

X線の網羅分析への使用事例

阿部 善也

1 はじめに

分析化学における「網羅分析 (non-target screening)」とは、事前に測定対象となる物質を特定せずに、試料中の検出可能なすべての成分を網羅的に分析する手法を意味する。生体内の代謝物の解析や、環境中の汚染物質の検出など、多種多様な化合物が同時に分析対象になりうる研究の中でしばしば用いられる用語であり、分析手法としてGC/MSやLC/MSなどの質量分析法、あるいはゲノム解析のためのシーケンサーなどと関連づけられて説明されることが多い。一方、本稿で取り上げる「X線分析 (X-ray analysis)」とは、X線を利用した分析・計測技術全般を指す。網羅分析とX線分析が同じ文脈で語られることはあまりなく、一見すると関係性が薄いように思われるかもしれない。しかしながら、一言にX線分析と言っても、実際にはX線と物質の相互作用を利用したきわめて多彩な分析手法が存在し、得られる情報はきわめて幅広い。さらに、X線分析の多くは非破壊的に実施でき、様々な手法を複合的に利用すれば、X線を用いて物質中に含まれる成分の網羅的な分析も実現しうる。本稿では、網羅分析の観点から主要なX線分析手法を概観すると共に、実際の使用事例を紹介する。

2 X線を利用した分析手法

2.1 X線とは^{1)~3)}

そもそもX線とは、我々が視認できる可視光などと同じく、光（電磁波）の一種である。電磁波にはその波長に応じた名前がつけられており、一般的にX線の波長は 10^{-11} ~ 10^{-8} m程度とされる。これは可視光や紫外線より短く、ガンマ線より長い。この波長の長さは、物質を構成する原子や分子の大きさ、あるいはそれらの結合距離と同程度である。1895年、ドイツの物理学者であるWilhelm Röntgen博士は、物質を透過する目に見えない光を発見し、「未知の光」を意味するX線 (X-ray) という名を与えた。この物理学上の新発見は、科学・医学・工学など多様な分野の発展に大きく寄与し、

Röntgen博士の偉大な功績に対して1901年に第1回となるノーベル物理学賞が贈られた。その後も、後述するX線分析手法にかかわる様々な発見に対して相次いでノーベル賞が授与された。このようにX線の利用は長い歴史を有するが、21世紀の現在においても研究・産業の幅広い分野で不可欠な技術となっている。

ところで、X線と聞いて多くの人がイメージするのは「物質を透過する」という性質であろう。医療用のレントゲン写真撮影や、コンピュータ断層撮影 (computed tomography, CT) スキャンなど、X線の透過性を利用した技術は我々の身の回りに普及している。しかし、実際にはX線を物質に照射することで、物質中の原子と様々な相互作用を生じている。X線照射によって生じる物質との主な相互作用をまとめたものが図1である。まず基本的なことは、X線の一部は物質により吸収され、残りは透過するということである。上述したX線撮影技術は、透過した成分を検出する。

電磁波の波長とエネルギーは反比例の関係にあるため、可視光や紫外線に比べて波長が短いX線は、高いエネルギーを持つ。そのため、X線を原子に照射すると軌道電子と原子核の間に生じている静電引力を断ち切り、内殻準位にいる電子が外側にある高エネルギー準位の空軌道へと遷移したり、原子の外に弾き飛ばされたりすることがある。X線により内殻電子を励起することを内殻励起という。一方、X線に限らず、電磁波の照射によって原子から電子が飛び出す現象を光電効果と呼び、弾き飛ばされた電子を光電子という。内殻励起により、原子は内殻準位に空位を持つ不安定な状態となる。安定化には二つの経路があり、蛍光X線を放出するか、オージェ電子と呼ばれる別の電子を放出する。これらの発生原理については後述する。内殻励起を生じなかったX線は、原子の中の電子によって散乱される。このときの散乱にも2種類があり、波長およびエネルギーが変化しない場合をトムソン散乱、電子に運動エネルギーを与えて自身はエネルギーを一部失って波長が長くなる場合をコンプトン散乱と呼ぶ。

