科学の峰々 134

東京電機大学 大学院先端科学技術研究科 研究科委員長
東京電機大学 工学部応用化学科 教授
公益社団法人 日本分析化学会 副会長

保倉 明子（ほくら あきこ） 先生 に聞く

植物中の元素の化学形態を放射光X線などで緻密に分析。持続可能な開発の礎に（上）

聞き手：富山裕明　日本科学機器協会 広報委員長
岡田康弘　日本科学機器協会 編集長
（取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ㈱　安井久雄）

取材日：2026年7月15日
日本科学機器協会会議室





保倉 明子 先生のプロフィール

【学歴・職歴】

1997年 3月　東京理科大学 大学院理学研究科化学専攻博士課程 修了 博士(理学)
1997年 4月　日本学術振興会特別研究員(PD)
　　名古屋大学 大学院工学研究科応用化学専攻
2000年 1月　JST科学技術特別研究員
　　無機材質研究所(改組) 2001.4.1 ～ 物質・材料研究機構 物質研究所
2001年10月　東京理科大学 理学部応用化学科 助手
2007年 4月　東京理科大学 理学部応用化学科 助教
2009年 1月　東京理科大学 理学部応用化学科 講師
2009年 2月　早稲田大学 高等研究所 講師
2009年 4月　東京電機大学 工学部環境化学科 准教授 分析化学研究室
2013年10月　東京電機大学 工学部環境化学科 教授
2017年 4月　東京電機大学 工学部応用化学科(学科名変更)
2021年 4月　東京電機大学 大学院先端科学技術研究科 博士課程(後期)研究科委員長 現在に至る

【主な受賞歴】

2002年　コーニングリサーチグラント
2008年　日本化学会関東支部大会優秀講演賞
2009年　日本分析化学会 X線分析研究懇談会 第4回浅田榮一賞
2011年　第4回 資生堂女性研究者サイエンスグラント
2015年　日本分析化学会関東支部 平成26年度新世紀賞
2019年 5月　第13回(平成30年度)関東工学教育協会賞 業績賞
2021年 9月　日本分析化学会 女性Analyst賞

【主な所属】

所属学会：　日本分析化学会、X線分析研究懇談会、表示・起源分析技術研究懇談会、
　　プラズマ分光分析研究会、日本放射光学会、日本化学会、
　　日本イオン交換学会、日本鉄鋼協会など
委員会・協会：計量行政審議会 計量標準部会
　　経済産業省 日本産業標準調査会 産業構造審議会
　　製品評価技術基盤機構 認定制度試験事業者(環境)技術委員会
　　令和7年度 領域アドバイザリーボード(計量標準総合センター)
　　科学警察研究所 特別研究員

植物の化学分析により化学形態を明らかにし、資源回収～環境浄化に繋ぐ

保倉明子先生は、さまざまな分析化学の手法を用いて、植物や微細藻類、食品などに含まれる元素を「はかる」研究に取り組まれています。まず、現在の主な研究テーマをお聞かせください。

保倉　私の研究は、もともとは金属イオンの分離を扱う溶媒抽出から始まりました。その後、プラズマ分光分析、材料合成とX線回折、放射光X線分析へと、対象や分析手法を広げてきました。

現在は主に3つのテーマに取り組んでいます。1つ目は、植物・微細藻類による元素の取り込みと化学形態変化、2つ目は、微細藻類を利用した有用金属回収の基礎研究、3つ目は、食品中の微量元素分析と産地判別です。

少し平易に言うと植物や微細藻類が元素をどのように取り込み、どこに蓄積し、どのような化学形態で存在しているのかを明らかにする研究です。また、そうした性質を利用した有害元素の除去や有用金属の回収、さらに野菜などの食品や漢方薬に含まれる微量元素を正確に測定し、産地の違いを見分ける研究にも取り組んでいます。

