

# 第 1 章

---

## 厄介だが有用な元素

# 1 「元素」と付き合っていくとどうなるか

今や悪役のイメージが強い水銀だが、長らく有用な物質として様々な用途に使われてきた。物質としての水銀が発見されたのは大変古く（というよりいつ発見されたか知られていない。）、今から約150年前にロシアの化学者メンデレーエフが発表した周期表にももちろん記載されている。彼は、元素を原子量順に並べると、類似の性質を示す元素が周期的に現れることに気づき、周期表を発表した。

## ○有用性と有害性は紙一重!?

メンデレーエフの理論では、化学的特性が類似の元素は「原子量が近い（原子番号が隣接）」場合と「規則的に増加する（同族元素）」場合が挙げられている。その視点で、水銀の周りの元素を眺めてみると、金銀銅をはじめとして有用なイメージが強い元素がたくさん並んでいる（表参照）。銅やスズは青銅器として一つの時代を支えてきたし、ガリウム、インジウム、ゲル

マニウムなどは半導体材料として、パラジウム、白金などは触媒として現代社会に無くてはならない物質である。また、亜鉛は、ヒトの必須ミネラルとして、多くの酵素活性に重要な役割を演じている。

これに対して、水銀、鉛、カドミウムは、名前を聞いただけでブラックなイメージが漂ってくる。3悪党ともいえるこの3元素は、実は善玉の亜鉛と性質が似ているらしい。「亜鉛」という名称自体、外見が鈍い銀白色で「鉛」と似ているから付けられたと言われているし、亜鉛と同族のカドミウムは、生体が必須ミネラルの亜鉛と間違えて取り込んでしまい、結果として富山のイタイイタイ病などの疾患を引き起こした。そして水銀は、硫化物として亜鉛に伴って産出されることが多く、閃亜鉛鉱グループに属している。有用性と有害性は、実は紙一重なのかもしれない。

## ○消えない元素、消えない毒性

国連環境計画（UNEP）は、水銀、鉛、カドミウムについて

28 ニッケル	29 銅	30 亜鉛	31 ガリウム	32 ゲルマニウム
46 パラジウム	47 銀	48 カドミウム	49 インジウム	50 スズ
78 白金	79 金	80 水銀	81 タリウム	82 鉛

水銀まわりの周期表の抜粋

「人の健康と環境に対するリスクをライフサイクル全体に渡って管理する必要がある物質」として、それらの管理プログラムを実施している。UNEPがこの3元素を取り上げた理由は、その毒性もさることながら、人間が意図的・非意図的にそれらの物質を拡散させているため、他ならない。

これらの物質は元素であるため、いったん環境中に排出されるとそれ以上分解されず、長期的に残留するという性質がある。そのため、長い時間をかけて地殻の奥深くの元居た場所に戻ってもらうまで、我々はこれら元素のリスクと付き合っていかなければならない。この問題の本質は、人間活動に伴う排出によって、生態が許容できるしきい値を超えたばく露（危険因子にさらされること）が起きることであり、そのリスクを許容範囲内で管理していくことが我々の目標となる。

一方で元素であるということは、地球誕生の時から存在していた物質であり、火山活動や岩石の風化など自然現象によっても環境中に排出されていることになる。つまり、人間が作り出したプラスチックやPCBといった物質と異なり、生命は、それらの物質の存在を前提として発生したことができる。そう考えると、たとえ有害元素であっても、環境中に通常存在するバックグラウンドレベルであれば、それほど神経質になる必要はないのではないか。

## 2 水銀はどこからきてどこに行くのか

現在、世界で水銀鉱山が残っている国は数えるほどしかなく、縄文時代から水銀を採取してきたと言われる日本でも、1970年代には全ての水銀鉱山が閉山した。しかし、水銀は、水銀鉱山での採掘以外にもいろいろな形で掘り出されている。それらは主に不純物として意図せず他の鉱物に含まれ、時に厄介者として取り除かれることになる。

### ○水銀鉱山から掘り出されるまで

スイスの鉱物学者であるゴルトシュミットは、化学的挙動の類似性に着目して、元素を「親気元素」「親銅元素」「親石元素」「親鉄元素」などに分類した。水銀は、このゴルトシュミット分類において「親銅元素」に分類されており、一般に硫化物を作りやすく、融点や沸点が低いという性質を持っている。例えば地殻活動などでマグマが上昇する際に、類似の性質を持つ元素同士が集まって鉱脈を作ることがあるが、水銀は、地下のマントルから熱水鉱床や火山のマグマなど

の形で上昇し、主に硫化物として鉱脈を作ることが知られている。そのため水銀鉱山では、主に辰砂（しんしゃ）・硫化水銀鉱）として鉱出される。

### ○図らずも掘り出される厄介者

水銀鉱山以外では、銅、鉛、亜鉛や金など、非鉄金属の採掘に伴って水銀が鉱出されることが多い。これらの金属は、どれも「親銅元素」に分類されるため、元素として水銀と類似の性質を持つ。そのため水銀が含まれやすく、一緒に

掘り出されてしまうのだ。ただ、目的金属ではない水銀はまさに「不純物」であり、取り除かれて捨てられることになる。品位が低いと採算が取れないし、そもそもマーケットの需要と鉱出量は目的金属に対して決められるもので、随伴金属は、製錬しても売れる保証が無い。ただし、日本では製錬過程で除去された水銀を、そのまま廃棄せずに回収・利用するといった工夫もなされている。



辰砂を含む鉱石

## ○石炭に水銀が含まれるワケ

石炭に水銀が含まれていることから、炭鉱も、非鉄金属鉱山と並んで水銀鉱出が多い場所である。植物は、生存中に吸収した微量の水銀を内部に残している。そうした植物の化石である石炭には、濃度の差はあるものの、どの炭種であっても水銀が入っている。その濃度は、水銀として製錬することができるようなレベルではないが、石炭の鉱出量は他の鉱物に比べて桁違いに多いため、水銀量としては相対的に大きなものとなる。