X線分析は、図1に示した様々な相互作用を利用した分析手法であり、物質の諸情報を知ることができる。以

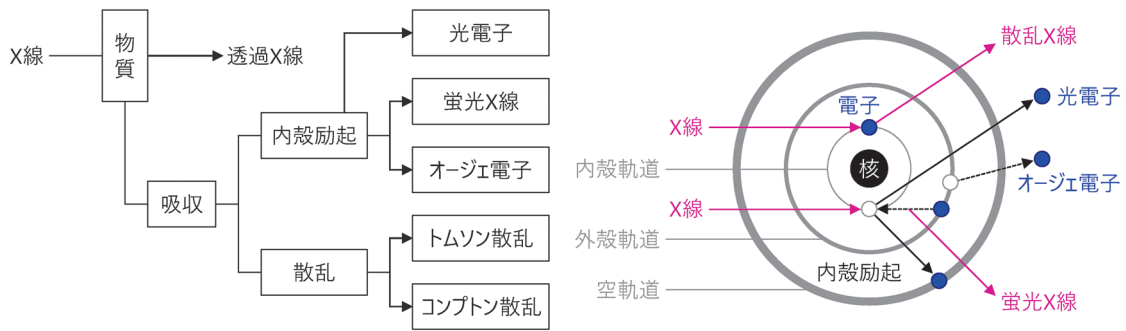


図1 X線と物質との主な相互作用の経路(左)および模式図(右)¹⁾²⁾

下では、網羅分析の観点から3種類のX線分析手法を取り上げ、原理と特徴を簡単に紹介する。

2・2 蛍光X線分析(XRF)¹⁾²⁾

X線照射により内殻電子が外側の空軌道へと遷移されるか、光電子として原子外へ放出されると、原子は内殻準位に空位を持つ不安定な状態となる。このとき、原子はより安定な状態に戻ろうとして、より外側の電子軌道から空位のある内殻準位へと電子が遷移する。この遷移に伴い、遷移前後の電子軌道のエネルギー差を外部に放出することになるが、差分に相当するエネルギーを持つ光(電磁波)として放出する場合があります。この光を蛍光X線と呼ぶ。なお、ここで余剰のエネルギーを電磁波の形で放出せず、同じ軌道にある別の電子に与える場合があります。エネルギーを受け取った電子は励起され、原子から放出される。この放出された電子のことをオージェ電子という。

内殻準位と外殻準位のエネルギー差は元素の電子構造に応じて決まった値を持つため、蛍光X線のエネルギーの値は元素によって固有である。さらに、元素の存在量に応じて蛍光X線の発生量も増える。したがって、物

質にX線を照射し、放出された蛍光X線を検出すれば、そのエネルギーの値から含有元素の種類を、強度から各元素の含有量を計算することができる。このようにして物質に含まれる元素の組成、すなわち化学組成を分析する手法を蛍光X線分析(X-ray fluorescence analysis, XRF)と呼ぶ。蛍光X線分析は原理的に非破壊の分析手法であり、前処理を必要とせず、物質の状態(固体、液体、気体)を問わず適用できる。蛍光X線分析で検出可能な元素の種類は装置によって異なるものの、原理的には ${}_{3}\text{Li}$ よりも原子番号の大きいすべての元素が検出対象になりうる。ただし、原子番号が小さくなるほど蛍光X線のエネルギーは低くなり、空気などによる吸収を受けやすくなるため、検出が困難となる。したがって、実際にこの分析手法で対象とされることが多いのは ${}_{11}\text{Na}$ または ${}_{12}\text{Mg}$ よりも原子番号の大きい元素であり、これより軽い元素の分析には低エネルギーX線の検出に適した装置が必要となる。

X線の照射により、物質からは膨大な量の蛍光X線が放出され、さらにそれらのエネルギー(波長)の値は単一ではないため、分光してから検出する必要がある。蛍光X線分析装置の分光方式にはいくつかの種類があ

