



不思議な 水銀の話

翼を持った悪戯元素の秘密～第2版

環境省環境保健部水銀対策推進室 〒100-8975 東京都千代田区霞ヶ関1-2-2
電話：03-3581-3351 Fax：03-3580-3596 Eメール：suigin@env.go.jp
<http://www.env.go.jp/chemi/tmms/index.html>

2021.3 ver.2.0



はじめに

皆さんは「水銀」についてどれだけ知っていますか。

水銀は化学元素の1つで、生命誕生前から地球上に存在していた物質です。大気中や食品中にも微量ですが存在します。金属でありながら常温で液体という珍しい特徴を持ち、世界中の人々の暮らしの中で様々な用途で使われてきました。

一方で、水銀は環境汚染や健康影響の原因ともなり得ます。このため、環境中への水銀の人為的な排出を減らすための国際的なルールができました。それが「水銀に関する水俣条約」です（44ページのトピックでも本条約について扱っております。）。2017年にはこの条約が発効し、世界の人々が協力して水銀排出を削減しようとする取組が始まっています。

この冊子では、水銀に関する様々なトピックを取り上げています。化学物質を扱っているため、自然科学の基礎知識が必要となる項目も少なくありませんが、高校レベルの知識があれば十分理解可能と思います。気軽に読める水銀の本として、気の向くまま好きなページから読み始めてください。

環境省環境保健部水銀対策推進室

注：この冊子の記載には正確を期しておりますが、内容は執筆者の考えに基づいており、環境省の公式見解として示されたものではありません。

環境省環境保健部水銀対策推進室（2021）
不思議な水銀の話、翼を持った悪戯元素の秘密、東京：環境省

第2版 2021年3月15日発行

文：斉藤 貢

イラスト：プロセスユニーク

この冊子は、教育的・非営利な目的の利用にあたっては、出典を明示することにより環境省への許可を受けることなく、全体或いはその一部を再利用することができます。

目次

■はじめに	1
■「元素」と付き合っていくということ	4
■便利な計測器は水銀のおかげ	6
■水銀が船の安全を守る	8
■水銀ランプはクルマの未来を照らすか?	10
■物語の中の水銀	12
■伝統の中の水銀	14
■世界遺産となった水銀	16
■健康か生活か ～小さな金採掘業者のつぶやき	18
■エシカルジュエリーを選ぶ意味	20
■液体電極として利用される水銀	22
■電池に用いられる水銀	24
■水銀触媒が招いた悲劇	26
■水銀が科学の発展の礎となる場合	28
■水銀はどこからきてどこに行くのか	30
■水銀が毒として働くとき	32
■フェロー諸島とセイシエルの大バトル	34
■水銀は世界をめぐる	36
■マーキュロクロムの歴史に幕?	38
■美容のために水銀を・・・	40
■空海と丹生明神	42
■「Minamata」の名が発するメッセージ	44
■アマルガムの功罪	46
■参考資料	48
■編集後記	49



「元素」と付き合っていくということ

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。

水銀まわりの周期表の抜粋

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

●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「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に他ならない。

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ということが出来る。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。

便利な計測器は水銀のおかげ

「水銀はとても有用な物質だ」と言ったら、大きな批判を受けるかもしれない。水銀の毒性は一般にも広く認識されているが、一方でその物理化学的な特性から、様々な「測る」場面で活躍し、その利便性を我々に提供してきたという側面、歴史がある。

●液体として存在する金属

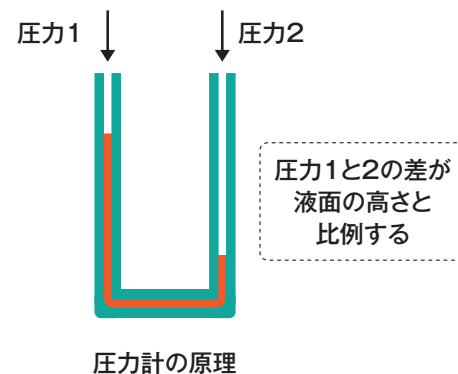
水銀が常温(20℃)で液体である唯一の金属元素ということはよく知られている。実際は、低融点の金属元素は少なくないのだが(合金であればたくさんある。)、地球の平均気温が15℃程度だったため、融点がマイナス39℃の水銀の特徴は際立って見える。また、沸点は357℃であり液体としての温度幅が広いため、体温計をはじめとした温度を測るのに好都合であった。水銀は、金属なので熱伝導が良く、そのため応答も早い。そして膨張率が大きく、かつそれが広い温度範囲で一定であるといった特性により、冷凍庫の庫温から天ぷら油の油温まで我々が日常生活で取り扱うほとんどの温度を、水銀で計測することができる。水銀は、18世紀にドイツの物理学者ファレンハイトが、水やアルコールを使用していた当時の温度計の欠点を改良する目的で採用したもので、温度の精密計測を可能にした。



水銀体温計

●「重い液体」としての活用

温度だけでなく圧力を測る場面にも、水銀が使われている。水銀は重金属なので比重は「13.6」、つまり水の13.6倍の重さがある。「重い液体」というその特徴から、水銀は様々な圧力計測に利用されているが、それには圧力計の原理(イラスト参照)が関係している。一般に圧力は、2つの圧力状態の差として計測され、液面の高さの差はその液体の比重に反比例する。水を入れた管で一方の圧力を1気圧分高めると、液面の差は約10mとなり、その高さを測るのは大変であるが、中に入れる液体を水銀にすると、液面の差が約76cmと小さくなり、高さの計測が容易になる。



「フォルタン型水銀気圧計」は、この原理を応用させた構造で、気圧を精密に測定できたため、気象台や測候所での観測に広く用いられた。また、血圧もこの原理で測定されており、その値は、日本の計量単位令に基づき、水銀柱ミリメートル(mmHg)という非SI単位を用いることが定められている。

圧力測定以外に、重い液体として水銀が利用された例として、地震計が挙げられる。19世紀に開発された「パルミエリの地震計」は、水銀が入ったU字管に鉄球のウキが浮べられており、地震が起きると発生時刻とウキの動きが記録できた。この地震計は、明治初期に日本に輸入され、東京気象台(現気象庁)での最初の地震観測に用いられた。

●「導電性」や「表面張力」も活用する

水銀の用途は他にもある。水銀が金属としての導電性を持つことを利用して、加速度センサーや傾斜センサーとして電気回路に組み込まれたスイッチなどに応用されている。また、水銀の大きな表面張力を利用して、物体表面の細かな孔の量を計測する水銀圧入法という手法が、研究目的に用いられている。このように、水銀が持つ物性・特性は様々な計測器で利用されている。

●そして新しい時代へ

こうして有用とされてきた水銀計測器であるが、「水銀に関する水俣条約」では、温度計、気圧計、湿度計、圧力計、血圧計の5種類について、2020年で製造・輸出入が禁止されることとされた。法律上、販売・使用・所持が禁止されるわけではなく、また必須用途については免除されることもあるが、いずれにしても、できるだけ水銀を使わない社会に向けて、すみやかに代替製品への切り替えを進めていくことが我々に求められる時代になってきた。

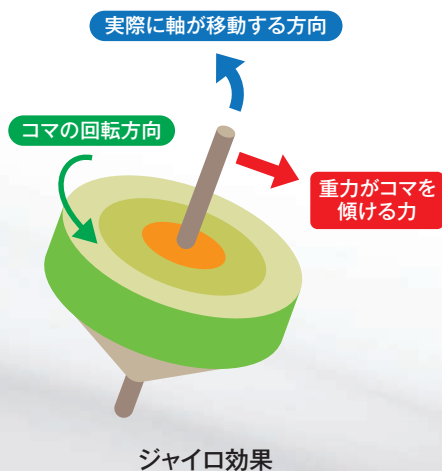
水銀が船の安全を守る

「水銀が船の安全を守る」と聞いて、どう思うだろう。まず、バロメータ（晴雨計）や温度計に使われている水銀を思い浮かべるかもしれない。悪天候は航行の直接的な脅威となるため、気象情報は船舶の安全には欠かせない。確かに水銀を用いた計測器は、電源を必要とせず目盛りを読み取るのも容易で、現場で使う器材として重宝されている。

●正しい航路を維持するために

航海において常に一定の方位を示してくれる装置に、コンパス（羅針盤）がある。この方位を測るコンパスに、方位磁石を想像する人は多いと思うが、多くの船舶では、方位磁石の代わりに「ジャイロコンパス」と呼ばれる装置が搭載されている。方位磁石のコンパスが、厳密には磁北を指向するため真北と若干の誤差を生むのに対して、回転盤のジャイロ効果（こまの首振りの原理；イラスト参照）を利用して北を指すジャイロコンパスは、地球の自転を駆動原理としているため、精度が高いと言われている。それもあって、大型船舶のほとんどに装備され、航海の安全を支えている。

ジャイロコンパスは、回転軸が地球と同じ、つまり常に北極星を向くようにあらかじめ調整されているが、地球の自転により重力の方向が変わった場合、それを修正する機能が必要となる。この修正機能に、実は水銀が役立っている。スペリー式と呼ばれるジャイロコンパスでは、南北方向に「安定器」を置いて、重力の方向を修正するもので、その安定器として水銀壺が使われている。重力の方向が変わると南北に置かれた水銀壺の間を水銀が移動し、その力を利用してコンパスの方向を修正するというしくみになっている。



●一閃の光を規則正しく送り届ける



水銀槽式回転装置
(展示品)

灯台は、航路標識のうち光波標識の一種とされ、その外観や灯光によって船舶の航行目標となる。コンパスとは対照的に船の外にあって船の安全を守る施設だが、ここでも、「安全」を支えるために水銀が活躍している。灯光を拡散させることなく遠くまで届ける灯台には、フレネルレンズと呼ばれる大きなレンズが使われている。これを一定速度で回転させるため、「水銀槽式回転装置」と呼ばれるものが使用されていた。レンズを水銀槽に浮かべることによって回転抵抗を軽くするという、一種の流体ベアリングであるこの「水銀槽式回転装置」は、現在では新たな灯台への設置は行われていない。しかし、遺産的価値のある古い灯台では今なお現役で、例えば明治初期に建設された和歌山県檜野埼の灯台（映画にもなったトルコのエルトゥール号遭難事件が起きたことで知られる）でも、この装置が稼働している。

●水銀の「重さ」は深い海でも

さらに特殊な例として、小型の深海探査潜水艇などに水銀を採用した事例がある。潜水艇には「トリム・ヒール調整装置」と呼ばれる、船舶の前後方向の傾き（これをトリムと言う）や、左右方向の傾き（これをヒールと言う）を制御・調整する装置が搭載されている。水中での潜水艇の姿勢は、重い物体を前後左右に動かす時の反動により制御されるが、この「重い物体」に、水銀が使われることがある。艦体内部のスペースが限られる小型潜水艇の場合、固体の重りよりも液体である水銀の方が、効率的に重心が移動できるために採用されたものと考えられる。重い液体としての水銀は、深い海の底でも「安全」のために働いている。