## ○セメント原料にも水銀が含まれるワケ

セメントの原料となる石灰石もまた、水銀の主要な鉱出源である。石灰石は堆積岩であり、それが直接水銀の鉱脈とはならないが、風化により火成岩に含まれる水銀が環境中に放出されたり、ガスとして大気中に存在する水銀が次第に酸化されて無機の水銀塩として沈着したりして、「不純物」として微量に石灰石に混入するためだ。石炭と同様、石灰石も鉱出量が非常に多いため、随伴する水銀量は無視できない。

## ○水銀のライフサイクルを管理する

水銀は元素であり分解して無くなることはない。だから、地中から掘り出すということは、それだけ我々の生活環境中の水銀量を増やすことにつながってしまう。今でも水銀需要はあるため、何らかの供給のしくみは必要であるものの、それらは使い終わった水銀をリサイクルすることによって十分賄えるはずである。「水銀に関する水俣条約」では、将来的な水銀鉱山の廃止をその規定に盛り込んでいるが、それ以外の鉱出は禁止していない。石炭やセメント（石灰石）などは経済発展に伴いこれからも需要が伸びていく資源であり、水銀のためにそれらの生産を止めるわけにはいかない。しかし、それらを焼くことで水銀が排出されてしまうため、大気排出管理を行う必要がある。水銀の拡散を防ぎ、凶らずも掘り出されてしまった水銀が、いつの日か地中深く元居た場所に戻っていくまで、我々は根気強く水銀の管理を続けていかなければいけない。

### 3 健康か生活か ～小さな金採掘業者のつぶやき

水銀は、自然水銀（単体の金属水銀）としても産出されるが、多くは赤褐色の鉱石である辰砂（しんしゃ・硫化水銀鉱）として自然界に存在している。金属水銀は、この辰砂を強く熱すると簡単に取り出せるため、水銀の製錬に高い技術は必要ない。また、水銀も多くの金属と同じように合金を作るが、その合金は、特に「アマルガム」と呼ばれ、他の金属の抽出などに使われている。アマルガムを作り、裸火でも気化し、無くなってしまふ（ように見える）水銀は、古代から近世にかけて世界各地で盛んに行われていた錬金術（卑金属から貴金属を作り出そうとする試み）の主要物質とされてきた。水銀を用いて金を採掘する零細・小規模金採掘（ASGM）は、現代の錬金術とも呼ばれている。

#### ○アマルガム法とは？

鉱石に含まれる金・銀などの金属は、水銀と混ぜ合わせると鉱石から溶け出し、水銀アマルガ

ムをつくる。そのアマルガムを強く熱することで水銀が蒸発して金属だけが残るというアマルガム法は、高度な装置や技術を必要とせず、17世紀以降のアメリカ大陸において盛んに用いられていた。有名なところでは、19世紀に起きたカリフォルニアのゴールドラッシュにおいても、このアマルガム法が金の採掘に用いられていた。

#### ○生活になくってはならない水銀

20世紀に入り、遠隔地など交通が不便な場所でも行うことができるアマルガム法ASGMが、アジアやアフリカの発展途上国に紹介されると、一気に広まりをみせ、現在では70か国以上で、この水銀を用いたASGMが行われている。さらに近年の金相場上昇を背景に「儲かる商売」として、1000万人以上が従事しているともいわれるASGM、現在この金採掘が、世界最大の水銀の用途になっている。水銀を使ったASGMは、単にそれが環境破壊や健康被害につながるだけでなく、その地方の唯一の生計手段として経済的にその社会に取り込まれてしまっている点が、問題を複雑にしている。



一方で、大規模な鉱山会社が開発する金鉱山の製錬場では、アマルガム法ではなく、シアン化合物を用いて金製錬が行われている。しかし、この方法では、水銀よりさらに毒性の強いシアン化合物を使用するため、技術レベルの低い零細・小規模な採掘者では取り扱うことが難しい。その他の水銀を使用しない製錬方法も提案されているものの、アマルガム法と同等以上の金回収率を達成するのは容易ではなく、課題は残り続けている。

### ○水銀対策の視点から金相場を眺めると

金が高騰すると、当然のように金の生産（採掘）も増加し、それに伴い水銀の使用量も増えて、価格は上昇する。経済学理論に従うと、水銀の需要を削減するためには、水銀の価格を上昇させるべきとの考え方もあるが、この金の採掘に限って言えば、水銀の価格は金の数百分の一であるため、多少値上がりしたところで水銀の使用をやめる動機にはつながらない。

真の問題は、水銀の価格の上昇によって、新たな水銀鉱山が開発されてしまう危険性がある、ということにある。水銀は、いったん環境中に排出されると、分解されずに循環を続けることになる。そのため、地中から掘り出す行為は、真っ先にやめなければならない。水銀対策の視点から金相場を眺めると、いつもとは別の景色が見えてくる。

## 4 いずれもあぶない金銀製錬法

金や銀の存在は紀元前から知られており、長い利用の歴史がある。そして、意外に思われるかもしれないが、銀は、その希少性から、金に匹敵する貴金属として扱われてきた時代が長かった。多くの金が天然に自然金として存在したが、銀は貴金属の中では比較的反応性が高く、硫化物や塩化物等の化合物になるため、自然銀は量が少なく貴重だったことが、主な理由である。金と銀の価値差が広がったのは、製錬技術の発達により、銀鉱石から大量の銀が生産されるようになってからである。