環境や食品など、誰にとっても身近なものですね。“分析化学は遠い分野だ”と感じていましたが、毎日の生活と距離が近い研究分野なのですね。

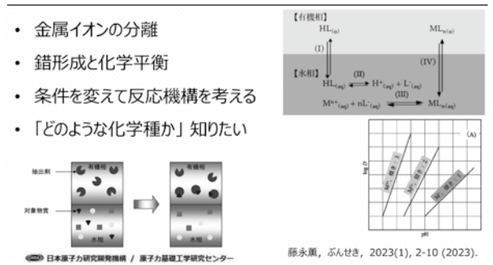
保倉　そう感じていただけると嬉しいです。私の研究が将来どのように社会に役立つかというと、1つには植物の機能を利用した環境浄化が考えられます。

ある種の植物は、土壌などの環境の中から、カドミウムやヒ素などの有害元素を取り込み、高濃度に蓄積する性質をもちます。この性質を利用して汚染土壌や水を浄化する方法を「ファイトレメディエーション」と言い、環境負荷の小さい浄化技術として注目されています。

一方、微細藻類には、金、白金、パラジウムなどの有用金属を取り込むものがあります。将来的には、希薄な廃液などから有用金属を回収する技術につながる可能性があります。

ただし、実用化に向けてはいろいろな課題があります。単に取り込み量だけを見るのではなく、どこに蓄積するのか、どのような化学形態になるのか、共存元素の影響を受けるのか、といったことを理解する必要があります。現在は、その基礎となる仕組みを明らかにする研究を進めています。

さまざまな分析化学の手法を用いて突き詰めているのですね。



様々な分析手法を用いて研究を展開する

どのような分析手法を使って研究を広げてこられたのでしょうか。

保倉　研究者として歩む中で、さまざまな分析化学の手法に携わってきました。私の経歴とあわせて、どのように研究手法が広がってきたのかをお話しします。

東京理科大学の大学院生だった頃は、溶媒抽出を用いて、金属イオンの抽出挙動や酸化還元反応について研究していました。実験条件を変えながら、目に見えない化学種や反応機構を推定するところに、謎解きのような面白さを感じました。分析化学の魅力は、単に数値を得ることではなく、そのデータから試料の中で起きている現象を読み解けることだと思います。

その後、名古屋大学でポスドクとして研究する中で、プラズマ分光分析に出会いました。植物試料を対象に、微量元素を高感度に測定する手法を学び、元素の量だけでなく、どのような化学状態で存在しているのかということにも関心を広げていきました。

続いて、無機材質研究所（現・

NIMS:国立研究開発法人物質・材料研究機構）では、無機材料を対象に研究を行いました。メソポーラスシリカを利用した金属イオンやアミノ酸の分離などを扱い、対象は材料へ広がりましたが、金属イオンの分離という点では大学院時代の研究ともつながっていました。

その後、東京理科大学に教員として着任し、中井泉先生のもとで助手、助教、講師を務めました。中井先生はX線分析の専門家で、文化財の分析にも取り組まれていましたので、私もエジプトに3回ほど赴き、文化財の成分分析に携わる機会をいただきました。

そうした中で、私はもともと植物への興味が強かったこともあり、中井先生が専門とされていた放射光X線を用いて、植物中の微量元素を調べる研究を始めました。放射光X線マイクロビームを利用して、植物体内のどこに元素が存在し、どのような状態で移動・蓄積していくのかを解析する研究です。実は、植物への興味は高校時代からずっと持っていました。

海外で研究する機会もあったのでしょうか。

保倉　私は大学院時代に海外で学ぶ機会をいただきました。修士課程ではドイツに約6週間滞在し、ドレスデン工科大学で実験を行うとともに、ドイツ国内のいくつかの大学や研究機関を訪問し、さまざまな研究環境や取り組みに触れることができました。また、博士課程ではオーストラリアのメルボルン大学に半年間留学しました。いずれも東京理科大学で指導教員だった関根達也先生のご紹介によるものです。当時、関根先生は若いうちにできるだけ幅広い経験をしておいた方がよい、と考えておられました。そのおかげで、私も貴重な経験をさせていただきました。

海外での生活や研究は非常に楽しく、刺激的でした。特にメルボルン大学では、溶媒抽出に関連する研究に半年間取り組み、その成果を後に論文としてまとめることができました。それは研究者として大きな自信につながる、とても嬉しい経験でした。