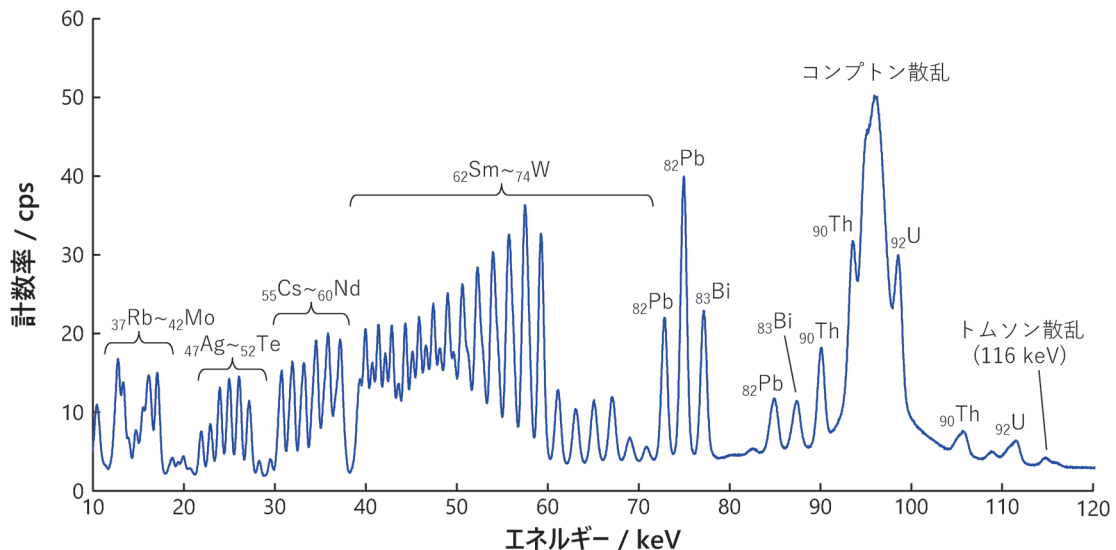


図2 NIST SRM610の蛍光X線スペクトル(SPring-8 BL08Wにて測定)

るが、最も普及しているのはエネルギー分散型 (energy dispersive X-ray fluorescence analysis, ED-XRF) と呼ばれる方式である。この分光方式の装置では、半導体検出器などの優れたエネルギー分解能を持つ X 線検出器を利用することで、物質から発生した蛍光 X 線をエネルギーごとに計数し、スペクトルの形で描画する。エネルギー分散型の蛍光 X 線分析の最大の特長は、多元素同時分析が可能であるという点である。その一例として、大型放射光施設 SPring-8 (兵庫県佐用町) で得られた NIST SRM 610 の蛍光 X 線スペクトルを図 2 に示す。NIST SRM 610 は米国 NIST 製の認証標準物質であり、ソーダ石灰ガラスをマトリクスとして、様々な重元素が約 500 ppm ずつ添加されている。蛍光 X 線分析では、照射する X 線のエネルギーに応じて、得意とするエネルギー領域が変化する。図 2 に示した例では、116 keV というきわめて高いエネルギーの単色 X 線を励起源とすることで、希土類元素を含む 30 種類以上の元素の蛍光 X 線を同時かつ高感度に検出している。まさしく、物質中に含まれる元素の網羅分析に適した分析手法と言えよう。

2.3 X 線回折分析 (XRD)³⁾

X 線は先述したように電磁波の一種である。電磁波は特定の振動数と波長を持ち、光の速度で直進し、進行方向に垂直な平面に広がりを持つ交番電場を伴う。このような X 線が電子と衝突すると、電子は X 線の交番電場によって X 線と同じ振動数で強制的に振動させられる。電子が振動すると、その振動と同じ周期を持った電磁波が電子から放射され、電子を中心に球面状に広がっていく。これをトムソン散乱と呼ぶ。トムソン散乱によって発生する X 線は、照射 X 線と同じ波長の X 線であつ互いに一定の位相の関係があり、可干渉性の散乱である。

