

詳解

不思議な 水銀の話

詳解

不思議な水銀の話



詳解

不思議な 水銀の話

第1章 厄介だが有用な元素

1	「元素」と付き合っていくということ	10
2	水銀はどこからきてどこに行くのか	14
3	健康か生活か―小さな金採掘業者のつばやき	18
4	いずれもあぶない金銀製錬法	22
5	アマルガムの功罪	26
6	時代に翻弄された水銀鉱山―その栄枯盛衰	30
7	水銀は世界をめぐる	34
8	黄金狂の時代を支えた水銀	38
9	永久凍土の中の水銀量	42

第2章 身の回りにある水銀

10	水銀を扱うときの心得	46
11	水銀を徹底的に取り除くためには	50
1	便利な計測器は水銀のおかげ	56
2	紫外線の光源となる水銀	60
3	電池に用いられる水銀	64
4	医療・治療に用いられる水銀	68
5	美容のために水銀を	72
6	水銀ランプはクルマの未来を照らすか?	76
7	伝統の中の水銀	80
8	家庭でできる水銀対策	84
9	エシカルジュエリーを選ぶ意味	88

10	コンピュータ時代の夜明けを記憶する水銀	92
11	健康を数値化するゝ血圧測定の意義	96

第3章 毒としての水銀

1	水銀が毒として働くとき	102
2	ダンベリーシエイクゝ職業病としての水銀中毒	106
3	水銀触媒が招いた悲劇	110
4	今、あらためて『海の牙』を読む	114
5	イラクで起きた水銀中毒	118
6	フェロー諸島とセイシエルの大バトル	122
7	毛髪の中の水銀	126
8	忌まわしい梅毒と水銀療法	130
9	毒劇法が除外する水銀化合物	134

10	クジラが考えた水銀対策とは?	138
11	環境はいくらか?ゝ水俣の場合	142

第4章 科学の発展への貢献

1	水銀がつくる標準・基準の数々	148
2	水銀が科学の発展の礎となる場合	152
3	赤外線望遠鏡が捉える宇宙	156
4	水銀が刻む未来の時	160
5	火山研究と水銀	164
6	水銀がターゲットにされている!?	168
7	夢の液体大天頂望遠鏡	172
8	水銀圧入法によるコンクリートの評価	176
9	古代日本史研究における水銀の役割	180

第 1 章

厄介だが有用な元素

終章

10	マーキユロクロムの歴史に幕?	276
11	ロケットサイエンスで水銀が活躍	280
12	真空技術の発展と水銀ポンプ	284
1	「Minamata」の名が発するメッセージ	290
2	不思議な水銀の話	294
●	参考資料	298

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、今でも神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°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°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 ^6Li 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

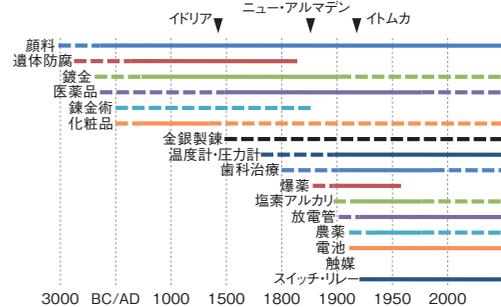
こうしたアマルガムも、現在ではその使用範囲が限られてきているが、逆にどんどん増えている用途がある。金アマルガムを用いた金の製錬である。金鉱石を細かく砕いてそれを水銀と混ぜ合わせると、微細な金粒子がアマルガムとなって溶け出し、鉱石と分離する。このアマルガムを強熱、水銀を蒸発させて金を製錬するのだが、その際の水銀蒸気による作業者の健康被害は、今や深刻な問題となっている。

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？

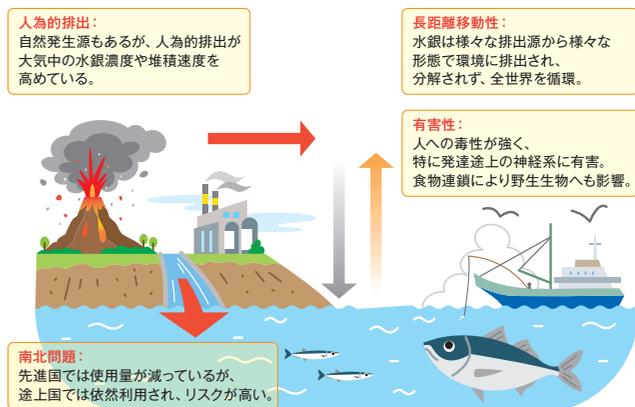
水銀は、火山の噴火や岩石の風化などでも環境中に排出されるため、完全に無くすることはできない。特に金属水銀は、常温でも揮発して水銀蒸気（気体）となり、大気中に長期間とどまることが知られている。その間、大気循環により地球を何周も回り続け、やがて、紫外線酸化や他の

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」（Gens・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、永久凍土の中の水銀量を約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

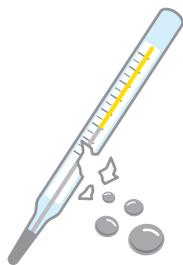
とは分かっていない。ただし、地球が長い年月をかけて氷の中に閉じ込めた水銀量は、高々100年程度の歴史しかないPOP sとはケタが違う。これも温暖化の隠れた時限爆弾の一つであろう。

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℃で13.2mg/m³であるが、水銀温度計に封入されている3g程度の水銀でも、計算上は100m³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0.025mg/m³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。

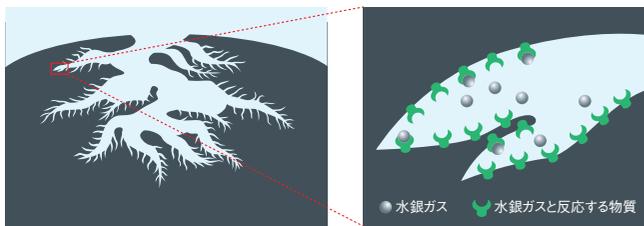
○水銀除去に威力を発揮する活性炭

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。

○燃焼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、燃焼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。燃焼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、燃焼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酸化物（SO₂、SO₃）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、燃焼排ガスからは、水銀だけでなく、こうした硫酸酸化物も取り除く必



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（ HgCl_2 ）と原子状水銀（ 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（ HgI_2 ）や硫化第二水銀（ 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（ Al_2O_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。

第 2 章

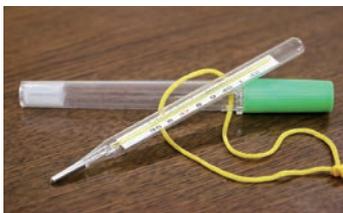
身の回りにある水銀

1 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

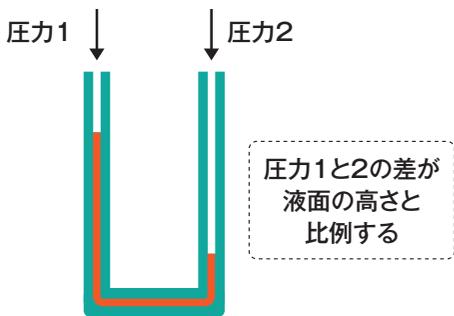


水銀体温計

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ぶ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ールンハイトが、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。

○「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



圧力計の原理

小さくなり、高さの計測が容易になる。「フォルトン型水銀気圧計」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「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。

2 紫外線の光源となる水銀

金属をガスバーナーであぶると、種類によって異なる色彩の炎が出る。炎色反応という現象だ。金属の同定（その金属が何であるかを決定すること）や、濃度の把握などに利用できる。ストロンチウム（赤）、ナトリウム（黄）、バリウム（黄緑）、銅（青緑）など、特有の炎色反応がある金属元素は、花火の炎色剤としても用いられる。では水銀はどうだろう。水銀にはあまりはっきりした炎色が出ない。いや出ないというのは少し不正確で、可視域の光成分が少なくと言った方が適當だろう。水銀の最も強い炎色は、紫外域にある。だから、ヒトの目には見えない。

プリズムで光を分光した時、紫色より先にあつて目に見えない紫外線。可視光線より波長が短く、X線より波長が長い電磁波で、その中でも波長200～380nm（ナノメートル）の近紫外線と呼ばれる部分は、ヒトの生活により深くかかわっている。日焼け止めの目薬にも使われるUV-A・UV-Cは、この近紫外線の波長をさらに細かく分類したもので、ビタミンDの生成に役立ったたり皮膚がんの原因となったりと、良くも悪くも紫外線はヒト健康の面で注目されている。

○水銀が出す「光」とその殺菌力

水銀の炎色は、近紫外線である354nmに最大の光成分を持っており、これはUV-C（200～280nm）に分類される（イラスト参照）。UV-Cは、DNAに損傷を与えるため、強い殺菌力があるとともに人体には有害な光であるが、オゾン層で守られている地表には通常到達しない。水道施設における「水銀ランプ」は、このUV-Cの殺菌作用を利用したもので、微生物汚染対策として広く用いられている。

○照明器具として働く水銀

水銀ランプの紫外線は、蛍光剤を用いて可視光線に変換することができる。蛍光とは、紫外線等の電磁波の照射により物質（原子）がエネルギーを吸収し、原子の中で電子が励起（エネルギーの高い状態へと移ること）され、それが基底状態（エネルギーが最も低い状態）に戻る際に可視光線等が放射される現象である。この、紫外線を蛍光剤に吸収させると可視光



線になる性質を利用したものが、「蛍光灯」である。内面に蛍光剤を塗布した形式の蛍光灯は、昭和初期に開発され、戦後照明器具として定着、普及した。

○ブラックライトにも水銀のチカラ

蛍光剤の種類を変えて、可視光線より少しだけ波長の短い紫外線（UVA）を放出するように調整したものが、いわゆる「ブラックライト」である。ブラックライトの光は、そのままではほとんど見えないが、その光を当てることにより特定の物体が発光するため、証明書類の偽造防止や真贋鑑定、屋内におけるビジュアルエフェクトなどに利用されている。用途として、蛍光塗料を塗布して効果を得る場合と、もともと蛍光作用を持つ物質の検知に使う場合がある。



蛍光灯

○水銀ランプからLEDへ

紫外線の利用にあたっては、長く水銀ランプが用いられてきたが、水銀の安全性への懸念から他の光源（とりわけLED）の開発が進められている。LEDは長波長（赤色）が先に製品化され、次第に短波長LEDも開発されてきている。LEDを照明用として使う限り、紫外線は不要であり、余分なエネルギーが消費される短波長成分は、無いに越したことはない。しかし、殺菌などでの使用を考えると、紫外線成分を多く含むLEDは、今後の水銀使用製品の代替につながる重要な技術であり、その開発は待ち望まれているところでもある。

3 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い。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

アノード側反応

- ・通常反応 $\text{Zn} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{ZnO} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
- ・水素ガス発生 $\text{Zn} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{OH}^- + \text{H}_2 \uparrow$

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。

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、その影響が大きいため、安全性にはことさら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。



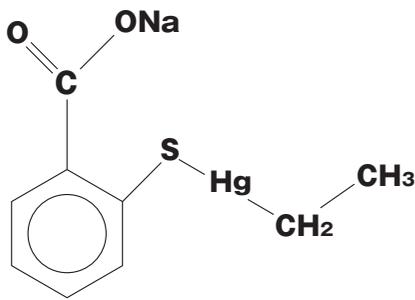
4 医療・治療に用いられる水銀

医療、治療のために水銀が使用された事例は古く、ギリシャ、インド、ペルシャなどで医薬品に用いられていた記録は紀元前まで遡る。また、皮膚疾患や梅毒の治療に使われたとの記録も残っており、漢方にも水銀を用いた伝統薬がある。かつて日本のどこの家にも置いてあるほど普及していた「マーキュロクロム液」（俗に言う赤チン）は、水銀化合物の消毒・殺菌効果を利用した傷口消毒剤であるが、この薬も、2020年で製造や輸出入が禁止されるため、早晚使われなくなる運命にある。

他にも、利尿剤として「甘汞」（かんこう…塩化第一水銀、汞は中国語で水銀のこと）やいくつかの有機水銀化合物が用いられていた。いずれの場合も、水銀が細胞内のチオール基（SH）と親和性があることにより、その効能を発揮するしくみを利用している。さらに、厳密に医療行為と云えるかどうか分らないが、明治から昭和期の鍼灸治療において、鍼の滑りを良くするために水銀を塗布してから刺入するという施術が行われていた記録もある。

○保存剤としての水銀 ～そのメリットとリスク

治療の有効成分としてではないが、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）という水銀化合物が添加されたワクチンがある。チメロサルは有機水銀化合物の一種（イラスト参照）で、生体内で分解してエチル水銀を遊離（化合物中の結合が切れて、その一部が分離すること）する。メチル水銀よりも簡単に分解されるため、エチル水銀の毒性はそれほど高くないとされている。チメロサルを添加したワクチンは、冷蔵庫に入れることなく常温での保管が可能なため、電気の安定的な供給が見込めない途上国の遠隔地においても使用できる。これが「チメロサル」という水銀化合物を添加する最大の理由である。この場合、乳幼児の予防接種を行うことのメリットと、その際に水銀にばく露（危険因子にさらされること）することのリスク



チメロサル

を比較し、リスクよりメリットが大きいとの判断から、現在までチメロサル入りワクチンは水銀規制の対象とはなっていない。

○水銀体温計と血圧計は早めに処分を

検査器具としては、広く普及している水銀体温計と血圧計がよく知られた存在だ。これらの器具も2020年で製造自体は禁止されるが、消耗品ではないため、引き続き使い続けることが許されている。さらに困ったことは、大量に流通しているために、その廃棄が長期間にわたると想定されている点である。水銀廃棄物は、特殊な処理が必要で費用がかかるため、少量を個別に処理業者に持ち込むより、取りまとめて回収処分を行う方がより迅速に低コストで廃棄できる。「まだ使えるから」「水銀が漏れるわけではないから」と使い続けるのではなく、早めに処分したほうが安全面でも費用面でも好ましい。

○ヒトの健康を守るための医療行為が…

日本ではほとんど使われなくなったが、歯科治療に使われるアマルガムの充填剤は、世界的にはまだ広く使用されている。アマルガムとは、水銀と他の金属との混合物（合金）で、歯科用充填剤には主に銀との合金が用いられている。水銀と混ぜることにより固まるアマルガム充填剤は、途上国など歯科医療の施設が充実していない地域においても取り扱いが容易で、他の充填剤で代替できないケースもある。口の中に水銀があり、少しずつ蒸発していることに対する不安はもちろんだが、実はこの歯科用アマルガムが全く別の問題を途上国で引き起こしていることを想像できるだろうか。

歯科用アマルガムの供給・販売ネットワークは、途上国の遠隔地まで届けるようになっていたため、それが別の用途に流用されてしまうことが起こっているのである。別の用途とは、水銀を使用した零細・小規模な金の採掘で、これが現在、世界最大の水銀使用用途と言われている。法の目の届かない途上国の遠隔地で行われているため、効果的な水銀対策を進めていくためには、水銀の直接的な供給ルートだけに目を奪われることなく、様々な視点からの検討が求められる。ヒトの健康を守るための医療行為が逆の結果につながらないよう、注視していくことが必要である。

5 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（三硫化二アンチモン）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では使われていない。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る。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。

6 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、屋内照明用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、よく知られた蛍光ランプである。蛍光ランプは、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。蛍光ランプ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事用品として製造に成功した。

○蛍光ランプの民生化は法隆寺から！

軍事用に独占されていた蛍光ランプを、一般照明として最初に使用したのが、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、蛍光ランプ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、蛍光ランプ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、この蛍光ランプより古く、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に変化するため、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

7 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、ベンガラや材料となる「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（金めつき）である。高さが15メートルにも及ぶ巨像の表面を金めつきするためには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ての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つっており、それを「環境に悪いから」という理由で捨ててしまつてよいの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、また、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。

8 家庭でできる水銀対策

普段はあまり気づかないが、水銀はとても身近な存在だ。そして、どの家庭でも多かれ少なかれ、水銀を使用した製品を保有しているはずである。この水銀に対する国際的な取り決めとして、「水銀に関する水俣条約」は存在する。水俣条約は、水銀及び水銀化合物の人為的排出からヒト健康と環境を保護するために、水銀の生産、使用から排出、廃棄に至るまで、言うなれば「ゆりかごから墓場まで」の管理を求めるものとなっている。その中では、市民一人ひとりも、家庭内で適切に水銀対策を進める必要がある。

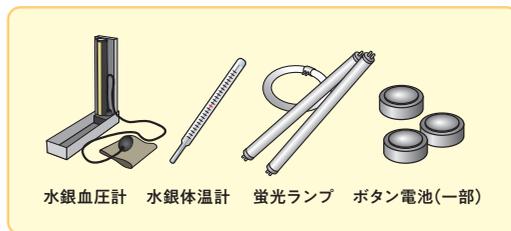
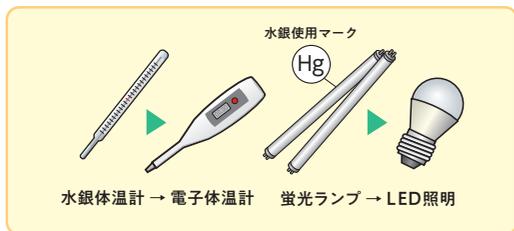
○水銀が使われた製品を知り正しく利用

水銀を使用する製品は、世の中に数多く出回っている。「こんな

ものにまで水銀が使われているのか」と、驚くばかりである。水銀対策の第一歩は、身の回りにどういった水銀使用製品があるのか、「先ずは敵を知る」ことから始まる。家庭で一般的に使われるものとして、蛍光ランプとボタン電池、加えて水銀体温計・血圧計などがある。さすがに水銀体温計や血圧計を使っている家庭は少ないだろうが、どこかに眠っているかもしれないので、一度確認することをお勧めする。なお、これらの製品は、決められた用途を守って正しく使う限り、水銀が漏れ出すことはない。

○水銀が使われていない製品への切り替えを検討

水銀使用製品と同じ目的を達成できて、しかも水銀を使用していない製品も、今では入手しやすくなってきている。寿命が来るなどして買い替える必要が出てきたときは、蛍光ランプからLEDランプへの変更のように、交換することによって電気代の節約などにつながることもあるので、水銀が使われていない製品への切り替えを検討してほしい。日本では、水銀使用製品について、「水銀を使用



していることが分かるように表示すること」と法律で義務付けられている。製品を購入する前には、水銀使用の有無を確認してみると良いだろう。

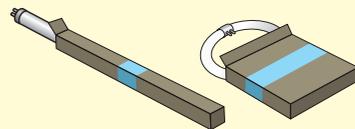
○水銀が使われている製品はルールに従って廃棄

使わなくなったり寿命が来たりした水銀使用製品を廃棄するときには、水銀が漏れ出さないように正しく廃棄、収集される必要がある。水銀は揮発しやすいので、例えば水銀を使った体温計や血圧計の場合、収集運搬中に割れてしまうと大気中に水銀が発散されるし、燃えるゴミに入れば焼却施設からガスとして排出されてしまう。水銀は化学元素であり分解して消滅することがないため、廃棄過程で水銀が漏れ出すと、それが環境中を循環してまた、我々のところに戻ってくる可能性がある。水銀使用製品の廃棄については、市区町村で定められたルールを守り、正しく処分する必要があることを理解してほしい。

○魚介類は賢く選んでそのメリットを享受

水銀使用製品以外では、魚介類に含まれる水銀について話題に上がることがある。大気中に排出された水銀は、やがて海に溶け込み、海洋生態系の中で次第に濃縮されていく。日本人の場合、水銀摂取の大部分が魚介類由来とも言われている。我々が捨てた水銀は、巡りめぐって食卓に戻ってくるのだ。ただ、魚介類は、良質なたんぱく質や健康に良いとされる不飽和脂肪酸（EPAやDHA）を豊富に含んでおり、健康的な食生活に欠かすことができない食材でもある。魚介類を遠ざけるのではなく、賢く選んで、魚食のメリットを活かしつつ水銀の影響を避けることを考えてほしい。