ドイツ・ドレスデン工科大学の研究機関を訪問（前列中央）



オーストラリア・メルボルン大学にて（右端）
全反射法による溶媒抽出界面の観察や大学院生と交流

生物に興味があって今の植物の分析に研究を広げてきたというお話がありました。生物に興味を持ったきっかけをお聞かせください。

保倉　高校時代に、教科書でニンジンのカルス培養の写真を見て、生物の先生に「こんな実験をやってみたい!」と申し出たことがあります。ニンジンの組織の一部を培地の上に置いておくと、そこから未分化の細胞の集まりがもこもこと出てきて、さらに根や芽が出て植物が再生していくというものでした。教科書には載っていましたが、授業では深く取りあげる内容ではありませんでした。それでもとても興味を持ち、自分でもやってみたいと思って申し出たところ、生物を担当されていた桑原岳夫先生が実験できるように準備をしてくださいました。

植物は挿し木でも新しい個体がつくれるように、再生能力がとても高い生物です。植物組織の一部を適切な培地で培養すると、いったん分化した細胞が脱分化して増殖し、カルスと呼ばれる未分化な細胞の集まりをつくることがあります。さらに条件を変えると、そこから根や芽を再び分化させ、植物体を再生することができます。高校生の時、このように植物が組織の一部から再び植物体をつくれることを、とても面白いと感じました。

高校ですので、それほど設備が整っているわけではない中で実験をしました。培地や器具をきちんと高温高圧で滅菌し、無菌的に操作しないと培地にカビが生えたりして、色々と苦労しながら培養した思い出があります。今思うと、自分で「やってみたい」と思って実験を行った初めての経験で、とてもワクワクしたことを覚えています。

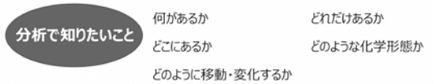
研究を通して一貫する問いは「元素はどこに存在し、どんな化学形態なのか?」

科学機器　No.939　2026.9

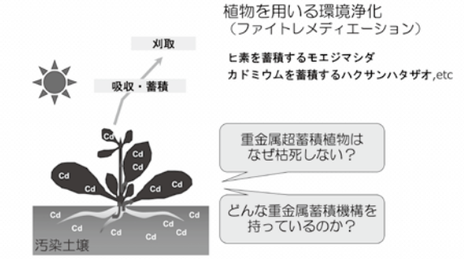
産学官との連携

研究の展開：分析手法との出会い

- 溶媒抽出：　化学平衡論，化学量論，化学種と反応機構
- プラズマ分光分析：　微量元素を高感度にはかる
- 粉末X線回折法・透過電子顕微鏡：　材料の構造を見る
- X線・放射光分析：　元素の分布と化学形態を見る



研究のモチベーション



保倉　このように、分析の手法も対象もさまざまに変わってきましたが、研究を通して一貫しているのは、「元素がどこに存在し、どのような化学形態で存在しているのか、そしてどのように移動・変化するのか」を知りたいということです。

私がこれまで扱ってきた分析手法には、溶媒抽出、プラズマ分光分析、粉末X線回折法、X線・放射光分析などがあります。それぞれ得られる情報は異なりますが、何が、どこに、どれだけ存在するのか、そしてどのような化学形態なのかを明らかにするために、目的に応じてさまざまな分析法を組み合わせています。

例えば植物を対象にすると、元素は植物体内に均一に分布しているわけではありません。根から取り込まれた元素がどのように移動し、どの組織に蓄積するのか、その過程で化学形態がどのように変化するのか。そうした元素の動きを追いながら、植物の中で起きている現象を明らかにしたいというのが、研究の大きなモチベーションです。

有害なヒ素やカドミウムを高濃度に蓄積する植物

植物の分析についてお聞かせください。有害な元素や重金属を取り込む植物があるということでした。

保倉　植物は環境からさまざまな元素を取り込んでいます。その中には、カドミウムやヒ素のように、植物にとって有害となる元素もあります。通常は高濃度になると生育が阻害されますが、中にはそうした元素に耐性を持ち、しかも高濃度に蓄積する特殊な植物があります。

例えば、2001年には、ヒ素を高濃度に蓄積するシダ植物がNature誌で報告され、大きな注目を集めました。また、私たちも、植物や藻類を利用して有害元素を除去したり、有用元素を回収したりする研究に取り組んできました。こうした性質は、将来的には土壌や水の環境浄化、資源回収への応用につながる可能性があります。

