にみられたのに対し、カルシウム添加した土壤で栽培したものは元素の集積はほとんど見られなかった。

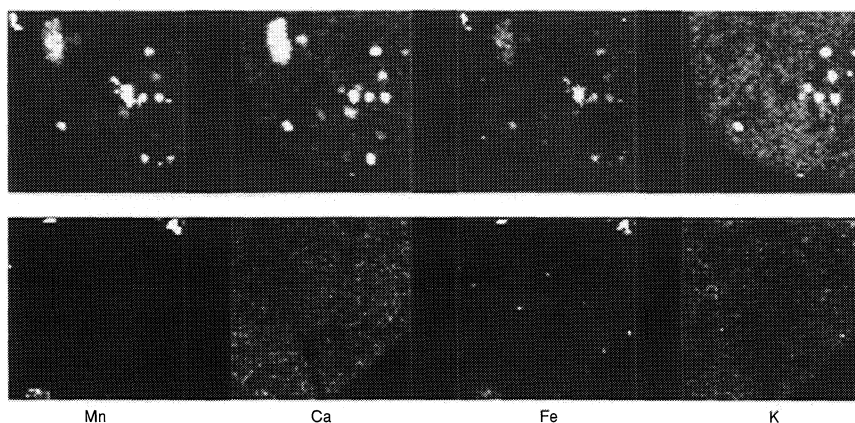


図6 Mn過剰土壤(Mn 0.4%添加)で栽培したセイヨウミヤコグサ葉の発芽後約80日目の元素分布  
 上段は炭酸カルシウムを0.3%添加してほぼ中性に調整した土壤の場合、下段はカルシウムを添加しない土壤の場合。  
 カルシウム未添加の場合にはマンガンやカルシウムなどの集積斑点が顕著にみられたのに対し、カルシウム添加した土壤では元素の集積はほとんど見られなかった。  
 Elementary distributions on about 80days after budding leaves of bird's-foot trefoil cultivated in soil with excessive Mn (Mn added at 0.4%)  
 The upper level shows the case of soil adjusted to almost neutral by adding calcium carbonate at 0.3%. The lower level Shows the case of soil not added with calcium.  
 While cumulative spots of manganese, calcium, etc. are apparently observed where calcium was not added, accumulation of elements is hardly observed in soil added with calcium.

### 3.2 動物組織試料・標本への応用例

医学分野への応用例として希少な症例標本の元素分布測定と、環境科学的興味から生体の元素濃縮機構の研究の一助としての生体中元素分布測定の応用例を紹介する。本章で紹介する医学標本は東京大学付属病院第3内科教室、本田英輔博士に、水棲昆虫標本は群馬大学工学部応用化学科、角田欣一助教授にそれぞれご提供いただき、筆者らとの共同研究に供されたものである。

#### 3.2.1 医学標本への応用例

—脳石灰化病患者解剖標本の分析—

医学の分野においては希少な症例標本について複数の分析・評価手法を用いた総合的な解析が必要となることが多々ある。このような場合に非破壊で簡便に元素分布を得ることができる蛍光X線元素マッピング法は有用な手段となる。

Fahr病は、脳組織内に石灰質の結石を生じて脳機能障害を引き起こす病気で、その症例は非常に少なく、発病の原因についても解明されていない。今回供試したのは42歳で別の原因により死去した女性患者の死後解剖で摘出された脳結石を、アクリル樹脂固定して約0.2mmの薄片に切りだした標本である。同一試料は密着ラジオグラフィやレーザ顕微鏡等に供試された。図7に本試料中の毛細血管断面と推定された部分の元素マップの一例を示す。カルシウム、リンが円形に分布しているのが見られるが、これは“血管の内壁にリン酸カルシウムを主成分とする結晶が析出し、それが結石に成長する”という仮説を支持すると考えられるものであった<sup>6)</sup>。発病機構の解明には多くの病理学的知識と多様な解析手法による情報を総合する必要があるが、元素マッピングが直ちにその解明につながるものではないが、元素分布の情報はその有用な助けとなるものであるといえる。このように同一試料を複数の手法で観察する必要がある場合、本手法の非破壊性が有効となる。