### ○最も古い鉛を用いた「灰吹法」

自然金や自然銀より品位の低い金鉱石・銀鉱石の場合は、製錬が必要となるが、これまでにいくつかの方法が開発され、普及してきた。その中で最も古い方法は、鉛を使った「灰吹法」と呼ばれるもので、メソポタミアでは紀元前から行われていたとも言われている。鉛は融点が

低く(327℃)、溶融鉛は貴金属をよく溶かすため、金銀の抽出材として用いられた。この方法では、まず、金や銀を鉛に溶け込ませて、鉱石から抽出する(この時の鉛合金を「貴鉛」と呼ぶ)。その後、この貴鉛を、灰の入った皿(キューベルと呼ばれる)の中で加熱、すると鉛が酸化して灰に吸収され、金や銀が皿の上に残ることになる。この灰吹法は効率的な製錬方法であったが、酸化鉛の粉塵を吸い込んだ作業員が鉛中毒になるといいう事例が多かったと言われている。

### ○水銀を用いたアマルガム法の普及

16世紀に入り、ラテンアメリカでの銀採掘が盛んになると、新たな製錬法が誕生した。「アマルガム法」と呼ばれる水銀との合金を用いた方法だ。水銀も鉛と同様、金銀と合金を作りやすく、しかも融点が鉛より低いため、合金化の工程に加熱を必要としない。加熱が必要なのは、最後に水銀を気化させるプロセスだけである。加熱させる燃料を確保するために森林の伐採が進ん



灰吹法



でいたラテンアメリカの鉱山地帯にとつては、願ってもない方法だった。少なくとも森林保全の点からは、少しは環境に優しくなったと言えようか。しかし、水銀の蒸気は強い神経毒であり、鉛の時と同様に、水銀による中毒は避けられない。

### ○シアン化合物を用いるのが現在の主流

さらに時代が下り19世紀になると、シアン化合物を利用した「青化法」が登場する。青化法は、金銀が、酸素のある環境中でシアン水溶液に溶解する性質を利用して。まず、シアン化ナトリウムやカリウムの溶液に粉碎した金や銀の鉱石を入れ、空気を送り込みながら攪拌する。すると、金銀がシアンとの錯イオン（金属原子を中心に他の原子等が立体的に結合したイオン）となつて溶解するので、その水溶液に亜鉛を加えて、金銀を沈殿させる。その後、沈殿した金銀を取り出して精製するのである。この方法は、ゴールドラッシュ中期に発明されたこともあり、急速に普及し、現在でも多くの金製錬に用いられている。しかし、使われるシアン化合物はやはり毒性が高く、一旦河川などに流れ込むと、魚類の大量死にもつながるため、いくつかの国や地域では使用が禁止されている。反面、環境中では比較的短時間で無害化され、かつ、残留性が無いことから、使用を禁止していない国もある。そうした国の多くは、しっかりと管理の下で、シアン化合物の使用を認めている。

このように、金銀の製錬には、何れも有害化学物質が使われてきており、実際にヒトの健康や環境への被害も発生している。金銀生産の歴史は、労働者にとつて苦悩の過去だったのだ。その金と銀であるが、実は製造業への供給は逼迫していないと言われている。世の中には十分以上の金銀備蓄があり、レアアースのように、一つの国の規制措置が世界の産業を危機に陥れるようなことも起こらない。では、なぜそこまでして採掘を続けなければならないのだろうか。需給関係を無視してまで金銀の採掘を続けることに本当に意味があるのか、今がまさに立ち止まって考えるべき時なのかもしれない。

## 5 アマルガムの功罪

金属は合金をつくる。それは、水銀の場合も同様である。水銀の合金は特に「アマルガム」と呼ばれているが、メカニズム的には、他の金属同士の合金の延長線上にある。アマルガムの大きな特徴は、水銀の融点が低いため、その合金が低融点（場合によっては常温で液体）となることである。現在、その特異性を利用した多くのアマルガムが知られている。

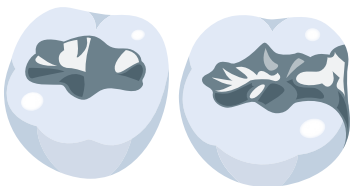
### ○歯科用充填に用いられる銀アマルガム

アマルガムとして最もよく知られているのは歯科用充填剤であろう。19世紀前半にフランスで使われ始めたもので、銀粉を水銀で混和したアマルガム充填は、その後米国や英国に広がっていった。米国に渡った初期のアマルガムは、硬化が遅いうえに膨張も甚だしく、評判は芳しくなかった。そこで1845年に、米国の一部の歯科医師たちは、アマルガム使用を廃絶すると宣言した。他方、アマルガムの独特な利点に理解を示す者も少なくなく、ここに10年間の「アマルガ

ム戦争」と呼ばれる論争が勃発する。それから膨張収縮の少ない三元（銀―スズ―水銀）アマルガムが主に用いられなど、アマルガムの改良が進められてきたが、歯科用アマルガムの安全性に関しては、繰り返し議論されており、「水銀に関する水俣条約」においては、その削減が規定されている。

### ○アマルガム法による金めつき

鍍金（めつき）は、最も古いアマルガムの利用形態の一つだ。中央アジアの騎馬民族であったスキタイの技術が、シルクロードを経由して古墳時代の頃、日本に伝わったと考えられている。多くは青銅の上に金アマルガムを塗り、その後、火で水銀を蒸発させて、最後にヘラで磨くというプロセスで製作される。古く東大寺の大仏像を彩り、今でも寺社や工芸美術品の修復などで用いられている。



歯科用充填剤

## ○まだまだあるアマルガムの利用法

他にも様々な場面でアマルガムは利活用されている。鏡の鏡面処理に使われたのが、スズアマルガムだ。青銅などの金属鏡は徐々に錆が発生するため、鏡面（表面）にスズアマルガムを塗布して定期的に磨かれていた。また、初期のガラス鏡においても、スズアマルガムを用いて鏡面（背面）が作られていた。更に、食塩電解による苛性ソーダを製造する際に、電解槽からナトリウムを取り出すために用いられていたナトリウムアマルガムも代表事例の一つだろう。