水銀に汚染された魚を食べるのでもない限り、魚介類の摂取に特段の制限を設ける必要性はないと考えられている。ただし、妊娠中の女性は、胎児発達への影響も考慮する必要があるため、厚生労働省が公表している『魚種に応じた摂取量についての注意事項』を参考にすると良いだろう。また、一般に大型の魚の方が水銀濃度は高いので、妊娠中は小さな魚を食べることをお勧めする。敵ばかりでなく己についてよく知ること、**「百戦危うからず」**となる。



蛍光灯や水銀体温計など破損しやすいものは、購入時のパッケージに入れるなどして出す

9 エシカルジュエリーを選ぶ意味

宝飾店のウイ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にはできないし、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「ARRM」(Alliance for Responsible Mining)とこの団体を結成し、貴金属の小規模採掘に対する支援に乗り出した。ARRM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乘せされるため、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乘せされる。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く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。

10 コンピュータ時代の夜明けを記憶する水銀

2020年、日本の新しいスーパーコンピュータ「富岳」が、ベンチマークランキングにおいて「京」以来となる世界一を獲得した。実に9年ぶりのことである。富岳は、早速新型コロナウイルスの飛沫拡散シミュレーションにおいて成果を挙げているが、新たな研究方法としての「*in silico*」（イン・シリコ）実験の進展には、目覚ましいものがある（*in silico*はラテン語で「シリコの中」のことで、転じて「コンピュータを用いて」の意味で用いられる）。

○電気を遅らせて記憶するメインメモリ

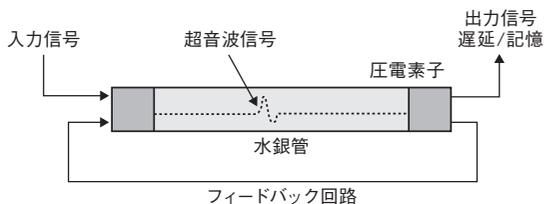
電子計算機（昔、コンピュータはこう呼ばれていた）の優劣は、プロセッサ（演算装置）とメインメモリ（主記憶装置）によるところが大きく、その処理速度がそのままコンピュータの性能とみなされることも多い。電気信号は非常に速く伝搬するものだが、時にそれを意図的に遅らせる必要性が生じることがある。初期の「電子計算機」用メモリの開発がその例であり、このと

きのメモリ開発に、遅延回路を使って電気信号を保持させる「水銀遅延線」が用いられた。

水銀遅延線は、水銀中の超音波（振動）が、電気信号より十分に「遅く」信号を伝達する性質を利用している。具体的には、水銀を入れた管の両端に圧電素子（電気信号と圧力を相互に変換する素子）を取り付け、一端に電気信号を入れて、他端から取り出すというものだ。出力信号を増幅後に再び入力信号とすることにより、内部に信号を維持し続けることができる。このような装置に使用する物質には、所要の遅延時間が得られるだけでなく、信号のひずみが少なく、反射ノイズが発生しにくいといった諸条件が必要になる。水銀の特性は、こうした超音波式の遅延線に適しており、そのため水銀遅延線は早くから実用化されていた。

○遅延回路はレーダー技術の応用

「電気信号を遅延させて循環させることにより情報を記憶させる」というアイディアの元となった遅延回路は、レーダーの移動目標指示装置として使われていたものだ。レーダーは、飛



水銀遅延線の動作原理

行機や船舶といった移動する物体を見つげるための装置であるが、電波はそうした移動体以外にも、地面や雨滴等からも反射されて戻ってくる。これらの固定反射信号は、レーダー本来の目的としてはノイズに当たる。そのため、送出した電波を一定時間保持しておき、戻ってきた電波から引き算することによって、その固定反射信号をキャンセル、ノイズをクリアしていた。

○電子計算機のメモリ開発

この時代、遅延回路を使わないメモリ開発も併せて進められていた。例えば、磁気コアメモリである。電気信号が無くなっても記憶が維持される（これを不揮発性という）素子を用いた磁気コアメモリは、小さなドーナツ状のフェライト製磁性体に磁氣的に情報を記憶させるもので、1960年代に多用された。その他、ブラウン管の表示画面に生じる静電気を利用したもので、黎明期に開発されたメモリにはユニークなものが多い。

世界初の電子計算機とされる「ENIAC」（1946年、アメリカ）は、多数の電線でスイッチ等を繋ぎ直すことで様々なプログラムを実行する構造になっており、現在のような「記憶装置（メモリ）に置かれたプログラムを実行する」方式（プログラム内蔵方式という）ではなかった。プログラム内蔵方式の設計思想に基づいて、初めて水銀遅延線によるメモリを実装したのが、1949年に運用を開始した「EDSAC」（イギリス）で、長さ約15mの水銀遅延線32

本が使われ、1本あたり10000ビットの記憶容量があった。日本では、1956年に完成した国内初の電子計算機「FUJIC」に、水銀遅延線が搭載されている。ENIACがアメリカ陸軍の砲撃の弾道計算を目的として設計されたのに対し、FUJICは、レンズの光学設計のために開発された。電子計算機でも、軍事技術がやがて民間に転用される、という側面を垣間見ることができる。

その黎明期においてコンピュータは、世界で、また日本でも、水銀遅延線がメインメモリとして使用されていた。水銀の中の記憶は数ミリ秒しか残らなかったが、その活躍はコンピュータ開発史の中で長く残るに違いない。

11 健康を数値化する ～ 血圧測定の意義

血圧を気にする人は多い。それはとても良いことだ。健康について自ら考えることで、病気の予防にもつながる。病気と、その裏返しとしての健康について、計測し定量化されるようになってきたのは、長い医療の歴史の中でもここ200年ほどの話である。血圧測定は、医療をして魔術から技術への変革を象徴する出来事であった。

○病気の診断には脈が大事

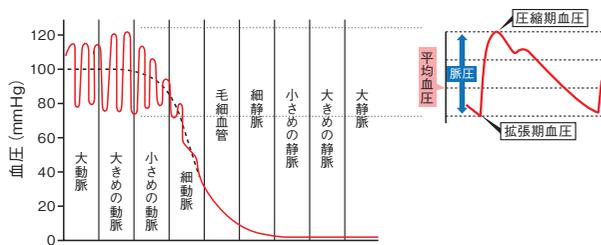
脈拍の速さや質といった「脈」の診断は、古代からヒトの健康状態を推し量るために重要とされてきた。また、脈動は血圧の変動として現れることから、19世紀以降になると、その数値化・グラフ化が進められていった。身体の部位によって異なり、また脈動している血圧は、動脈が高い値を示す。そこで、実験動物の動脈に「カテーテル」という細い管を挿入して、血圧を数的・グラフ的に計測する試みが行われ、これが生理学研究の扉を開いた。しかしこの方法は、実験動

物では実施可能だが、実践的な臨床医学には応用できない方法であった。

○いかにして動脈の血圧を測るのか

その後、腕の動脈を拍動が振れなくなるまで圧迫したときの圧力が、血圧（正確には最高血圧⇨収縮期血圧）と一致することが明らかにになり、血管を切開しなくても血圧測定が可能となった。イタリアの医師リバロッチは、腕の周囲に「カフ」と呼ばれる膨張させたゴム製の筒を巻き付けて、そこに手動のゴム球で加圧する、いわゆる「水銀血圧計」を発明（1896年）した。彼は、カフの下流の動脈を触診しながら水銀柱の圧力を下げていき、脈が感じられるようになる時の圧力を患者の血圧とした。この方法（「触診法」と呼ばれる）は、今日行われている血圧測定の原型を成すものである。

しかし、触診法では、最低血圧（⇨弛緩期血圧）を測ることができなかつた。その問題を解決したのが、ロシアの外科医



からだの各部位における血圧の変化

コロトコフである。彼は、リバロッチの方法に従いながらも、脈を触診する代わりに脈の音を聴診したところ、ある圧力範囲に限って不思議な低い音が聞こえることに気づいた。そして、その音（コロトコフ音と呼ばれている）の出始める点がリバロッチの血圧（最高血圧）と一致し、消える点が最低血圧であることを明らかにした（1905年）。これが今も全世界で使用され続けている「聴診法」である。難を言えば、このコロトコフ音は低く小さいため、ある程度の熟練がないとなかなか聞き取れないものらしい。血圧測定も意外と職人技なのだ。

○血圧測定が医学の近代化を推し進めた

血圧測定ができたとして、その結果を活用するには、「正常」と「異常」の数値を示す必要がある。それまでの医学は、記述的な言い回しを用いた定性的な説明が主であったが、血圧計をはじめとする生理学的器具が誕生して臨床用に応用されると、身体の状態を定量的に描写することが可能となった。客観的かつ数量的な指標で健康状態を表現することは、医療の透明性を高めることにもつながる。こうした新しいやり方は、医師たちが相互に情報伝達する際にも活用され、医療教育の場面でも、計測・再現できる知識が強調される形へと変わっていった。

患者、あるいは一般の人々にとっても、それまでの受け身の医療から、自ら知り、考え、行動する健康管理へと意識が変化する契機となった血圧測定。血圧計とそれにより計測された値が、

医師と患者のコミュニケーションにおいて共通語として使われるなど、血圧測定は、医学の近代化を推し進めたとも言えるだろう。

水銀血圧計は、カフとゴム球、水銀柱で構成されるところもシンプルな機器である。最近では電子血圧計に切り替えられてきている水銀血圧計だが、途上国や紛争地などの屋外診療が必要となる医療現場では、その利便性に加えて、軽量かつ電源を必要としないしくみのため、まだ活躍の場が残されている。



水銀血圧計

第 3 章

毒としての水銀

1 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。このように無くする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。

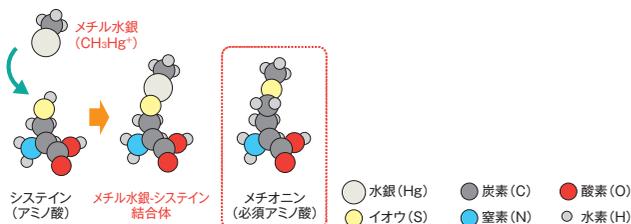
○「リスク管理」とは？

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。

○水銀が生体に影響するメカニズムとその有害性

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



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

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

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）。

○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、生体を持つ「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的な場合では、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あたっては、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。

2 ダンベリーシェイク 職業病としての水銀中毒

アメリカ・コネチカット州にあるダンベリーは、ニューヨークの北東約100 kmに位置する地方都市である。18世紀末頃から帽子の製造が始まったダンベリーは、19世紀に入ると、「帽子の町」としてその名を知られる存在になっていった。「帽子屋のように気が狂っている」(mad as a hatter)という英語の表現があるように、帽子の町ダンベリーの歴史は、そのまま水銀中毒の歴史とも重なっている。

○帽子用フェルトは水銀溶液で加工されていた

帽子の製造工程に、「キャロツティング」という毛皮を前処理するプロセスがある。「フェルト」となる動物の毛を皮革部分から剥がし、その毛を縮充させるこのキャロツティングには、硝酸第二水銀溶液が使われていた。この溶液が(ニンジンのような)オレンジ色をしていたため、このよ



うに呼ばれるようになったのである。特に毛質が硬くて短い毛皮は、水銀によるキャロツティングが欠かせなかったという。その後、金型と熱湯を用いて頭とつばが成型され、フェルトは帽子となる。

○帽子の大量生産が水銀による大量被害を生んだ

帽子作りが職人芸だった時代、職人達もこの仕事の危険性には気づいていたはずであり、十分な注意を払っていたであろうこうとは想像に難くない(どのような工芸技術にも特有の危険はあるので、それをコントロールすることも職人芸のひとつだろう)。時代が工業化を追い求めていた19世紀、帽子の需要が伸びるに従いダンベリーでも、次第に分業制の大量生産方式で製造されるようになっていった。そのため、当時の帽子工場には多くの非熟練工が雇われることになり、雇用側の安全意識が希薄だったことも相まって、労働者の水銀ばく露(危険因子にさらされること)を広げる結果を招いてしまう。こうした状況の中、工場労働者が水銀の中毒症状である「手足の震え(振戦)」を訴えたことから、「ダンベリーシェイク」(Danbury Shake)というスラングが生まれることになったのである。

ダンベリーシェイクは、日本で言えば幕末から明治時代の話であり、被害の規模や範囲について詳細な調査記録は残されていない。水俣病の原因究明とその後の患者認定において、良くも悪

くもその根拠とされてきたハンター・ラッセル症候群でさえ、1940年に発表された論文に基づいており（この論文では、1937年にイギリスのロンドン郊外の水銀農薬工場において、工場労働者4名がメチル水銀中毒になったことが報告されている）、それと比較しても、ダンベリーの水銀中毒は、工業化が招いたかなり初期の事例であると言えるだろう。

○ダンベリーシエイクの顛末

アメリカ南北戦争で、南部における産業基盤が破壊されてしまった19世紀の後半、ダンベリーの帽子産業はさらなる発展を遂げた。しかし、この発展が、皮肉にもこの産業の終焉を呼び込むことになってしまう。労働者が増えて組合の力も強まり、健康被害に対する労働争議が頻発したのだ。加えて、屋根付きの乗り物が普及するにつれて帽子をかぶる機会も減っていき、需要自体が落ち込んできたとも言われている。そして、1920年代には帽子工場もわずか数件となり、帽子製造への水銀使用が禁じられた1941年には、ダンベリーの帽子産業は、実質的に消滅していた。

ダンベリー市街をゆつくりと流れるステイル川は、本流のフーサトニック川に入り、ロングアイランド海峡へと注がれる。近年、この流域における水銀汚染の調査により、ステイル川の底質に、当時の水銀が残っていることが明らかになった。工場の跡地からも水銀汚染は見つかって

おり、環境保護当局による対応が、今も続けられている。

3 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。

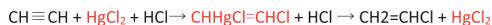
触媒は、反応の前後で変化しないとされているが、実際にはいくつもの中間体が生成され、それが反応条件によつては元に戻らないことも珍しくない（触媒が失活したとも言われる）。その中間体から毒性の高いメチル水銀が生成したことで水俣の悲劇が起きた。その後、水俣病の教訓から水銀を使用しない製造プロセスが求められ、近年は、アセチレンの代わりにエチレンを原材料とすることに、水銀触媒の使用を避けている。

○水銀触媒削減の道のり

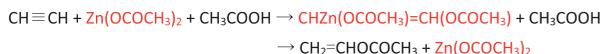
アセチレン（石炭から合成）からエチレン（石油から合成）へ原材料を変更するというのは、言うのは簡単だが、その実態は産業構造を石炭化学から石油化学に大転換するということである。日本では、1960年代まではアセチ

ビニル樹脂製造の反応系

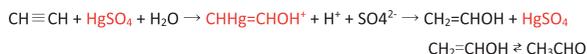
塩化ビニルモノマー（触媒：塩化第二水銀 HgCl_2 ）



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 ）



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勞しているのが、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。

4 今、あらためて『海の牙』を読む

水上勉の長編推理小説『海の牙』は、彼にとって最初の文学賞（日本探偵作家クラブ賞、1961年）受賞作品でもあり、出世作の一つである。この小説は、水俣病発生当初の水俣市を舞台とした社会派ミステリーで、金田一耕助をはじめとする名探偵が怪事件を次々と解決するような「探偵小説」ものに代わる新たなジャンルとして、当時注目を浴びた。もちろんここで、『海の牙』の文学的な評価を行うつもりはない。彼が実際に訪問、見聞した当時の水俣と、それに対する彼の感受性について着目するとしよう。

○水上勉が見た1959年の水俣

1956年4月下旬、水俣市月浦に住む少女がチッソ附属病院に入院した。当時の病院長が、その特異な神経症状を水俣保健所に報告したのが5月1日、これが後に「水俣病の公式確認」と言われる日である。3年後の1959年に水上は、水俣で現地調査を行い、同年12月発行の

『別冊文芸春秋』に、ミステリー（つまりフィクション）という形で作品「不知火海沿岸」を発表した。その後、大幅に加筆、改題し、1960年4月に『海の牙』を刊行している。それから60年以上が経過し、その間に様々なことが起こってきたが、小説の中の水俣は、1959年で時間が止まっている。この本を読むことで、我々は、その当時の水俣に身を置くことができる。

1956年に水俣病が公式に確認されて以降、様々な調査が行われ、以前からネコやカラスに異常行動があったこと、過去に類似の症例を示した患者がいたことなどが次々と明るみに出た。また、病気の原因が魚介類であると示唆されると、水俣湾で捕れた魚は売れなくなり、近郊の漁民は困窮を極めたという。

水上が訪れた1959年の水俣は、大きく揺れていた。7月に熊本大学医学部の研究班が「水俣病の原因物質は水銀化合物、特に有機水銀であろうと考えるに至った」と発表すると、水俣にはチッソの工場以外に水銀を排出するところは無いため、発表を聞いた患者や漁民がチッソに補償を迫る事態に発展した。同年10月に県漁連の総決起集会と工場への乱入騒ぎがあり、11月には国会の調査団が水俣を訪問、12月にチッソと県漁連との補償調停と、社会問題としての水俣病が連日報道をにぎわしていた。



○小説のモチーフに使われた水俣病

水俣病の原因企業である「チツソ」（小説では東洋化成）についても、水上は、小説の中で詳細に記述している。今でもチツソが肥料工場だったと誤解する人は多いが、そのことについて彼は、「硫安、塩化ビニル、酢酸、可塑剤などが生産の中心になっていた。そのうち塩化ビニルが主力だと言われた」と、正確に描写している。水俣病は、アセトアルデヒド工程からの排水が原因である。しかし、当時は、塩化ビニル工程が疑われていたため、その原因究明が遅れたという実際の顛末にもつながる話だ。塩化ビニル工程で使われる水銀触媒は、工程内でメチル化されないのだ。また、塩化ビニルを製造する工場は他にいくつもあるのに、水俣でだけ病気が発生することに説明がつかない。

他方、アセトアルデヒドは塩化ビニルの可塑剤の原料であり、この可塑剤の製品化においてチツソは、当時の国内市場をほぼ独占していた。そして、他の企業がアセトアルデヒド製造工程の稼働率を下げた時期にも、チツソは増産を続けていた。水上は、可塑剤におけるチツソ（東洋化成）の独占状態に着目、これをライバル企業による陰謀の動機として、作品をミステリー仕立てに作り上げたのである。

水上の小説には、水俣病の描写と並んで、地元の地名が数多く登場する。これは、彼が実際に現地を訪れて土地勘を得た上で、それを小説の舞台として利用したためであろう。星の浦（月浦）、滝堂（湯堂）、百巻（百間）、湯王寺（湯の鬼）、津奈見（津奈木）など、それと分かるような名称の読み替え（括弧内が実際の地名）を行っているが、その位置関係はかなり正確である。水俣市を「水潟市」としているのは、第二水俣病が発生した新潟から一文字もらい受けていると思いがちだが、これは違う。新潟水俣病が明らかになったのは1965年であるから、まさに偶然であろう。しかし、何とも言えない感銘を受ける。

○情報の断片から真実を見出す努力

こうした中で水上は、1968年に水俣病の原因に関する政府の統一見解が出されるはるか前に、原因が工場の排出した水銀にあると確信している。それは、結果的に正しかったものの、騒動の渦中、部外者として中立的な態度ではなかったかもしれない。しかし、漁業組合内の問題点を指摘したり、会社側の対応を評価したりするところもあり、どちらかに肩入れするものではなかった。情報の断片から真実を見出そうとする姿勢が、この小説を通して貫かれている。