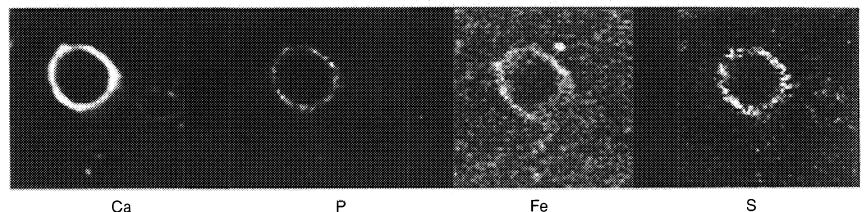


図7 Fahr病患者の死後解剖で摘出された脳結石を、アクリル樹脂固定した標本の元素マップ  
毛細血管断面と推定された部分にカルシウム、リンが円形に分布しているのが見られる。  
(Fahr病は、脳組織内に石灰質の結石を生じて脳機能障害を引き起こす奇病)  
Elementary map of acrylic resin-fixed specimen of cerebral calculus extirpated by  
autopsy of Fahr's disease patient  
Calcium and phosphorus are observed to be distributed in a circle in the part estimated to be a cross section  
of a capillary vessel. (The Fahr's disease is a strange disease to incur mental retardation by forming  
a calculus in the cerebral tissue.)

#### 3.2.2 水棲昆虫体内の金属元素分布の測定

生物はその棲息する環境から各種の元素を吸収し、そのうちの多くのものを体内に集積することが知られている。特に水棲生物は呼吸及び食餌の際に環境水や水中の微生物等を多く摂取しているため、その集積作用が顕著であることが知られている。

群馬大学工学部の在る桐生市内を流れる渡良瀬川は上流に廃銅山跡があるため、重金属濃度が高いものと考えられている。実際に渡良瀬川と桐生市内の別の水系の水質を比較すると、銅、亜鉛、カドミウム等の濃度が高くなっているという結果が得られた(ただしこれらの値は環境基準の定められている金属についても、基準値を大幅に下回っている)。そこで河川中に棲息する水棲昆虫の一種であるトビゲラを、渡良瀬川及び銅山の影響を受けていない桐生川で採取して分析を行っ



た。表2が両地点での河川水中の金属濃度及びそこで採取したトビゲラ体中の元素濃度を湿式分析(原子吸光およびICP質量分析)法で測定した結果である。各元素とも河川水中での濃度比よりも生体中の濃度比が大幅に上回っており生体による濃縮作用の起こっていることがよくわかる。次にこれらの元素がどの様に分布しているかを調べるため、採取したトビゲラをパラフィンに固定してその断面の元素分布を蛍光X線元素マッピング法で観察した。図8に渡良瀬川で採取したトビゲラ体中の鉄、カルシウム及びマンガンの分布の一例を示す。試料は正中断面とよばれる、背中中央から腹に向かって刃物で切断した面で右下が頭部、左上が背部に相当する。本マップでは正確に元素の集積部位を特定することはできないが、鉄は大部分が水中の微小な砂粒とともに不溶態として体内に存在するのに対し、マンガンなどはイオン態で体内に存在し臓器等に蓄積している可能性が高いことが示唆された。さらに亜鉛、銅、ヒ素等の分布も興味深い銅管球を励起源に使用する限りこれらの元素の分析は困難であり、より高いエネルギーのX線を利用した装置の開発が期待されることである。

金属種別	Cu		Zn		Cd		Ni	
	生体中 μg/g (ppm)	河川水中 μg/l (ppb相当)	生体中 μg/g (ppm)	河川水中 μg/l (ppb相当)	生体中 μg/g (ppm)	河川水中 μg/l (ppb相当)	生体中 μg/g (ppm)	河川水中 μg/l (ppb相当)
渡良瀬川 (桐生大橋)	490	2.35	280	13.49	8	0.04	114	0.73
桐生川 (天神橋)	52	1.65	147	3.89	1	0.04	13	0.26

表2 渡良瀬川および桐生川において採取したトビゲラの、体内と河川水中の重金属濃度の比較  
生体中濃度は硝酸・過酸化水素分解後桐生川原子吸光法、水中濃度はICP質量分析法によってそれぞれ測定したものである。  
Comparison of heavy metal concentrations in bodies of caddis-flies sampled in Watarasegawa and Kiryugawa and in river water.