水銀ランプはクルマの未来を照らすか？

管内にガスや蒸気を封入し、電極間に放電を起こさせる装置を「放電管」と言い、光源や整流などの用途に用いられる。最初に放電管を製作したのは、ドイツの理化学機器工ガイスラーで、実験に用いるために作られたこの装置は「ガイスラー管」と呼ばれた。このガイスラー管の原理は、現在の照明装置に応用されている。

●レトロなネオンサインが放電管照明の嚆矢

ネオンサインというレトロな看板は、内部に低圧のガスを充てんした「ネオン管」と呼ばれる放電管を、文字などの形に加工したものだ。1910年にフランスで開発され、封入ガスとしてネオンをはじめとする不活性ガスや水銀蒸気を用いることによって、様々な色光が得られたため、店頭照明や広告用に広く用いられた。

表示用としては効果的なネオン管だったが、作動に高い電圧が必要なため、屋内照明に導入することは難しかった。低い電圧でも放電し、一般照明にも適した特性を持つのが、よく知られた蛍光灯である。蛍光灯は、陰極を加熱して積極的に電子を放出させる「熱陰極管」というタイプの放電管だ。蛍光灯には低圧のアルゴンガスと水銀蒸気が封入されており、水銀が発する紫外線を、ランプ内面に塗布した蛍光剤で可視光線に変換することによって、明るく光るのが特長である。1930年代にアメリカで試作が始まり、日本では、1940年に潜水艦などの軍用品として製造に成功した。

●蛍光灯の民生化は法隆寺から！

軍事用に独占されていた蛍光灯を、一般照明として最初に使用したのは、奈良法隆寺の金堂である。それには、当時進められていた、金堂内の壁画を模写するプロジェクトが関係している。プロジェクト遂行にあたって、白熱球より色温度が高く、演色性の良い光源が求められたが、蛍光灯はまさに最適な存在だったのである。この金堂壁画は、1949年に失火により焼失してしまい、1968年に復元されているが、その際、蛍光灯によって鮮明に撮影された写真や模写が参考となったと言われている。

水銀ランプは、この蛍光灯より古く、1930年代に実用化されている放電管だ。水銀ランプを代表とする高圧放電ランプ(HIDランプ)には、大気圧より高いガスが

封入されており、効率は蛍光灯にやや劣るものの、高輝度・長寿命で経済性に優れることから、街路灯や大規模空間の照明に用いられている。照明用途にとどまらず、舞台演出やプロジェクター用にも使われるHIDランプだが、1960年代に入ると、水銀の他に金属ハロゲン化物を発光物質として封入したメタルハライドランプや、ナトリウムを封入した高圧ナトリウムランプなども開発されていった。

●高圧放電管の特性を活かした自動車用ディスチャージランプ

近年の放電管事情を見ると、蛍光灯については、発光効率の良いLED照明器具の登場もあり、エネルギー基本計画の中で切替の対象とされている。また、水銀ランプは、「水銀に関する水俣条約」の規定に基づき、2020年で製造、輸出入が禁止された。このように、放電管は使われない方向へと向かっているが、反対に最近導入されたのが、自動車用のディスチャージ(HID)ヘッドランプ(前照灯)である。古くは白熱ランプ、現在は主にハロゲンランプが使われているヘッドランプであるが、ハロゲンランプより明るくフィラメント切れの無いHIDが登場し、1992年にドイツで実用化された。

自動車のヘッドランプは、単なる表示灯ではなく運転者の視界を確保する照明装置である。そのため、車検整備の対象項目に含まれている。HIDヘッドランプは、その機構上瞬間点灯に向いておらず、ロービームのみをHIDとすることも多い。また、ハロゲンランプより光量が多いので、同じ光軸に調整しても対向車への眩惑が大きくなることもある。さらに、始動時から安定時にかけて色が変化するため、白色光の規定を外れてしまう場合もある。このように、現在の車検のルールには、HIDヘッドランプがクリアすべき課題もいろいろと存在する。だが、高効率で高寿命という特長を活かしてその適用範囲を増やし、水銀フリーの製品も開発されてきている。HIDヘッドランプは、今も進化を続けている。将来どのようなヘッドライトを搭載した車が走るのか興味は尽きない。



車のディスチャージヘッドランプ

写真: iStock.com/teddyleung

物語の中の水銀

『不思議の国のアリス』は、19世紀後半に英国の小説家ルイス・キャロルによって書かれた児童文学シリーズで、何度も映画化されているので知らない人はいないだろう。ここに登場する帽子屋(ハッター)は、典型的な変人として「狂った帽子屋」と呼ばれることが多い。この帽子屋が水銀中毒だったという話は、比較的よく知られた都市伝説である。最近では、ティム・バートン監督による映画の中で、ジョニー・デップ演じる姿が記憶に新しい。『不思議の国のアリス』は言葉遊びの多い物語だが、ルイス・キャロルの時代には、「帽子屋のように気が狂っている」(mad as a hatter)という慣用句があったという。ハッターというキャラクターは、その慣用句を基に彼が創作したと考えられている。



画像: PIXTA

●帽子屋はなぜ気が狂ってしまったのか

19世紀の英国では、帽子の素材となるフェルトを処理するために「硝酸第二水銀」が使われていた。フェルトの材料である羊毛は、表面がうろこ状のキューティクルに覆われており、このキューティクル同士を絡み合わせ固くするために、水銀による物理化学的な処理が行われていた。このとき用いられた水銀は、蒸気(気体としての元素状水銀で、肺から吸収され水銀中毒を起こしやすい)となって作業場内に排出されるため、作業者は高濃度の水銀にばく露されること(危険因子にさらされること)になる。「水銀蒸気」による繰り返しばく露では、中枢神経系が標的臓器と考えられており、振戦(手足の震え)や水銀エレチスムと呼ばれる行動・性格の変化(癩癩、いらいら、過度の人見知り、不眠等)が症状として現れ、それらが全て帽子屋の職業病「帽子屋のように気が狂っている」(mad as a hatter)と考えられたのである。

●赤い「賢者の石」、その正体は水銀だった!?

ティム・バートンの映画もヒットしたが、『ハリーポッターと賢者の石』は、それ以上の大ヒットを記録した。こちらも英国作家の児童文学シリーズだが、アリスシリーズより100年以上後に書かれた。この中に登場する「賢者の石」は、錬金術において卑金属を金に変えるための触媒のような働きをするものと考えられており、作者のJ.K.ローリングは、この作品の中で「血のように赤い石」と表現している。水銀が含まれる鉱石の最も代表的なものが辰砂(しんしゃ; 硫化水銀鉱)で、赤褐色の塊状、あるいは深紅色の結晶の形で産出されることから、賢者の石は水銀であるとする説が有力である。

採掘された赤い鉱石(辰砂)が光り輝く液体となり、さらに金銀などを溶かす性質を持つ水銀は、古代から中世における錬金術で盛んに用いられた。水銀の沸点は357℃と金属としては低い。そのため、金を溶かし込んだ水銀の合金(これをアマルガムという)を火であぶるなどして強熱すると、沸点の低い水銀は蒸発して金だけが残る。確かにこれなら、操作手順を工夫すれば、卑金属が金に変わったように見せることもできそうである。

●mad as a minerの言葉が生まれぬように

水銀を使ったこの方法は、零細・小規模な金採掘(ASGMと呼ばれている)における金の製錬法として、現在でも世界各地で行われている。金鉱石(を砕いた砂)と水銀を混ぜると、金が水銀の中に溶け出してアマルガムとなる。それをバーナーなどであぶって金を取り出して売る——これによって生計を立てている人は、途上国を中心に1000万人以上いると推計されている。

この場合も帽子屋と同じように、作業者は高濃度の水銀蒸気に繰り返しばく露されることになる。水銀が賢者の石であった時代はまだ良かったが、今や「狂人の石」になってしまいかねないほど、このASGMは途上国にとって深刻な問題となっている。世界的な水銀規制を進めている中、ASGMは最大の水銀の用途となっており、しかもその消費量は上昇傾向にある。時々の社会情勢を踏まえて多くの新語・造語が作られる今の時代に、「mad as a miner」という慣用句が生まれることのないよう、ASGMへの対応をより一層進めていかなければならない。

伝統の中の水銀

古くから赤は、神聖な色として、土器や埋葬品の着色に用いられてきた。赤色の顔料には、主にベンガラ(酸化第二鉄)と水銀朱(硫化第二水銀)が使われ、後に鉛丹(四酸化三鉛)も用いられるようになった。重金属の毒性など科学的知識が無かったはずの時代でも、経験的にそれらの使用が生活に支障が無いと認識されていたため、使われ続けていたものと思われる。

●水銀の朱が彩る世界

水銀朱の原料は、「辰砂(しんしゃ)」と呼ばれる天然に産出する硫化水銀化合物を含んだ赤い鉱石で、古く縄文時代から採掘が行われていたようで、三重県や徳島県の遺跡からは、辰砂のすりつぶし用とされる石臼や石杵も出土している。辰砂は、ベンガラの材料となる「鉄鉱石」より鉱出が限られていたため、水銀朱は高級とされ、神社や寺院の装飾の他には漆器や、練り朱肉など高級な用途に用いられている。



●金色の大仏像にも水銀

辰砂を製錬することにより、光り輝く液体の「金属水銀」を取り出すことができる。金属水銀は、他の金属とアマルガムという混合物(合金)を作りやすいという性質を持っている。このアマルガムの使用例として特筆に値するのが、8世紀に建立された奈良東大寺の大仏への鍍金(金めっき)である。高さが15メートルにも及ぶ巨像の表面を金めっきするために大量の金アマルガムが塗布され、そこから水銀を蒸発させるために周囲で火が焚かれたと言われている。大仏殿も同時に建設されていたため、この作業は屋内で行われたことになり、高濃度の「水銀蒸気」が充満した大仏殿内は、非常に危険な状態であったであろうと想像される。なお、現在の大仏は、2度の焼損のち再興されたもので、創建当時の鍍金は蓮花座の一部にわずかに残るのみである。

●環境か伝統か

京都や日光にある神社仏閣では、今も日本の伝統的な手法に則った修復が行われている。水銀朱を用いた塗装やアマルガムを利用した建築装飾品への金めっきなども、その手法のひとつである。もちろん作業員の安全面への対策は十分にとられているだろうが、水銀の毒性がよく知られた現代においては、環境面で水銀を使い続けるのは良いのか、そもそも文化と環境を天秤にかけて議論することが相応しいのか、など難しい問題を抱えているのも事実である。漆器などの工芸品では、「色味」や「風合い」といった、代用品を以って代えることのできない価値を水銀朱は持っており、それを「環境に悪いから」という理由で捨ててしまっよいかという疑問も投げかけられている。