5 イラクで起きた水銀中毒

1971～1972年のイラクで、大規模なメチル水銀中毒が発生した。水銀系農薬（防カビ剤）で処理された種用小麦を食用（パン）に用いたことによるもので、水銀中毒は、種用を供給されたイラク全土の農村に広がっていた。イラク政府の要請を受けた世界保健機関（WHO）は、患者の診断・治療や回復に向けた支援に、疫学調査や比較研究などを加えた包括的なプログラムを実施した。その最初の成果が、1974年にバグダッドで開催された「アルキル水銀で処理された種子による中毒に関する国際会議」で報告されている。

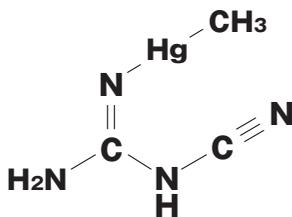
○イラクで水銀中毒が発生した経緯

有機水銀系防カビ剤は、20世紀初頭に開発・製造が始められた。有機水銀系（フェニル水銀系、メトキシ水銀系、アルキル水銀系などいくつか種類がある）が、総じて無機水銀系より毒性が弱かったからである。しかし、毒性が全く無いわけではない。1940年代以降、防カビ剤

メチル水銀ジシアンジアミド（イラスト参照）が使われると、これが集団メチル水銀中毒を引き起こすことになった。

水銀系農薬で処理された種用小麦と大麦は、1971年の9月～12月にイラク国内で配布された。最初の水銀中毒患者が入院したのが1971年12月21日であったというから、短期間のうちに症状が発現したと分かる。水銀のばく露（危険因子にさらされること）については、いくつかのルートが検討されたが（大麦を家畜の飼料とし、その肉を摂食した、畑に蒔いた種糊によって地下水や魚が汚染されたなど）、最終的に汚染された小麦を「パン」として摂食したことが主原因と判断された。

イラクでは、1955年と1960年にも、水銀剤で処理された小麦を摂食したことによる大規模集団中毒が発生している。そのため、防カビ処理された種糊は着色され、袋には警告サインとドクロマークが記されていたが、警告がアラビア語で書かれておらず、多くの農民は理解することができなかった。また、パンを焼くことで無毒化できるとの誤解もあったため、同様の事故が繰り返されたと言われている。



メチル水銀ジシアンジアミド

水銀と窒素の結合が切れることによりメチル水銀基が生成される

○WHOが包括的な支援プログラムを実施

イラクでのメチル水銀中毒だが、その全体像はよく分かっていない。1972年3月までに6148人が入院し、452人が院内で死亡したとされるが、病院がすぐに満床となってしまったため、重症患者でも帰宅したケースがあったという。加えて、診断すら受けなかった人も相当数いたと考えられており、前述の数字は過小評価なのであろう。ただ、イラクの事例では、多分野の研究者によって多方面からの研究調査が実施されており、新たな知見も多く得られている。日本では、メチル水銀中毒は治癒しないとされていた。もちろんイラクでも、重症患者は死亡してしまふケースが多かったが、助かった場合は症状が大きく改善し、症状の軽い患者では全快することもあったと記録されている。他方、胎児性患者については、ばく露期間が短かったため出産事例はあまり多くないが、日本の症例と類似の傾向が見られていた。他にも、臨床診断法（潜伏期間等）、治療法（解毒剤等）、メチル水銀の毒性値、野生生物への水銀汚染実態等の各種研究成果が、国際会議の場で報告されている。

イラクにおけるメチル水銀中毒の事例は、その規模において水俣や新潟に匹敵、あるいは凌駕するものであった。水俣の事例と異なるのは、国際社会（とりわけWHO）が、その最初から包括的な支援プログラムを実施したことによって、多くの患者の治療回復が図れたこと、そして、貴重な科学的知見が得られたことである。その知見は、3年後のバグダッドでの国際会議で広く周知されており、これ以降世界で大規模なメチル水銀中毒は発生していない。現在でも、国際的な水銀規制や基準の設定に当たって参照されるのは、水俣の事例ではなく、この時に集められたイラクの知見なのである。

○科学的なアプローチが真実を追求する

「水俣の悲劇を二度と繰り返してはいけない」とのスローガンはあるが、実はその後も新潟、イラクと残念ながら悲劇は繰り返されていた。新型コロナウイルスの騒動にも通じる話だが、真実を追求する科学的なアプローチを取ることは、人類の健康と繁栄に向けた正しい道であると、あらためて考えさせられる。

6 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。セイシエル共和国は、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、水銀ばく露をめぐって大バトルを繰り広げていたことをご存じであろうか。

○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、セイシエル共和国を調査地に選定し、「セイシエル小児発達研究」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。

フェロー諸島では、1986〜87年の間に出生した子供と母親、計1023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、セイシエル共和国では、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



フェロー諸島とセイシエルの位置

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エ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際には、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に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。紆余曲折があったものの、雨降って地固まる、ということになるのか。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エルにおける調査は、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。

7 毛髪の中の水銀

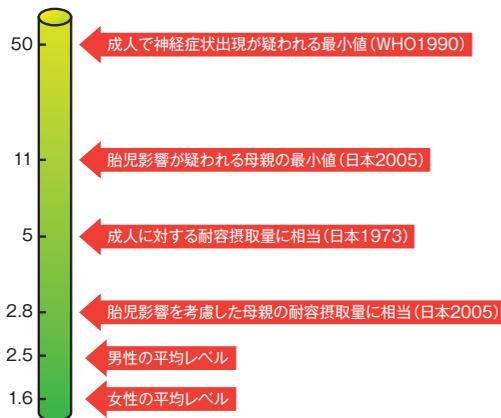
水銀のばく露（危険因子にさらされること）を測る上で、毛髪はとても有用な媒体である。水銀、特にメチル水銀は、1価のカチオン（陽イオン）で、多くのアニオン（陰イオン）と化合物を作るが、そのアニオンの一つにチオール基（ $-SH$ ）を持つアミノ酸のシステインがあり、チオール基の水素を置換する形で結合体となる。その結合体が構造的類似性のため、別のアミノ酸であるメチオニンと誤認され、たんぱく質として合成されてしまう。毛髪はケラチンと呼ばれるたんぱく質でできているため、メチル水銀がたんぱく質として毛髪に組み入れられることになる、それゆえ毛髪を調べることで、体内の水銀量を推し量ることができるのである。

なお、メチル水銀は生物濃縮されやすいため、疎水性で脂質に蓄積すると考えられがちだが、それは正しくない。メチル水銀は、体内で無機化され尿中に排泄されるし、脂肪細胞よりは筋肉細胞により多く分布していることから、たんぱく質との親和性が高い物質である。

○毛髪でわかる水銀ばく露

食事などで摂取されたメチル水銀は、大部分が吸収されて血流に入る。血液はヒトのメチル水銀ばく露を最も直接的に表す指標であるが、その濃度は毎日の食事により変動し、血中水銀濃度からは直近の水銀ばく露しか分からない。毛髪は1か月に1cm程度伸び、一度生成されたたんぱく質の構成が変化することはない。毛髪の水銀濃度は、その毛髪が生成された時の血中水銀濃度に比例すると考えられるため、毛髪には時系列的な水銀ばく露履歴が記録されていることになる。髪が長い女性の場合、4〜5年程度まで遡り、水銀ばく露の履歴を知ることができる。

毛髪による水銀分析の最大のメリットは、水



毛髪水銀レベルの参照値 (mg/kg)

銀濃度の高さである。毛髪の水銀濃度は、それが生成された時点の血中水銀濃度の約250～300倍になると言われており、そのため、比較的簡単な手順で濃度分析が可能だ。日本では、成人の水銀耐用摂取量に対応する毛髪水銀濃度として5mg/kg、胎児への影響を考慮した場合の母親つまり妊婦に対しては2.8mg/kgの数値が示されている。日本人は魚介類を多く摂取するため、世界的に見ても体内水銀濃度が高いと言われているが、平均レベルとしてこの値以下であれば、水銀ばく露を心配する必要はないと言える（イラスト参照）。

○媒体としての毛髪 ～その利便性と留意点

生体試料の採取においても、毛髪は血液や尿に比べて取り扱いが容易である。採血は、専門の医療従事者が行わなければならないのに対し、毛髪の採取は、簡単な訓練で誰でも行うことができる。採尿は、それ自体難しいものではないが、試料の保存や運搬に冷蔵などの配慮が必要となる。毛髪は封筒などに入れて郵送しても全く問題なく、採取量も、水銀分析には10～20本程度で十分であり、採取部分が禿げ上がってしまうわけではない。

確かに毛髪は水銀ばく露の良い媒体であるが、気をつけなければならないこともある。例えば職業的に常時水銀蒸気（金属水銀）にばく露しているような場合では、直接毛髪の表面に水銀が付着してしまい、測定値が「水銀耐用摂取量に対応する毛髪水銀濃度」の評価に当てはまらなくなってしまう。あくまで毛髪は、メチル水銀評価のための媒体であり、金属水銀の付着はその評価の妨害物質と考えるべきであろう。また、毛髪中に組み入れられた水銀は、一般に安定しているが、パーマをかけるなど髪に熱や薬品をかけることで脱落すると言われており、これも過小評価につながる可能性があるため注意が必要である。

○毛髪が水銀ばく露から守ってくれる？

毛髪に水銀が集まることのもう一つのメリットは、水銀の「固定」と「排泄」である。毛髪に入った水銀は体内に戻らず、散髪することで排除することができる。毛髪や動物の体毛は環境中でも分解されにくく、水銀の再放出を妨げていると考えられる。体毛は食用に適さず、また、食べでも消化されずに残され、水銀の生物濃縮につながるため、結果的にヒトや生物を水銀ばく露から守っていることになる。このような効用があるうとは、当の毛髪も毛ほども思っていないかっただろう。

8 忌まわしい梅毒と水銀療法

梅毒は、忌まわしい病気だ。「スピロヘータ」と呼ばれるらせん状の病原体（梅毒トレポネーマ）による感染症で、ヨーロッパでは1495年に初めて確認されている。大航海時代のヨーロッパ人（スペイン人）が、アメリカ大陸から持ち込むとともに世界中に運んでしまったことで、梅毒は、16世紀初頭にパンデミックを引き起こした。日本では、1512年に初めて記録に表れ、社会のあらゆる階層を巻き込んで広まったと言われている。飛行機も鉄道も無い時代に、20年足らずで西半球から東半球の、端から端まで到達したその猛威は、新型コロナウイルスにも匹敵すると言えるだろう。戦国の荒れた時代、武将達は、敵と同時に梅毒とも戦わなければならなかったのだ。

梅毒は、現在では命を落とすような病気ではない。末期症状になるまで未治療の場合は悲惨な死に至るものの、それまでに10年以上かかるので、通常は初期段階にペニシリンを投与することで治療される。ただ、感染して抗体ができて免疫は得られず、再感染するため、ワクチンが存在しない。また、病原体がヒトのみを宿主とするため、ヒト→ヒトが唯一の感染経路となる梅

毒であるが、一般的な性交渉によるものだけでなく母子感染の場合もあり、この場合、胎児に重篤な先天障害を引き起こすため、非常に怖い病気でもある。

○梅毒には様々な治療法が試みられた

現在も梅毒に対する特效薬である「ペニシリン」は、イギリスの細菌学者フレミングがアオカビから発見したものだ。このペニシリンが発見されるまで、有効な治療法が存在しなかった梅毒に、多少なりとも効果があったのが水銀である。水銀療法は、梅毒の治療法として最も広く、そして長く用いられていた。水銀軟膏の塗擦、水銀蒸気の吸入、水銀錠の内服などあらゆる施術が試みられていたが、そのどれもが、水銀剤によって患者の垂涎を促し、病毒を流し去るものと考えられていた。副作用が強いことは理解されていたものの、根治しなければ再発につながるため、患者の「体



梅毒の治療を描いた絵

力」に任せた非常に危険な治療法であった。この水銀剤として使用されたのは、昇汞（しょうこう）…塩化第二水銀、汞は中国語で水銀のこと、赤降汞（せきこう）…酸化水銀、甘汞（かんこう）…塩化第一水銀）、金属水銀（蒸気吸入用）等、主に無機水銀の製剤であるが、これらは全て、日本の薬機法で「毒薬・劇薬」に指定されるものだ。

日本では当初、梅毒に対して温泉療法や漢方などの治療が行われていた。しかし、その効果は、到底期待できるものではなく、遅くとも18世紀には、水銀療法が伝わったと言われている。治療薬の一つである甘汞については、すでに平安時代から化粧品（白粉）として製造されていたので、国内で調達できたであろう。昇汞水を用いた治療法については、1775年に来日したスウェーデンの医師によって紹介されたと、自身の日本紀行に書かれている。

病原体である「梅毒トレポネーマ」は、人工培養ができない（野口英世が培養したとされているが、現在でも追試が成功していない）。そのため、治療薬の開発は困難を極めた。1905年以降、ヒ素系の治療薬が開発され、中でも「サルバルサン」は、他のスピロヘータ類の感染症に効果が見られたが、毒性も強く、現在では医療用には使われていない。ペニシリンが梅毒治療に有効であることが証明されるのは1943年のことであり、長い梅毒の歴史から見ると、ごく最近のことだと言えよう。

○過去には非倫理的な人体実験も行われていた

このような治療法開発の陰で、近年まで非倫理的な人体実験が密かに行われていた。アメリカ・アラバマ州のタスキギーで、黒人梅毒患者を対象に、「梅毒を治療しなかった場合にどのような症状が進行するか」を経過観察するという酷い実験だ。タスキギーの梅毒実験は1932年に開始され、1972年まで続けられた。その間、1943年にペニシリンの効果が証明されても、患者たちには隠蔽するなどの情報操作も行われていたという。この実験については、1997年にクリントン大統領（当時）から公式の謝罪がなされている。

ペニシリンによって駆逐されたと思われた梅毒だが、2010年以降、世界的に再び流行の兆しが見られている。日本でも過去10年の患者数が10倍近く増加しており、決して他人事ではない。梅毒という病気の忌まわしき、その根は相当深いようである。

9 毒劇法が除外する水銀化合物

「毒物及び劇物取締法」（毒劇法）は、保健衛生上の見地から毒物や劇物を取り締まる法律で、1950年に公布された。その対象物質は、累次の改正を経て増えており、現在、毒物は130品目余り、劇物は400品目余りが指定されている。

この毒劇法では、一部の例外を除き、水銀及び水銀化合物が、「毒物」あるいは「劇物」とされている。法律が明示的に除外しているのは、「アミノ塩化第二水銀」（白降汞…はくごうこう、汞は中国語で水銀のこと）、「オレイン酸水銀」、「ヨウ化第一水銀」（黄色ヨード汞…おうしょくよどこう）、「雷酸第二水銀」（雷汞…らいごう）、「硫化第二水銀」（朱）の5物質である。これらの水銀化合物は、毒物・劇物のいずれの指定も受けない一般物に分類されている。裏を返せば、それ以外の水銀化合物は全て何れかに分類されているということであり、水銀が危険な物質であることに違いはない。

○水銀化合物は毒劇法以外でも規定されている

毒劇法上の毒物・劇物は、医薬品及び医薬部外品を含まないことになっている。そのため、「医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律」（薬機法）でも「毒薬・劇薬」が規定されるのだが、毒劇法上の毒物・劇物とは異なる観点で分類されている。薬機法の毒薬・劇薬というのは、使用が禁止されるものではなく、取り扱いに厳格性が求められるもので、実際、医療現場では多種多様の毒薬・劇薬が用いられている（例えばモルヒネは毒薬で麻薬だが、鎮痛剤として処方される）。

薬機法では、アミノ塩化第二水銀（白降汞）・オレイン酸水銀・ヨウ化第一水銀（黄色ヨード汞）の3品目が、「劇薬」（ただし膏は除く）に規定されている。これらは、毒劇法で例外とされているものだが、薬機法ではしっかりと規制されている。水虫や梅毒治療用の軟膏として使用されていた3品目であるが、白降汞については、長期間反復使用することによってアレルギー性皮膚炎を引き起こす恐れがあるため、1969年に厚生省から通知が出され、市販薬の販売中止が要請されている。オレイン酸水銀と黄色ヨード汞に対しては、そのような通知こそ出されていないもの、日本での使用は実質的に無くなっている。また、ダイナマイトや銃弾等の起爆用雷管に使用される雷酸第二水銀（雷汞）は、別途「火薬類取締法」によって取り扱いの規制を受け

る。毒劇法に指定されなかったからと言って、ノーコントロールになるわけではないのだ。

○硫化第二水銀は水俣条約に基づき適切に管理

さて、ここに「つだけ残されたのが硫化第二水銀（朱、丹、辰砂、銀朱等、様々な呼び方がある）である。硫化第二水銀は、印肉や漆器などの赤色顔料として、現在も用いられている。魏志倭人伝に、「以朱丹塗其身體如中國用粉也」（中国で白粉を用いるように、朱丹を身体に塗っている）」と書かれているように、日本人と硫化第二水銀の付き合いは長く、文化財にも朱で塗られた／描かれたものが数多く残されている。硫化第二水銀は、水に不溶で揮発性も低く、そのため、環境中に放出される可能性も非常に低い。水銀として、最も取り扱いしやすい化学形態なのである。

水銀に関する水俣条約の国内担保法に当たる「水銀汚染防止法」は、硫化第二水銀について、「環境上適切な貯

蔵を行うこと」と規定している。水銀の使用は世界的に減少していくため、将来的には廃棄の対象と想定されるが、その際に水銀を、この硫化第二水銀として廃棄していくこうとするのが世界的な趨勢である。「安定化」と呼ばれるその方法は、水銀と硫黄を当量（元素数として同じ量）で混合、エネルギーを加えて反応させるもので、反応系としては至って単純である（ $Hg + S \rightarrow HgS$ ）。ただ、反応後の硫化第二水銀は、化学形態として安定しているものの粉末状で飛散しやすいため、日本では、樹脂で固形化したのち最終処分されることになっている。

硫化第二水銀は、毒物・劇物のいずれにも該当しない。もちろんそのことは100パーセント無害安全ということではないが、少なくとも毒劇法に指定されている130品目余りの毒物、400品目余りの劇物と同レベルの管理方法が求められることはない。硫化第二水銀による廃棄が、水銀管理の出口戦略として有効に機能するように望むものである。



安定化された水銀
結晶系が異なるため色が黒くなってしまうが、化学組成は朱と同じHgSである。



硫化第二水銀を用いた練り朱肉

10 クジラが考えた水銀対策とは？

海洋は、グローバルな水銀循環における最大のシンク（吸収源や消滅場所のこと）である。火山や人間活動によって環境中に放出された水銀の多くは、最終的に海底堆積物として地層の中に取り込まれるのだが、海洋には様々な物理化学現象や多様な生態系があり、そのしくみや過程は複雑だ。その中において海洋生物は、水銀を体内に取り込み、物質循環を促進する存在と考えられている。そのため、陸上生物に比べて水銀濃度が高いと言われており、その傾向は生態系の上位に位置する大型の魚類や海棲哺乳類に顕著である。

○体内に高濃度の水銀を蓄積するハクジラ

海水中に含まれる水銀は大部分が無機水銀であり、それらは腸管からの吸収率が低い（5%以下）。対してメチル水銀は、ほとんど全て（95%以上）が吸収されるため、海洋生物の体内で選択的に濃縮されることになる。海洋生態系の頂点に位置する鯨類、中でもハクジラにおいて、こ

のメチル水銀の摂取が多いことが分かっている（ヒゲクジラが主にオキアミなどを食べるのに対して、ハクジラはより栄養段階の高い魚介類を食べるため）。

○セレンが水銀を解毒・固定化する

メチル水銀の毒性は、中枢神経系に損傷を及ぼすことであるが、これまで野生の海棲哺乳類において、そうした障害例は報告されていない（水俣でネコやカラスの事例はある）。一方で、ある調査結果は、水銀を高濃度に蓄積している個体はセレン濃度も高く、これにより何らかの解毒過程が働いていることを示唆している。ちなみに、そのような個体では、肝臓にモル比1:1（原子の数が同数）の割合でセレンと水銀が蓄積されており、そのほとんどが無機水銀であったという。