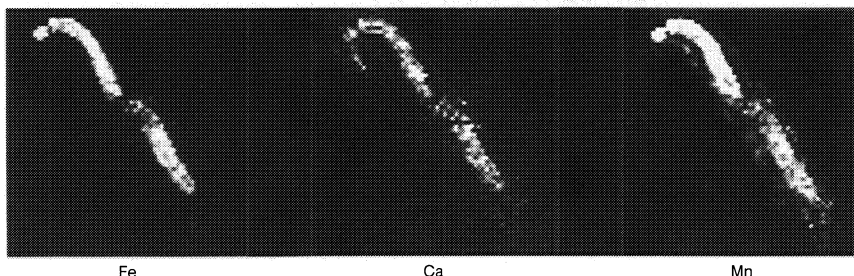


図8 渡良瀬川で採取したトビゲラ体中の鉄、カルシウムおよびマンガンの元素分布の一例  
試料は、正中断面とよばれる、背中中央から腹に向かって刃物で切断した面で、右下が頭部、左上が背部に相当する。  
Example of elemental distributions of iron, calcium and manganese in body of caddis-fly sampled in Watarasegawa River  
The specimen shows the so-called median plane of having been cut from the center of the back toward the abdomen with a cutter. The lower right corresponds to the head and the upper left to the back.

#### 4. 非生体試料への応用

生体試料以外の試料の分析では多くの場合EPMAの使用が可能であり、必ずしも蛍光X線マッピング法に頼る必要はない。しかしながら水分や溶剤を多く含む試料をEPMAで分析する場合には真空引きに長時間を要する上、真空引きによる試料の破壊や脱水・脱溶媒時の元素移動が生じる場合がある。蛍光X線マッピング法は大気中で湿潤状態の試料にも適用可能であるので、このような試料には本法が有利となる。また試料が非常に少量しか得られないような場合、従来の蛍光X線分析装置では非常に測定が困難であったが、XGTを用いた微小ビームX線分析装置を使用すれば一辺の長さが十数μmの試料でも元素定性が容易に行える。

単結晶X線回折法で金属錯体等の構造解析を行う場合試料中に特定の金属が含まれているか、という情報が事前に知られていると構造解析の信頼性が非常に高くなる場合があり、そのような場合に本手法は有効である。筆者らの研究グループにおいてもX線構造解析に先立つ予備試験として蛍光X線マッピング装置を使用する試みがなされている。

## 5. さらに高感度・高分解能をめざして

以上述べてきたように、蛍光X線元素マッピング法は生体試料をはじめとしてさまざまな試料について、その非破壊性、高感度性、簡便性などの利点を活かした応用が可能である。一方、目的によっては、より高分解能で、さらに低濃度の元素を迅速にマッピングしたいとの要望もある。本手法の利点を活かしつつ、さらに高性能化をはかる可能性について検討してみる。

### 5.1 要素技術の開発

X線源としては、より高出力でしかも焦点面積の小さい高輝度のもの、さらに、XGTとの組み合わせを考えると、対陰極と窓面の距離はできるだけ近いものが望まれる。

XGTの材質・形状・加工精度などを改善し、より広いエネルギー範囲(MoK $\alpha$ 線(17.4keV)程度まで)のX線を効率よく伝達できるものが期待される。

高感度化には、X線を強くするとともに、試料から放出される蛍光X線の検出効率を高めることが必要である。検出器の面積が一定の場合には、X線の検出効率が試料と検出器の間の距離の2乗に反比例するため、両者はできるかぎり近づけなければならない。とくに、軽元素のK $\alpha$ 線などの低エネルギーX線の場合は、大気による減衰を避けるために重要になる。一方、エネルギー分散形蛍光X線分析に用いる検出器(Solid State Detector:SSD)は、図9に示すように、シリコン素子やFETなどを液体窒素温度に冷却しながら使用しなければならない。このために、現状では検出素子に比べ検出器の外形寸法がかなり大きくなっており、この差を小さくして、両者を近づけることは今後の課題の一つである。