実際の物質は無数の原子から構成されているため、X 線を物質に照射すると、各原子を構成する電子から同時多発的にトムソン散乱が発生し、互いに干渉し合う。ここで、ある特定の条件下で散乱波同士の位相が揃う場合があり、干渉によって強め合う回折と呼ばれる現象が生じる。X 線の回折現象は、散乱を生じる電子が周期的に配列している場合に生じるが、これは物質を構成する原子が 3 次元的な周期構造を持つことを意味し、結晶性物質がこの条件に当てはまる。結晶性物質に X 線を照射すると、ある特定の方向で散乱 X 線どうしの位相が揃い、強め合った回折 X 線が検出される。回折 X 線が検出される方向 (角度) は、照射 X 線の波長と回折を生じた結晶格子面の間隔によって決定される。この関係は Henry Bragg と Lawrence Bragg の父子によって定式化され、ブラッグの条件と呼ばれる。つまり、照射する X 線の波長が既知であれば、回折 X 線が検出された角度から、結晶性物質を構成する電子の配列に関する情報

が得られる。一つの回折 X 線信号は、ある特定の結晶格子面に関する情報しか持たないが、散乱 X 線の強度を角度ごとに計測し、複数の回折 X 線を検出・解析すれば、結晶構造全体の情報を明らかにできる。この手法を X 線回折分析 (X-ray diffractometry, XRD) と呼ぶ。X 線回折分析の分析対象となる物質は、枚举にいとまがない。無機物・有機物を問わず活用されているだけでなく、タンパク質などの生体高分子の構造解析にも利用され、ほぼすべての結晶性物質が対象になると言ってもよい。

X 線回折分析には、試料の状態や測定目的に応じた特徴的な手法が多数あり、その利用方法も多岐にわたる。本稿では網羅分析という観点から、粉末法 (粉末 X 線回折分析) と呼ばれる手法について紹介する。この手法では、多数の微細な結晶がランダムな方向で集合したものを対象とする。ただし、試料が文字通りの粉末になっている必要はなく、多結晶体であればバルク試料のまま非破壊的に分析することも可能である。得られた分析データ (粉末 X 線回折パターン) を解析することで、結晶構造に基づく未知試料の相同定のほか、結晶化度や配向性の評価、さらには複数の結晶相を含む混合物に対しては (あるいは非晶質相も含めた) 組成比の定量も可能である。解析に際しては、Powder Diffraction File™ (PDF®)⁴⁾ に代表されるデータベースを参照することで、迅速かつ高い信頼性で相同定が可能となる。あるいは、そうしたデータベースを参照しなくても、データから未知試料の結晶構造の種類を予想することもできる。

多相試料における粉末 X 線回折分析の例として、青色の宝石として知られるラピス・ラズリの分析データを図 3 に示した。ラピス・ラズリは単相の鉱物ではなく、藍方石 (Häuyne : $\text{Na}_3\text{Ca}(\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12})(\text{SO}_4)$)、青金石 (lazurite : $\text{Na}_7\text{Ca}(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)(\text{S}_3)\cdot\text{H}_2\text{O}$)、ノゼアン (nosean : $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)\cdot\text{H}_2\text{O}$)、方ソーダ石 (sodalite : $\text{Na}_4(\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12})\text{Cl}$) などの方ソーダ石グループの鉱物を主成分とし、様々な鉱物が混合した半貴石である。天然のラピス・ラズリを粉末化し、回折パターンを測定した結果、10 種類以上の鉱物が混合していることが確かめられた。さらに、これらの鉱物の組成比を定量した結果、藍方石や青金石を含む方ソーダ石グループの鉱物と透輝石 (diopside : $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) が全体の約 80 % を占め、副成分として霞石 (nepheline : $\text{Na}_3\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16})$)、曹長石 (albite : $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、金雲母 (phlogopite : $\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)、微量成分として方解石 (calcite : CaCO_3)、黄鉄鉱 (pyrite : FeS_2)、石英 (quartz : SiO_2) を含むことが明らかとなった。粉末 X 線回折分析は、検出対象となる物質や化合物を事前に定めることなく、未知試料に含まれる結晶相の相同定・定量が可能であり、結晶性物質に関する網羅分析の代表的な手法と言えよう。