しかし、無機水銀にも毒性（腎機能障害）があるので、メチル水銀が無機化されていても安心はできない。イルカなどの小型のハクジラ類には、メチル水銀を無機化して、



スジイルカ
（小型のハクジラ的一种）

写真:PIXTA

さらに「セレン化水銀」(HgSe)の形で固定する、代謝機構が備わっていると示唆されている。セレンは元素の周期表で硫黄と同族であるため、その性質は、硫化水銀(HgS)と類似する部分があると考えられる。「タイマナイト」という鉱石として天然にも存在するセレン化水銀は、不溶性なため肝臓に安全に蓄積できるが、一度蓄積されると体外に排泄されないらしい。

○ヒトの必須元素で毒性もあるセレン

セレンはヒトの必須元素である。そのため、水銀中毒患者にセレンを投与すれば中和されると考えてしまいがちだが、話はそう簡単ではない。無機水銀と異なり、メチル水銀の毒性に対するセレンの抑制効果は、まだ十分に解明されておらず、ヒトの脳内においてセレンがメチル水銀の毒性を抑えているという報告もされていない。他方、「セレノメチオニン」(必須アミノ酸であるメチオニンの硫黄をセレンで置換したもの)が、水銀による神経細胞の変性(胎児性水俣病の発現機構)を防御するとして、ヒトを含めた哺乳類でその効果が示唆されており、セレンが予防的な意味を持つ可能性は否定できない。ただし、セレンには、過剰摂取による毒性もあるため、やみくもに投与すれば良いというものでもない。また、野生生物が水銀の摂取量に応じて体内にセレンを蓄積しているということは、日常の食生活において水銀濃度の高い食品を摂る際に、同時にセレンが摂取できているということにもなる。

水銀を鉱物にして体内で無害化するという大胆な水銀対策は、ハクジラに限った解毒機構ではないようだ。ハクジラ以外でも、魚介類の摂取が多い海鳥やアシカの仲間の肝臓中にも、セレン化水銀の顆粒が観察されている。水銀は生命の誕生以前から環境中に存在しており、進化の過程において、ある種の生物がその毒性を抑制する機能を発達させていったと考えられる。ヒトが必ずしも進化の頂点にいるわけではないという一例と言えよう。

11 環境はいくらか？ ～水俣の場合

1992年の「国連環境開発会議」（通称地球サミット）において、「環境と開発に関するリオ宣言」が採択されたことは、ご存じの方も多いだろう。リオ宣言は、持続可能な開発を進めるための27の原則から成っており、その多くは、現在も環境政策を進める上での主要な指針となっている。その中の第15原則に、「科学的な知見が確立される前であっても環境悪化を防ぐための行動をためらってはならない」という、予防的なアプローチが示されている。水俣病は、その初期において、こうした「予防的アプローチ」が採られなかったために被害が拡大した事例の一つと言えよう。

○後手後手に回った初期対応

水俣病は、化学工場から排出されたメチル水銀化合物を、魚介類が直接、あるいは食物連鎖を通じて体内に蓄積し、これを日常的に多量に摂食することによって起こった中毒性の中樞神経疾

患である。1956年に、原因不明の疾患として水俣保健所に届け出されたことをもって「水俣病の公式確認」としているが、病気はそれ以前から水俣の海と人々を蝕んでいた。

水俣病は、感覚障害、運動失調（筋肉が協調して円滑な動作をできないこと）、求心性視野狭窄（視野の周辺部が見えにくくなること）、聴力障害等が主な症候とされるが、それら以外にもばく露量に応じて様々な症状を引き起こす。出生前にメチル水銀ばく露を受けることで発症する「胎児性水俣病」などでは、臨床的に「脳性小児まひ」と類似し、その症状は非特異的（他の要因でも起こりうること）である。そのため、診断した医師もすぐには原因を特定することができず、当初は感染症も疑われていたという。

また、有機水銀化合物による中毒という評価が固まりつつあった1959年以降も、それが「工場から排出されたものかどうか不明でない」ということで、排水が止められることはなかった。同じ製造プロセスを用いた他の工場周辺で同様の病気が発生していないこと、触媒として使われる無機水銀が有機化するメカニズムが不明なことなどが、結果的に工場側を擁護することになったわけである。チツソが最終的に原因プロセスを停止したのは1968年のことで、その後も9年間疑わしいまま操業を続けていたことになる。

○対策を怠った損害は莫大

経済活動を優先して環境汚染を軽視する姿勢は、健康被害を拡大させるばかりでなく、その後の環境修復などに係る費用を莫大なものにする。そのことを裏付けるものとして、3つの視点から水俣病の被害額を試算する研究が、1991年に行われている。取り上げた視点は「患者」「環境」「漁業」それぞれの補償である。水俣病のケースでは、まず認定患者に対して、補償協定に基づく慰謝料（一時金）、医療費、年金等が支払われ、環境に対しては、水俣湾に堆積する水銀に汚染された底質約150万㎡を浚渫して埋め立て封じ込める工事が行われている。そして、壊滅的被害を受けた沿岸漁業に対して、漁業補償協定に基づいた操業の禁止とともに漁民に対する金銭的な補償が実施された。これらの合計額を、仮に工場において水銀排出防止策を講じた場合にかかったであろう費用と比較すると、そこには100倍以上の開きがあったという。つまり、予防的なアプローチを取っていたとすれば、損害にかかる費用が100分の1で済んだということになる。

水俣湾周辺地域の水俣病での損害額と汚染防止対策費用の比較
(1991年の試算)；年額

対策費用(チッソにおける公害防止投資額の1年あたりの平均額)	1億2300万円
被害額(以下の合計)	126億3100万円
健康被害(補償協定に基づき、患者に支払われた補償給付額等の1年あたりの額)	76億7100万円
環境汚染被害(水俣湾浚渫事業の平均的な1年あたりの支出額)	42億7100万円
漁業被害(漁業補償を元利均等補償した場合の1年あたりの償還額)	6億8900万円

○予防的アプローチは科学の軽視なのか？

科学の重要性は言うまでもなく、それを軽視する姿勢は厳しく糾弾されなければならない。一方で科学的な解明には、地道な調査・研究が必要であり、時間がかかることも多い。そのため、「科学的な知見の確立前に対策を講じる」という予防的アプローチは、必然的に政治的な対応とならざるを得ない。環境問題を金銭の単位で捉えようとする「環境経済学」は、出てきた数字の信頼性などが十分に検証されているとは言いが、環境という曖昧模糊とした概念を金額として可視化するツールとしては有効なのではないだろうか。予防的政策の立案に当たっては、「自然科学的な難問に社会科学的にアプローチする」という手法も活用してもらいたい。

第4章

科学の発展への貢献

1 水銀がつくる標準・基準の数々

国際的な標準や基準となる物理量を定義するため、人類は様々な物質や現象を用いてきた。例えば、長さの基準一つ取っても、地球の子午線長から定められていたものが、「メートル原器」が使われるようになり、その後クリプトンの光の波長、さらに光速を用いての定義と移り変わっている。もちろん、その度に、定義の精度が格段に向上していったのは言うまでもない。水銀もまた、これまで様々な形で標準・基準の策定に貢献してきた歴史がある。

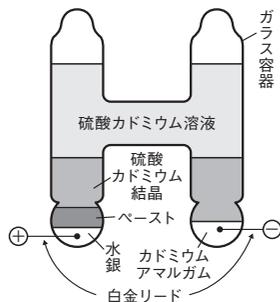
○水銀が電気の標準・基準だった!?

「電気抵抗」の単位である「 Ω 」（オーム）の国際的定義に水銀を用いたのが、標準としての水銀の、最も古い使用事例であろう。抵抗を定義するに当たっては、断面積と長さを指定した人工の導体による方式がいくつも見出され提案されていた。その導体の素材として、常温で液体であり、断面積の調整が容易であるという特長を持つ、水銀が採用されたのである。最初に水銀を

使った方式を提案したのがドイツの電気工学者ジーメンスで、「ジーメンス水銀単位」（断面積1mm、長さ100cm、温度0℃の純粋な水銀柱の抵抗）と呼ばれた（1860年）。その後、ジーメンス水銀単位を改良して、「国際オーム」（長さ106.3cm、質量14.4521g、温度0℃の水銀柱の抵抗）が定義される。やがて、この方法ではガラス管の断面積の精度に問題が生じるとして、ボルトとアンペアから組み立てる方式へと変更されたが、1908年〜1948年の間、電気抵抗の定義として用いられた。

また、定義としてではないが、「起電力」の測定器を校正する際の基準となる装置に、国際標準として、水銀を用いた「ウェストン電池」が採用されていた。電池の負極側（アノード）にカドミウムアマルガム（水銀とカドミウムの合金）、正極側（カソード）に金属水銀及び硫酸第一水銀のペーストが使われるウェストン電池は、電流が流れるとアノードからカドミウムイオンが溶出するとともに、水銀イオンがカソードの金属水銀に還元されるしくみを持つ。ウェストン電池は、起電力が長期に安定しており（20℃で1.01866V）、1908年に国際的に採択された「温度による補正式」を用いることで、起電力を正確に測定することができた。

さらに、「電位」においても、水銀は活躍する。電位とは、ある基準点から考えた時の電圧の



ウェストン電池

ことであるが、実際に電位を測定または制御する際、その基準点を与える電極を「基準電極」と呼んでいる。基準電極にはいくつかの種類があり、最も基本となるのが「標準水素電極」と言われるもので、この電極の電位を0（ゼロ）Vと定めている。しかし、水素電極は、必ずしも使いやすい電極とは言えず、実用上は構造が単純な「カロメルII甘汞（かんこうII塩化第一水銀、汞は中国語で水銀のこと）電極」（+0.244V）が広く用いられていた。近年は銀-塩化銀電極など、水銀を使わない他の基準電極に代替される場合が多いが、電気学の標準・基準の定義において、水銀が役立つてきたことは間違いない。

○電気だけではない水銀標準・基準

トリチエリの大気圧実験にも使われたように、水銀は「圧力」とも相性が良い。そのため、電気関係だけでなく圧力の世界においても、水銀を標準として用いるケースが見られる。「計量」のための機器校正も、その一つだ。量的な値は、様々な取引の基本となるため、精度良く測定することが大変重要である。日本では、「計量法」に基づき、「トレーサビリティ制度」（信頼できる校正を行っていることが確認できるしくみ）を運用することで対応しており、計量法では、国が「特定標準器」を定めて、これを機器校正の総元締めにしている。圧力の特定標準器の一つに「光波干渉式標準気圧計」というものがあり、現在茨城県つくば市の「産業技術総合研

究所」に設置されているこの装置は、U字管内の水銀柱の高度差を、レーザー光の干渉を使って正確に測定するようになっていた。これにより、圧力に係る校正を揺るぎないものとしている。さて、こうした標準の運用には、温度補正が不可欠である。そのため、「温度」自体の基準も必要となる。1990年に定められた「国際温度目盛」（ITS-90）は、純粋な物質が持つ物性（物理化学的な性質）を用いることにより、温度の基準点と目盛り幅を定めている。ITS-90では、基準となる定点として、低温側では主に物質の三重点（物質の気相、液相、固相が共存して平衡状態となる温度・圧力状態）が、高温側では金属の凝固点（それぞれ用いられている）。この定点は現在17種類あるが、水銀の三重点（234.3156K）は、水の三重点（273.16K）とアルゴンの三重点（83.8058K）とのギャップにおける精度向上を目的として、1990年、新たに追加されたものだ。

これらの標準は、すでに廃止されているものもあれば、現在も使用されているものもある。とりわけ国際温度目盛の定点は、定期的に見直されており、折しも水俣条約の発効を踏まえて、水銀の三重点の代替となる新たな温度定点の開発が始まったところである。採用されてしまった水銀標準に対して、人類がどのような手を打っていくのか。技術史的な視点からも、その行く末は大変興味深い。

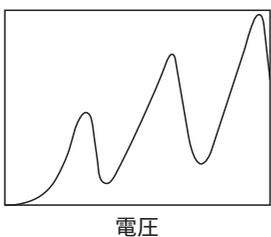
2 水銀が科学の発展の礎となる場合

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場合は、水銀原子に跳ね返されてしまったため（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、4.2 K（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_{1-2x}1223と呼ばれる物質は、134 K（約-140℃）での超伝導転移が確認されている。

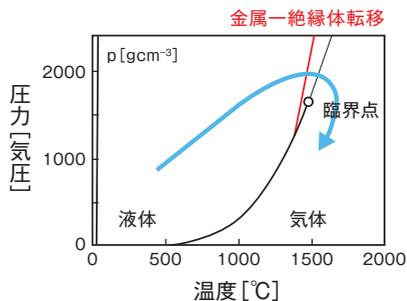
○科学者達の探求に水銀という道標

極低温とは反対に、高温高圧での物理現象にも、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できる限界がある。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。

この謎を解明するための実験が、兵庫県にある「Spring8」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変化させる。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、金属の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

3 赤外線望遠鏡が捉える宇宙

物質に光を照射することによって、内部に起電力が発生する現象を、「光起電力効果」と呼ぶ。この名前自体は聞き慣れないかもしれないが、その現象を応用した太陽電池は、誰もが知っている存在だろう。光エネルギーを電気エネルギーに変換できるということは、電源装置としてだけでなく、DVDの読み取りを行う装置や、カメラの露出を調整するセンサーとしても利用が可能だ。また、便宜的に光と言っているが、可視光線だけでなく赤外線などの電磁波全般にもこの原理は適用されるため、光起電力効果の応用範囲はとても広い。

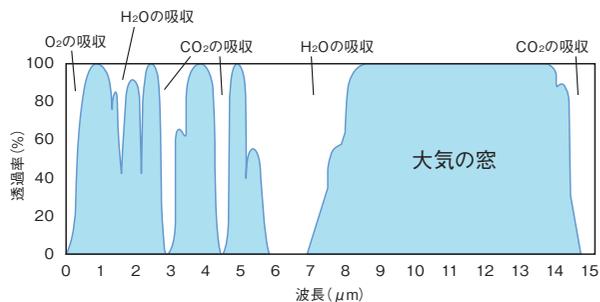
○赤外線で見ることの意義

赤外線望遠鏡は、観測天文学の花形だ。天文台にある大きなドームが天空の一点に狙いを定め、宇宙から到達する赤外線を捉える。その天体観測用カメラにも、光起電力を利用したセンサーが使われている。そのセンサーの一つが、テルル化水銀カドミウム (HgCdTe・MCT)

半導体素子だ。この「MCT半導体」は、水銀とカドミウムの成分比を変えることでその素子の特性（感度）を変えられるため、目的に応じた波長に合わせてセンサーを作ることを可能としている。

なぜ、そのような波長の調整が重要なのか。それは、地上に届く赤外線が、大気中で一部失われてしまうからである。地球が放射する赤外線を吸収し、温暖化を引き起こす原因ともなっている大気中の気体分子、特に水蒸気と二酸化炭素は、宇宙から届く赤外線にも同様にはたらく。そのため、大気圏を通過した赤外線は、特定の波長が吸収された櫛状になり、吸収されなかった部分が「大気の窓」となって地上に到達する。この窓から宇宙を覗き見るのが赤外線望遠鏡なのである。（これに対し、この吸収を避けるために宇宙空間で観測を行うのが宇宙望遠鏡である。）

赤外線が天体観測に用いられるのは、可視光線に比していくつもの長所があるからだ。まず、波長が長いいため、微粒子による散乱を受けにくい。宇宙には、大量の塵をま



大気の窓

とった天体があり、そのような天体の場合、赤外線の方がより明瞭に観測することができる。また、天体が放射する光（電磁波）は、低温ほど波長が長くなるため、例えば褐色矮星のような低温の天体も赤外線では明るく見える。さらに、宇宙遠方の天体は、「赤方偏移」と言って波長が伸びる性質があるため、長波長である赤外線での観測がより重要となるのだ。

○すばる望遠鏡が持つ赤外線の日

すばる望遠鏡は、ハワイ島の山頂に林立するマウナ・ケア天文台群の一つで、1999年に観測を開始した。7つの観測装置を用いることで可視光線から遠赤外線までの観測ができる望遠鏡であるが、その中で、近赤外線を観測する装置に、前述のMCT半導体が用いられている。この赤外線検出器のしくみはデジタルカメラのそれと類似しており、検出部が、水銀・カドミウム・テルルの合金による薄い板状の半導体集積アレイ（縦横の配列）で形成され、個々の素子が受けた赤外線強度を電気信号に変換することで、画像データとして記録される。

このタイプの検出器には、温度に弱いという弱点がある。温度で装置が壊れるわけではなく、ノイズが入って精度が落ちてしまうという意味だ。全ての物質は、温度に応じた「光」を放っている。高温ではより短い波長、低温ではより長い波長を出し、常温の物質は赤外線を放射する。そのため、装置そのものが赤外線を出して、宇宙からの微弱な放射を覆い隠してしまうことが問題になるのである。この影響を軽減するため、装置全体は、氷点下150℃以下に冷やされなければならぬ。高性能な装置は、なかなか繊細なのだ。

○ハワイ島山頂は現代版バベルの塔

標高4200mの雲の上に造られたマウナ・ケア天文台群は、天空の城だ。ここに集う各国の研究者たちが、共通の言語で意見を交わし、壮大な宇宙の謎を解き明かすべく取り組む姿は、現代版バベルの塔のようでもある。この新たな人類の試みについては、神も微笑んでくれることを切に願っている。

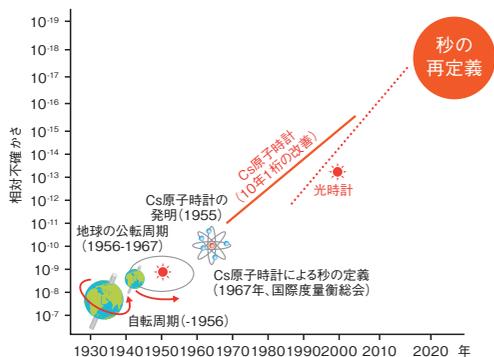
4 水銀が刻む未来の時

今、ノーベル賞級の研究とされているものの一つに、新たな時計の開発がある。世界一精度の高い時計を用いた新しい「秒」の定義に向けて、現在、国際的な議論が進められている。そう遠くない将来に我々は、新たな秒を用いて時を刻むようになっていくかもしれない。

○「秒」の精度は著しく向上している

国際的な単位の共通化は、1875年に成立した「メートル条約」に遡る。メートル法の普及を目指すフランスが中心となって、先に「長さ」と「重さ」の基準が定められたが、現在はSI単位系として統合され、全ての物理単位を対象としている。その中でも、秒の単位は最も高精度な定義がされており、実際に秒を使って他の単位を組み立てるということも行われている。例えば、長さ1メートルは、1983年以降、光が299,792,458分の1秒で進む距離という定義に変わっている。

地球の自転を基準としていた時代、秒の単位は7桁(10⁷)程度の精度であった。「潮せき」などの影響で自転自体が揺らいでいたため、基準となるものが不安定であれば、それ以上の精度向上は望むべくもない。現在の秒は、セシウムに9,2GHzのマイクロ波を照射して原子を励起させ、その周波数から1秒を定義するもので、「原子時計」と呼ばれている。マイクロ波よりさらに振動数の大きい光を用いた原子時計は、特に「光時計」と呼ばれ、今なお、高精度化に向けて世界中で開発が進められている最先端技術である。



秒の定義の変遷

○日本発の光時計が未来の「秒」の候補に

光時計には、荷電原子（イオン）を用いるものと、荷電していない中性原子を用いるものがあり、その2方式の間で、現在し烈な開発競争が繰り広げられている。先に開発されたのがイオンを用いる方式で、「単一イオン光時計」と呼ばれるものだ。それを猛追しているのが、中性原子を用いた「光格子時計」で、これは日本で最初に開発された技術である。