また、マッピング時間の短縮は、生体試料に与えるストレス(X線照射以外)を軽減させるためにも重要で、これには要素技術の開発と同時にデータ処理の高速化も必要となる。

### 5.2 卓上型X線分析顕微鏡の開発

堀場製作所では、以上のような技術課題の検討と合わせ、手軽に蛍光X線マッピング像を得たいとのニーズに対応して、現在卓上型X線顕微鏡の製品化を進めている(図10)。

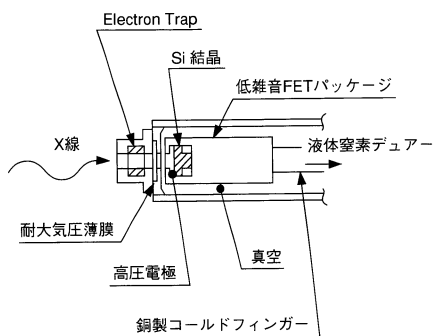


図9 シリコン半導体検出器の内部構造  
Internal structure of silicon semiconductor detector



図10 試作した卓上型X線分析顕微鏡  
Test-produced desktop X-ray analytical microscope

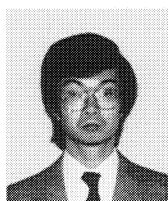
## 6. おわりに

生物体内の元素分布を生きたままでモニタリングするという一見大胆な試みも、少なくとも植物葉については十分実用的な成果が得られることが確かめられた。生命現象にともなう元素の移動を生きたままの状態を観察できる蛍光X線元素マッピング法は、動・植物の病気や生育障害等の発生機構の解明のための強力な支援助となることが期待できる。X線を微小なビームにする技術や蛍光X線を高い効率で検出する技術は現在も日々進歩をとげており、感度、分解能、適用可能元素範囲などについてさらに優れた装置が世に出るのもそう遠い先のことではなさそうである。

もちろん生体試料以外にも微小な機械・電子部品などの工業製品や文化財・工芸品、事件証拠品など、本手法の非破壊性や簡便性を活かした応用分野は多々あがる事ができる。それらの用途ごとに感度、分解能、コストを最適化したマッピング装置を実現して、本手法が実用的な分析法として広く普及することを期待している。

### 参考文献

- 1) Y. Gohshi, S. Aoki, A. Iida, S. Hayakawa, H. Yamaji, K. Sakurai, "A Scanning X-Ray Fluorescence Microprobe with Synchrotron Radiation" Jpn. J. Appl. Phys., 26, L1260-1262 (1987).
- 2) S. Larsson P.Engstrom A. Rindby and B.Stocklassa "X-ray Capillary Microbeam Spectrometer", Advances in X-ray Anal., 33, 623-628 (1990).
- 3) H. Nakazawa, "X-ray Guide Tube for Diffraction Experiments" J. Appl. Cryst. 16, 239-241(1983).
- 4) H. Watanabe and Y. Kobayashi "X-ray induced Transport of Inorganic Elements in Living Rice Leaves Observed with X-ray Fluorescence Element Mapping Spectrometry", Agric. Biol. Chem. 50, 2077-2082 (1986).
- 5) 川崎 晃, 越野 正義, "高分解能蛍光X線元素マッピング装置による植物中の元素分布の非破壊計測", 農林水産省・農業環境技術研究所年報 平成2 (1990)年度, P.74-78.
- 6) 福本夏生, 小林慶規, 倉橋正保, "生物試料の非破壊計測を目的とした高分解能蛍光X線元素マッピング装置の開発", 分析化学, 41, 545-550 (1992).



福本 夏生

Natsuo FUKUMOTO

工業技術院  
物質工学工業技術研究所  
主任研究官



柏原 孝造

Kozo KASHIHARA

開発センター 係長  
1990年入社  
X線顕微鏡の開発に従事