純水銀は $39^{\circ}\text{C}$ で凝固してしまうが、タリウムと合金を作ること、その融点は $-60^{\circ}\text{C}$ まで低下する。この現象を利用して、純水銀が凝固するような極寒地で気温を測る温度計にタリウムアマルガムが用いられている。また、カドミウムアマルガムを用いたウェストン電池は、起電力の基準となる国際標準として長く使われていた歴史を持つ。

特殊な例では、電球型蛍光灯の発光特性を改善するためにピスマスやインジウムアマルガムが活用されたり、リチウムアマルガムが同位体分離（水素爆弾に使用される $^6\text{Li}$ の濃縮）に用いられたり、アマルガムには多くの使用事例がある。

## ○アマルガムが引き起こす問題

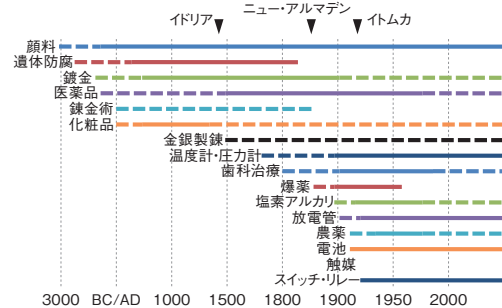
こうしたアマルガムも、現在ではその使用範囲が限られてきているが、逆にどんどん増えている用途がある。金アマルガムを用いた金の製錬である。金鉱石を細かく砕いてそれを水銀と混ぜ合わせると、微細な金粒子がアマルガムとなって溶け出し、鉱石と分離する。このアマルガムを強熱、水銀を蒸発させて金を製錬するのだが、その際の水銀蒸気による作業者の健康被害は、今や深刻な問題となっている。

水銀がアマルガムを作ること、それ自体が問題となる金属もある。アルミニウムである。アルミニウムは表面に酸化被膜を作ることにより腐食の進行を抑える働きがあるが、水銀が付着すると、被膜が作られず、アルミニウムがどんどんアマルガム化して溶け出してしまう。特に天然ガスの中に不純物として含まれる水銀は、熱交換器などのアルミ製機器を痛めるため、石油業界にとって大変な厄介者である。

アマルガムは、功罪も混ぜ合わせている。

## 6 時代に翻弄された水銀鉱山とその栄枯盛衰

水銀採掘の歴史は非常に古い。そして、先史時代から世界各地で水銀を使用した痕跡もある。しかし、現代の鉱山業のレベルで考えると、それらのほとんどは、ごく小規模に採掘されていたに過ぎない。水銀採掘量が著しく増えるのは、15世紀以降、スペイン帝国によるラテンアメリカの鉱山開発が始まった頃からである。15世紀末にイドリヤ水銀鉱山（当時オーストリア（現スロベニア）にあった世界の累計水銀鉱山産出量第2位の鉱山）が開かれると、ここからメキシコの鉱山へ大量の水銀が流入することになる。この水銀を用いた金銀採掘手法は、今日まで続いている。こうして歴史的な水銀の供給を見ると、水銀の需要と鉱山開発は、お互いに影響を与え合っ



世界の水銀需要の多様化の歴史

実線部分は日本での需要を示す

ていると分かる。

### ○ゴールドラッシュは水銀ラッシュでもある

アメリカ・カリフォルニア州にあったニュー・アルマデン水銀鉱山（アメリカ史上最大の水銀鉱山）は、1850年代から本格的な水銀生産を始めた。1848年に始まったカリフォルニアのゴールドラッシュがきっかけになっていることは、疑う余地もない。16世紀以来、水銀の最大の用途は、ラテンアメリカの銀採掘におけるアマルガム（水銀との合金）法である。これに、北米・オーストラリアなどでの金採掘が加わり、水銀の需要は拡大の一途をたどることになる。

### ○戦争が水銀の大量需要をもたらす

19世紀末にシアン化合物を用いる金銀の新たな製錬方法（青化法）が開発されると、この方法は徐々に普及していった。そして同じ頃、金銀の資源も枯渇していったことで、20世紀初頭には、ゴールドラッシュにおける水銀の利用は終息に向かっていた。ゴールドラッシュの次に起きたのが、水銀の軍事利用である。20世紀前半は、第一次大戦、第二次大戦を初めとした紛争に明け暮れた時代であり、その中で、雷汞（らいこう・雷酸水銀、汞は中国語で水銀のこと）を用い

た雷管が、武器弾薬として普及していったのである。銃弾の発射や爆薬の起爆装置として雷管は欠かせないものであった。軍用水銀の増産は日本でも進められ、1939年にイトムカ（アイヌ語で「光輝く水」の意）水銀鉱山の開発が始まっている。

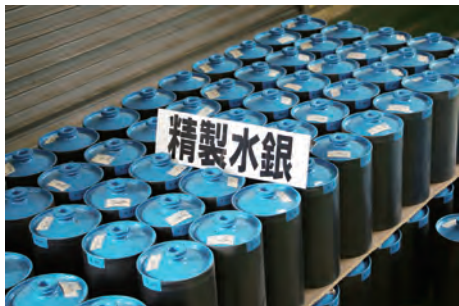
### ○戦後は工業用途の水銀需要が拡大

イトムカは、北海道中央部の大雪山中にあり、一時は東洋一の規模を誇った日本屈指の水銀鉱山である。戦後、一旦操業が停滞するが、水銀の新たな用途が次々に開発され普及していき、多様な産業が水銀を必要としていた時期と重なる形で、1960年代に再び隆盛を迎える。まず、水銀農業が稲作に欠かせない存在となり、塩素アルカリ工業も、苛性ソーダや塩素など基礎工業薬品を水銀法で製造した。また、ランプや整流器といった電気製品や、計測器、赤色塗料等にも水銀が用いられ、水銀系医薬品も少なくなかった。そうした中、有機合成の触媒として用いられていた水銀が、あの「水俣病」を引き起こす。