2017年、国際度量衡委員会（メートル条約に基づいて設立された執行機関）は、新たな秒の定義の候補として、単一イオン方式5種類（アルミニウムイオン、水銀イオン、イッテルビウムイオン（2波長）、ストロンチウムイオン）、光格子方式3種類（水銀、イッテルビウム、ストロンチウム）、マイクロ波方式1種類（ルビジウム）の計9種類を推薦した。目標とする精度は18桁、現在のセシウム原子時計が16桁精度であるから、100倍の高精度化が求められていることになる。水銀、イッテルビウム、ストロンチウム等を用いた光時計は、すでに16桁の精度を実現しているが、今後これらをどのように選定し、あるいは組み合わせる新たな定義とするかはまだ決まっていない。また、新たな方式（カドミウムなど）が加わる可能性も残されている。

原子時計の精度を向上するには、いくつかの不確実性を減らすことが必要とされている。一つは「原子同士の衝突」による影響で、この不確実性を減少させるため、「原子を捕獲して動けな

いようにする」という技術が開発されている。また、ぶつかり合わないまでも、原子が揺れ動くことでドップラー効果を生み、周波数に揺らぎが発生してしまう課題もある。「ポールトラップ」という手法を使用してその摂動を無くしたのが、電場と磁場を組み合わせる1個のイオンを固定する、「単一イオン光時計」である。これに対して「光格子時計」では、摂動を無くすのではなく、それによって周波数に変化しない形の特異な格子状のトラップを作り、そのマスに複数の原子を1つずつ捕獲する方式を採用する。さらに、原子が入っている容器から放射される熱輻射（物体から熱エネルギーが電磁波として放出される現象）の影響も無視できないため、光時計は、低温環境で運転されるのが一般的である。その点で水銀を用いた光格子時計は、開発の難しい高性能の紫外線レーザーを必要とするものの、熱輻射の影響を受けにくいことから、室温でも安定した動作が期待できる。

どの方式が定義として採用されるにしても、超高精度の時間測定は、様々な可能性を引き出し、てくれるはずである。18桁精度の時間を用いれば、スカイツリーの1階と地上約450メートルにある展望台で、相対性理論に基づく時空の歪みを確認することも夢ではない。身近な場面では、GPSの位置精度が格段に向上するかもしれない。正確な時計は、これまでの常識はもちろん、我々の生活にも大きな変革をもたらす可能性を秘めている。

5 火山研究と水銀

環境中の水銀の量は、放出量と沈着量のバランスによって決定する。そして、これまで多量の水銀を放出してきたのが火山である。ここ数百年ほどは人為的活動による放出もかなり多くなっているが、それ以前では、火山が最大の放出源と考えて間違いないだろう。水銀は化学元素であるから、地球が誕生した時から存在しており、火山の研究に水銀を活用するのは合理的な考えだと言える。

○生物大絶滅の根本原因を突き止める

古生物学の研究では、地球誕生以来、生物の大絶滅が5回起こったと示されている。その中で最も新しい白亜紀末（約6550万年前）の恐竜絶滅は、メキシコに落ちた巨大隕石の影響であるとされているのは有名な話だ。では、それ以外の大絶滅はなぜ起こったのか。火山の大爆発によるとされるものが複数回あったと考えられている。例えば、史上最大と言われるペルム紀末

（約2億5100万年前）の大量絶滅では、「シベリア・トラップ」と呼ばれる溶岩流出跡の調査結果から、同時期に巨大な火山活動があったと推定されている。

いくつかの仮説が立てられている。オルドビス紀末（約4億4400万年前）については、急速な氷河の発達がこの時期に見られるため、気候の寒冷化が生物の大量絶滅につながったと考えられているが、確たる証拠が見つかっていなかった。そのため、なぜ通常の気候変動を上回るスピードで寒冷化が起きたのか、その根本原因を突き止める必要があった。これについて、2017年に日本とアメリカの研究チームが、寒冷化の原因を火山活動とする仮説を提唱した。中国とアメリカそれぞれの、オルドビス紀末の地層において、水銀が高濃度になっていると確認されたためだ。ただ、この時期に噴火したと考えるに足る溶岩流出跡の候補はあるものの、年代の確認（時期の絞り込み）がまだ十分にできていない。火山活動の時期が分かれば、この仮説の信頼性も上がるため、今後の研究成果が待たれる。

○現代の噴火予知や地熱探査に水銀を活用

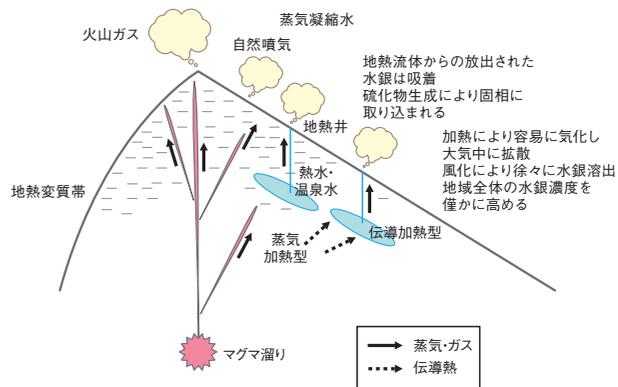
時代は一気に現代の日本に飛ぶ。日本では、噴火予知や地熱資源探査のために、火山の研究が進んでいる。日本は地熱資源に富む国である。温泉はその最たるものだが、他にも発電、暖房、融雪、温室と、地熱の利用範囲は広い。こうした地熱の探査にも、水銀が活用されている。水銀

の挙動は、地熱活動との関連性が深い。他物質に対する吸着性や化学反応性も高いため、実態を把握するには様々な条件を考慮する必要がある。反面、見ることでできない地中の状態を地表から推定できる可能性も有する。水銀は、有望な地熱資源を探し出し、火山の危険性を検知する優秀な化学元素と言えるかもしれない。

地熱資源を探索する場合、観測井戸を掘削し、深部での地熱流体を直接観測できればよいのだが、地表に全く熱兆候が無い場合は、その掘削位置を正しく選定することが困難である。ここで、地下に存在するであろう熱源を示唆すると言われる地中の水銀ガスが着目される。水銀は、温度上昇に従って著しくその蒸気圧が上昇するため、深部地熱熱源によって気化し、断裂に沿って上昇してくると考えられる。さらに、気中の水銀に対しては、金をトラップ（捕集装

置）とすることで簡便で高精度の濃度分析を行うことが可能だ。土中の気相にある水銀を分析して濃度マップを作ることにより、水銀が高濃度である地点が読み取れ、より高い確率で、良質な熱水や蒸気を得られると期待できる。

また、火山活動に伴う地下の熱異常をいち早く捉えるために、水銀を活用することも考えられる。地表面の温度観測では、地下水の影響などで必ずしも鋭敏に地下深部の熱異常を捉えることができない。しかし、地表部の水銀濃度が平常時から変化することにより、地熱兆候を推定することができる。火山は脅威にもなるが資源にもなる。水銀を用いた化学的探索手法は、その火山のご機嫌を伺い、便益を享受しつつ安全性を確保するために役立つ技術なのである。



地熱系による水銀の挙動

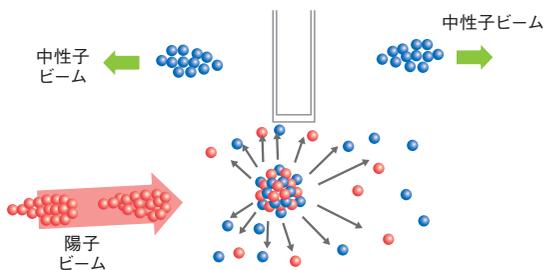
6 水銀がターゲットにされている!?

「陽子ビームがマリーキュリーに狙いを定めている」、と言っても、宇宙戦争の話ではない。日本原子力研究開発機構が茨城県東海村に建設した「大強度陽子加速器施設J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)」にある、中性子源施設のことである。J-PARCは、陽子・中性子等の粒子ビームによる実験を行う最先端の施設として、原子や分子の構造を解析したり、原子核や素粒子について研究したりしている。

このJ-PARCで建設・運用されているのが、様々な実験・研究用の中性子ビームを生み出す「水銀ターゲットシステム」である。このシステムでは、ほぼ光速にまで加速した高強度の陽子ビームを用いて、それを水銀の原子核に衝突させることにより、そこから中性子を生み出している。加速器では、通常、荷電粒子のビームしか作ることができない。荷電が無い中性子ビームを生み出すには、「加速させた陽子を打ち込んで二次粒子ビームをはじき出す」というひと手間が必要になるのだ。

○中性子ビームの作り方

原子核中の中性子は、原子番号が増えるにつれて累進的に増加する(例えば、水銀の安定同位体の一つ ^{201}Hg の場合、陽子80個、中性子122個で安定である)。そのため、加速器のターゲット物質としては、重くかつ密度が大きいもののほど中性子発生数が多いことになる。従来、タンタルやタングステンといった固体の金属を用いて中性子を発生させていたが、この方法では、核破砕反応による発熱を水で冷却しなければならぬ。システム高出力化のためには、ターゲット物質に冷却性能と中性子性能を両立する液体重金属を用いるのが有利である。特にJ-PARCでは、高強度の陽子ビームを使用するためターゲットでの発熱が高く、これを十分に除熱するには、中性子発生だけでなく冷却材としても機能する液体金属の採用が必須であった。その点、水銀は、核的特性がターゲット物質として優れてい



中性子源ビーム発生のおしくみ

たことに加えて、常温で液体であることから、加熱溶融が必要となる鉛などを用いるより設備を簡素にできる利点があった。

しかし、その水銀を入れる器作りは厄介だ。水銀は、多くの金属とアマルガムを作るため、材質面で様々な制約を受けることになる。そこでJ-PPARCでは、ステンレス製のターゲット容器を作り、容器に「ビーム窓」を設けて、そこから陽子を入射させている。この窓部分は、直接陽子ビームに曝されるため特に損傷が進みやすく、定期的なメンテナンスが必要とされている。(J-PPARCでは、半年ごとに定期保守を行っている)。

○J-PPARCが運用する中性子源施設

J-PPARCの装置には、水銀1.5m³(重量にして約20トン)が用いられており、システムの運転中、ターゲットとなる水銀は冷却のために、循環装置で熱交換器へと送られる。そのため、冷却機能も含めたシステム全体が、放射化された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。そこで、ばく露対策が必要となる範囲に遮蔽用の鉛版を設置するなどした結果、この水銀ターゲットシステムは、全体で総重量300トンを超える巨大なものとなった。固体金属ターゲットを使ったシステムと比較すると、確かに複雑になった感が否めない。しかし、密度の低い冷却水によって中性子発生効率が低下するといったことが無くなり、固体金属よりも高い中

性子発生効率を得られることは大きなメリットであろう。

この施設で発生した中性子は、物質を原子・分子レベルで見ると「顕微鏡」として、様々な分野で利用されている。熱く沸きあがる水銀の海は、未来の高機能製品の開発を支えているのだ。

7 夢の液体大天頂望遠鏡

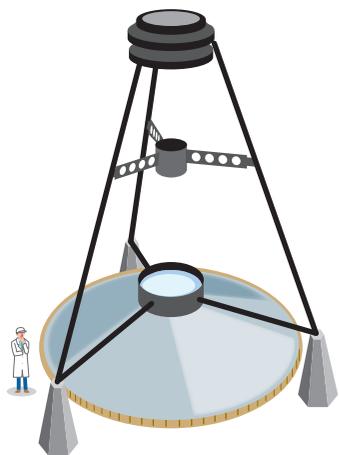
「天頂望遠鏡」とは、個々の星の動きを追わず、真上（天頂）を向いて固定された天体望遠鏡を指す。なぜこのような形にするかと言えば、「安く作れるから」である。巨大かつ繊細な反射鏡を歪み無く動かすには、高精度の制御技術が必要となる。しかし、反射鏡を固定してしまえば、そのような装置は不要だ。いきなりお金の話をすると、いささか夢の無い話と思われるかもしれないが、観測装置の普及も、天文研究の発展に欠くことのできない重要な要素の一つなのである。

○液面鏡が使える天頂望遠鏡

天頂望遠鏡にはもう一つ、良いところがある。「液面鏡」が使えることだ。液体の入った水槽をゆっくりと回転させたときにできる液面を、そのまま反射鏡として利用する液面鏡は、歪みの調整を必要としない。遠心力と重力によって自然と、望遠鏡の主鏡に使われる放物線形の凹面鏡

形状になるからである。そして、この液面鏡に最適な材料が金属水銀だ。水銀を利用した天頂望遠鏡は、1995年～2002年、NASAによるスペースブリ観測のために運用されたが、その際、直径3mの主鏡に15リットルの水銀が使用されていた。運用終了後、解体された部品の一部は、カナダ・ブリティッシュコロンビア大学の天頂望遠鏡（主鏡直径6m）に転用され、2003年の建設から2019年まで運用された。この水銀も、運用停止後、将来のプロジェクトに向けて回収・保管されている。また、現在インドにおいて主鏡直径4mの液体天頂望遠鏡の建設が進んでいる。

液体望遠鏡が、その規模の割に短期間で運用を終えているのは、不具合があったのではない。望遠鏡の開発や特定の観測を目的としたプロジェクトだったからだ。必要な時に必要な場所に設置でき、移設も可能なうえに大口径という、これまでに無いコンセプトの液体望遠鏡は、これを用いた新たな天体観測の可能性を広げている。例えば、液体望遠鏡は価格が安いいため、数多くを準備・設置することが可能だ。これら



液体天頂望遠鏡のイメージ
底面の主鏡はゆっくりと回転している

配列（望遠鏡アレイ）して同時に観測を行い、その画像を合成することによって、巨大口径の望遠鏡に匹敵する解像度を得ることができる。まだ実現はしていないが、仮に6mクラスの望遠鏡を66台組み合わせると、50mクラスの望遠鏡と同等の解像度が得られるという試算もある。どうだろう、少しは夢のある話になってきただろうか。

○月面望遠鏡というアイデア

この液体望遠鏡の設置場所として、最も適しているとされるのが月である。アポロ計画以降長らく途絶えていた月面開発の候補として、現在、月面天文台のアイデアが真剣に検討されている。月面は、大気が無く光が散乱されないのも、よりシャープな映像を得ることができるためだ。観測に際しても、雲が無いので観測可能時間が長く太陽光発電が安定して稼働する、雨が降らないのでドーム（雨除け）が不要、酸素が無いので装置が錆びない、地震や嵐が無く重力が小さいので構造物を簡単にできる等々、天体観測にはもってこいの条件が揃っている。また、月面にある資材を用いて構造物などを建設することで、地球から運ぶ資機材の重量を抑えることも可能だ。カナダ宇宙庁は、20mクラスの巨大液体望遠鏡であっても、地球から運ぶ資機材は3.5トン以内で済むとしている（ちなみにハッブル宇宙望遠鏡は、主鏡直径2.4mで重さ11トン）。

しかし、残念ながら、月面で水銀を使うことはできない。夜間の気温がマイナス150℃にもなるため、水銀が凍ってしまうからだ。加えて、比重の重い水銀を地球から運ぶのは、ロケットのペイロードを増やすことにもつながり好ましくない。そのため、NASAでは、水銀に代わる融点の低い「溶融塩」の開発が進められている。月面で水銀が使われることは無いが、これまで水銀液面鏡を使って得られた知見が、この大天頂望遠鏡プロジェクトに役立つとしたら……とても夢のある話ではないか。

8 水銀圧入法によるコンクリートの評価

コンクリート建築は、文明開化の象徴だ。木造しかなかった日本で、コンクリート造の近代建築が立ち並んでいく——その光景を目の当たりにしながら、当時の人たちはどう感じていたのだろう。それはさておき、この一見頑丈そうに見えるコンクリートも、実は意外な弱点を持っている。時の経過とともに環境から様々な物理化学的な影響を受け、そのまま放置した場合、ポロポロと崩れ始めてしまうのである。中でも、寒冷地における「凍害」には、「コンクリート特有の微細構造」がその弱点に関係している。

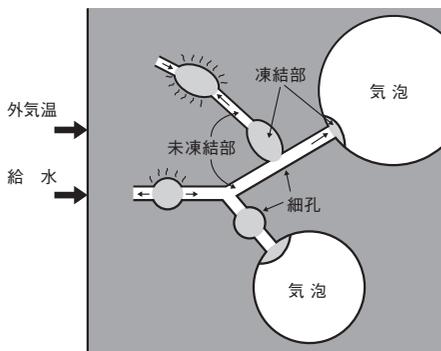
○コンクリートの凍害には表面の微細孔が影響

凍害とは、内部の水分が外気温や日射の影響を受けて凍結と融解を繰り返すことにより、コンクリートが次第に劣化していくことを言う。水は、凍結すると約9%体積が膨張する。そのため、コンクリート内の水が凍結すると、中からひび割れが発生し、これが徐々に広がっていくこ

とで構造物全体が蝕まれていく。コンクリートは、このような水が入る「空隙」を無数に持つており、その微細構造を知り、適切に管理することが、凍害対策の重要なポイントとなる。例えば、水の入った空隙が（入っていない）気泡とつながっていれば、凍結膨張分の圧力上昇を緩和する逃げ道が出来るから凍害を抑えられる、といった具合である。

○微細孔の分析に使われるポロシメーター

この空気や水の入った微細孔は、0.01〜10ミクロンという微生物クラスのサイズで、肉眼では分からない小ささだ。この微細孔を測定する手法の一つが、「水銀圧入法」である。水銀は表面張力が高く浸透しにくいことは、床に落ちても水のように広がらず、コロコロと光る玉にな



凍害によるコンクリート劣化の概念

ることからもイメージできるだろう。コンクリートの表面でも同じで、水銀がそのまま微細孔に浸透することはない。圧力をかけて無理やり空隙に押し込むのだ。そのときの圧力と中に入った水銀量の関係から、コンクリートの微細孔を評価するのが水銀圧入法である。

実際の分析には「ポロシメーター」という装置を使い、水銀槽の中に試料を入れて圧力をかけ、そのときの体積の減少から微細孔の有無を確認する。微細孔の分析には欠かせないポロシメーターだが、その特長は、測定できる細孔径のレンジの広さにある。加えて、顕微鏡などで直接観察する方法と比べ定量的な結果が得られるため、物質の強度、吸着性、反応性、密度、触媒作用といった様々な物性・特性を評価する手法として、広く普及している。

ところで、このコンクリートの微細孔は、少し複雑な性質を持っている。微細孔は毛細管現象により水を吸い上げるが、毛細管中の水は「凝固点降下」と言って凍りにくくもなる。また、凍結融解により広がった割れ目に水が浸透していく際の、空気との置換されやすさには、微細孔のサイズが関係している。そして、凍った部分と凍っていない部分が混在するコンクリート内では、同じ温度でも水と氷の蒸気圧差によって、凍結しやすい場所に水分の移動が起きると示唆されている。さらに、凍結融解以外にも、コンクリートの微細孔の量や大きさを変化させる要因が、実環境中に存在すると知られている。このように、コンクリートにある微細孔は、凍害に対してプラスにもマイナスにも作用しており、そのため、今もなお研究が進められている。

現在のところ、水俣条約が求める製造輸出入禁止の水銀使用製品にポロシメーターは含まれて

いない。しかし、ポロシメーターには水銀が使われているため、使用後に特別な処理を必要とする水銀廃棄物が排出される。短期的には、各研究施設が水銀廃棄物を適切に処理する手順を遵守することが求められよう。そして、長期的には他の分析法を含めて、望ましい方法が追及されていくことになる。