こうした研究では、実際の環境浄化や資源回収を主な目的として取り組んでいる研究者もいます。一方、私は分析化学を専門としているので、植物が元素をどのように取り込み、どこに蓄積し、その過程で化学形態がどのように変化するのかを明らかにすることに重点を置いています。

もう1つ、私が大切にしているのは、できるだけ「そのまま測る」ということです。化学形態を調べる方法としては、植物から対象成分を抽出し、クロマトグラフィーなどで分離して分析する方法もあります。ただし、抽出の過程で化学形態が変化する可能性がありますし、元素が植物体内のどこに存在していたのかという位置情報は失われてしまいます。そこで私は、できるだけ植物本来の状態を保ったまま測定し、元素がどこに存在し、そこでどのような化学状態をとっているのかを明らかにしたいと考えています。

有害となる元素を吸収し、枯れない植物は、どういうものでしょうか。

保倉　ヒ素を高濃度に蓄積するモエジマシダや、カドミウムや亜鉛を蓄積するハクサンハタザオなどが知られています。また、ニッケルも重要な資源元素の一つで、海外では植物を利用して土壌中のニッケルを回収しようとする取り組みも進められています。

一般に、有害元素が高濃度になると植物の生育は阻害されますが、こうした特殊な植物は高濃度の元素に耐えながら体内に蓄積す

ることができます。なぜそれが可能なのか、どのように取り込み、輸送し、隔離・無毒化しているのか。その蓄積機構を明らかにすることが、私の研究の目的の一つです。

有害元素を蓄積しても枯れない植物の仕組みとは

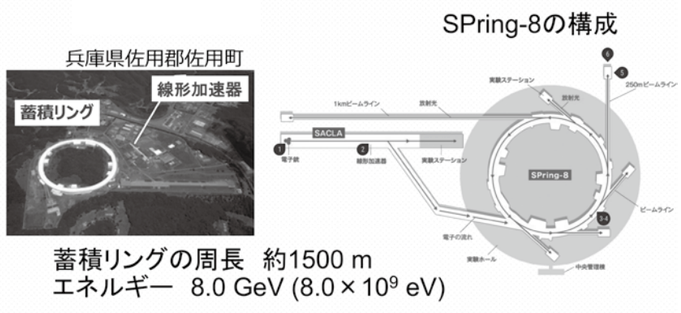
保倉　一般に、植物が有害元素の毒性を低減する仕組みには、いくつかの方法が知られています。その1つが、有害元素を生体分子と結合させる方法です。例えばカドミウムは硫黄との親和性が高く、ファイトケラチンのような含硫黄化合物と錯体を形成します。こうしてカドミウムを結合した状態にすることで反応性が抑えられ、毒性が低減すると考えられています。

もう1つは、有害元素を細胞の重要な部分から隔離する方法です。植物細胞の外側には細胞壁があり、そこに元素を保持することで、細胞内部への侵入を抑えることがあります。また、細胞内には液胞という大きな区画があり、不要な物質や有害な物質をそこに隔離することがあります。イメージとしては、細胞の中にある「隔離スペース」のようなものです。

このように、植物が有害元素をどのように取り込み、どこに隔離し、どのような化学形態で存在させているのかを調べることで、毒性を低減させる仕組みを理解することができます。例えば、元素が根の表面にとどまっているのか、それとも植物体内に取り込まれているのか、取り込まれた場合にはどの組織に蓄積しているのか、さらに酸化状態や周囲の配位環境がどうなっているのか、といった点を調べます。

先ほどカドミウムは硫黄と親和性が高いとお話ししましたが、実際に硫黄と結合しているのか、あるいは酸素など別の原子と結合しているのかを調べることも重要です。こうした元素の化学状態や局所的な環境を調べるために、放射光X線を用いた分析が有効になります。