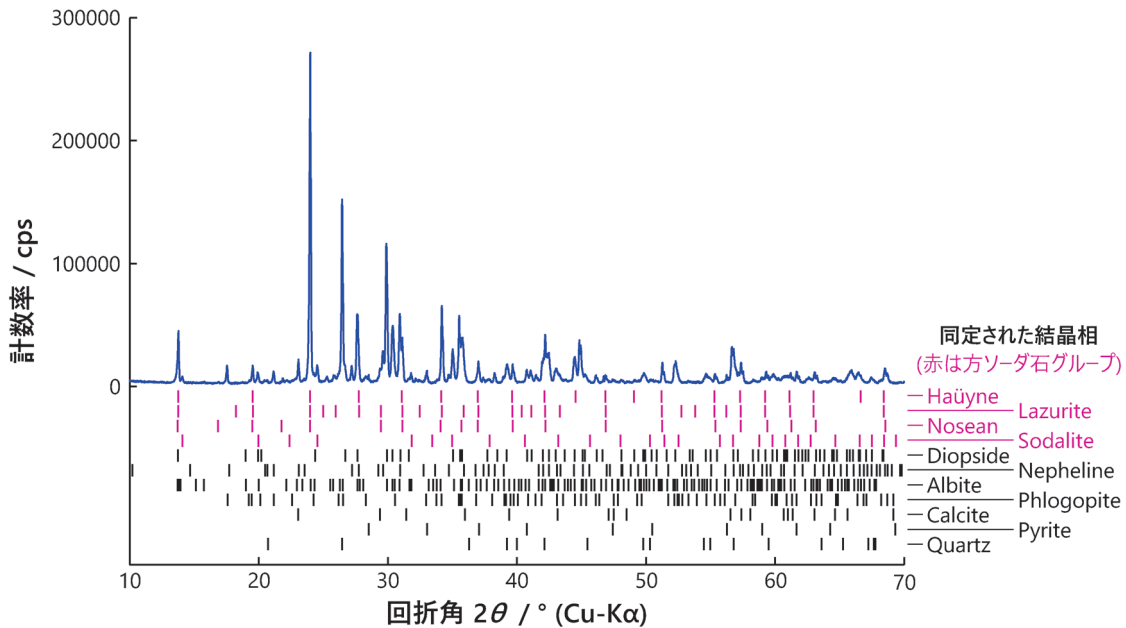


図3 ラピス・ラズリの粉末 X 線回折パターン (データ提供：ブルカー・ジャパン株式会社, D8 ADVANCE で測定)

2.4 X 線吸収微細構造 (XAFS) 解析²⁾⁵⁾

X 線を物質に照射したとき、原子の内殻励起は常に生じるわけではなく、X 線がその内殻電子を弾き出せるだけのエネルギーを持つ場合に限られる。この値は原子を構成する電子と原子核の結合エネルギーに相当し、これよりも高いエネルギーを持つ X 線であれば内殻励起が生じるようになる。この値は吸収端とも呼ばれ、元素および電子殻の種類に応じて、ほぼ固有の値を持つ。

入射 X 線のエネルギーを段階的に変化させながら物質に照射し、入射および透過後の X 線強度から吸光度を計算して、エネルギーと吸光度の関係を描画すると、X 線吸収スペクトルが得られる。例として、金属 Cu 箔を試料として得られた Cu-K 吸収端のスペクトルを図 4 に示す。あるエネルギーから急激に吸光度が増加しているが、この値が吸収端である。元素の酸化数に応じて電子と原子核の間に働く静電引力が増減するため、吸収端のエネルギーはわずかに変化する。したがって、吸収端近傍で吸収スペクトルを詳細に測定し、その微細構造を解析することで、吸収原子の電子状態に関する情報が得られる。さらに、吸収端よりも高エネルギー側に微細な吸光度の変動が見られ、この振動構造を解析することで吸収原子のまわりの局所構造 (隣接原子までの距離や数) についての知見が得られる。両者の構造はそれぞれ X 線吸収端近傍構造 (X-ray absorption near edge structure, XANES)、広域 X 線吸収微細構造 (extended X-ray absorption fine structure, EXAFS) と名付けられ、これらを総称して X 線吸収微細構造 (X-ray absorption fine structure, XAFS) という。これらの構造を解析することで、構成元素がどのような化学形態で存在しているのかを推定できる。X 線の吸光度を測定する代わりに、蛍光