### ○水俣病によって激変した水銀需要

1968年に、水俣病の原因が水銀化合物であることが公式に発表されると、日本では、世界に先駆けて次々と水銀の使用を取りやめる政策が進められ、その需要は一気に縮小した。1973年に塩素アルカリ工業が業界としての無水銀化を決定すると、水銀の大きな需要が失われるだけでなく、工場内で液体電極として使われていた大量の水銀も市場へと戻ってくるようになってしまった。そのため、水銀は供給過多の資材となり、鉱山から掘り出す意義も失われてしまう。結局イトムカも、1974年には鉱山としての役目を終え、現在は水銀含有廃棄物のリサイクルを行う事業へと業態を変えている。

イドリヤ、ニュー・アルマデン、イトムカの水銀鉱山は、何れも20世紀後半に閉山した。現在、世界最大の水銀鉱出を行っているのは中国（主に貴州省）だ。中国では豊富な石炭資源を用いた塩化ビニル製造が行われており、その触媒として大量の水銀を必要としている。水銀の鉱出を無くしていくことは、水俣条約の大きな目標であるため、今後中国がどのような道筋をつけていくのか、我々は注視していかなければならない。



## 7 水銀は世界をめぐる

水銀がグローバルな課題であると認識されたきっかけとして、越境大気汚染物質に関する調査研究が挙げられる。第二次世界大戦後の復興期、国境を越えての激しい大気汚染に悩まされていた欧州では、1979年に、主に酸性雨問題に取り組むことを目的とした長距離越境大気汚染条約が採択され、それに基づく環境モニタリングプログラムが開始された。その過程で、スカンジナビア半島の湖沼において水銀濃度が上昇しているということが明らかになり、重金属の越境移動に関する注目がやかに高まりを見せる。

### ○水銀の問題をなぜグローバルに考えるのか

水銀をはじめとする重金属汚染は、それまでローカルな問題と考えられていた。この場合、汚染源があつて、流出した汚染物質にはく露（危険因子にさらされること）されたヒトや野生生物などに被害が及ぶという、原因と結果が一直線の関係にある。一方、越境大気汚染や地球温暖化

に代表されるグローバルな問題は、原因と結果の関係がはるかに複雑だ。しかも地球科学に大きく影響を受け、複数の国や地域を巻き込んだ事象を取り扱わなければならないという点が対応を困難にしている。

ローカルな問題に対処するためには、それがどれほど深刻であれ、当該国内での問題解決に向けた取り組みが第一であるが、グローバルな問題の場合、国際的な連携が重要となる。水銀がグローバルな課題と考えられるようになったのは、有害性が高く長距離移動性を持つという性質に加えて、人為的に排出され、かつ途上国における排出が多いことも要因として挙げられる。さらに問題なのは、人為的な活動によって排出量が大幅に増加していることであり、国連環境計画（UNEP）の報告によれば、大気への水銀排出量は、人間活動によって4〜5倍程度上昇したと見積もられている。そのため、問題の解決に向けては国際協力が必要であり、世界的な取り組みによって人為的な排出の削減が必須と考えられるに至った。

### ○マグロの水銀はどこから来た？

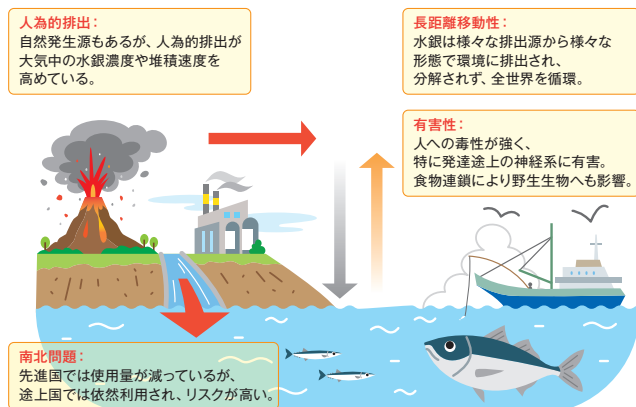
水銀は、火山の噴火や岩石の風化などでも環境中に排出されるため、完全に無くすることはできない。特に金属水銀は、常温でも揮発して水銀蒸気（気体）となり、大気中に長期間とどまることが知られている。その間、大気循環により地球を何周も回り続け、やがて、紫外線酸化や他の

物理化学作用によって地表や海上に沈降していく。こうして海洋に入った水銀の一部は、微生物の作用等により毒性の強いメチル水銀に変化したのち、生物濃縮を経て食物連鎖の上位の生物種（一般に肉食で大きな魚）に高濃度で蓄積する。このメカニズムを理解すれば、外洋を回遊していたマグロが体内に蓄えた水銀の起源を突き止めることは、ほとんど不可能に思えるだろう。日本は、世界でも有数の魚消費国であるが、魚介類の水揚げは、海洋にある水銀を我々の生活圏に引き入れる行為でもあるのは皮肉なことである。

### ○情けは人の為ならず

現在日本の水銀大気排出量は、世界の1パーセント弱にまで減少している。しかし、水銀が大気をめぐり、海洋に漂い、魚に蓄えらえることを考

えれば、日本で水銀の排出削減を進めても、日本人の水銀ばく露のリスクがほとんど削減できないと分かる。逆に、現在水銀を大量に排出している国の水銀対策を支援することは、地球をぐるりと回って日本の水銀対策にも寄与することになる。情けは人の為ならず——水銀をグローバルな枠組みでとらえるというのは、日本のためでもある。