放射光の発生



※SPring-8では、現在大規模改修計画「SPring-8-II」が進められており、2027年8月から約1年間の運転停止を予定している。

現行:8 GeV
SPring-8-II:6 GeV、より高輝度・省電力化

放射光X線を使う利点とは

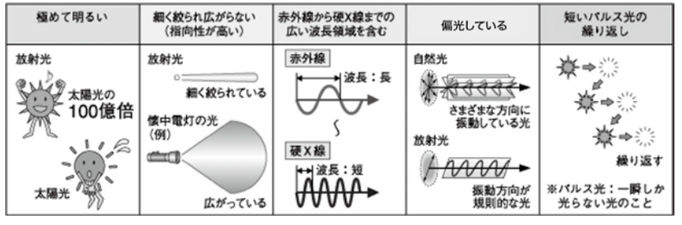
保倉　まず放射光とは何かというと、非常に高速で運動している電子の進行方向を磁石によって曲げると、電子が持っているエネルギーの一部が電磁波として放出されます。この光を放射光と呼びます。兵庫県にある大型放射光施設SPring-8では、電子をほぼ光の速さまで加速し、大きなリング状の加速器の中を周回させています。リング内では磁石によって電子の進行方向を曲げ、その際に発生する非常に明るい放射光を利用しています。SPring-8のリングは1周約1.5 kmあり、電子のエネルギーは8GeV（ギガ電子ボルト）です。

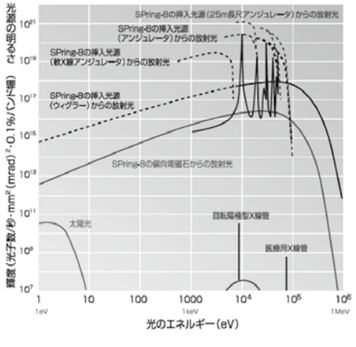
日本には複数の放射光施設があり、私の研究室ではSPring-8のほか、茨城県のつくばにある高エネルギー加速器研究機構のPhoton Factory（フォトンファクトリー）もよく利用しています。

高輝度・高指向性でエネルギーも選べる放射光X線

保倉　放射光にはいくつかの特長があります。まず、非常に高輝度で、指向性が高いことです。懐中電灯の光のように大きく広がらず、細くそろった光として利用できます。また、赤外線からX線まで幅広い波長の光を含んでいるため、その中から目的に応じたエネルギーの光を選んで使うことが出来ます。そのほか、偏光していることや、短いパルス状の光として得られることも

放射光の特長





放射光の特長です。

特に放射光は、X線分析の光源として非常に優れています。

研究で使うX線には、実験室のX線装置で発生させるものもあります。実験室のX線管では、例えば銅やモリブデンなどのターゲット材に由来する特性X線と連続X線が発生し、用途に応じて利用されます。

これに対して放射光では、幅広いエネルギー範囲のX線から、目的に合ったエネルギーを選択できます。さらに高輝度で指向性が高いため、微小な領域を高感度に測定したり、X線のエネルギーを細かく変えながら測定したりする分析に非常に適しています。

X線というと、体内を見る白黒のレントゲンを思い浮かべますが、分析ではそれ以外にもさまざまな使い方があるのでしょうか。

保倉　はい。X線は、物質とのさまざまな相互作用を利用して、多様な分析に使うことができます。

まず、レントゲン撮影では、X線が物質を透過する性質を利用しています。筋肉のような軟組織と骨ではX線の透過のしやすさが異なるため、その違いを画像として見ることができます。

また、X線吸収分光法（XAFS）では、対象となる元素がX線をどのように吸収するかを詳しく調べます。これによって、その元素の酸化状態や、周囲にどのような原子が存在しているかといった化学状態を知ることができます。

さらに、X線の散乱や回折を利用すると、結晶構造を調べることが出来ます。

もう1つが蛍光X線分析です。物質にX線を当てると、含まれている元素から元素固有のX線、すなわち蛍光X線が放出されます。そのエネルギーや強度を測ることで、どの元素が含まれているか、またどの程度含まれているかを調べることができます。

このように、X線が物質を透過する、吸収される、散乱・回折する、あるいは蛍光X線を発生させるといったさまざまな相互作用を利用することで、物質の構造や元素組成、化学状態など、多くの情報を得ることができます。