様々な色合いの水銀朱

●何を残して何を変えるべきか

「水銀に関する水俣条約」の規定では、伝統的・宗教的な用途に用いられる水銀使用製品の製造と輸出入は、禁止品目から除外すると明記されており、こういった問題に対しては一定の配慮がなされている。そのため、現時点で水銀朱は廃止の対象とはされていない。一方、アマルガムを用いた金めっきは、それ自身が水銀使用製品ではないため、取り扱いが明確には定められていない。仏像への鍍金は、現在でもネパールなどで行われており、作業員の水銀中毒が懸念されているため、これに新たな規制措置を加えるべきとの意見もある。伝統が全て善とは限らず、文化だからと議論を封印するのではなく、我々は将来に何を残して何を変えていくべきなのか——フラットな気持ちで考えることが求められている。

世界遺産となった水銀

2012年、「水銀の遺産アルマデンとイドリヤ」は、ユネスコ世界文化遺産として登録された。アルマデンはスペイン中部、イドリヤはスロベニア西部にかつてあった水銀鉱山であり、この2つの鉱山が、世界の歴代水銀鉱出量の1位と2位を占める。アルマデンは古くローマ時代から採掘の記録があり、イドリヤも15世紀に発見されたとされ、共に2000年前後まで続いた長い歴史を持つ鉱山である。ユネスコは、これらの鉱山遺構が、限られた鉱山のみで採掘されていた資源である「水銀」の2大産地として、中世以降の世界的な金銀需要において重要な役割を果たしたと評価した。アルマデンとイドリヤで採掘された水銀は、スペイン帝国の植民地であった中南米に輸出され、金銀（特に銀）の生産に大きく貢献していたのである。

●大航海時代の新大陸は銀の世界的産地であった

15世紀、話はコロンブスの新大陸発見まで遡る。コロンブスがスペイン王室から援助を受けて西回り航海に出発した目的、その一つが金銀財宝の獲得であった。彼は、マルコポーロの東方見聞録に書かれた黄金の国ジバングに惹かれ、アジア行きを計画したという。結局、彼が発見したのはアメリカ（西インド諸島）だったが、スペインは、ここですぐに鉱山開発を始めている。メキシコのマヤ、アステカや、ペルー／ポリビアのインカ等の旧文明を次々と征服していくと、この地域はやがて、スペイン帝国による銀の主要な産地となる。16世紀に入り、メキシコのサカテカス、グアナファート、ポリビアのポトシ等南米各地で銀が発見されると、スペイン主導による本格的な鉱山開発が始まった。

●アメリカの銀をヨーロッパの水銀で製錬

銀の製錬にあたって、スペインは、その頃北イタリアで使われ始めた「水銀アマルガム法」を導入している（アマルガムとは水銀と他の金属との合金のこと）。この方法は、最終工程を除いて加熱を必要とせず、品位の低い鉱石からも銀を取り出せるため、16世紀中期以降急速に広まっていった。スペインは、水銀の供給ルートを確認



アルマデンの水銀鉱山遺構

写真: PIXTA

するため、国王の独占体制を構築し、アルマデンとイドリヤの水銀をメキシコの銀鉱山へと送り込んだ。18世紀にスペイン帝国がハプスブルク朝からブルボン朝に移ると、税制改革を行うとともに、国王直属の水銀管理委員会を創設するなどして、さらに鉱山管理を強化した。その後、こうしたスペインの鉱山管理は、19世紀初頭まで続いていった。

●日本で水銀が使われなかったのはコロンブスのおかげ？

アルマデンとイドリヤに先立ち、メキシコのサカテカスとグアナファート、およびポリビアのポトシが揃って世界遺産に登録されている。また、日本でも、島根県の石見銀山が登録されるなど、銀について言えば、中近世の代表的な鉱山は押しなべて世界遺産になったことになる。石見銀山は、16世紀から19世紀にかけて採掘が行われ、開発の時期・規模とも中南米の銀山に匹敵するが、銀の製錬には古くから知られていた「灰吹法」が用いられ、水銀は使われていない。灰吹法とは、鉛で銀鉱石から銀を抽出する方法で、一度銀と鉛の合金を生成させ、その後加熱して鉛を酸化鉛として分離し、銀を精製するものである。ただ、水銀であっても鉛であっても、有害物質であることに変わりはない。

ここからは想像になるが、コロンブスがジバングの黄金を目指した結果が、中南米での鉱山開発につながったのだとすると、コロンブスがアメリカではなく本当にアジアに到達していたらどうなっていただろう。スペイン帝国は、石見銀山に水銀を送り込んで鉱山開発をしたであろうか（当時スペインは、アカプルコからマニラに至る太平洋航路を確立していたので不可能ではない。）。コロンブスが、誤って「インドを見つけたぞ」と言い放ち、誇らしげに卵を立てたおかげで、日本は、スペインからの大量の水銀流入を免れることができたのかもしれない。

健康か生活か ～小さな金採掘業者のつづき

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はいるものの、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。

エシカルジュエリーを選ぶ意味

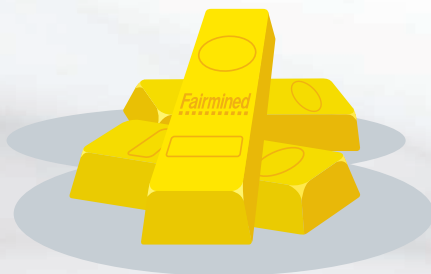
宝飾店のウィンドウを眺めながら、「このジュエリーはどのようにしてここまで来たのか」と考える人はほとんどいないだろう。実際、宝石や貴金属の素性について、我々はほとんど知識を持ち合わせていない。例えば、鉱山で労働者が低賃金で強制的に働かされていたり、原石が密売ルートで流通されていたり、仲介業者が法外なマージンを上乗せしていたり……いろいろな歴史をたどってその石が手元に届いていたとしても、我々はそのような話を知ることはできないし、たとえ鑑定士であっても分からないだろう。さらに、宝石や貴金属の取引による利益が武装勢力の資金源になっているという実態もある。（紛争ダイヤモンドについては、2006年に「ブラッドダイヤモンド」という映画になったので、ご存じの方もいるかもしれない。）

●金の中の見えない水銀汚染

金については、こうした労働搾取や密貿易などに加えて、製錬で使われる水銀のヒト健康および環境への影響も指摘されている。水銀が他の金属とアマルガムという混合物（合金）を作る性質は、現象的には水銀という液体に、金属が溶けていくと見ることができる。金鉱石に水銀を混ぜると、鉱石の中の金が溶け出し水銀とアマルガムを作り、その金アマルガムを火であぶって水銀を蒸発させることにより金を精製する。現在、世界最大の水銀用途は、こうした小規模な金の採掘・製錬における使用であり、この方法によって、大量の水銀蒸気が放出されることになる。

●エシカルな金へ業界が動いた

このような状況を踏まえ、宝飾業界や鉱山会社などは、フェアトレードに関する自主的取り組みとして「ARM」（Alliance for Responsible Mining）という団体を結成し、貴金属の小規模採掘に対する支援に乗り出した。ARMは、小規模な採掘事業者の社会開発や環境配慮の取り組みを審査する「Fairmined基準」を設定し



て、採掘事業者の認証を行っている。認証を受けた金は、それがフェアトレードの基準に合致したものであることを保証する刻印などが印され、カンヌ映画祭のパルムドールやノーベル賞の金メダルなどに使用されている。

Fairmined認証を受けた金を宝飾品に使う場合は、その分のプレミアムが上乗せされるため、当然割高になっている。金の価格は、宝飾品の製造原価の大きな割合を占めているため、このプレミアム分は宝飾品の販売価格にも上乗せされる。これがいわゆる「エシカルジュエリー」と呼ばれるもので、この価格差は、その宝飾品が持つ物語（どのようにしてここまで来たのか）に対するプレミアムである。このビジネスモデルは、消費者がこうしたしゅみを認識することによってはじめて成立する。つまり、エシカルジュエリーについて知り理解することによって、プレミアムを支払ってもかまわないという価値を見出し、あえて割高な価格で購入を決める。そして、このときのプレミアム分が、やがて小規模採掘現場での水銀対策の原資となる。

Fairmined認証の金の流通量はわずかだが、消費者側でもエシカルな金を求める動きが進んでいる。世界の現物地金取引において中心的なロンドンの市場、そこに参加する専門業者の組合である「ロンドン貴金属市場協会」は、金のサプライチェーンに関するガイダンスを策定し、金の取引において「水銀が適切に管理されているか」を考慮するよう求めている。日本で流通する金の大部分はこの協会の認証を受けた会社が製造販売したもので、ガイダンスに遵守した定期的な監査を受けている。

●エシカルは自分自身への表彰

パルムドールやノーベル賞は望んでも簡単に手に入れられるものではないが、エシカルジュエリーであれば、自分たちのより身近な機会、例えば婚約指輪にエシカルな金を、という形で求めることができる。自らの健康と地球環境を守る一つの選択肢として、エシカルジュエリーは存在する。



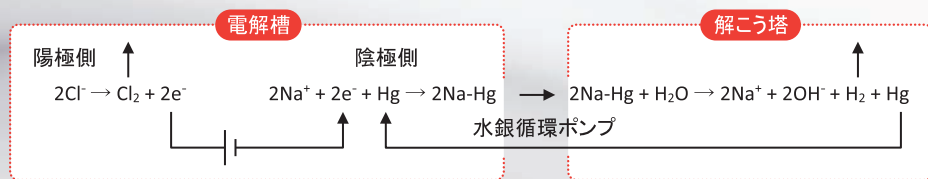
液体電極として利用される水銀

工業用化学品の製造技術は日進月歩である。こうした製造技術の中で最も単純なものの一つとして「電気分解」がある。学生実験でも簡単にできるので、水から水素と酸素を取り出した経験のある人も多いだろう。ただ、工業的には、水素や酸素は水の電気分解で生産されている訳ではなく、電気分解が工業的に広く行われているのは、主に食塩水から塩素と苛性ソーダを製造するプロセス（塩素アルカリ製造工程と呼ばれる）においてである。

ご承知のとおり、食塩は「NaCl」の化学組成を持っており、ここから塩素ガス（Cl₂）と苛性ソーダ（NaOH）を得る化学式は、比較的簡単に立てることができるだろう。苛性ソーダは石鹼やガラスなどの製造、塩素は殺菌の他にも漂白剤や塩化ビニルなどの樹脂製造における基礎化学品として安定した需要がある。電気を通す物質である水銀は、この塩素と苛性ソーダを製造するプロセスにおいて、液体電極として利用されている。