## 8 黄金狂の時代を支えた水銀

1925年に公開されたチャップリンのサイレント映画『黄金狂時代』（原題『The Gold Rush』）、空腹のあまり靴を料理して食べる一幕は、知っている人も多いだろう。実際に金を採掘するシーンは含まれていないが、19世紀後半に起きたゴールドラッシュを、彼らしいユーモアをもって描き出している。19世紀は、まさに、アメリカ、さらには世界中を巻き込んだゴールドラッシュの狂想曲が、鳴り響いていた時代である。

### ○世界中から人と技術がカリフォルニアに

1848年、サクラメント近郊のコロマという村で始



「黄金狂時代」のチャップリン

まったカリフォルニアのゴールドラッシュだが、噂はすぐに広まり、アメリカだけでなく世界各地から一攫千金を狙う山師（鉱夫や投資家）が、カリフォルニアを目指して集まってきた。しかし、「フォーティナイナーズ」(Forty-niners・1849年入植者の意味)と呼ばれる初期の移民で成功した者はいないとも言われ、むしろ採掘者の周辺で資機材を供給した中に、財を成した者が出たとされている。

世界中から押し寄せた彼らは、「槌」「木碗」「ゆりかご」といった原始的なものをはじめとして、あらゆる技術をカリフォルニアへと持ち込んだ。その中には、中南米で使われていた水銀アマルガム（水銀との合金）法も含まれていた。最初に発見された高品位の金は、あつという間に採り尽くされてしまい、川底を浚ったり山を砕いたりして集めた土砂が、アマルガム法によって製錬されたという。さらに、寄せ集められた技術が（比喩的な意味で）化学反応を起こし、様々な技術革新がもたらされた。高圧水を噴射して掘削する技術や、鉱石を粉碎する技術、さらには水銀の自動投入装置などの諸技術が、このカリフォルニアで開発されていった。

### ○ゴールドラッシュが世界に拡散

カリフォルニアのゴールドラッシュは、世界中から山師を集めるとともに、その彼らによって世界各地に第二第三のゴールドラッシュを生み出していった。オーストラリアからカリフォルニ



アに向かった山師たちも、その多くが夢破れて帰国した。カリフォルニアでの採掘経験を持って帰国した鉱夫たちが、1851年にニューサウスウェールズにおいて発見された金からオーストラリアのゴールドラッシュを生み出した。1859年にはコロラドのバイクスピークで金が見つかり、その後も、1886年に南アフリカのウイットウォーターズランド（後のヨハネスブルク）で大金脈の発見、1896年のカナダのクロンダイク（アラスカゴールドラッシュとも呼ばれ、チャップリンの映画のモチーフとなった）と続いていた。多くの場所で「ボナンザ」は長続きしなかったが、南アフリカでは、その後1世紀にわたり金採掘量世界1位を記録し、国の経済を支える金脈となっていた。

### ○土木技術の知見など得たものが多い一方で……

カリフォルニアのゴールドラッシュを歴史的に評価すると、会社形態に組織化された集団が新規の投資や技術の開発を進めて、当初行われていた個人個人による採鉱を「鉱山業」という業界にまで高めた点が挙げられる。アメリカ南北戦争が終了した時期と重なったことで、投資資金の流入を受けられたという幸運も手伝い、1879年に連邦地質調査所（USGS）が設立されるなど、とりわけアメリカの鉱山業は国家レベルで整備が進んでいった。そして、この時期にダムや橋梁、浚渫、水力発電といった重要な土木技術の知見が集積されるなど、得られた技術も少なくない。

一方で、水銀が大量に使われたアマルガム法だが、1887年にシアン化合物を用いて金銀を製錬する「青化法」が開発されると、徐々に置き換えられていった。青化法は、特に金粒の小さい鉱石に適しており、品位のあまり高くない鉱石を大量に処理するといった大規模な採掘形態に向いていた。こうしたことにより、鉱脈のタイプや品位、経営形態や規模などに応じた（アマルガム法を含む）様々な採掘技術が世界中に伝播していき、金製錬を押し進める結果となった。

20世紀以降、途上国で零細・小規模金採掘が隆盛を極めている現状は、これらの技術移転によるところが大きい。しかし、それが結果的に世界での水銀汚染につながったのは残念である。生活のために却って自身の生活基盤を脅かす彼らの行為は、チャップリンが自分の靴を食べてしまったのと本質的に変わらない。黄金狂の時代は、まだ終わっていないのだ。

## 9 永久凍土の中の水銀量

北極圏は、化学物質の墓場のようなところだ。人為的な産業活動がほとんど無いにも関わらず、多くの化学物質が検出されているからである。特にPCBなどの残留性有機汚染物質（POPと呼ばれる）については、その傾向が顕著で、そのためにPOPsに関する「ストックホルム条約」が採択され、国際レベルで規制されるようになってきている。

### ○水銀濃度が高い北極海

水銀にしても同様で、北極海の水銀濃度が他の海域に比して高いということは、海洋学者の間ではよく知られている。大気の水銀循環が、その発生から移動、反応、沈降など比較的よく研究されているのに対し、海洋には、「深層流」をはじめとして実態がまだ分からないことが多い。海洋の水銀循環について未解明の謎の一つが、北極海への水銀の流入源である。水銀は、気体である「水銀蒸気」の間は安定して大気中にとどまっているが、ハロゲン（塩素、臭素など）や紫

外線などにより酸化されると、容易に沈降し海洋や陸域に沈着すると言われている。しかし、このようにして大気経由で北極海に流入する水銀だけでは、夏季の水銀濃度の急上昇が説明できなかった。近年の水銀動態モデル研究では、現在北極海に流入する水銀は、大気経由で落ちてくるもの以外にも、シベリアやアラスカ、カナダの河川から大量に流れ込んでいるであろうと推定されている。