9 古代日本史研究における水銀の役割

日本における水銀利用の歴史は古く、縄文時代には、すでに赤色顔料として使われていたことが確認されている。また、金属水銀を持つ、金と合金（アマルガムと呼ばれる）を作る性質を利用して、装飾品や仏具への鍍金（めっき）の材料に用いられていた記録もある。このような水銀の遺構・遺物は、文字資料に乏しい古代日本の歴史を研究する上で、貴重な素材となっている。

○日本全国にある「朱」の遺構

朱（硫化第二水銀）は、縄文時代以降、ベンガラ（酸化第二鉄）とともに彩色土器の赤色顔料として利用されていた。注目すべきは、ベンガラが黄土・赤土など土性顔料として比較的容易に採取できたのに対し、朱は、辰砂（しんしゃ・硫化水銀鉱）という鉱物を採掘・粉碎の上、精製を必要としたため、貴重な資源だったという点である。そのため、朱で彩色された土器は、日用品というより、祭祀用として用いられていた可能性が高い。そして、大陸との交易が盛んになっ

た弥生時代以降は、朱に対する中国文化の（赤は神聖な色という）価値観も伝来したと考えられ、その採取や利用がさらに進んでいった。

古墳時代になると、朱を用いた埋葬が全国で行われるようになり、棺の中に大量の朱が敷かれた遺構も発見されている。当時の朱の精製も、縄文時代のそれとはほぼ変わらず、辰砂の原石を割って赤い部分を取り出し、石杵で潰したのち水で比重選鉱し、さらに細かくすり潰すという大変手間のかかるものであった。そのため、大量の朱は、権力者の威信を表すとともに、それを調達した地域との交易関係を示す証左ともなる。

○硫黄の同位体比が朱の産地を示唆

朱の産地を推定する作業に、最新の研究技術である「元素の同位体分析」が導入され始めている。元



古代の主な水銀鉱山

素には複数の安定同位体を持つものがあり、例えば辰砂 (HgS) 鉍脈が異なった過程で生成された場合、その同位体構成に差異が生まれる可能性がある。近年の調査により、硫化水銀の硫黄の同位体比とSの比が、辰砂の産地により異なることが分かってきた。当時の朱の精製には、化学反応や火を用いていないことから、精製方法によって同位体比に変化はないものと推察できる。これらを踏まえた分析の結果、初期の古墳には中国産の朱が、時代が下るにつれて、国産と推定される朱が発掘される傾向がうかがわれた。中国産の朱が見つかるということは、その当時中国との交易があった豪族の墓ということになり、ヤマト王権成立前の日本各地の国際的な地位を知る手掛かりにもつながる。硫黄以外にも朱に含まれている不純物(例えば鉛)の同位体を用いて、さらなる検討を加えることにより、産地推定の精度が一層高まることが期待されている。

○金銅製の遺物はアマルガム鍍金の歴史

一方、水銀アマルガム鍍金(めつき)の技術は、中央アジアのスキタイ文化が、シルクロードを経て日本に伝わったものと言われている。金細工には、鍍金を施したものの(金銅製)の他に、金そのものを加工したもの、漆等で金を貼り付けたもの、金の板をたたいて圧着させたものなど、複数の手法があり、その中で鍍金は、古墳の副葬品である馬具の出土品に多く見られる細工である。これは、スキタイ人が騎馬民族だったこと、また、これら出土品が日本に家畜化された

馬が伝来した時期(4〜5世紀)と一致することとも符合する。6世紀になると、それまでは青銅製だった刀剣に、金を鍍金した「裝飾付大刀」が現れるが、これは、馬具の裝飾技術が大刀の装具にも取り入れられたものと考えられる。

まだ仮説にすぎないが、朱を求めて古代王権が移動していったという考え方も出てきている。「過去」の多くは、歴史の闇に覆われて長い間葬り去られたままであるが、その闇に水銀が光を当てることで、新たな事実が発見されるかもしれない。古代日本の姿を知る上でも、水銀研究の成果が待たれる。

10 もはや自然は真空を嫌わなくなった

アリストテレスは、「自然は真空を嫌う」と言ったらしい。博物学に優れた偉大な哲学者だったが、その先見性ともいいくつかの誤りも指摘されているアリストテレス。彼が経験に頼らず、論理的思考だけで作り上げた一部の理論は、後世の権威主義者たちに無批判に崇拝された。こうした非科学的な営みが、科学の正しい発展を阻害した面も否定できない。

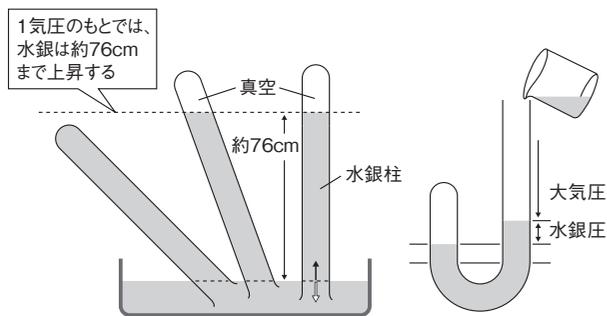
○真空は「存在する」という明らかな証拠

真空の存在を人の目に見える形で示したのが、有名なトリチェリ（イタリアの物理学者）の水銀実験だ。トリチェリは、水銀を満たしたガラス管を垂直に立てる過程で、水銀が76cmより上には上がらず上部に空間が生じることを示して、この空間が真空になっていると説明した（イラスト左参照）。1643年のことである。それ以来、真空の研究や技術開発は水銀によって進展していき、併せて、大気圧や気体の性質といった、真空とは相補的な概念の理解も進んでいった。

その後フランスの哲学者で、数学・物理学にも造詣の深いパスカルが、トリチェリのガラス管に目盛りを付け、気圧を測る器具に進化させた。彼は、その器具を使い、天候によって気圧が変化することや、標高が高い山では気圧が低いことを示し、「大気圧」の概念を確立した。そして、実験に基づく理論の重要性を述べるとともに、アリストテレス学派へ痛烈な批判を浴びせた。

さらに、アイルランドの貴族で科学者のボイルは、Jの形をしたガラス管に少量の空気を閉じ込め、そこに水銀を注ぐことにより、気体の体積と圧力の関係を測定した（イラスト右参照）。これが「ボイルの法則（体積・圧力一定則）」を導いた実験である。パスカルの装置を「気圧計」と名付けたのも彼である。

ドイツの政治家で科学者でもあるゲーリケは、銅製の半球状容器2個を組み合わせて内部の空気を排気、それを馬で引っ張るといふデモンストラーション（マクデブルクの半球）を行い、アリストテレスへの反証とした。



左:トリチェリの真空実験 右:ボイルの実験

同時にゲーリケは、トリチェリが観察していた水銀柱の高さが刻々と変化することに着目、「気圧計」を用いて天気予想を行った。やがてそれは、「晴雨計／バロメータ」と呼ばれるようになり、航海の必須アイテムとなっていった。

○真空を「利用する」時代の幕開け

「真空を作り測定する」という技術は、トリチェリの実験から200年後の19世紀に、大きく進展することになる。1873年に発明された「スプレングルポンプ」は、ガラス管内に水銀を滴下させて気体を排出するもので、1 Pa（パスカル・大気圧の約10万分の1）程度までの真空を作ることができた。また、翌年に発明された「マクラウド真空計」は、U字管の一端を封止、中に水銀を注入することで、開放端側の圧力を測定可能とするものだ。

これらの真空装置は、エジソンが白熱電球の量産工場を立ち上げた際にも用いられた。つまり、新時代の幕開けを飾る技術だったのである。そして、今や真空工学は、 10^{-10} Pa（大気圧の約100億分の1）以下の超高真空を実現し、半導体製造や加速器による実験に使われる最先端技術となっている。

トリチェリは、アリストテレス学派と長く対立していたガリレオ・ガリレイの最晩年の弟子でもあった。以前から、井戸掘りたちは、揚水器やサイフォンが10 m以上は水を吸い上げられなことを経験的に知っていたが、ガリレイは、「真空の力」が水を引き上げていると考えた。彼は、地動説裁判後生涯名誉回復されず、トリチェリの実験を見ることもなく1642年に亡くなっていく。弟子の真空実験でアリストテレス学派に一矢報いることができなかつたのは、やはり悔やまれるところであろう。紀元前3世紀のアリストテレスから、人々がようやく真空の存在を確信することになったトリチェリの実験まで約2000年。どうやら人間は、権威におもねると真実が見えなくなってしまう傾向があるようだ。

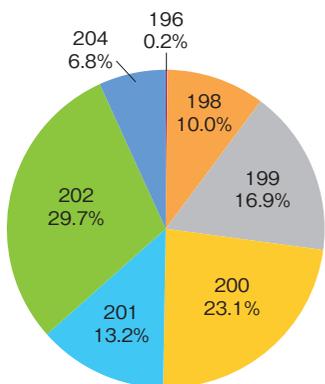
11 同位体で探る水銀の足跡

環境は内気だ。余り雄弁に自己主張しないので、付き合うには良い相手だが、時にキレて、ため込んだ毒気を吐き出すことがある。「環境モニタリング」というのは、その「環境さん」にご機嫌伺いをする行為と言えるかもしれない。うれしそうにしていたら「どんな良いことがあったのか」、怒っていたら「これからどうなるのか」、環境が発するかすかな声に耳を傾けることで、より良い付き合い方を理解することができる。

環境中に、ある化学物質が検出されたでしょう。それは、もともとそこにあつたのかもしれないし、化学反応で生成されたのかもしれない。あるいは風に流されてどこからか飛んできた可能性もある。発生源が近くにあつて、その影響を調べる場合（これをホットスポットモニタリングという）はまだ良いが、そのような要因が全く無いところで観測する場合（これをバックグラウンドモニタリングという）は、「静聴」して、様々な可能性を考えなければならない。

○安定同位体は微妙に挙動が違う

環境中の化学物質の履歴を調べる方法で、最近注目されているのが「安定同位体」である。多くの元素は同位体（原子核に含まれる中性子の個数が異なる原子のこと）を持つが、徐々に核崩壊して別の元素に変わってしまう放射性同位体と異なり、安定同位体は、環境中の成分比が一定しているのが特徴である。とはいえ、全く変わらないかというところでもなく、様々な物理化学的影響により微量の成分比の変動（これを同位体効果という）が起こる。その変動を捉えることにより、どの様な物理化学反応を受けて来たかを推定することが可能となる。水銀には7種の安定同位体があり、しかもそれらが比較的にまんべんなく分散しているので、同位体比を調べるには適した元素なのである。



水銀の安定同位体の質量数と存在割合

○特徴的な同位体分別で環境動態を推測

安定同位体の「同位体効果」は、原子の重さの違い（つまり質量数の差）に応じた物理的・化学的挙動の差に基づいて同位体分別が起こる場合（これを質量依存型同位体分別（MDF）という）と、原子核の体積や形、電荷分布など質量以外の要因によって同位体分別が起こる場合（これを質量非依存型同位体分別（MIF）という）が知られている。水銀同位体 ^{198}Hg をベースにして ^{199}Hg から ^{201}Hg との比を求めると、多くの反応系において、軽い同位体である ^{198}Hg がより速く反応すること（MDF）が示される。ところが、近年の研究で、紫外線により水銀が還元される（水銀化合物が元素状水銀になること）場合、質量数が奇数の同位体（ ^{199}Hg 、 ^{201}Hg ）が、偶数の同位体より反応しにくい（MIF）という現象が認められている。このことを利用すれば、同じ濃度の水銀化合物についても、それがもともとその濃度だったのか、高濃度の化合物が還元された残りなのかを区別することが可能だ。このように、静的な情報（濃度）から動的な情報（還元反応）を得られるということは、環境中での水銀の動きや濃度を予測するための新たな知見となる。

水銀の同位体分析は新しい研究分野であり、その可能性が指摘されている。しかし、具体的な成果を挙げるには、なお一層の調査や実験データの蓄積が必要である。グローバルな水銀の動態は、まだまだ分からないことが多く、水銀対策の効果を評価することも十分にはできていない。内気な「環境さん」のハートを掴むためにも、その「気持ち」を探るホットな研究が欠かせない。

第5章

歴史の中での存在感

1 ご遺体を守る水銀

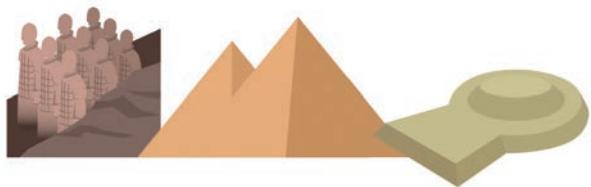
「エンバールミング」をご存じだろうか。あまり聞き慣れない言葉だが、遺体の保存処理を指す言葉で、防腐剤などを用いて一定期間、生前の状態に保全することを言う。血液の代わりに赤い防腐液を充填するエンバールミングでは、遺体をドライアイスで冷やすことなく血色の良いやわらかな姿を再現できるので、日本でも葬儀用の需要が増えているらしい。古今東西、様々な理由から、我々は遺体を保存してきた。戦死した兵士を故郷まで送り返す、支配者が永遠の繁栄を願う、あるいは博物館の展示用にエンバールミングを施すこともある。そして、水銀の最も古い用途の一つに、この防腐剤としての利用がある。

○世界中で行われていた遺体の防腐処理

古代に遺体の防腐処理が行われていたのは、主に文化・宗教的な目的によるものだ。エジプトでは、それを専門とする聖職者も存在し、その技術も、単純な乾燥処理から、香草、油脂、ター

ル等の塗布や内臓摘出など、より高度なものへと発達していった。「永遠の命は肉体の存在とともにある」という考えは、エジプトに限らず多くの地域にあったようで、例えばスペインのドルメン（支石墓）では、5000年前の人骨が、粉砕した辰砂（しんしゃ・硫化水銀鉱）に覆われた形で発見されている。また、紀元前2世紀に、中国の古墳から発見された女性の遺体がある種の液体（水銀が検出されているがその正体は不明）に浸かっており、まだ弾力が残るその肌は瑞々しかったという事例もある。

血管内に液体を注入して遺体を保存するという、現代的な意味でのエンバールミング手法も、実は6世紀頃の欧州で、すでに始められていたようである。アメリカの南北戦争においても、葬儀の儀礼的な目的で、戦死者に様々な種類の保存液を用いたエンバールミングが施されたという。エンバールミングは遺体に対する処理なので、毒性を有する物質を用いることも可能である。一般的にホルマリンのような有機溶媒を用いていたようであるが、中には水銀成分を含むものも存在していた。



○「お墓に施朱」は日本の伝統

国内に目を転じると、弥生後期から古墳時代にかけて全国で無数の古墳が築造され、その中の多くから、辰砂や朱（硫化第二水銀）が発見されている。壁画や彩色だけでなく、遺体処理として用いられた発掘例も少なからず報告されており、例えば、大和天神山古墳（奈良県天理市）からは約40kgの朱が入った木棺が出土している。西谷3号墳（島根県出雲市）、楯築墳丘墓（岡山県倉敷市）、桜井茶白山古墳（奈良県桜井市）、小羽山30号墓（福井県福井市）なども同様であり、施朱の風習は古代日本で広く行われていたと考えられる。

時代は下って江戸時代、徳川将軍家は、上野の寛永寺と芝の増上寺を菩提寺として、代々の将軍とその夫人、子女を埋葬していた。戦前、国宝に指定されるほど壮麗な建造物群であった増上寺の将軍家墓所は、残念ながら空襲により、ほぼ全壊してしまった。その荒れ地を譲り受けた西武鉄道が東京プリンスホテルを建設するわけだが、その際に大規模な学術調査が行われている。調査の中で、数々の副葬品と並び、遺体の防腐目的で用いられたであろう石灰、木炭、朱等も発掘され、とりわけ第6代将軍家宣の棺には、400kg近い量の朱が納められていたという。

○エンバーミングは現代でも

全体主義的な思想から、レーニン、ホー・チ・ミン、毛沢東、金日成等の遺体は永久保管されることになっている。こうした思想的・宗教的な理由で遺体を保存するという行為が、今後も続けられるかは全く分からない。ただ、科学技術が発展した現代では、エンバーミング用の薬剤開発も進み、保存剤に水銀を用いる必要はほぼ無くなっている。これも水銀を使わない社会に向かって、一歩前進と言えるのだろうか。

2 色の世界は赤から始まった

人類が「色」を使い始めたのは大変古く、ネアンデルタール人まで遡るといいう研究もあるらしい。彼らは、身体を着色していたと考えられているが、それには主に赤土が用いられていたという。また、旧石器時代の洞窟壁画に見られる色彩が赤茶色（具体的には酸化鉄系の顔料）中心であるなど、「赤色」は、人類が意識して使用した最初の色と言える。

○赤色顔料の中でも貴重な「朱」

赤色顔料には、古来、ベンガラ（酸化第二鉄）、朱（硫化第二水銀）、鉛丹（四酸化三鉛）が用いられてきたが、中でもベンガラと朱（丹とも呼ばれる）は、その歴史が特に古いとされている。朱は、辰砂（しんしゃ・硫化水銀鉱）と呼ばれる鉱石を粉砕して顔料とするため量が限られ、ベンガラ（赤土より採取）より貴重で、特に重要な用途に用いられていた。また、水銀と硫黄から朱を化学合成することも古くから行われていたが、これを特に銀朱（組成的には同じ

硫化第二水銀）と呼んで区別することもある。古代中国やローマで作られ始めた鉛丹も、こうした人工合成顔料に含まれる。

フランスのラスコーやショーヴェ洞窟に描かれた壁画には、黒と赤茶色の色彩が見られる。黒は、火を使うことによりカーボン（墨）として得ることができ、この黒に、赤色顔料を組み合わせることで、中間色である黄・茶・褐色の色味を出すことが可能となった。

○色彩の開発が豊かな文化に貢献

赤色顔料以外では、緑色顔料として緑青（孔雀石）が、古代エジプトや古代中国で使われていた。美しい青色を出す群青（ラピスラズリ）は、古くから用いられていたものの産地が限られていたため、大変貴重だったという。白色顔料は、チョーク（炭酸カルシウム）、石膏（硫酸カルシウム）、白亜（酸化アルミナ）等が早くから使われており、人工顔料である鉛白（塩基性炭酸鉛）も、中国で紀元前から作られていたとの記録が残っている。黄色顔料としては、黄土（水酸化鉄）に加えて雄黄や雌黄（ともに硫化ヒ素化合物）が、すでに古代ローマ時代には知られて



ラスコーの壁画

写真:PIXTA

いた。このように古代文明期は、彩色文化においても著しい発展を見せた時期であり、こうした発展が、極彩色の絵画や工芸品などを生み出す背景となったわけである。

洋の東西を問わず、絵画は、手法の発達と新たな絵具の開発により、その国の豊かな文化を築き上げてきた。日本では、植物から様々な染料（藍、茜、紅、梔子、紫草等の水溶性色素）を得るとともに、多くの顔料を輸入して「岩絵の具」が作られていた。その海外、とりわけ西洋では、亜鉛華（酸化亜鉛・白）、カドミウム黄（硫化カドミウム）、ビリジアン（水和酸化クロム・緑）、コバルト青（アルミン酸コバルト）、マンガン紫（リン酸マンガンアンモニウム）、アンバー（酸化鉄と酸化マンガン・褐色）等々、美術の授業でも聞き覚えのある数多の絵具が作られていった。

○水銀化合物は暖色系？

水銀化合物は、暖色を示すことが多い。カドミウム黄の一部を水銀で置換した硫化カドミウム水銀は、赤色系顔料として絵具になっているし、橙色の酸化水銀は、船底の防汚塗料として広く使われていた時期がある。特殊な例としては、温度によって色が変わるヨード赤（ヨウ化第二水銀）がある。この化合物は、126℃で結晶構造が可逆的に変化する性質があり、低温では赤色、高温では淡黄色を呈するため、示温塗料として塗布面の温度の監視等に利用されている。また、染