対象の物にX線をあてて二次的に得られる蛍光X線

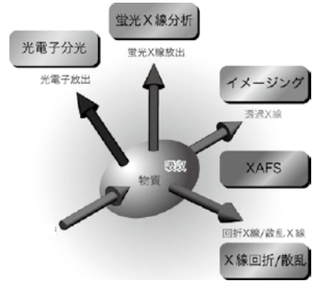
蛍光X線という言葉はあまり耳慣れません。補足いただけますか。

保倉　蛍光X線は、物質にX線を当てた時に、その物質を構成している元素から放出されるX線です。元素ごとに固有のエネルギーをもっているので、そのエネルギーを調べると、どの元素が含まれているかが分かります。また、その強度を測ることで、含まれている量を調べることもできます。

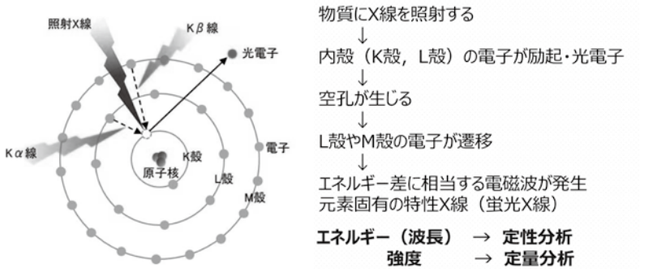
なるほど。元素ごとにエネルギーが決まっているのですね。

保倉　それはなぜかという原理を少し説明します。化学の授業で出てくる原子の構造を思い出していただくと、中心に原子核があり、その周囲にはK殻、L殻、M殻などの電子殻があります。それぞれの電子殻にある電子は、異なるエネル

X線と物質の相互作用を利用した分析手法



蛍光X線分析の原理



https://www.hitachi-hightech.com/jp/ja/knowledge/analytical-systems/xrf/xrf-descriptions.html

ギーをもっています。

ここに十分なエネルギーをもつX線や電子線を照射すると、K殻やL殻などの内側にある電子が弾き出され、そこに空孔、つまり電子の抜けた状態ができます。この空孔を埋めるために、より外側にある電子が内側に移ります。このとき、二つの電子状態のエネルギー差に相当するエネルギーがX線として放出されます。このとき発生する元素固有のX線を「特性X線」と呼びます。そのうち、物質にX線を照射したときに発生する特性X線を「蛍光X線」と呼びます。蛍光X線分析では、この蛍光X線のエネルギーと強度を測定して、どの元素がどれくらい含まれているかを調べます。

その蛍光X線で、含まれている元素量も調べられるということでした。

保倉　はい。蛍光X線の強度は、基本的にはその元素が多く含まれるほど強くなります。ただし、実際に定量するときには、試料の組成や厚さなどの影響も受けるため、標準物質などを用いて校正し、濃度を求めます。つまり蛍光X線分析では、どのような元素が含まれているかという「定性分析」と、どのくらい含まれているかという「定量分析」の両方が出来ます。

また、一度X線を照射すると、試料に含まれるさまざまな元素から、それぞれ固有の蛍光X線が発生します。そのため、複数の元素を一度の測定で分析しやすいことも、蛍光X線分析の大きな特長です。

X線の吸収のされ方を見るX線吸収分光法（XAFS）

X線吸収分光法（XAFS）についても補足いただけますか。

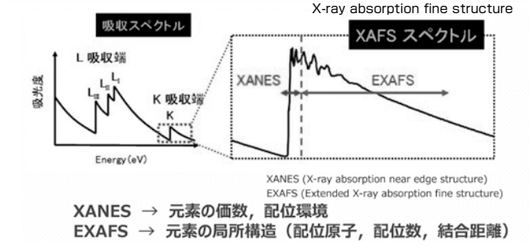
保倉　例えば、水は透明ですが、色素を溶かした水には色がついて見えます。これは、可視光の一部が物質に吸収され、吸収されなかった光が目に届くためです。X線吸収分光法（XAFS）も考え方は似ていて、物質がX線をどのように吸収するかを、X線のエネルギーを変えながら調べる方法です。

X線の吸収のされ方には、元素ごとに特徴があります。特に、吸収が急に大きくなる「吸収端」のエネルギーは元素ごとに異なります。

不思議ですね。なぜそういうことが起きるのでしょう。

保倉　先ほど蛍光X線の説明でお話しした、内殻電子が関係しています。入射するX線のエネルギーが、その元素の内殻電子を原子の外へ飛び出させるのに十分な大きさになると、X線が強く吸収されます。そのため、吸収が急に大きくなるのです。この吸収端のエネルギーは元素ごとに異なります。例えば鉄を調べたい場合、鉄の吸収端付近のX線を使って測定します。