●食塩電解 ～食塩水から塩素と苛性ソーダを製造するプロセス

食塩電解に水銀電極を用いる水銀法（イラスト参照）は、今から百数十年ほど前に開発されたものだ。電気分解の陽極側では、塩素イオン（Cl⁻）が電子を失って塩素ガス（Cl₂）となる。水銀は陰極として用いられ、ナトリウムイオン（Na⁺）が金属ナトリウム（Na）になったところで、この金属ナトリウムと作用しアマルガムという一種の合金を作る。生成されたナトリウムアマルガム（Na-Hg）を解こう塔に送り、水（H₂O）と接触させると、イオン化傾向の強いナトリウムは水中の水素イオンに電子を渡して再びナトリウムイオンとなり、ここで水素ガス（H₂）が発生する。この解こう塔内の溶液を濃縮したものが、苛性ソーダ溶液として製品となる。



水銀法の化学式

還元・析出（溶液から特定の物質が分離して出てくること）した金属ナトリウムと合金を作った水銀は、解こう塔内で再び水銀に戻ると、水銀循環ポンプで電解槽へと循環する。このとき、液体の水銀電極に析出したナトリウムは、攪拌されて水銀と混合するため、電極表面は常に新鮮な状態に保たれる。このような機能を持ち、常温で安定している物質は、水銀の他に思いつかない。さらに、この水銀法で製造された苛性ソーダは、同時期に開発された隔膜法に比べて高濃度で高品質という特長を有していた。ちなみに、この解こう塔の「こう」は、「汞」と書き、中国語で水銀を意味する。

●水銀法からイオン交換膜法へ

食塩電解技術のキモは、陰極側で発生するナトリウムの陽極側への逆流を防止することである。水銀法では、ナトリウムをアマルガムとして固定して電解槽から取り除くことで、その問題をクリアしていた。しかし、水銀が水俣病の原因物質であることが明らかになると、水銀電極の安全性に対する懸念が指摘されるようになる。「塩素アルカリ製造工程」は、水俣病の原因となった「アセトアルデヒド製造工程」と異なり無機化学であるため、水銀のメチル化は起こりにくとも考えられたが、それでも水銀を使用しない技術へのニーズは高まりを見せ、新たにイオン交換膜法が開発された。イオン交換膜法では、ナトリウムイオンを陰極側に選択的に透過する膜で陽極側と陰極側を分離し、陽極側に食塩水を供給することによって、逆流問題に対応している。

●技術の進歩が水銀需要を減少させる

このイオン交換膜法は、エネルギー効率にも優れ、有害物質を使用しない技術として水銀法からの2025年までの転換が世界中で進められている。実際、イオン交換膜法は、水銀法と比較して苛性ソーダ製造1トン当たり約1000kWhもの電力が削減できる。このような技術イノベーションは、水銀を用いていた多くの産業で進められ、日本の水銀需要に大きな変革をもたらした。国内の塩素アルカリ産業は、1990年代にこうしたプロセス転換が完了し、現在運転されている工場は全てイオン交換膜法を採用している。国内の水銀需要は、ピーク時の約2,500トンから現在は約5トン以下と大幅に減少しているが、それはこうした化学品製造技術の進歩によるものと言えるだろう。

電池に用いられる水銀

電気を電気として貯めるコンデンサという電気部品があるが、この場合、蓄えられるエネルギーは、数秒で使い切ってしまう程度でしかない。このことから「電気は貯めることができない。」と教わった人も多いただろう。しかし、蓄電池は、装置に蓄えておいた化学エネルギーを電気として取り出して使用するため、長時間の使用に耐えるほどのエネルギーを供給することが可能だ。この蓄電池、とりわけ化学電池には、金属／金属化合物を用いたものが多く、その中には水銀を使った電池も含まれている。

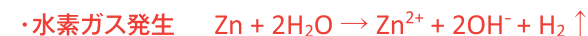
●水銀電池のしくみ

酸化第二水銀をカソード(正極)として用いる「水銀電池」は、放電に伴い還元された金属水銀が液体となって電極から遊離するため、放電中に電極面の劣化がほとんどなく、放電特性に優れていた。こうしたことから、起電力(回路に電流を流す原動力)の標準となる「ウエストン標準電池」のカソードにも、水銀化合物(硫酸第一水銀)が用いられている。蓄電容量にも優れる水銀電池は、早くからボタン型電池として小型機器の電源に利用されていたが、水銀の有害性の観点から、次第に代替が進められていった。途上国には現在でも水銀電池を製造しているところがあるが、国内での製造は1990年代に終了している。

●それでも水銀が電池に添加される理由

他方、水銀は、水銀電池以外にも使われているため、電池の名称になっていないだけで安心してはいけな。電池のアノード(負極)には亜鉛が用いられることが多く、電流が流れると電極の亜鉛は酸化されて酸化亜鉛を生成することになっている。しかし、時に亜鉛が電解液によって腐食して溶け出すとともに、水素ガスを発生させることがあり、これが電池の破裂や液漏れの原因となっていた。水素ガスの発生、すなわち水の還元反応を促す触媒能力は「水素過電圧」と呼ばれ、金属によって異なっている。白金はこの水素過電圧が最も小さく(還元反応を妨げる抵抗が低く)、逆にこの値が最も大きいのが水銀である。この性質を利用して、電池の水素ガス発生を抑制する目的で水銀が添加されるケースがある。

アノード側反応



この場合、水銀は、電池の放電反応には関与しないので、水銀を添加するかしないかは、各メーカーの技術開発や品質管理の話になってしまう。「マンガン乾電池」や「アルカリ乾電池」などは、世界的にもほぼ無水銀化が達成されており、日本で現在販売されている製品に水銀が含まれていることはほとんどない。だが、ボタン電池では、「アルカリボタン電池」「酸化銀電池」「空気亜鉛電池」に水銀含有製品が残っている。これら製品の無水銀化にあたっては、メーカーそれぞれが、様々なガスの発生抑制や発生したガスを吸収する技術を取り入れて、無水銀製品の開発を進めている。

●電池の無水銀化に向かって

「アルカリボタン電池」は、比較的安価なおもちゃや小型の電子機器に広く使われており、無水銀化もある程度進んでいる。しかし、「酸化銀電池」は腕時計に、「空気亜鉛電池」は補聴器に主に使われているが、高級腕時計の中で電池が液漏れしたり、補聴器の使用中に電池が破裂したりすることは、その影響が大きいので、安全性にはことさらに注意を払うべきである。「水銀に関する水俣条約」では、2020年までの電池の無水銀化を求めているものの、ボタン型の「酸化銀電池」と「空気亜鉛電池」については除外規定を設けており、引き続き製造・輸出入が可能となっている。無水銀化への推移を注意深く見守る必要があるだろう。

●一人ひとりが無水銀化に責任



水俣条約における電池の管理規定は、製品に組み込まれた電池にも適用される。しかし、電池が最初から組み込まれている製品の中身が、無水銀電池であるかを確認することは非常に困難である。ネットショップで簡単に海外から商品を取り寄せることができる時代、自身の輸入品の中に条約違反の電池が組み込まれているかもしれないというリスクは、いったい誰が負うのだろうか。我々一人ひとりが向き合うべき問題である。

水銀触媒が招いた悲劇

化学反応を促進・優先させる働きがあり、自身が反応の前後で変化しない物質を一般に「触媒」と呼んでいる。触媒作用は、反応物質が触媒と特異的に結合することにより効果を発現させるが、その活性点には金属元素が選ばれることが多い。複数の酸化状態を持ち、それらの状態を比較的容易に切り替えることができる金属元素は、特定の反応分子の化学反応を仲立ちすると考えられている。

●触媒作用と水俣病

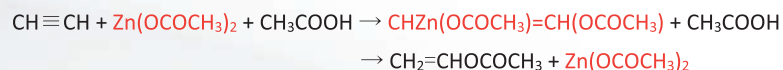
水銀を含む亜鉛族元素は、有機合成とりわけアセチレンを材料とするビニル樹脂の製造に、長く触媒として用いられてきた。亜鉛族元素の触媒は、アセチレンと中間体を形成して付加反応を促進すると考えられ、この反応のための触媒は、今のところ亜鉛族元素以外は知られていない。このプロセスの中で、アセトアルデヒド製造のために使用された水銀触媒が、工程内でメチル化して環境中に放流されたために起こったのが水俣病である。

ビニル樹脂製造の反応系

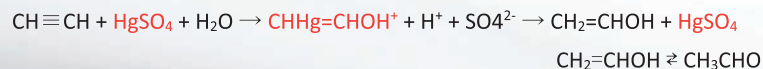
塩化ビニルモノマー(触媒:塩化第二水銀 HgCl_2)



酢酸ビニル(触媒:酢酸亜鉛 $\text{Zn}(\text{OCOCH}_3)_2$)



ビニルアルコール・アセトアルデヒド(触媒:硫酸第二水銀 HgSO_4)



触媒は、反応の前後で変化しないと言われているが、実際にはいくつもの中間体が生成され、それが反応条件によっては元に戻らないことも珍しくない(触媒が失活したとも言われる)。その中間体から毒性の高いメチル水銀が生成したことで水俣の悲劇が起きた。その後、水俣病の教訓から水銀を使用しない製造プロセスが求められ、

近年は、アセチレンの代わりにエチレンを原材料とすることにより、水銀触媒の使用を避けている。

●水銀触媒削減の道のり

アセチレン(石炭から合成)からエチレン(石油から合成)へ原材料を変更するというのは、言うのは簡単だが、その実態は産業構造を石炭化学から石油化学に大転換するということである。日本では、1960年代まではアセチレンプロセスが主流であったが、1970年代にエチレンプロセスに転換され、現在水銀触媒を用いた製造プロセスは国内に存在しない。このようなプロセス転換が可能だったのは、水俣病の教訓はもちろんだが、この時期に国内の炭鉱が相次いで閉山し、国全体として石炭の供給が大きく減少したことも要因の一つになっている。このため、石炭を輸入する代わりに石油を輸入することで比較的容易にプロセス転換を進めることができたと言えよう。

一方でこのプロセス転換に苦労しているのが、隣国中国である。中国は、今でも世界最大の石炭生産国であり、国内での石炭需要を維持するためにも、アセチレンプロセスにより安価なビニル樹脂(特に塩化ビニル)の製造を続けている。ちなみに、中国の塩化ビニル樹脂の製造量・使用量は、ともに世界一である。現在中国では、水銀に代わる新たな触媒の開発を進めるとともに、使用済みの触媒をリサイクルすることで水銀の排出を削減することに取り組んでいる。