料では、傷口消毒剤として知られるマーキュロクロム（いわゆる赤チン）が、着色に用いられる場合もある。

ここまで見てきて分かる通り、顔料には重金属が多用されており、それらの中には、有害性を指摘されているものも含まれている。しかし、これら作られた色によって、歴代の画家達が素晴らしい絵画芸術を生み出していったことも確かであり、それによって我々は貴重な文化遺産を得ることができた。ただ、華やかな色彩で裏側にある有害性を覆い隠すのではなく、こうした重金属顔料との付き合い方を考えつつ、これから先も文化を守り高めていくべきであろう。

3 鍍金技術の伝来と大仏造立

鍍金（めっき）は、金属の防錆として広く使われる技術だが、装飾目的にも用いられる。その典型とされるのが「金めっき」である。金をはじめとした金属による表面装飾には、溶融させて塗りつけたり、たいてい圧着させたり、漆で貼り付けたりと様々な方法があり、また、素材によっても使い分けられている。

最も古い鍍金として、「スズめっき」の例が挙げられる。スズは融点が232℃と低く、また製錬が容易だったことから、人類が最も早く使い始めた金属の一つだと言われている。また、銅との合金が「青銅」として一時代を築いたほか、鉄に薄く塗る（今でいうブリキ）処理も、紀元前15世紀頃から行われていたとの記録がある。対して金は、スズに比べて融点が高い（1064℃）ため、金めっきでは、金を融解させて用いるのではなく、溶媒に溶解させる方法で鍍金材としていた。金を水銀に溶かしてアマルガム（水銀との合金）を生成、それを対象の表面に塗布し、その後加熱して水銀を蒸発させるといふ鍍金手法は、紀元前7世紀頃にスキタイ人が考え出したと言われている。スキタイ人は中央アジアの騎馬民族で、金属加工に大変優れていたとされ、その技

術できらびやかな装飾馬具などを数多く残している。

○鍍金技術は装飾馬具として伝来

中国では、紀元前5世紀頃から鍍金が使われ始めたようだ。そして、紀元後2世紀頃に仏教の思想が広まると、鍍金を施した金銅製の仏像が盛んに作られるようになっていった。この習慣は、仏教伝来とともに日本にも伝わってきたのだが、日本人が鍍金の技術を知るのは、それより少し前のようだ。古墳時代後期のものとされる古墳の副葬品からは、鍍金された馬具が出土しており、日本に馬が伝来した際、装飾馬具として金銅（金めっきされた青銅）製品が持ち込まれたであろうことを物語っている。国産の馬具がいつ頃から作り始められたかについて、正確なことは分かっていない。ただ、法隆寺金堂の釈迦三尊像を作った鞍作止利（くらつくりのとり）の祖父である司馬達等（しばたつと）が、馬具製作を生業にしていたと伝承がある。ちなみに、中国系渡来人である彼は、仏教伝来前の6世紀初頭に來日、蘇我氏とともに仏教普及に尽くした人物とされており、このことから、馬具製作の技術が仏像制作にも活かされたと考えるのが自然であろう。

いずれにしても、仏教伝来初期は、金銅仏が盛んに作られた時期である。特に7世紀頃のもの

信仰していたと想像される。そして、その後8世紀に、金銅仏の頂点ともいえる東大寺の大仏が造立されることになる。聖武天皇の治世は、疫病（天然痘）が大流行するなど世の中が乱れており、災いから脱却するために大仏の造立が発願され、発願から約10年後の752年に開眼供養が行われた。

○聖武天皇が拜んだ大仏は何色だった？

開眼供養時の大仏だが、現在目にする姿と様相を異にすることはご存じだろうか。まず、当初の大仏は露座であり、大仏殿が完成するのは6年後の758年である。そして、まだ鍍金が施されていない仏像は青銅製で、こがね色（金メダルの色）ではなくあかがね色（銅メダルの色）に輝いていたと考えられる。そして、この巨像への鍍金であるが、5年の歳月をかけて、757年に完成したと伝わっている。

この鍍金に要した資材の量は、古代史料にも記載されており、その詳細を知ることができる。単位の換算率については諸説あるため、文献によって数値は異なるが、最近では、金



黄金色に輝く東大寺大仏（想像図）

写真・PIXTA

約60kg、水銀約300kg（それぞれ仏体部のみで台座等を含まない量）が使われたのではないかとする説が有力である。現在と違い、水銀採掘の絶対量が少なかった古代において、この量は確かに大量である。しかし、時の帝であればこれくらいの量が確保できても不思議ではないし、何より大仏造立直後の777年には水銀を輸出したとの記録も残っているほどである。この時代の日本は、各地で水銀開採が盛んに進められており、豊富に水銀を持ち得ていたと推察される。

仏像への鍍金は、日本では行われなくなっており、アジアの仏教国（例えばネパール）では、まだそうした習慣を残しているところがある。これに関しては、できるだけ水銀を使用しない社会に向けてどうしたらよいか、仏陀の教えもどうかがつてみたい。

4 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、二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、鉾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、例えば伊勢の丹生鉾山は、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。



丹生都比売神社（和歌山）

○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た時代であり、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するのは、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強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（にゆうじょう…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。

5 魅惑の水銀が人を惑わす術

水銀には「Quicksilver」の別名がある。その名のおも、ものの変化や敏捷さを象徴する水銀は、その変幻自在をもつて、これまで人類を大いに惑わしてきた。歴史を振り返ると、錬金術という疑似科学（現代の目から見るとそう評価される）が信じられ、また実践されたのも、水銀が持つ不思議な性質によるところが大きい。



液体として存在する水銀

○金を作り出そうとした西洋の錬金術

錬金術の歴史は長く、盛衰も繰り返されてきた。そのため、一義的にその全容をとらえるのは困難であるが、アリストテレスの四元素説に理論的根拠を求めている。現代の元素の考え方と異なるので理解し難いが、我々の住む世界が「火・空気・水・土」の4つの元素から構成されている」とする彼は、同様に金属も一種の化合物（混合物？）と捉えていたようである。仮に金や銀が化合物であれば、それは化学反応によって作り出せるはずと考えるのは特に不自然ではない。そこから、鉛やスズなどの卑金属から金や銀などの貴金属を作り出す錬金術という学問が始まったのだろう。

錬金術は、古代ギリシャで生まれ、中世アラビアで花開いた。古くからアラブ人は、科学に熱心だったようで、現在でも多くのアラビア語起源の科学用語が使われている。アルカリ、アルコール、アルジブラ（代数学）、アルケミー（錬金術）といった単語の「アル」は、アラビア語の定冠詞だ。このアラビアの錬金術で特に重要視されたのが、水銀と硫黄である。彼らは、アリストテレスの4元素のうち水と土から水銀が生まれ、火と空気から硫黄が生まれると考えた。そして、この2つを適切な割合で混合することにより、（金を含む）全ての金属を作ることができるとしたのである。

その後、十字軍の遠征を機にアラビアの錬金術がヨーロッパに再流入すると、これを利用する神秘主義者やさらには単なるペテン師が世に溢れ、ついにはローマ法王が禁止令を出すに至る。これによって、錬金術は、ますます暗くオカルト的な様相を呈するようになっていく。



錬金術記号の例

左から金、銀、鉛、硫黄、水銀

○不老不死を求めた中国の煉丹術

西の錬金術に対し、東の煉丹術も紀元前からの長い歴史を有する。中国においては、道教的な思想の下、不老長寿を達成するための術として発達した煉丹術だが、最も重視されたものに「煉丹服薬法」がある。仙薬（仙人になるための薬）を作って服用するというこの方法では、最上の仙薬が丹（朱と同じ）で、次いで金、銀の順になると考えられていた。当時の人々は、植物性の薬（薬草）は燃やすと灰になってしまうが、鉱物性の薬（例えば丹の場合）は焼けば水銀となり、また水銀から丹を作り出すこともできることから、不滅の薬は鉱物から得られると考えた。ただ、実際に丹薬を服用した人の運命がどうであったかは、想像に難くない。不老長寿を達成した仙人など、少なくとも今は生きていないのだから。

錬金術にしろ煉丹術にしろ、その歴史は優に1000年を超える。それだけの長い間、水銀は我々を惑わし続けてきたわけだが、近世の新たな元素論の台頭によって、ようやく「術」の効き目も終わりの時を迎える。そして18世紀以降、次々に新たな元素が発見されると、水銀も、数ある元素の一つに過ぎないと理解されるようになった。

○現代的な視点での錬金術

ここで、現代的な視点で錬金術（つまり金を合成する方法）を考えてみよう。放射性同位体がベータ崩壊する場合、原子量が同じで原子番号が隣接する元素となるが、水銀（80）と金（79）は隣同士の元素であるから、この方法での相互変換が可能である。水銀は、原子量が196、198、199、200、201、202、204の7種類の安定同位体を持つ。これに対して金は、197のみ安定である。このことから、（人工の）放射性同位体である ^{196}Au を作れば、ベータ崩壊（電子捕獲ともいう）の結果、 ^{196}Au （安定）を得られることになる。しかし、このようにして金を作るのは、金鉱山から金を採掘するよりはるかに費用がかかるため一つもメリットが無い。現代科学の錬金術でも、どうやら一攫千金とはいかないようである。

6 ザ・水銀く水銀の製造・販売体制

「座」というのは、商工業者による一種の同業者団体である。平安から室町時代にかけて、朝廷や公家、寺社などが「本所」と呼ばれる権限付与・管理機能を担い、各地に座を開いていた。この時代の座としては、石清水八幡宮の「大山崎油座」や北野社の「麴座」が有名である。権力者にお金などを払う代わりに販売権や独占権を付与される「座」というしくみによって、商工業者たちは自身の商売を発展させていったのである。

○水銀座

全国で多種多様な座が開かれる中、平安時代末期（12世紀頃）に、伊勢の丹生（現在の三重県多気町）で国内唯一の「水銀座」が設立された。古くから顔料及び鍍金用に使われていた水銀だが、この地における辰砂（しんしゃ・硫化水銀鉱）採取の歴史は、はるか縄文時代まで遡る。水銀座の本所については、確たる史料は無いものの、撰閥家に当たたる高位の公家であったのではな

いかと考えられている。水銀を京に納める水銀商人は、多量の商品物資とともに街道を行き交う富豪の象徴として「今昔物語集」にも書かれている。隆盛を極めたであろう水銀商人であるが、その権威をかさに着て乱暴や悪事に手を染めていたことも伝わっており、特にお藤元の伊勢神宮とは揉め事が絶えず、神宮側が訴訟を起こすこともあったという。この水銀座だが、14世紀頃までは確認できるものの、伊勢の辰砂鉱資源が枯渇したこともあり、その最後については知られていない。

○白粉座

水銀座が辰砂や水銀を扱うのに対し、「白粉（おしろい）座」は、軽粉Ⅱ甘汞（かんこうⅡ塩化第一水銀、汞は中国語で水銀のこと）を取り扱う団体になる。白粉座は、丹生から遠くない射和村（現在の三重県松阪市射和町）で鎌倉時代（13世紀頃）に成立し、伊勢神宮を本所としていた。射和の白粉座では、製法が秘伝とされ、家も世襲として情報漏洩を防ぐなど、専売権の維持に努めていた。しかし、より廉価な鉛製白粉の鉛白（えんぱくⅡ塩基性炭酸鉛）が伝来・普及したことで、座は衰退していった。その後、15世紀末に欧州で発生した梅毒が日本にも上陸、瞬く間に蔓延したことで状況が変化する。甘汞の駆梅毒としてはたつきが注目されると、射和においても全面的に販売方針が転換され、薬として軽粉を生産するようになったのである。

中世の座は、織田信長の政策で有名な「薬市薬座令」によって廃止されることになる。しかし、江戸時代に入り「株仲間」と名前を変えて類似の同業者団体が復活すると、仲間意識が強かった射和の軽粉業者は、「軽粉株仲間」として再結成を果たす。軽粉株仲間では、共同で水銀の購入、価格の協定、製品の販売を行い、また、業者仲間の倒産を回避するために仲間同士で融資し合うなど、その関係が緊密であった。彼らは、丹生の水銀が枯渇した後も、大坂の薬種問屋を通じて中国から水銀を購入して操業を続け、明治維新で株仲間制度自体が解体される中、戦後の1953年まで軽粉の製造を続けた。

○朱座

中世とは異なり、江戸時代の「座」は、幕府による製造・販売を独占する制度で、現在の専売制に近いものであった。「金座」「銀座」「銀座」「銀座」など、金融関係の座がよく知られているが、朱の製造も「朱座」として幕府直轄とされていた。朱座は、まず堺が幕府の公認となり、後に江戸や京都にも設置されていく。朱座が扱う「朱」とは、水銀と硫黄から合成される人工の硫化第二水銀（銀朱ともいう）だが、物質的には天然鉱物である辰砂と同じである。朱墨や絵具が主な用途である銀朱が座の専売品であった一方で、辰砂は、座の専売品ではなく、「薬」として薬種商が取り扱うものとされてきた。同じ物質であるにも関わらず、辰砂は薬で銀朱は毒と信じられ

ていたため、「別扱い」されていたのだ。この朱座による専売事業は、明治維新で廃止されるまで続いた。

座による水銀の製造と販売、その歴史を俯瞰すると、私的用途か公的用途かを問わず、水銀が時代を通して使用されていたことが分かる。もちろん使われ方はいろいろと変遷してきたが、今も昔も水銀は、我々のすぐ近くにあり続けている。



街中にひっそりと建つ堺の朱座之趾の碑

7 赤備えは武勇の誉れ

甲冑は、戦いのためのアウトフィットであり、生死を左右する戦場において機能性を第一とすべきものである。実際の足軽が白兵戦で用いるような甲冑には、簡素にして防御能力に優れたものが求められ、戦国の世は、そうした甲冑が大量に供給された時代である。

○戦場で恐れられた精鋭軍団

「赤備え」は、全体の地色を赤く統一した甲冑に身を包んだ戦闘集団を指し、戦国時代には精鋭部隊が着用したことで、恐れられつつも一目置かれる存在だった。その戦いぶりは、数々の戦記物でも描かれているため割愛するが、武田、井伊、真田の名が特に知られている。ただ、神功（じんぐう）皇后が、朝鮮半島（新羅）に出兵（3世紀）する際の武器や軍衣を「赤土」で染めたと日本書紀に記されているから、その風習はかなり古くからあったようだ。この赤備えの顔料には、ベンガラ（酸化第二鉄）とともに朱（硫化第二水銀）が用いられていた。朱は、ベン

ガラより色鮮やかな顔料だが、室町時代には国内の水銀資源が枯渇していたこともあり、中国から水銀を輸入して作られる貴重品だったとされている。

赤備えが今なおもてはやされるのは、徳川家康の思いと、それを斟酌した後世の伝承によるところが大きいだろう。家康は、たびたび赤備え部隊に悩まされた。三方ヶ原の戦い（1573年）において、自身の馬印（武将が自身の居場所を示すために掲げる目印）が倒された（即ち本陣が敵方の攻撃に曝された）わけだが、その時の相手が、赤備え部隊の発祥とされる武田軍であった。その後、武田氏が1582年に滅亡した際、家康はこの精鋭部隊を自軍に引き入れ、家臣である井伊直政の配下とした。そして、「井伊の赤鬼」と呼ばれる鬪将直政は、幾度も激戦を潜り抜け、関が原においても赤備えを率いて戦い、武勲を立てた。

家康は、大坂夏の陣（1615年）で再び、赤備え部隊（真田軍）に本陣の馬印を倒される。これにより真田信繁（幸村）は、「日本一の兵」（ひのもといちのつわもの）と称賛を受けることとなったが、家康にとっても、敵は強敵である方が自身の武勇を強調できるため都合が良かったのだろう。なお、大坂の陣の頃になると、戦乱の世も終わり、戦国武将も世代交代が進んでいった。井伊家の赤備えも、若輩の井伊直孝が率いることになり、戦闘経験の無いピカピカの甲冑を見て家康は、大いに落胆したと言われている。

○現存する赤備えは平和な時代の装飾品

甲冑は戦闘服であるから、損耗が激しく、後世には残りにくい。一般の武士が戦場で着用したものは使い尽くされてしまうし、ひとたび敗走となれば、重たい甲冑は打ち捨てられることも珍しくない。したがって、残っていたとしても痛みが激しかったり、後世の修理が入っていたりするため、文化遺産として価値のあるものは限られてしまう。寺社の宝物殿などに残されている甲冑類は、將軍など限られた武将の持ち物とされ、実用性より外見の立派さに主眼をおいて作られた華美壮麗なものが多い。

現在、我々が目にする赤備えの甲冑は、井伊家に伝わった江戸時代のものがほとんどである。この頃の甲冑は、戦場で用いられることが無く、井伊家代々の軍装である朱漆塗りの甲冑も、結果的に良い

状態で保存されることになった。また、甲冑の性格が合戦用から工芸品になっていき、立派に見えるための装飾が増えていった。

このように、井伊の赤備えとして甲冑は残ったが、精鋭部隊としての赤備えはどうであろうか。太平の世に、甲冑の着用方法すら忘れてしまった武士が、にわか仕立てで重武装したところで、銃火器中心の近代戦では通用しない。幕末の戦乱において、主君である徳川幕府軍の一員として戦った井伊の赤備え部隊は、敵方鉄砲隊の恰好の標的とされ、大敗したとのこと。戦国の世の武勇も、もはやノスタルジーとなってしまった。



赤備え具足

写真:PIXTA

8 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パングに惹かれ、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／ボ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、グアナフアート、ボ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銀山開発が始まった。

○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保するため、国王の独占体制を構築し、アルマデン



アルマデンの水銀鉱山遺構

写真:PIXTA

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ブ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、およびボ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、鳥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は変わりはない。

ここからは想像になるが、コロンブスがジパングの黄金を目指した結果が、中南米での銀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場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銀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。

9 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、比較的良好に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。



写真: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、業者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）や水銀エレクトリシズムと呼ばれる行動・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いる——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曝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、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。

10

呪われた金山 ～セラ・ペラダ

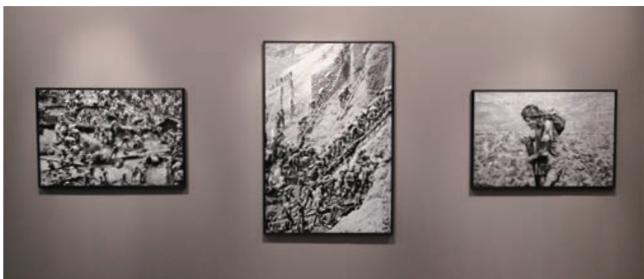
ブラジル生まれのドキュメンタリー写真家であるサルガドは、1980年代にブラジル・アマゾン川流域において進んでいた大規模な金採掘の現場をカメラに収め、それを世の中に広めたことで知られる。金鉱の名は、「セラ・ペラダ」。ポルトガル語で「禿げ山」を意味する金鉱は、アマゾン川下流の、ジャングルから外れた不便な丘の上にあった。1979年、一人の農夫がこの地で金塊を発見したことから、アマゾンのゴールドラッシュは始まった。

○サルガドが切り取ったモノクロームの悪夢

カラーフィルムがすでに普及していた時代、サルガドの写真は白黒で撮影されていた。にもかかわらず、見た者は誰もが、その中に写る幾千もの人影に圧倒された。人々……、心を失くした機械仕掛けの人形のように、男たちは一区画四畳半にも満たない地面を掘り返し、土の入った袋を担いで長い梯子を上っていた。ガリンペイロと呼ばれる、組織に属さない金の採掘人

たちだ。彼らは、金発見の噂を聞きつけてやって来た「よそ者」で、ここを開拓する者の日雇い人夫として働いていた。開拓者といっても、結局は地権者から小さな土地（一区画2m×3m）の採掘権を手に入れただけの、こちらも「よそ者」たちである（4000件以上の権利が発行されたと言われている）。当時、5万人を超える男たちが、直径約200メートルの穴の底で一攫千金を狙い、泥土の中にある幸運を探し求めている。