X線吸収分光法の原理



https://staff.aist.go.jp/a.ohta/japanese/study/XAFS_ex2.htm

放射光X線を使う利点

蛍光X線分析	多元素同時分析
高輝度（明るい）	短時間（＜1 秒/点）で微量分析
高指向性	マイクロビームで局所分析
エネルギー可変	X線吸収分光法（化学形態分析）
高エネルギーX線	重金属元素も高感度分析

約1 μm角のX線マイクロビームを使うと、
細胞スケールでの二次元イメージングと化学形態分析が可能

非破壊分析であるため
生きている状態のままでも分析が可能

科学機器　No.939　2026.9

産学官との連携

さらに面白いのは、同じ鉄でも、2価の鉄と3価の鉄では吸収端の位置や、その近くのスペクトルの形が少し異なることです。その違いを酸化状態や化学形態が既知の標準物質と比較することで、試料に含まれる鉄がどのような酸化状態にあるのかを調べることができます。

X線吸収分光法で原子の周囲の構造までわかる

目には見えない原子や電子の状態を、X線の吸収のされ方から読み取れるのですね。

保倉　そうですね。さらにXAFSでは、対象となる原子の周囲の構造も調べることができます。

吸収端より高いエネルギー側を見ると、吸収スペクトルに細かな振動が現れます。これは、X線を吸収して飛び出した電子が波として周囲に広がり、その波が近くの原子によって散乱され、もとの波と重なり合うことで生じるものです。

例えると、水面に石を落としたときに波紋が広がり、周囲のものに当たって反射した波と重なり合うようなイメージです。

この振動を解析すると、目的の原子の周囲にどのような原子があるのか、何個くらいあるのか、どのくらい離れているのかを調べることができます。専門的には、配位原子、配位数、原子間距離といった情報です。例えば、周囲に酸素がある場合と硫黄がある場合では、振動の現れ方が異なるため、その違いを解析することができます。

お話を伺っていて、“この金は本物なのか”なども分かるわけですね。

保倉　元素分析によって、金が含まれているかどうかや、合金組成を調べることができます。ただし、メッキなどの場合には、測定条件やX線がどのくらいの深さまで届くのかも考慮する必要があります。また、X線分析の大きな特長の一つは、多くの場合、試料を切断したり溶解したりせずに測定できることです。

最近では、電池材料の分析にもよく使われています。例えばリチウムイオン電池では、充放電に伴ってコバルトなどの元素の酸化状態が変化します。材料を電池から取り出して測定すると、その過程で状態が変化してしまう可能性があります。X線吸収分光法を使えば、電池を作動させた状態で、充放電に伴う酸化状態を調べることもできます。

X線分析で、そこまでのことが分かるのですね。

保倉　放射光X線を分析に使う利点は、これまでのお話でも触れましたが、他にもいくつかあります。

まず、非常に高輝度で指向性が高いため、微小な領域を高感度に測定することができます。X線のエネルギーを目的に応じて選べるので、元素ごとの吸収端を利用するXAFSには適しています。さらに、高エネルギーのX線を利用できる施設では、カドミウムなど原子番号の大きい元素についても、その元素の吸収端に合わせたエネルギーを選んで測定することができます。

また、X線分析は試料を大きく加工せずに測定できることも大きな特長です。植物の場合には、条件によっては生きた状態に近いまま測定することもできます。複数の分析法を組み合わせることも重要です。例えば、蛍光X線分析で「元素がどこにあるか」を調べ、XAFSで「その元素がどのような化学状態にあるか」を調べる、といった使い方ができます。

こうした特徴を生かして、放射光X線分析は、材料、環境、食品、植物、生体、文化財など、非常に幅広い分野で利用されています。

放射光分析のさらなる結果は、次回下編で伺います。



植物で環境を浄化する
ファイトレメディエーションには
元素分析が重要な基礎となります

次号「科学の峰々」では、引き続き
保倉 明子先生にお話を伺います。