### ○永久凍土の中は水銀でいっぱい？

では、なぜシベリアやアラスカ、カナダの川に大量の水銀が流れ込むのであろうか。そこで着目されたのが永久凍土である。近年の研究により、永久凍土の中には、予想を超える量の水銀が閉じ込められていると明らかになってきた。永久凍土をボーリングしてその中の成分を分析すると、水銀と炭素の濃度に良い相関が見られるという。植物は、気孔から空気を吸い込み光合成をする際、一緒に水銀も取り込んでしまう。そのため、植物の死骸である有機物（炭素）には微量の水銀が含まれることになる。永久凍土の水銀は、どうやら有



永久凍土

写真:iStock.com/SeppFriedhuber

機物、つまり高緯度ツンドラなどの植生に取り込まれて固定化されたようである。

植物が水銀を取り込むメカニズム自体は、極地も温暖地も特に変わらない。しかし、死骸の分解速度が大きく異なり、極地の方がはるかに長い間地中にとどまることが分かっている（温暖地では、100年以下で有機物が分解してしまうのに対し、永久凍土では1万年以上との推計がある）。最近の研究では、永久凍土中の水銀量を約80万トンと推計しており、これは、約50000トンと推計されている大気中の水銀よりはるかに多く、海洋中の総量である約35万トンの倍以上に当たる。鉱物資源を別にしても、土壌には多くの水銀が含まれており、そこから常時水系への水銀流出が起きている。その点で、こと水銀の固定に関しては、これまで永久凍土は良い仕事をしてくれていたと言えるようだ。

### ○永久凍土が溶けることの影響は未知である

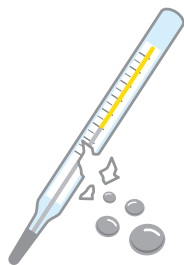
現在の関心事は、この永久凍土内の水銀がこれからどうなるかである。気候変動の研究者は、今後、永久凍土の融解が引き起こす影響について調べを進めている。その量について確たる数字は出ていないが、温暖化には正のフィードバック（動き出したら止まらなくなるしくみ）があると言われており、現在の永久凍土の過半が融けてしまうと予測する研究者もいる。

永久凍土から解き放された、水銀を含んだ有機物がその後どうなるかについて、まだ詳しいこ

とは分かっていない。ただし、地球が長い年月をかけて氷の中に閉じ込めた水銀量は、高々100年程度の歴史しかないPOPsとはケタが違う。これも温暖化の隠れた時限爆弾の一つであろう。

# 10 水銀を扱うときの心得

水銀の話題になると、小さい頃に水銀温度計を割ってしまった、「転がり出る水銀を触ったことがある」と語る人が多い。少し前までは、水銀はそれだけ身近で、またその危険性もあまりよく知られていなかったと言えよう。少量の金属水銀に短時間触れた程度では、健康被害が出る可能性は低い。とはいえ何に注意して、どのように取り扱うべきかを知っていることは大切である。



## ○割ってしまったらそのまま放置しない

金属水銀については、経気道ばく露（危険因子にさらされること）、つまり吸入が最も危険である。そのためには水銀が気化しないような配慮が必要になる。水銀温度計などのガラス製品

を、使用中に誤って割ってしまったとしよう。この時、漏出した水銀が床の隙間などに入り込むと、ゆっくりと気化して室内に充滿することになる。理科室で水銀温度計を割ってしまったことを内緒にして、そのままごみ箱に放置していると、翌週の理科実験の授業までには室内に水銀蒸気が充滿していることだろう。

水銀の飽和蒸気濃度は $20^{\circ}\text{C}$ で $13.2\text{mg}/\text{m}^3$ であるが、水銀温度計に封入されている $3\text{g}$ 程度の水銀でも、計算上は $100\text{m}^3$ 程度の部屋全体をこの飽和蒸気濃度にまで高めてしまうことができる（密閉されていて換気が無い場合。ただし気化に時間を要するのですぐに上昇するわけではない）。ちなみにこの濃度は、日本の作業環境基準 $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ の $500$ 倍に達し、急性水銀中毒により死亡事故が起きるレベルである。

このように、水銀が使われている場所で知らないうちに水銀汚染が起きていることは、実は珍しいことではない。測候所や理科実験室では、何年も前に水銀を使用しない機器類に入れ替えていたにもかかわらず、室内の水銀濃度が高いままという事例も報告されている。

## ○水銀廃棄物は正しく分別すること

家庭内では、水銀使用製品として蛍光灯やボタン電池が使われている。これらの製品は、使用段階で水銀が漏れ出すことは無いため、普段の生活に支障はないものの、廃棄の際は、割れ

たり他のごみと混ざったりしないような配慮が必要だ。燃やすゴミに水銀を混入させてしまった場合、焼却場から水銀蒸気となって大気中に排出されてしまうことになる。水銀廃棄物は正しく分別して収集・回収されるべきで、水銀を安全に処理することが必要である。

### ○水銀農薬は産業廃棄物として処理すること

農家の方は、水銀農薬が納屋に眠っていることもあるため、一度棚卸をするとよいだろう。特に稲作では、いもち病の特効薬として水銀農薬が広く使われていた時代があるため、水田から転作して使わなくなった農薬が残っている場合は、できるだけ早く確認すべきである。ちなみに、農薬を廃棄する場合は産業廃棄物となるため、処理の責任は自治体ではなく事業者としての各農家にあるので注意が必要だ。さらに今後は、水銀廃棄物の処理費用が上昇する可能性もあるため、早目の情報収集と対処方法の検討をお勧めする。