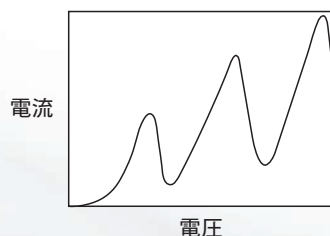
2015年時点の世界の水銀需要推計では、約4分の1が塩化ビニルモノマー製造のために使われていることになっており、しかもその量は増加傾向にある。グローバルレベルでの水銀需要の削減が求められる中、水銀触媒の使用削減は喫緊の課題として「水銀に関する水俣条約」においても規定されている。

水銀が科学の発展の礎となる場合

近代物理学の双璧ともされるアインシュタインとボーアが相次いで斬新な理論を発表するなど、20世紀は、科学が目覚ましい発展を遂げた時代である。1905年にアインシュタインが、「特殊相対性理論」における光速速度一定の原理を提唱すれば、ボーアは、1913年に量子論的な原子模型を提案するとともに、電子の「エネルギー準位」（とびとびのエネルギー状態）の仮説を提示した。今日、相対性理論と量子力学は、物理学の2大理論とされており、現在もそれらを統一する試みが続けられている。

●量子力学の理論を証明する水銀

ボーアの仮説によれば、通常の原子では、電子は最もエネルギーの低い状態（基底状態）にあり、外部からエネルギーが与えられた場合に、一つ上のエネルギー状態（励起状態）へと持ち上げられる。フランクとヘルツは、水銀蒸気を封入した電子管の陰極を加熱して熱電子を発生させ、それを電極間に電圧をかけることにより加速させ、水銀原子に衝突させる実験を試みた。衝突のエネルギーが小さいうちは、水銀原子に跳ね返されてしまうため（弾性反射）、熱電子はほとんどエネルギーを失わない。しかし、印加電圧を上げていくと、熱電子はより加速され衝突エネルギーも増加していき、ある一定のレベルに達すると、熱電子はエネルギーを失う。このとき、水銀原子が熱電子のエネルギーを吸収し励起状態になったと考えられ、この現象がある特定の電圧の時に起きることから、水銀原子のエネルギー吸収は、連続的ではなくとびとびに起こることが明らかになった（イラスト参照）。ボーアのエネルギー準位の仮説は、こうしてフランクとヘルツによる実験と、水銀によって証明されたのである。



フランクとヘルツの実験結果

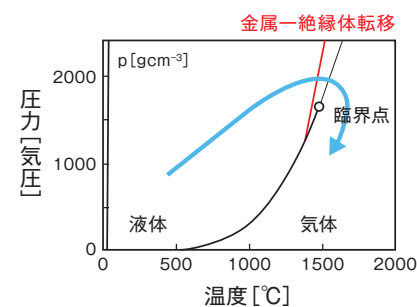
●超電導現象の発見と未来に水銀の影

同じ頃、物性物理学においても、大きな発見があった。1911年にオランダの物理学者オンネスは、4.2K（氷点下269℃）という極低温で水銀の電気抵抗が突然消滅す

ることを報告した。「超電導」の発見である。物質が超電導相に転移すると、水が氷になるのと同じように、その物性は大きく変化する。そして、その移り変わる温度（「転移温度」と呼ばれる。）は、物質によって決まっている。物理学的には大変興味深い発見であったが、液体ヘリウムで冷やさなければ観察できない超電導現象は、実用性が限定的であるとされてきた。しかし、より高温で超電導現象を起こす物質が次々と発見され、今後はその応用も期待されている。例えば、銅酸化物高温超伝導体の中で、水銀が使われているHg-1223と呼ばれる物質は、134K（約-140℃）での超伝導転移が確認されている。

●科学者達の探求に水銀という道標

極低温とは反対に、高温高压での物理現象にも、科学者達の探求の手は伸びている。物質には、「臨界点」という液体と気体が相変化する限界がある。この臨界点を超えたところでの流体（超臨界流体）の物性については、実のところまだよくわかってはいない。特に金属の場合は、液体であれば電気が流れ（導体）、気体になると流れなく（絶縁体）なるため、超臨界流体が電氣的にどのような挙動をするかは謎であった。



水銀の相図

実験では水色の線に沿って温度・圧力の状態を変化させた

この謎を解明するための実験が、兵庫県にある「SPring-8」という大型の加速器を有する実験施設で行われた。金属の超臨界流体の実験には、常温常圧ですでに液体である水銀を用いるのが最も容易であろうと考えられた。実験では、まず水銀を液体状態から加熱加圧し、臨界点を迂回する形で状態を気体側に变化させる。その際に、X線のビームを打ち込む「X線回折」によって原子間距離を計測して、水銀原子の状態が観察された。実験の結果、金属が絶縁体に遷移する過程では、局所的な密度のゆらぎや不均質な原子分布が生じており、金属的な部分と絶縁体的な部分が揺れ動いていることが明らかになった。

物理学の基礎となる現象を、実験によって証明するためには、それに適した物性の物質を選ぶ必要がある。その物性が際立っている水銀は、科学が新たな道を切り引くための道標を、科学者達に提供し続けている。

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「親銅元素」「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。



辰砂を含む鉱石

●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。

●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、図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。

水銀が毒として働くとき

水銀は、工業化学物質やプラスチックなど人間が作り出した化合物とは異なり、化学元素であるため、宇宙に普遍的に存在している。このように無くすことができない物質によって環境やヒトの健康に悪影響を与えるという問題には、「リスク管理」という考え方で対処する必要がある。

●「リスク管理」とは？

リスク管理の目的は、有害性とばく露（危険因子にさらされること）の積（掛け算）として「リスク」を算出し、それを我々が受け入れられる程度に小さくすることである。水銀は化学形態を変えながら地球上を循環するため、そのライフサイクル全てを含む包括的なリスク管理を行うことが重要である。

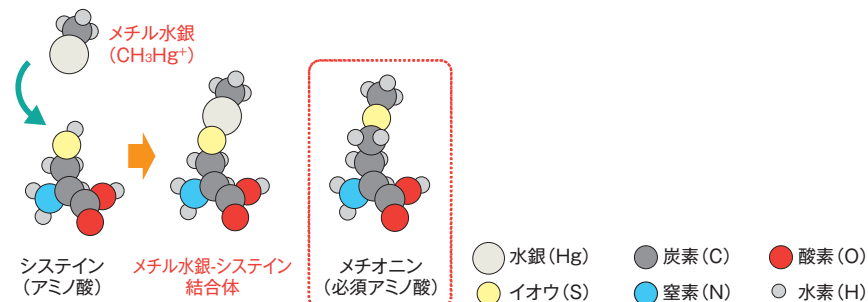
$$\text{リスク} = \text{有害性} \times \text{ばく露}$$

●水銀が生体に影響するメカニズム ～その有害性

環境中の水銀は、大きく「金属水銀」「無機水銀化合物」「有機水銀化合物」（主にメチル水銀）の3つの化学形態に分けることができる。水銀の有害性（毒性と言い換えてもよい。）といっても、様々な水銀化合物がありその毒性は同じではないが、主に2通りのメカニズムで生体に影響を及ぼすと考えられている。一つは、「無機水銀化合物の腐食作用」である。これは無機水銀化合物の水銀イオンによるもので、生体内外の表面に接触した場合、その細胞をただれさせる作用がある。そのため、大量に経口摂取した場合には、主に消化管内や腎臓に障害を与えてしまう。

もう一つが、水俣病を引き起こした「メチル水銀の取り込みによる障害」である。メチル水銀がアミノ酸である「システイン」と結合体を作ることにより発現するもので、特に毒性が強い。この結合体は、必須アミノ酸である「メチオニン」と構造が似ているため、生体が持つ「必要なアミノ酸を吸収して輸送するシステム」の流れに乗ってたんぱく質の一部として合成されてしまい、そのたんぱく質が正しく機能することを阻害する。

一方で生体は、その代謝機構によって様々な形態の水銀を酸化し、解毒を試みる。最終的には無機水銀の形態にして尿中に排泄、これによって解毒するわけだが、そのプロセスにはある程度の時間を要するとされている（摂取した水銀の半分が排泄されるまでの時間は、おおよそ2～3か月）。



メチル水銀-システイン結合体とメチオニンの形態類似性

●水銀の生体内での動き ～そのばく露

水銀へのばく露に関しては、その化学形態に加えて、体内に取り込まれる量と吸収・代謝のされ方が重要になる。

金属水銀による生体への作用はほとんど無く、また、誤飲しても消化管からはほとんど吸収されずそのまま排泄されることが多いため、あまり重篤な影響は生じないと考えられている。しかし、水銀蒸気になると、肺のガス交換機能により高率で吸収され、血流に乗って生体内を循環する。さらに、生体が持つ「血液脳関門」という防御バリアを通過、脳などの中枢神経にまで達してしまう。脳内に入ったのち、金属水銀が生体の代謝を受けて無機水銀（水銀イオン）になると、前述の「無機水銀化合物の腐食作用」によって、部位に応じた障害を発現することになる。

メチル水銀の場合は、主に食事から経口的に摂取され、消化管から高率で吸収される。メチル水銀も次第に代謝、排出されていくのだが、一部は前述のようにアミノ酸と誤認されて輸送され、たんぱく質の中に紛れ込んでしまうことで、その部位と水銀による変性の程度に応じた障害を引き起こす。たんぱく質は、新陳代謝によって次第に組み替えられるものであるが、その頻度は体の部位によって異なっているため、障害の治癒の程度にも違いが見られる。さらに、たんぱく質の変性が不可逆な場合は、水銀が排泄された後でも後遺症が残ると考えられている。

無機水銀化合物については、その化学的安定性によっても毒性が異なるため、生体への作用にも違いがある。例えば、昇汞（しょうこう）：塩化第二水銀、汞は中国語で水銀のことは強い毒性を持っているが、硫化第二水銀は水溶解度が低く、水銀の最も安全な化学形態と言われている。そのため、廃水銀の最終処分に当たっては、事前に水銀を硫化させる安定化処理が求められているほどだ。

フェロー諸島とセイシエルの大バトル

フェロー諸島は、スコットランドの北、ノルウェーとアイスランドの中間付近に浮かぶデンマークの自治領である。セイシェル共和国は、マダガスカル島の北、アフリカ大陸の東のインド洋上に浮かぶ小さな島しょ国である。この、一見つながりが無いような北と南の2つの島しょ群が、水銀ばく露をめぐる大バトルを繰り広げていたことをご存じだろうか。

●相反する研究結果にバトルが勃発

話は、1980年代に行われた、2つの研究グループの調査から始まる。当時、水俣病のような高濃度水銀ばく露（危険因子にさらされること）に関する科学的知見は集まってきたが、低濃度メチル水銀ばく露による健康影響がどのレベルで起こり始めるかについて明らかになっていなかった。そのため、世界の研究者の関心は、「魚介類の摂食のような低濃度ばく露が健康影響を引き起こすか否か」という点に移っていた。フェロー諸島では、伝統的な捕鯨によって日常的にクジラ肉を摂食しており、ここで南デンマーク大学の研究グループによる「フェロー諸島出生コホート研究」が行われた。それに対して、米国ニューヨーク州ロチェスター大学の研究グループは、セイシェル共和国を調査地に選定し、「セイシェル小児発達研究」を実施した。住民の8割が毎日魚（アジのような近海魚が中心）を食べる、という食事パターンが調査に適していたからだ。