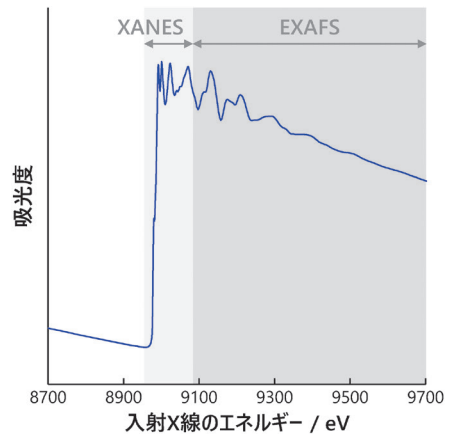


図4 X 線吸収微細構造スペクトルの例 (金属 Cu 箔, Cu-K 吸収端)

X 線の収量を測定することでも同様のスペクトルが得られる。吸光度を測定する方法を吸収法、蛍光 X 線を測定する方法を蛍光法と呼ぶ。

この手法は、蛍光 X 線分析と同様に、固体、液体、気体のすべてに対応できる。また、結晶性物質への適用が主となる X 線回折分析とは異なり、長距離秩序を持たない非晶質物質の分析にも有効である。一般に、X 線吸収微細構造スペクトルの測定には単色 X 線を幅広いエネルギー領域で走査する必要があるため、広いエネルギー領域をカバーできる放射光施設が利用される。放射光を利用する様々な X 線分析手法のうち、本手法は最も基本的な分光法の一つであり、材料解析に関する汎用手法として認識されている。一方、本手法はあくまで対象物質に含まれる特定の元素による吸収を調べるものであり、網羅分析という観点からは適していない。網羅分

析を指向する場合の本手法の強みは、前述の蛍光 X 線分析や X 線回折分析と組み合わせて複合的に活用できる点にある。実際にこれらの手法を組み合わせて利用した研究事例について後述する。

3 研究事例の紹介

X 線分析が高い柔軟性を有し、網羅分析としても活用可能であることをここまで述べてきた。以下ではその実例として、筆者が携わったいくつかの X 線分析に関する研究を網羅分析の観点から紹介する。

3.1 原発事故により大気中に飛散した放射性エアロゾルの性状解明⁶⁾

2011 年 3 月に発生した福島第一原子力発電所事故により、膨大な量の放射性物質が環境中へと放出された。その一形態として、事故の初期段階に生成・放出された、比較的高濃度の放射性 Cs を含む微小な粒子 (Cs-bearing microparticle, CsMP) が知られている。CsMP の最初の発見は、事故直後に気象研究所 (茨城県つくば市) で捕集された大気粉塵であった⁶⁾⁷⁾。その後、帰還困難区域の土壌⁸⁾や、事故直後に東日本の様々な地点で捕集された大気粉塵サンプル⁹⁾¹⁰⁾から同様の放射性微粒子が発見され、事故による環境および生体への影響を評価するうえで重要な物質であると認識されるようになった。以下では、その発見の最初期に行われ、CsMP の詳細な物理・化学的性状を初めて解明した X 線分析の成果⁶⁾を紹介する。

事故直後の 2011 年 3 月 14 日夜から翌朝にかけて気象研究所で採取された大気粉塵フィルター上に、強い放射性を示す粒子が多数捕集されていた。フィルター上から放射性粒子を単離して電子顕微鏡で形態を観察した結果、直径約 2 μm の球形粒子であることが判明した。さらに、1 粒子単位でガンマ線スペクトル測定を行った結果、¹³⁷Cs として 1 Bq 程度の放射能を有することが明らかとなった⁷⁾。この粒子 (CsMP) が Cs 以外にどのような元素を含むのか、どのような状態で含まれるのかなど、詳細な物理・化学的性状を解明するために、大型放射光施設 SPring-8 において、縦横 1 μm 以下に集光したマイクロビーム X 線を用いた非破壊かつ複合的な分析が実施された。

蛍光 X 線分析の結果、CsMP は Cs 以外にも様々な金属元素を含有しており、その中には核燃料由来と考えられる U も含まれることが明らかとなった。蛍光 X 線分析で CsMP から検出されたすべての元素は、核燃料およびその核分裂生成物や、燃料被覆管の合金、压力容器の母材や防護材など、事故当時炉内に存在していた物質に起源づけることができた。この結果は、事故当時に固形物が外部に直接的に飛び出す程度に炉が損傷していたことと、燃料だけでなく容器や建造物も溶けて混ざり合っ