### ○水銀を「選ばない」という選択肢

水銀は、時代時代で様々な用途に使われてきた。それらは我々の生活に利便性をもたらしてくれたが、同時にその毒性からヒト健康や環境への被害を引き起こした。水銀を取り扱うことの煩

わしさや、多くの代替物質・製品開発が普及している実態を踏まえると、やはり水銀は、可能な限り使わないに越したことはない。元素である水銀を、この地球上から消し去ることはできないが、我々には水銀使用製品を「選ばない」という選択肢が残っており、それが世界規模での水銀使用量の削減につながるのである。

# 11 水銀を徹底的に取り除くためには

水銀は、微量だが環境中に広く存在している物質だ。一般大気1立方メートルあたり数ng（ng：ナノグラムは10億分の1グラム）オーダーで存在しているため、たった今吸い込んだ空気にも、間違いなく水銀は含まれている。ただ、その量は、安全レベルのさらに数百分の1程度であり、全く心配する必要はないし、仮に心配したところで避けることもできない。生物は、これまでも長く水銀と共存してきたのだ。

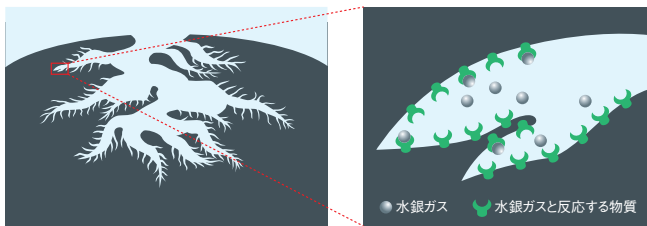
## ○水銀除去に威力を発揮する活性炭

とはいえ、水銀濃度が高くなつては困る場合は、しっかりと除去しなければならぬ。いくつかわ水銀除去の手法は実用化されているが、低濃度まで水銀を下げる必要がある場合には、「活性炭」が用いられる。活性炭は、木材ややし殻、おが屑等の炭素性素材から作る多孔質吸着剤で、その孔の中に分子や原子を捕らえることで目的物質を除去する。吸着には物理吸着（分子間力

による吸着）や化学吸着（化学結合による吸着）などのメカニズムがあり、その目的物質の分子サイズ及び物理化学的性質に基づき、様々なタイプの活性炭が開発されている。

## ○燃烧排ガス中の水銀の除去

水銀除去が喫緊の課題となっている分野に、燃烧排ガスの処理がある。「水銀に関する水俣条約」に基づいて、日本でも、水銀の大気排出を削減するため、石炭火力発電所や廃棄物焼却施設等の水銀排出が法的に規制されることとなった。燃烧排ガスを処理するプロセスにおいて、排ガス中の水銀濃度を下げることが目的に、活性炭を用いたシステムが採り入れられている。ここで注意しなければならないのは、燃烧排ガスに含まれている、水銀吸着を妨害する物質の取り扱いである。その代表的な物質として硫酸化合物（ $SO_2$ 、 $SO_3$ ）が知られているが、これらは、活性炭の細孔を塞いで、水銀の吸着を妨げてしまう。したがって、燃烧排ガスからは、水銀だけでなく、こうした硫酸化合物も取り除く必



水銀用活性炭の内部構造

要があるため、脱硫システムのデザインとともに、水銀の除去に特化した「水銀用活性炭」の開発も求められた。

水銀用活性炭は、水銀を狙って除去する専用の活性炭で、硫黄やハロゲン（塩素、臭素、ヨウ素）と化合物を作りやすいという水銀の性質を利用して、そして、活性炭表面にこれらの元素を添着（固定）することで、水銀の吸着を促進、その除去性能を向上させている。これにより、主に塩化第二水銀（ $\text{HgCl}_2$ ）と原子状水銀（ $\text{Hg}^0$ ）の形で存在する燃焼排ガス中の水銀は、水銀用活性炭の表面に、より安定なヨウ化第二水銀（ $\text{HgI}_2$ ）や硫化第二水銀（ $\text{HgS}$ ）の形で固定される。こうした物質を活性炭表面にたくさん埋め込むことができれば、水銀用活性炭の吸着性能は大きく向上すると考えられる。

## ○石油・天然ガス中の水銀の除去

燃焼排ガスと並んで水銀処理を課題とする産業として、石油・天然ガス分野が挙げられる。水銀は多くの金属とアマルガムという合金を作るが、時としてそれが深刻な事故を引き起こすことがある。とりわけ石油産業にとって、水銀は大敵なのだ。例えば、液化天然ガス（LNG）のプラントでは、熱交換器に用いられるアルミニウムが「アマルガム腐食」を起こすことが問題とされている。アルミニウムが水銀とアマルガムを生じた後、水分子が触媒となって酸化アルミニ

ウム（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）となるのがアマルガム腐食である。この反応では、アルミニウムが酸化アルミニウムとなって水銀中から排出されるため、水銀はまた新たにアルミニウムとアマルガムを作ることができ、腐食が奥へ奥へと繰り返されていく。この様子を実験的に見せる動画が、「アルミと水銀のお化け」としてインターネット上に公開されているが、くれぐれも真似だけはしないほしい。

一方の石油分野はどうだろうか。原油中の水銀は、石油化学製品の製造に使われる触媒（白金、パラジウム等）とアマルガムを作り、その触媒能力を劣化させる「触媒毒」として働く。やはり厄介な存在だ。ちなみに、原油中の水銀濃度には地域性があり、東南アジアのタイランド湾産の原油は、水銀濃度が高いことで知られている。そういった原油は、水銀を除去する費用がかかるため、その分値段が低く取引されることになる。他方、水銀除去技術を持っている国などは、むしろ安い原油を購入できることで、そのまま事業的優位性につなげていける。水銀除去の技術は、技術立国のための好例と言えるだろう。