フェロー諸島とセイシエルの位置

フェロー諸島では、1986～87年の間に出生した子供と母親、計1,023組の親子に対して、7歳および14歳時に神経行動発達調査が行われた。その結果、神経発達に関するいくつかの指標に、水銀ばく露との有意な関連が見られたとされている。一方、セイシェル共和国では、1989～1990年にかけて生まれた779組の親子に対して、6.5、19、29、66か月および9歳時に神経発達調査が実施された。こちらは、いずれの年齢においても、フェロー諸島で認められたような心理・発達試験の得点の低下は見られなかったという。

この、相互に矛盾する結果が、両者の研究成果が出そろった1998年以降より、小児神経発達に低濃度メチル水銀が影響するかどうかの論争に発展した。フェロー諸島の研究グループは、セイシエルの研究はその結果の不確実性が高く、「メチル水銀の影響を過小評価している」と執拗に主張した。他方、セイシエルの研究グループは、メチル水銀は小児の神経発達に対し、ある時は正に、ある時は負に影響し、一貫性のある結果は見られないと強調、「フェロー諸島の結果は偶然の産物に過ぎない」という説明を繰り返した。

●バトル収拾の決め手となったのは？

新たに行われたセイシェル小児発達栄養研究（2008年に発表）が、両者の論争に終止符を打つことになった。この調査では、小児神経発達に魚由来の多価不飽和脂肪酸（とりわけドコサヘキサエン酸、エイコサペンタエン酸等のオメガ3脂肪酸）の有益性が示される一方、その影響は、メチル水銀濃度によって相殺されるとされていた。つまり、魚介類の摂食は、正の影響を与える多価不飽和脂肪酸と、負の影響を与えるメチル水銀を同時に摂取する行為だと結論付けたのである。同様の結果は、日本で2001年から開始した東北コホート調査においても得られており、化学物質の有害性を調査するには、結果に影響する交絡因子を慎重に見極める必要があることが改めて示唆された。

この大バトルの間には、2つの研究グループ以外からも低濃度メチル水銀ばく露に関する多くの論文が発表され、結果的に科学的知見を深めることにつながった。紆余曲折はあったものの、雨降って地固まる、ということになるだろうか。現在、メチル水銀のリスク評価・管理において、フェロー諸島およびセイシェルにおける調査は、関係する基準値設定にあたっての重要なデータとなっている。

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にわかにより高まりを見せる。

●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、汚染源があって、流出した汚染物質にばく露(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。

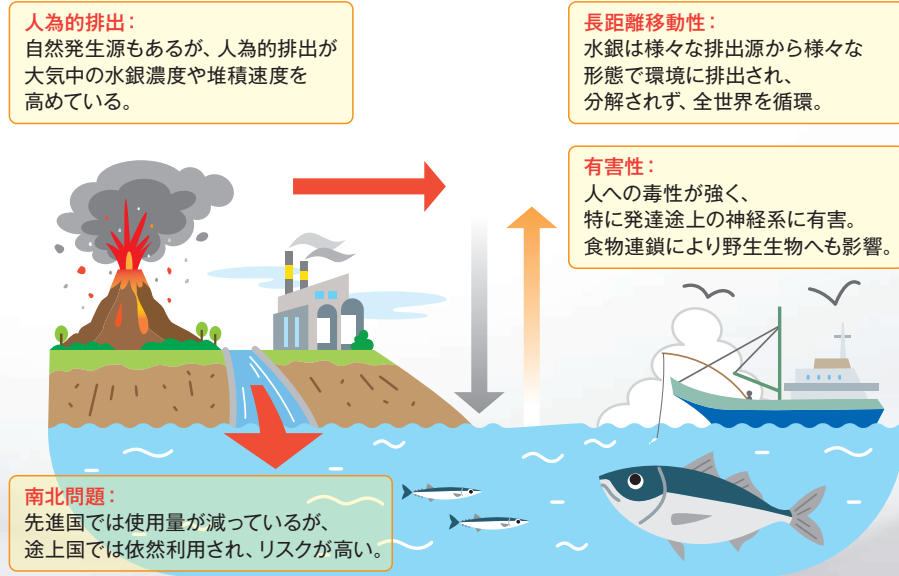
●マグロの水銀はどこから来た?

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、水銀が大気をめぐる、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。





マーキュロクロムの歴史に幕？

マーキュロクロムは、「メルブロミン」という有機水銀化合物の水溶液で、傷口の殺菌・消毒の目的で広く普及していた。同じ傷口消毒剤としては、先行して、ヨウ素をエタノールに溶かしたもの（ヨードチンキ）が使われていたことから、マーキュロクロムは、ヨードチンキ＝「ヨーチン」に対して赤いヨードチンキ＝「赤チン」という愛称で呼ばれ、親しまれた。

●医療現場でも重宝された「しみない消毒薬」

マーキュロクロムは、ヨードチンキに比べて刺激性が少なく、家庭の常備薬として広く使われてきた。水銀剤の作用は、主にチオール基(SH-)と水銀との親和性による活性阻害と言われており、積極的に細菌を殺すというよりも、細菌の増殖を抑制する「静菌的」な働きをされると考えられている。また、水には溶けやすいが、有機溶媒にはほとんど溶けないメルブロミンは、皮膚浸透性や生物濃縮性が低いという性質を持っている。そのため、体内にしみ込みにくく皮膚表層で静菌作用が継続し、また水銀が体内に取り込まれにくいため、外用剤として使う限り安全性が高いとされていた。

医療現場では、静菌作用を示す穏やかな効き目と、異常なほどの価格の安さから、好んでマーキュロクロムが使われていた時期がある。眼科では「しみない消毒薬」として、目の殺菌用の点眼液として用いられた。また、施術が顔面や口腔になる耳鼻咽喉科や歯科でも、できるだけ刺激の少ない消毒として医師や歯科医師に愛用された。ヨードチンキと比較した場合に、短期の殺菌力に劣るマーキュロクロムは、開削手術前の患部殺菌等には不十分であったとされるが、医療現場において思いのほか活躍していたようだ。特殊な例では、産婦人科において、臍帯ヘルニア（新生児の腸管が出生時に脱出しているもの）という比較的重篤な新生児疾患が、マーキュロクロムの塗布によって改善したとの症例が報告されている。



消毒用マーキュロクロム液

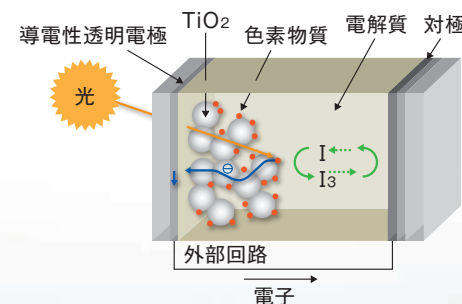
●医薬品としての役目を終える「マーキュロクロム」

1918年に殺菌作用が発見されて以来、長らく愛用されていたマーキュロクロムであるが、水銀剤ということで、徐々に製品規制の網がかけられていく。アメリカの食品・

医薬品局 (FDA) が1998年にマーキュロクロムの安全性分類を変更し、米国内の流通を止めることに踏み切ると、その後、ドイツやフランスでも販売が停止された。日本では、メルブロミン原液の製造こそ行っていないが、輸入した原液を国内で精製水と調合し、製品として販売している。しかし、「水銀に関する水俣条約」の規定により、2020年以降水銀を使用した局所消毒剤の製造が規制されるため、マーキュロクロムは日本の市場からも早晚消えていくことになる。

●あの「色」が新たな可能性を生むか!?

その歴史に幕となるはずのマーキュロクロムだったが、現在、新たな用途での使用が検討されている。「色素増感太陽電池」という未来型技術の候補物質としてである。太陽電池は、シリコンを用いたものが一般に知られているが、実は種類が多く、新たな技術開発も進んでいる。色素増感太陽電池は、1991年に発明された「グレッツェル・セル」で世界的に注目され、近年多くの研究者が取り組むようになった。構造は、負極(二酸化チタンや酸化亜鉛)とヨウ素系電解液、色素物質を透明な導電層で挟み込むシンプルなものだ。負極に吸着している色素物質は、光が当たると励起(エネルギーの高い状態へと移ること)されて電子を負極に渡す。電子を失った色素は、電解液中のヨウ素から電子を奪い、ヨウ素は正極から電子を受け取り元に戻る。色素増感太陽電池は、シリコン太陽電池に比べて光電変換効率は劣るが、低コストで、構造上、変形可能な材料で作ることができるなど、メリットもある。ただ、現状では劣化が早く、耐久性の向上が課題となっている。



色素増感太陽電池の原理

使われる色素は、効率を気にしなければ何でも構わないが、マーキュロクロムは、実用的でそこそこ良い変換効率が出せると言われている。現在も、色素増感太陽電池の開発は進んでおり、どの色素が適しているかについて結論が出ているわけではない。色素の選択によっては絵を描くこともできるなど、今後、デザイン的な観点から色彩パリエーションが揃えられるようになると、最終的には、マーキュロクロムの特徴的なあの赤色の色彩的嗜好が採否の決め手となるかもしれない。

美容のために水銀を・・・

現在では水俣病の経験もあり、有害化学物質としての認識が確立している水銀だが、世界的には今でも美容のため、積極的に利用する習慣がある。化粧の基本は赤白黒と言われている。赤は口紅や頬紅(ほおべに)など、白は白粉(おしろい)、黒は眉墨(と、日本では何故かお歯黒)が古くから用いられていた。これらはいずれも何らかの化学物質であるので、中にはヒトの健康に影響を与えるものもあった。

●水銀が伊勢の特産物!