ていたことを示唆している。さらに、1 粒子レベルで実施した粉末 X 線回折分析の結果、CsMP は結晶構造を持たない非晶質であることがわかった。そこで、粒子に含まれていた一部の金属元素 (Fe, Zn, Mo, Sn) について X 線吸収微細構造解析から化学状態を推定した結果、ガラス中に高酸化数のイオンの形で溶解した状態とよく対応することが判明した。以上より、CsMP は金属や鉱物ではなくガラスであり、高温の熔融物が急冷された過程で生成したものと推定された。ガラスは水に対して難溶であるため、CsMP は環境中で長期的な影響力を持つ可能性が示された。

このように、直径わずか 2 μm の微粒子の分析を通じて、重大な原発事故の実態解明へとつながる有益な知見が数多く得られた。これらの放射光 X 線分析は、CsMP の性状に関する事前の情報がほとんどない状態で行われた。特に核燃料由来と考えられる U の存在は、分析の実施前には予想だにせず、多元素同時分析である蛍光 X 線分析を実施したことで発見されたと言っても過言ではない。そして、複数の X 線分析手法を複合的に組み合わせたことで、その正体が初めて明らかにされたのである。

3.2 小惑星「リュウグウ」サンプルの初期分析¹¹⁾

物質に含まれるほぼすべての元素を検出可能な蛍光 X 線分析は、元素の網羅分析においてきわめて有効な手法の一つである。その実例として、ここでは JAXA の小惑星探査機「はやぶさ 2」が地球近傍小惑星「リュウグウ」から持ち帰った貴重なサンプルに対して行われた初期分析¹¹⁾を紹介する。

はやぶさ 2 は 2014 年 12 月に地球から約 3 億 km 離れた小惑星リュウグウに向けて打ち上げられ、2019 年には地表および内部からのサンプル採取に成功した。採取された約 5.4 g のサンプルは、2020 年末に地球へ帰還し、無事に回収された¹²⁾。人類が初めて手にしたこの貴重なサンプルに対し、国内外の研究機関が協力してその物理的・化学的な分析を網羅的に実施する「初期分析」が行われた。約 1 年間にわたる化学分野の初期分析の中で、最初のステップとして計画されたのが蛍光 X 線分析である。この蛍光 X 線分析は「リュウグウ」サンプルの全岩化学組成を決定する目的で行われ、後続する分析の方針を見定めるうえでもきわめて重要な意味を持っていた。さらに、分析後のサンプルは別の分析へとそのまま引き継がれるため、破壊や汚染が一切許されないという厳しい条件が求められた。

含有元素に関する事前情報が一切ない状態で、この貴重なサンプルから少しでも多くの元素情報を得るために、東京理科大学の中井泉名誉教授をリーダーとする蛍光 X 線分析のチームが編成され、筆者もそこに参画させていただく機会に恵まれた。1 か月弱という限られた

時間の中で、株式会社リガクおよび株式会社堀場テクノサービスによる最新鋭の装置を用いた分析と、SPring-8での高度な分析が実施された。特長の異なる複数の蛍光X線分析装置を相補的に利用した結果、主成分からサブppmまでの計37元素から成る詳細な化学組成が報告された。最終的には、初期分析に用いられたサンプルの一部について湿式法の誘導結合プラズマ質量分析法による化学組成分析が実施された。非破壊の蛍光X線分析で得られた化学組成はその結果と良好に対応しただけでなく、酸分解の過程で揮散あるいは難溶性塩の形成を生じるGeやSnなどは湿式法では分析しづらく、初期分析の論文¹¹⁾の中でこれらの元素は蛍光X線分析による定量値のみが報告されている。この貴重なサンプルの分析は、元素の網羅分析における蛍光X線分析の有用性を示す好例である。