クレオパトラも使っていたとされるアイシャドウは、輝安鉱(三硫化ニアンチモン)の黒い粉末であるが、アンチモンの毒性に対する懸念から現在は使われていない。白系の化粧品の代表である白粉には、鉛白(塩基性炭酸鉛)や水銀系の甘汞(かんこう; 塩化第一水銀、汞は中国語で水銀のこと)が古くから用いられていた。日本での甘汞は「伊勢白粉」と呼ばれ、三重県の丹生(にう)鉱山という水銀鉱山から産出された水銀を用いて、松阪市周辺で作られていた。なお、丹生の「丹」の文字は辰砂(しんしゃ; 硫化水銀鉱)のことであり、全国にある丹の付いた地名は水銀に縁があることが多い。ちなみに、辰砂は伊勢の特産物であり、三重県の鉱物にもなっている。江戸時代になると、伊勢白粉より安価で伸びも良い京白粉(鉛白)が用いられるようになり、歌舞伎役者など職業的に白粉を多用する人たちに鉛中毒が多発したと言われている。一難去ってまた一難である。

●漂白という美白

白粉ではなく実際に肌の色を白くする美白処理も、美容には欠かせない分野といえるだろう。世の中に美白用のクリームやせっけんは数多く、様々な物質の美白作用が研究され、また実用化されている。美白化粧品には、皮膚にあるメラニンを作る細胞(メラノサイト)の活性を阻害して色素の分泌や沈着を抑えることで肌の色を変化させるものと、メラニン自体を脱色することによって肌を白くするアプローチがある。白降汞(はくごうこう; アミノ塩化第二水銀)は、後者に当たり、細胞内のメラニン色素

を漂白するため効果がすぐに現れるが、漂白による肌のダメージも大きいものがあり、注意が必要だ。いまだ途上国で流通している美白効果を活用したクリームやせっけんは、しかし「水銀に関する水俣条約」の対象になっており、1mg/kg以上含有する製品の製造および輸出入が2020年以降禁止となった。



●化粧品への水銀の使用は直接的なばく露である

化粧品の効能ではない目的で、水銀が添加されている製品もある。マスカラや目元のクレンジング剤など、目の周りで用いるための化粧品類には、緑膿菌の繁殖を抑えるため、保存剤として「チメロサル」(エチル水銀チオサリチル酸ナトリウム)やフェニル水銀類などの有機水銀化合物を使用することが認められている。緑膿菌は、環境中に広く分布していて、病原性は低いものの薬剤抵抗性が非常に高い。水銀は、その緑膿菌に効果を発揮する数少ない物質の一つである。ただし、化粧品への水銀の使用は、直接的なばく露(危険因子にさらされること)となるため、その必要性とヒト健康に対する影響を注意深く検討しなければならない。よくよく気をつけないと取り返しがつかないことになりかねないのは、美容の怖さでもある。

空海と丹生明神

真言密教のカリスマ教祖である空海は、仏教界では特別の存在だ。遣唐使として唐に渡った当時、すでに高名な僧であった最澄。同じ密教の開祖である最澄と比して、同行した空海は、無名の一学問僧に過ぎなかった。しかし、語学に優れ、三筆に列せられるほどの能筆家であった空海は、短期間のうちに密教の奥義を伝授され、20年の留学予定を短縮し、わずか2年で帰国した。このように天賦の才に恵まれていた空海は、また、朱(硫化第二水銀)に関連した伝承の多い人物でもあり、彼の足跡と水銀との関連を伺わせる史料も少なくない。果たして、空海は、どれほど水銀のことを知っていたのだろうか。

●空海を高野山に導いた2柱の神

空海が高野山を開くにあたり、2人の人物に道案内されたとの伝承がある。2人は高野明神と丹生明神の化身だったと言われ、別けても高野山周辺の地元神である丹生明神は、空海に現在の伽藍がある土地を譲った恩人とされている。丹生明神(丹生都比売神)は、朱の採掘を生業とする丹生氏が信仰した神ということから、「水銀の神」と考えられており、神功(じんぐう)皇后の三韓(朝鮮半島)遠征に際し、この丹生明神が、銚や舟を赤く染める土を与えて軍威を高めたとの言い伝えもある。紀ノ川から高野山へ続く長い参道の途中にある丹生都比売神社は、丹生明神を祀る神社の総本社であり、ユネスコ世界遺産の一部としても登録されている。

空海が(あくまでも仮定だが)水銀に関わっていたとするならば、その手助けをしたのは、この丹生氏の一族とも考えられる。全国にある「丹生」の名前を含む地名や施設は、朱に縁があることが考古学的にも確かめられており、例えば伊勢の丹生鉱山は、大仏の鍍金(めっき)用に水銀を上納したことで知られ、縄文時代から水銀採取地で



丹生都比売神社(和歌山)

ある徳島の若杉山遺跡周辺は丹生谷と呼ばれている。高野山では、丹生明神が、信仰の中心である壇上伽藍に守護神として祀られている。

●空海は中国の神仙思想の影響を受けたのか?

空海が留学した唐では、神仙思想が盛んであった。唐代は、不老長寿を信じて何人もの皇帝が水銀を飲んでいて時代であり、空海もまた、水銀に関する知識を持って帰国したに違いない。水銀は、朱の顔料として絵画や建築物に使われるとともに、鍍金(めっき)の材料としても利用されていた。また、中国の煉丹術(不老長寿の薬を作る術)では、金や銀より価値があるものとされており、高価な材料であった。西洋的価値観であれば「金・銀・銅」の順になるところが、中国では「朱・金・銀」の順であったため、朱を求めて山に入るというのは、当時の人にとっては自然な感覚だったのかもしれない。

空海は、生まれ故郷である四国から奈良末期の平城京に上った。若い頃の空海は、吉野(和歌山県)や出生地である四国で山林修行をしつつ勉学に励んでいたとされるが、中央構造線上のこのあたりは水銀の産地で、縄文時代から朱を採掘していた記録が残っている。修行中の彼が、山中で朱に関して見聞していたとしても不思議ではないし、その経験から、中国的価値観を受容できたであろうことも頷けるのではないだろうか。

高野山にお参りすると、根本大塔をはじめとして、朱塗りの立派な御堂が目を引く。空海は、ここで入定(にゅうじょう:永遠の瞑想の意)し、今でも奥の院で禅定を続けているとされ、毎日食事が差し入れられているそうである。果たして彼が、水銀を飲んで不老長寿の身となったかどうかは誰にも分からない。



「Minamata」の名が発するメッセージ

「条約」とは、国家間の合意であり、国際法によって規律されるものを言う。ここでは便宜的に「条約」と表現するが、「憲章」「協定」「議定書」「宣言」など、慣習的に様々な表現が使われており、どのような名称であっても、その効力に優劣は無い。世の中にどれだけの「条約」があるかは定かではないが、数えきれないほど多いことに間違いは無い。その中で、「ヴェルサイユ条約」や「サンフランシスコ講和条約」など、名称に地名が付いた条約の例はすぐに挙げることができるだろう。そうした地名の付いた条約の一つ、「水俣条約」が2013年に採択されている。

●条約の地名は採択された場所

「ヴェルサイユ条約」や「サンフランシスコ講和条約」は平和条約であるが、環境条約の中にも採択地の地名が付いたものは多く、「ラムサール条約」(1971年)、「ロンドン条約」(海洋投棄関係1972年)、「ワシントン条約」(1973年)、「ウィーン条約」(オゾン層関係1985年)、「モントリオール議定書」(1987年)、「バーゼル条約」(1989年)、「京都議定書」(1997年)、「ロッテルダム条約」(1998年)、「カルタヘナ議定書」(2000年)、「ストックホルム条約」(2001年)、「名古屋議定書」(2010年)、「パリ協定」(2015年)など枚挙にいとまがない。特に近年は、好んで地名付きの条約を選んでいるようにも感じられるが、どれが何だか混乱しそうである。

地名を付けた条約の多くは、別の(長い)正式名称を持っていて、それを見ることで条約の目的を理解することができる。例えば「ロッテルダム条約」の場合は、「国際貿易の対象となる特定の有害な化学物質及び駆除剤についての事前のかつ情報に基づく同意の手続に関するロッテルダム条約」が正式名称である。この長い名称から、「特定の有害な化学物質及び駆除剤」についての条約であり、「事前のかつ情報に基づく同意の手続に関する」ものであることが分かる。英語では、Prior Informed Consent(事前通報承認)の頭文字を取ってPIC条約とも呼ばれている。

●「水俣」の名が体を表している

最も新しい環境条約の一つである「水銀に関する水俣条約」は、その条約名に「水俣」という地名が冠されており、これが、そのまま条約の正式名称となっている。条約が対象とする地域を条約名に記すこともあるが、水俣条約は水俣地域のための条約ではなく、グローバルな水銀対策を進めるためのもので、前述の地名条約と同じく、この条約が採択された場所として記されたものである。



国連公用語による水俣条約の正式名称

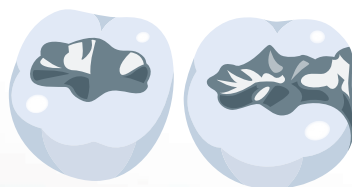
このように採択地の地名を記した条約は少なくないものの、条約の目的が分かりにくく、一般の人に周知されにくいという問題がある。世界遺産条約、化学兵器禁止条約、砂漠化対処条約などの方が、よほど条約のイメージがわかりやすい。その中にあって水俣条約は、「名は体を表す」と言っても過言ではないくらい、条約の目的が容易に理解できる。正式名称も「水銀に関する水俣条約」と簡潔であるが、それさえも必要ではないくらい「水俣条約」の名称には、単なる地名以上に水銀による被害を防いでいこうという世界中のコミットメントが表れている。「水俣(Minamata)」という名前が、世界中に力強いメッセージを伝えている。

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。



歯科用充填剤

●アマルガム法による金めっき

鍍金（めっき）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、シルクロードを經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。

●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°C で凝固してしまうが、タリウムと合金を作ることで、その融点は -60°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ビ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 ^6Li の濃縮）に用いられりと、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。

参考資料

P4-5 渡辺正(2007)元素大百科事典, 33. 亜鉛～35. 水銀, 43. 鉛, 東京: 朝倉書店, pp422-444, 518-528
United Nations Environment Programme, Chemicals and waste, UNEP's activities on lead and cadmium, <https://www.unenvironment.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/emerging-issues/lead-and-cadmium>

P6-7 渡辺正(2007)元素大百科事典, 35. 水銀, 東京: 朝倉書店, pp438-444
日本化学会(1977)環境汚染物質シリーズ, 水銀, 2冊目とその関連, 丸善, 丸善, pp111-121
橋本毅彦, 根雅範, 廣野善孝訳(2005)科学大博物館, 装置・器具の歴史事典, 温度計, 東京: 朝倉書店, pp72-75
環境省(2017)水銀による環境の汚染の防止に関する法律, ～水銀対策のさらなる推進に向けて～(パンフレット), http://www.env.go.jp/chemi/tmms/suigin_leaflet_law.pdf

P8-9 吉中百合雄(1972)各種ジャイロコンパスの解説[上巻], ジャイロコンパスの原理, 成山堂書店, pp15-19
日本化学会(1977)環境汚染物質シリーズ, 水銀, 2冊目とその関連, 丸善, 丸善, pp111-121
海上保安庁交通部(2013)等を照らして150年～～前線探測の歴史と現在～, p11(パンフレット), <https://www.kaiho.mlit.go.jp/soshiki/koutsuu/kikaku/kourouyousuikipanpu.pdf>
日本機械学会, 機械遺産第 63 号, 豊野塔灯台の光学系機械装置, https://www.jsme.or.jp/kikaikan/heritage_063_jp.html
谷内琢也(1986)特殊潜水艇の最新技術, マンエンジニアリング(21)2, 東京: 日本船用機関学会, pp99-104

P10-11 小学館(1985)ガイサー管, 日本大百科全書 4(おおつーかき), 東京: 小学館, pp625-626
乾昭文, 山本充壽, 川口芳弘(2013)電気機器技術史, 事始めから現在まで, 東京: 成文堂, pp122-129
電気設備技術編纂委員会(2013)電気設備技術史, 6. 電灯, コンセント設備, 東京: 電気設備学会, pp156-159
日本照明工業会(2019)自動車用電球ガイドブック第 6 版, 2 自動車用電球の原理と構造～4 自動車用電球の特性, 東京: 日本照明工業会, pp5-15

P12-13 Stockport Metropolitan Borough Council, Hat Works, Exploring the museum, 5. Research facilities, It made them mad, <https://www.stockport.gov.uk/exploring-the-museum/research-facilities>
日本公衆衛生協会(2001)水銀汚染対策マニュアル, 第 1 章総論, 東京: 日本公衆衛生協会, pp3-19
UNEP(2017)Global Mercury Supply, Demand and Trade, United Nations Environment Programme, Global, regional and sectoral consumption of mercury, Geneva: United Nations Environment Programme, pp44-63

P14-15 高島芳弘, 辰砂の精製, 徳島県立博物館, <http://www.museum.tokushima-ec.ed.jp/co/51.htm>
石野亨(1968)奈良東大寺大仏の塗金, 古仏像の表面処理について, 金属表面技術現場パンフレット(15), 東京: 金属表面技術協会, pp7-11

P16-17 ICOMOS(2012)Evaluations of Nominations of Cultural and Mixed Properties to the World Heritage List, ICOMOS Report for the World Heritage Committee, 36th ordinary session, Saint-Petersburg, June-July 2012, WHC-12/36.COM/INF.8B1, Paris: UNESCO, pp339-352
近藤仁之(2011)ラテンアメリカ銀と近世資本主義, 大津: 行路社, pp93-103

P18-19 ハイランダー(2008)水銀の利用を続けるのか, それとも中止するのか, 水銀の功罪についての歴史的考察, 訳: 佐竹・中津, 地球環境, (13), pp151-166
UNEP(2012)Reducing Mercury Use in Artisanal and Small-scale Gold Mining, A Practical Guide, Mercury use in detail, Nairobi: United Nations Environment Programme, pp14-19
UNEP(2017)Global Mercury Supply, Demand and Trade, Global, regional and sectoral consumption of mercury, Geneva: United Nations Environment Programme, pp44-63

P20-21 村尾智(2013)エンカルジュエリーの現状, 地質汚染, 医療地質, 社会地質学会誌 9(1-2), 千葉: 地質汚染, 医療地質, 社会地質学会, pp9-21
LBMA(2018)Responsible gold guidance, LBMA responsible sourcing programme, V8, London: London Bullion Market Association, p10

P22-23 TBS プリタニカ(1973)水銀法, プリタニカ国際大百科事典, 小項目事典3, コーセー, 東京: TBS プリタニカ, p744
吉沢四郎, 竹原善一郎(1965)電気化学と水銀, 化学 20(7), 東京: 化学同人, pp11-17
慈達治(1986)ソーダ工業と食塩電解法—その構造的, 歴史的把握をめぐって—, 立命館大学人文科学研究所紀要 41, 京都: 立命館大学人文科学研究所, pp185-215

P24-25 電池便覧編集委員会(2001)電池便覧第 3 版, 一次電池, 東京: 丸善, pp136-138
電気化学会電池技術委員会(2010)電池ハンドブック, 電池の歴史, 東京: オーム社, pp2-6
石原鏡光(2015)触媒能を表すパラメータ, トンヤとさい, 電気化学の本, 東京: 日刊工業新聞社, pp150-151

P26-27 大前島(1987)酢酸ビニル製造の過去, 現在, そして未来, 有機合成化学協会誌 (45)7, 東京: 有機合成化学協会, pp691-700
UNEP(2017)Global mercury supply, trade and demand, Global, regional and sectoral consumption of mercury, Geneva: United Nations Environment Programme, pp44-63

P28-29 大鷹謙, 金野正(1968)量子力学第 1(共立物理学講座, 第 14), 1. 量子力学の形成, 東京: 共立出版, pp1-14
矢沢深(2009)自然界をゆるがす「臨界点」の謎 宇宙・生命・物質のすがたはこうして一変する, 第 7 章 超流動, 超伝導, 超臨界の臨界点, 東京: 技術評論社, pp137-168
Nao Takeshita, Ayako Yamamoto, Akira Iyo, and Hiroshi Eisaki(2013)Zero Resistivity above 150 K in HgBa2Ca2Cu3O8+δ at High Pressure, Journal of the Physical Society of Japan 82(2), Tokyo: The Physical Society of Japan, pp023711-1-4
田村剛三郎, 乾雅範(1999)超臨界金属液体の構造研究—膨張する水銀—, SPring-8 利用者情報 4(5), 日本: 高輝度光科学研究センター, pp38-42

P30-31 UNEP(2019)Global Mercury Assessment 2018, 3. Mercury emission to air, Geneva: United Nations Environment Programme, pp10-19
渡辺正(2007)元素大百科事典, 4. 地球化学, 東京: 朝倉書店, pp45-55

P32-33 日本公衆衛生協会(2001)水銀汚染対策マニュアル, 第 1 章総論, 東京: 日本公衆衛生協会, pp3-19
国立水俣病総合研究センター(2014)水銀と健康, 第 5 版(パンフレット), http://nimd.env.go.jp/kenko/archive/suigin_kenko_dai5.pdf

P34-35 村田勝敬(2009)平成21年度メチル水銀曝露による健康障害に関する国際的レビューに関する研究, 水俣: 国立水俣病総合研究センター, pp2-6, http://nimd.env.go.jp/kenkyu/review/h21_mercury_analysis_review.pdf
日本環境化学会編著(2019)地球をめぐる不都合な物質, 第 6 章メチル水銀が子どもの発達に与える影響を探る, 東京: 講談社, pp164-189

P36-37 UNEP(2019)Global Mercury Assessment 2018, 2. Understanding the global mercury cycle, Geneva: United Nations Environment Programme, pp6-9
UNECE(2015)Updated handbook for the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and its Protocols, Geneva, p11
清水誠, 土井隆雄(1973)マクロの水銀循環-1. その実態, 生物・医学的意義, 科学 43(6), 東京: 岩波書店, pp357-362

P38-39 壽中山(1966)マーズキウローム過敏症, 耳鼻咽喉科 38(7), 東京: 医学書院, pp739-742
荒川裕則(2001)色素増感太陽電池の最新技術, 第 12 章マーズキウローム色素増感太陽電池の開発, 東京: シーエムシー, pp143-150

P40-41 小学館(1985)伊勢白粉, 日本大百科全書2, 一いつ, 東京: 小学館, pp316-317
WHO(1999)Environmental Health Criteria 118, Inorganic Mercury, <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc118.htm>
WHO, Mercury in skin lightning products, https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/mercury_flyer.pdf?ua=1
US Food & Drug Administration(2019), Prohibited & restricted ingredients in cosmetics, <https://www.fda.gov/cosmetics/cosmetics-laws-regulations/prohibited-restricted-ingredients-cosmetics>

P42-43 田中久夫(1988)金銀島日本(シリーズ, につぼん草子), 第四章朱砂の需要? 水銀鉱山のともて? 東京: 弘文堂, pp51-66
吉元裕治(2009)日本全国神話, 伝説の類, 朱・水銀(空海とも問わりも), 東京: 勉誠出版, pp1118-1129
松田壽男(2005)古代の朱, 五 日本のみ, ちくま英文文庫, 東京: 筑摩書房, pp62-74

P44-45 United Nations(1969)Vienna Convention on the Law of Treaties, https://legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/conventions/1_1_1969.pdf

P46-47 総山孝雄(1953)成形充填, アマルガム編, 東京: 永末書店, pp27-51
木原諒二ほか編(1999)金属の百科事典, アマルガム, 東京: 丸善, p193
渡辺正(2007)元素大百科事典, 35. 水銀, 東京: 朝倉書店, pp438-444
飯高一郎(1967)金属と合金, 5 水銀およびアマルガム, 岩波全書, 東京: 岩波書店, pp201-204

編集後記

不思議な水銀の世界ようこそ

一度水銀の不思議な世界に足を踏み入れると、その広がりには驚かされます。古く占星術や錬金術などの思想が確立されるにつれて、金属一星一神一暦が同一視されていきました。古代から知られていた七金属(金、銀、鉄、銅、スズ、水銀、鉛)に七つの星(太陽、月、火星、金星、木星、水星、土星)を対応させると、水銀は水星とつながり、ローマ神話のメルクリウスとも同一視されます。太陽系の最内周惑星で、その動きが速い水星は、神々の使いで俊足の神メルクリウス、さらに金属なのに液体で自由自在に動き回る水銀と似ていると考えられたのでしょうか。

メルクリウスは、美術では、伝令杖を持ち、翼の生えた帽子をかぶったり、翼の生えたサンダルを履いている姿で描かれます。日本橋三越の屋根に、この姿で輝いている銅像があるので、お気づきの方もいるかもしれません。そう、メルクリウスは高い神なのです。また、泥棒、旅人の神でもあるそうです。変幻自在、善悪共に通じた多才な姿は、水銀の秘密にも通じるものがあります。

私たちは、銀色に輝く液体(金属水銀)と朱肉の朱(硫化第二水銀)という全く違う姿で水銀を目にします。天然に産する辰砂(しんしゃ; 硫化第二水銀)は、その赤い色が生命の源泉となる血の色とも似ていたため、人類はその色を尊び、それを用いて壁画を描いたり、土器に塗ったりしたのが、水銀の最も古い用途だったと考えられています。すでに火を手にしていた人類は、やがて辰砂を強熱することで金属水銀を得ることができました。金属水銀は、加熱を続けると赤い酸化水銀になり、さらに加熱するとまた金属水銀に戻るそうです。このように、赤一銀一赤一銀と変化し続ける水銀は、生命の生まれ変わりにも見立てられました。

古今東西、変化に富む水銀は、私たちに様々な姿を見せてくれましたが、2013年に人類は、重要な決断をしました。この翼を持った悪戯元素を、人智の檻の中に閉じ込めようという試みです。今ごろ、空の上でメルクリウスは、どんな気持ちで私たちの試みをながめているのでしょうか。彼にすると身をかわされまいよう、私たちは、水銀に関する知識を身に付けていかなければなりません。