4 おわりに

本稿では、「網羅分析」という観点から主要なX線分析手法を取り上げ、その基本原理や特徴を概説し、あわせて筆者の研究事例を紹介した。紙面の都合上ここでは詳述できなかったが、筆者の主要な研究対象の一つは文化財であり、考古遺跡出土の遺物や美術館に所蔵された絵画を対象とした科学的な研究を数多く行ってきた。貴重な文化財の分析調査においては、非破壊かつ非侵襲的な手法を用いることが強く求められる。そのため、本稿で紹介したようなX線分析手法を積極的に導入している^{13)~15)}。実のところ、筆者自身は「網羅分析」という概念を特に意識して研究を進めてきたわけではない。しかし、本稿で触れたような環境試料や地球惑星試料の研究、あるいは文化財に関する研究において、事前に分析対象となる成分を特定できる場合は多くない。さらに、工業製品や材料の検査とは異なり、これらの試料中に含まれる元素や成分はきわめて多様である。一方で、本稿で紹介したCsMPに含まれていたUのように、物質の来歴を検証するうえで決定的な手がかりとなる特徴的な成分が見出される場合もある。こうした研究では、必然的に「網羅分析」の考え方に基づくアプローチが求めら

れる。汎用性と応用性に優れたX線分析は、まさにその要請に応える手法である。本稿が、X線を用いた分析手法の理解を深める一助となれば幸いである。

文 献

- 1) 中井泉編：“蛍光X線分析の実際”，第2版，(2016)，(朝倉書店)。
- 2) 辻幸一，村松康司編著：“分光法シリーズ 第5巻 X線分光法”，(2018)，(講談社)。
- 3) 中井泉，泉富士夫編：“粉末X線解析の実際”，第3版，(2021)，(朝倉書店)。
- 4) S. N. Kabekkodu, A. Dosen, T. N. Blanton : *Powder Diffr.*, **39**, 47 (2024)。
- 5) 太田俊明，横山利彦編著：“内殻分光”，(2007)，(アイピーシー)。
- 6) Y. Abe, Y. Iizawa, Y. Terada, K. Adachi, Y. Igarashi, I. Nakai : *Anal. Chem.*, **86**, 8521 (2014)。
- 7) K. Adachi, M. Kajino, Y. Zaizen, Y. Igarashi : *Sci. Rep.*, **3**, 2554 (2013)。
- 8) 小野貴大，飯澤勇信，阿部善也，中井泉，寺田靖子，佐藤志彦，末木啓介，足立光司，五十嵐康人：分析化学 (*Bunseki Kagaku*)，**66**, 251 (2017)。
- 9) 小野崎晴佳，阿部善也，中井泉，足立光司，五十嵐康人，大浦泰嗣，海老原充，宮坂貴文，中村尚，末木啓介，鶴田治雄，森口祐一：分析化学 (*Bunseki Kagaku*)，**68**, 757 (2019)。
- 10) Y. Abe, S. Onozaki, I. Nakai, K. Adachi, Y. Igarashi, Y. Oura, M. Ebihara, T. Miyasaka, H. Nakamura, K. Sueki, H. Tsuruta, Y. Moriguchi : *Prog. Earth Planet. Sci.*, **8**, 13 (2021)。
- 11) T. Yokoyama *et al.* : *Science*, **379**, eabn7850 (2023)。
- 12) T. Yada *et al.* : *Nat. Astron.*, **6**, 214 (2022)。
- 13) 阿部善也，権代紘志，竹内翔吾，白瀧絢子，内田篤興，中井泉：分析化学 (*Bunseki Kagaku*)，**60**, 477 (2011)。
- 14) Y. Abe, R. Shikaku, M. Murakushi, M. Fukushima, I. Nakai : *J. Archaeol. Sci. Rep.*, **40**, 103195 (2021)。
- 15) 阿部善也，小林仁，福嶋喜章，村申まどか，長江惣吉，藤田清，中井泉：文化財科学，**84**, 31 (2023)。



阿部 善也 (Abe Yoshinari)

東京電機大学工学部応用化学科 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町5番)。東京理科大学総合化学研究科総合化学専攻修了。博士(理学)。《現在の研究テーマ》X線を中心とした機器分析手法の開発・高度化と学際分野への応用。《趣味》お酒を嗜むこと。

E-mail : y.abe@mail.dendai.ac.jp