サルガドがここを訪れたのは1986年になってからである。だから、この金鉱を報道した最初の写真家ではない。それでも、彼の写真は大きな反響を呼び、世界中の名だたるニュース週刊誌、イギリスのサンデータイムズ、アメリカのニューヨークタイムズ、フランスのパリマッチ等々が特集記事を組んだ。（なお、サルガドは、その後も数多くの写真プロジェクトを企画・実施するとともに、長くユニセフの親善大使も務めている）



サルガドの展示会におけるセラペラダの写真

写真:gettyimages/Europa Press News

○ゴールドラッシュの熱と夢の跡

大航海時代のエル・ドラド（新大陸のどこかにあると言われていた黄金郷）探検の旅は、16世紀のメキシコ、ペルーに始まり、19世紀にはアメリカ・カリフォルニア、カナダ・クロンダイクのゴールドラッシュへとつながっていった。その間、16世紀には水銀アマルガム法が開発され、いわゆる砂金探しでは採りきれない微細な金の採掘・製錬が可能となった（アマルガムとは、水銀と他の金属との合金のこと）。金鉱開発は水銀鉱開発と一体に進められていき、例えばカリフォルニアでは、金鉱とともにニュー・アルマデン水銀鉱山などが開発されていくことになる。そして、このアメリカのゴールドラッシュは、より効率的な金採掘技術の開発に貢献するだけでなく、それらの技術（水銀アマルガム法も含む）を世界中に普及させる契機となった。

20世紀になると、それまで特定の国の特産物と考えられてきた金が、「誰もが自身の裏山から掘り出せるもの」と認識が変化していった。この変化のきっかけとなった「零細・小規模金採掘（ASGM）」により、アジアで、アフリカで、そして再び南米で……ゴールドラッシュという熱病はパンデミックのように拡散していった。零細・小規模という言葉の響きから、どこかどこかな光景を想像しがちだが、経営形態は零細であっても、複数の集団が同じ時期に同じ場所での採掘を行えば、そのインパクト、特に環境へのインパクトは無視できないものになる。セラ・ペ

ラダの熱狂は、その一つの極限形と考えることができる。

この呪われた金山は、しかし、長くは続かなかった。発見後10年程度で資源が枯渇し、現在は、当時の傷跡が残る山肌と深さ200メートルの水銀に汚染された湖をさらすのみである。しかし、世界のASGMは未だ衰えを見せず、このような廃墟は世界各地で作られ続けている。この現実には、我々はどう向き合っていけばよいのか。確かな答えはまだ得られていない。

11 軍事と水銀

古代中国の4大発明、その一つとされる火薬は、後の戦争を一変させた。すでに6〜7世紀には「黒色火薬」が発明されていたと言われており、これを用いた「鉄砲」（火縄銃）が、14世紀頃から使われ始める。19世紀初頭に発見された雷酸化合物（とりわけ雷汞…らいこう、汞は中国語で水銀のこと）は、刺激に敏感な爆薬で、特に起爆薬として盛んに利用された。ところで「火薬」「爆薬」と聞くと、どちらも可燃性の危険物という漠然とした印象を持つが、火薬は、主に弾丸の射出（発射薬）やミサイルの飛行（推進薬）などに用いられ、爆薬は、爆弾の爆発（炸薬）や火薬への点火（起爆薬）等の用途という違いがある。ちなみに、科学的には、燃焼速度が音速以下のものを火薬と呼び、音速以上を爆薬とする分類もある。

○「銃用雷管」により火を点ける必要が無くなった

この雷汞を用いた「銃用雷管」は、当時の火縄銃が抱えていたいくつかの問題を解決した。火

縄銃は、引き金を引いて点火薬（燃焼速度の遅い黒色火薬）に着火してから弾丸が発射されるまで、一瞬の間ができてしまう。そのため、その間に目標物が移動して的外してしまう「遅発」の問題があった。また、火縄についても、戦場では雨に弱いこと、暗闇で光って敵に見つけられやすいこと、火の粉が飛散して隣の銃が誤射する可能性があることなどの欠点があった。雷汞は、刺激に敏感なことから、火を点ける必要が無く、また、撃鉄を打ち付けるだけで爆発するため、不発の可能性が少なかった。更に雷汞は、燃焼速度の速い爆薬であるため、遅発もほとんど無く、命中精度の向上にも貢献した。

○「水素爆弾」の原料はアマルガムで濃縮された

20世紀を迎えると、世は核兵器の時代になる。「水素爆弾」（水爆）は、これまで実戦で用いられたことはないが、現在、世界最大の威力を持つ兵器とされている。水爆は、水素（H）の同位体で、原子核に中性子を1個持つ「重水素」（D）と中性子を2個持つ「トリチウム」（T）を核融合させることによって莫大なエネルギーを放出するもので

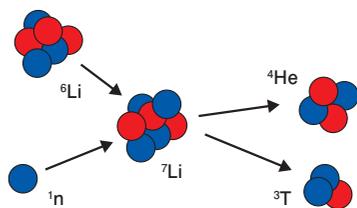


19世紀に製造された
銃用雷管を用いたエンフィールド銃

写真PIXTA

ある。この中で重水素は、水素の安定同位体で、自然界にも0.015%の割合で存在するため、水から取り出して濃縮することができる。一方のトリチウムは、半減期が短い(約12年)放射性同位体で、毎年5%程度減耗するため、自然界にはほとんど存在しない。そのため、水爆では、リチウムの安定同位体「リチウム6」(${}^6\text{Li}$ 、陽子が3個、中性子が3個)をトリチウム源としている。リチウム6に中性子を打ち込むと、トリチウム(陽子が1個、中性子が2個)とヘリウム(He、陽子が2個、中性子が2個)に分裂する性質を利用し、重水素化リチウム(LiD 、これ自身に放射性はない)を用いて水爆は作られている。

リチウム6は、自然界に75%ほど存在している(残りはリチウム7、 ${}^7\text{Li}$)が、これを水爆で使用するには、さらに濃縮する必要がある。これまで開発されてきた多くの方法のうち、最も実用性が高いとされるのが、水銀アマルガム(水銀と他の金属との合金)を用いたCOLEX法という手法だ。このCOLEX法は、リチウム6が、リチウム7より水銀への親和性が少しだけ高いという性質を利用して、両者を徐々に分離することを可能としている。アメリカでは、1950〜60年代にかけてCOLEX法の施設を建設、リチウム6を分離濃縮した。水爆実験が行われなくなり需要がほとんど無くなった現在では、もちろん生産はされていない



トリチウム発生のしくみ

が、その時精製した在庫から必要量が、今も供給されている。

○軍事技術が平和利用される時

このように水銀には、兵器開発に使われていたという暗い過去があるが、これらの技術は、他の多くの軍事技術と同様、平和的な用途にも利用されるようになっていく。銃用雷管に用いられていた雷汞を使って、ノーベルがダイナマイト起爆用の「雷管」(工業雷管)を発明したのが良い例である。ダイナマイトは、鉱山やトンネルの掘削効率を著しく高め、産業の発展に大きく貢献した。

水爆の技術も、未来のエネルギーと呼ばれる核融合炉に応用が可能だ。これまで実例は無いが、机上の空論というわけではなく、21世紀半ばの実用化に向けて、国際的な研究が進められている。仮に実用化されるとなれば、炉の燃料としてリチウム6の需要が再び高まってくるため、その供給方式を検討する時期も出てくる。現在も、技術的・経済的な面で「アマルガム」を用いる方法が最も優れていると考えられているが、本当にこの方法を採用してよいのか、あるいは別の技術を改良していくべきなのか。数十年先の需要とは言え、その体制整備に向けた方針の整理は必要である。

第 6 章

まだある水銀の用途

1 水銀が電気機関車を走らせた

蒸気機関車（SL）に対して親しみを持つ人は多いようで、近年あちこちでSL観光列車が復活している。SLが黒い煙を上げているのを見て人は喜ぶが、あれは石炭の排煙であり、地球温暖化対策でターゲットにされている石炭火力発電所と本質的には変わらない。人は、心の持ちようで、同じものを見ても違った印象を受けるようだ。

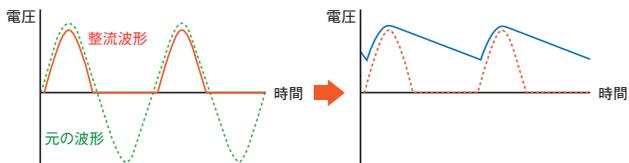
SLの場合、排煙による大気汚染に加えて、一緒に排出される火の粉が周辺の火災を引き起こすとの懸念から、木造の住宅密集地への鉄道敷設には反対の声が大きかった。その問題を解決して都市内の大量輸送を可能にしたのが電気機関車、すなわち鉄道の電化である。鉄道の近代化は、鉄道電化の歴史でもあるのだ。

○鉄道電化の背景に整流器あり

鉄道を電化するためには、電気機関車（電車）の開発とともに電力供給施設の整備が必要とな

る。電気鉄道の初期は、鉄道会社が自前の発電施設を建設して電車を動かしていた。その後、商用の電力会社から電気の供給を受けられるようになる、それを利用するようになり、鉄道の電化は一気に進展していった。しかし、商用の電気は交流で送電されるが、最初に開発された電車は直流方式であったため、交流から直流への変換（整流）が必要であった。

電気の整流とは、交流のプラスとマイナスの波のうち片方だけを取り出すことであり、そこから波の形を整えて（電圧変動を減らして）供給するものである（イラスト参照）。鉄道電化が始まった19世紀末には、半導体はもとより真空管も発明されていなかったため、「回転変流器」と呼ばれる、交流に同期して物理的に回路を開閉するスイッチが用いられていた。そのうち電氣的に弁作用（一方方向には容易に電流を通すが、逆方向にはほとんど通さない作用）を持つ、いわゆる「整流器」が開発されることになる。そして、鉄道のような大容量の直流電源を必要とする分野で、その整流のために開発されたのが「水銀整流器」である。



整流の概念

○水銀整流器が鉄道の近代化を後押し

「水銀整流器」は、水銀蒸気のアークが弁作用を持つことを利用したもので、そのしくみは真空管をイメージすると分かりやすい。真空管では電子のみが電流を送るのに対して、水銀整流器は、放出された電子が水銀蒸気に衝突し、それが解離する時の連鎖反応によって、電流を担う「荷電粒子」が多量に生成されるため、はるかに大きな電流を流すことができる。鉄道の電気施設として適した水銀整流器は、1920年代から1960年代にかけて、広く日本に普及していった。

一方で、機関車への電力供給を直流から交流にしていくという動きも出てきたことから、1950年代には交流機関車の開発が進められることになる。その際、「交流のまま機関車の電動機を回す方式」と、整流装置を機関車に搭載して「従来の直流機関車と同様に運転する方式」が検討され、最終的に後者が採用された。そのため、1957年に日本初の交流



国内初の交流電気機関車ED70

写真:PIXTA

電気機関車として国鉄（現JR）に投入された車両（写真参照）には、「イグナイトロン」と呼ばれる水銀整流器が搭載されていた。なお、前者の交流電動機方式を用いた電車が普及するのは1980年代以降である。

○真空管とともに役目を終えて

鉄道以外でも、直流の大電流を必要とする電気精錬や電気分解、電気溶接などの用途において活躍していた水銀整流器だが、半導体の普及に伴い、信頼性が高く管理が容易な「シリコン整流器」へと置き換えられていくことになる。この辺りは、同じしくみを有した真空管と同じ運命を辿っているのが、時代の必然とはいえ、感慨深いものがある。

2 水銀が船の安全を守る

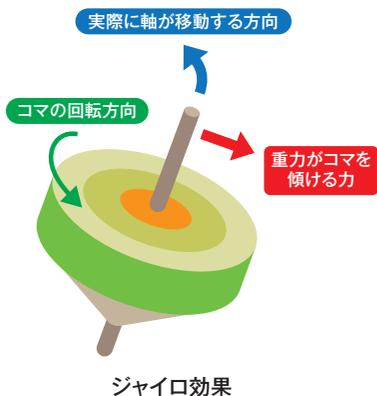
「水銀が船の安全を守る」と聞いて、どう思うだろう。まず、バロメータ（晴雨計）や温度計に使われている水銀を思い浮かべるかもしれない。悪天候は航行の直接的な脅威となるため、気象情報は船舶の安全には欠かせない。確かに水銀を用いた計測器は、電源を必要とせず目盛りを読み取るのも容易で、現場で使う器材として重宝されている。

○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。それもある、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。スベ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

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樫野埼の灯台（映画にもなったトルコのエルトゥール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。



水銀槽式回転装置(展示品)

○水銀の「重さ」は深い海でも

さらに特殊な例として、小型の深海探查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。

3 水銀と電気機器との相性

電気黎明期のアメリカで、エジソンとウエスティングハウスという2人の発明家が、「電流戦争」とも言うべき争いを始めた。エジソンの直流送電方式に対抗して、ウエスティングハウスが交流の送電方式を進めたこの争い、ウエスティングハウスの大勝利に終わった結果が、現在の送電事情である。ただ、当時の交流方式には、電気料金を計測するための電量計と、交流で動くモーターが無いという課題もあった。とりわけ前者は、電気料金徴収の基本であり、電気事業の維持にも欠かせないものであったために大きな問題であった。電量計については、水銀に浮かべた導体の円板を電動機のトルクで回転させる構造（これはアラゴの円盤と呼ばれている）を持つ直流用の積算電力計が先に開発されていた。しかし、交流式の電量計もやがて開発され、結局、交流電化が世界の標準となった。

○交流を直流に変換する水銀開閉器

供給側で負けた直流だが、需要側では、今でも多くの機器や施設で用いられている。小型の家電製品はもちろん、電気溶接や電気めつきなど大容量の直流電源を必要とするシステムは少なくない。このような大電流を制御するには、特別な交流→直流変換装置が必要となり、そのために開発されたのが「サイラトロン」と呼ばれる熱陰極管である。真空管に類似したサイラトロンは、内部にガス（主に水銀蒸気）が封入されており、制御電流が加わると、そのガスがイオン化されて電気が流れるしくみを持つ。ちなみに、サイラトロンを代替する半導体製品を「サイリスタ」と呼ぶが、これは、「サイラトロンに似たトランジスタ」として付けられた商品名（造語）に由来する。半導体技術が普及して駆逐されてしまったかのように思われるサイラトロンだが、大電力や高電圧等の過酷な条件下でも稼動する開閉器として、現在も命脈を保っている。

○高速開閉操作を可能とする水銀リレー

一つの回路から別の回路へ電気信号を中継する電気部品のことを、「電磁リレー」と呼んでいる。けして大電力ではないが、こうした信号系の電気部品にとって重要なのは、接点の開閉に

おける信頼性である。物理的に金属の接点を動かしていると、火花が飛んだり接触面が腐食したりと、いろいろなトラブルが発生する電磁リレーだが、接点に液体である水銀を用いると、水銀の「濡れ面効果」により、接触面の抵抗が少なくチャタリング（接点の機械的振動）無く開閉ができる。高速の開閉操作が必要となる精密機器・装置に用いられてきた水銀リレーだが、水俣条約の規制対象になっているため、今後は代替製品への切り替えが必要とされている。

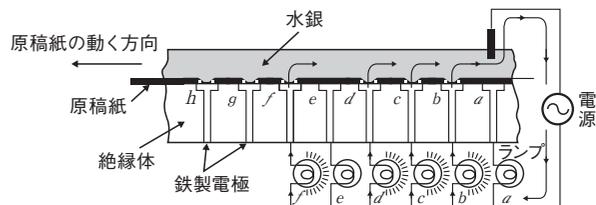
○ニユースを流す看板に使われた水銀

水銀が電気的な接点として使われた例は他にもある。変わった例としては、白熱電球を並べて文字を流した「電光ニユース看板」には、液体でしかも導電体であるという特性から、水銀を用いた接点が使われていた。レトロ感のあるこの装置は、昭和初期（1928年）に初めて登場し、パンチ穴で文字を印した厚い原稿用紙を、鉄製電極と水銀電極の間に挟み、その原稿用紙

を引っ張ることによって文字が流れて見えるようにした、単純だが実に絶妙なくみだった。1960年頃の東京都内では、この方式による電光ニユース看板が20ヶ所以上のビルに設置されていたという。しかし、この装置には約20kgの水銀が使われており、作業員が水銀中毒になるという問題もあった。

その他、回転体を通じた電源供給や、信号の取り出しに使われる回転接触コネクタにも水銀が用いられていた。ジャイロコンパスの輪転球に電源を供給するために利用されているのも、その一例である。

水銀は金属であるから、基本的に「電気機器との親和性が高い」と思って間違いない。前述の用途は特殊な例に当たるかもしれないが、ストープ転倒安全装置に水銀スイッチが使われているなど、一般家庭においても水銀ならではのユニークな使われ方をされている。水銀と電気機器の相性は、やはり抜群である。



電光ニユースの回路図

4 液体電極として利用される水銀

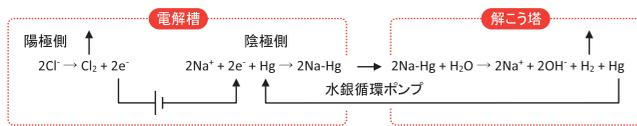
工業用化学品の製造技術は日進月歩である。こうした製造技術の中で最も単純なものの一つとして「電気分解」がある。学生実験でも簡単にできるので、水から水素と酸素を取り出した経験のある人も多いだろう。ただ、工業的には、水素や酸素は水の電気分解で生産されている訳ではなく、電気分解が工業的に広く行われているのは、主に食塩水から塩素と苛性ソーダを製造するプロセス（塩素アルカリ製造工程と呼ばれる）においてである。

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（Na₂Hg）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。

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



水銀法の化学式

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いとも考えられたが、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2500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製品製造技術の進歩によるものと言えるだろう。

5 水銀とノーベル

スウェーデンの化学者で実業家でもあったノーベルの遺言に基づいてノーベル賞が設立されたことは、今さら説明の必要もないだろう。ノーベルは、ダイナマイトを発明したことにより巨万の富を築いたが、その発明品に水銀が含まれていたことはあまり知られていない。

○ダイナマイトに求められた条件

巷で流布しているダイナマイトの発明物語では、ニトログリセリンを、爆発威力を損なうことなく安全に取り扱うために珪藻土に浸み込ませて安定化させた、と説明されている。しかし、爆発物を実用化させるためには、ある程度衝撃に鈍感で取り扱い中は爆発しないことだけでなく、次のようにいくつかの条件が求められる。

- ・経年劣化を起こして不発とならないこと
- ・湿度やその他の環境条件に影響されず安定して爆発すること
- ・製造中に暴発しない安全なプロセスが確立されていること

確かにニトログリセリンを珪藻土に浸み込ませることにより、その安定性は著しく向上した。しかし、狙ったタイミングで確実に爆発させるためには、それに適した起爆装置を開発する必要もあった。ダイナマイトに直接火を近づけても、ただ燃えるだけで爆発はしない。爆発には、爆薬の非常に速い燃焼とそれに伴う気体の膨張が必要である。そのため、適切な方法で爆薬に着火させる起爆装置が欠かせないのである。

○安定性と鋭敏さをバランスした「程よい感度」

ノーベルがダイナマイトの開発を行っていた19世紀当時、銃の点火薬として広く用いられていたのが「雷汞」（らいこう・雷酸水銀、汞は中国語で水銀のこと）である。起爆薬には、爆薬そのものと同じように、取り扱いの安全性と狙ったタイミングでの確実な爆発が求められる上に、わずかな刺激を与えただけで爆発する鋭敏さも必要となる。そのような「程よい感度」を持っていたの



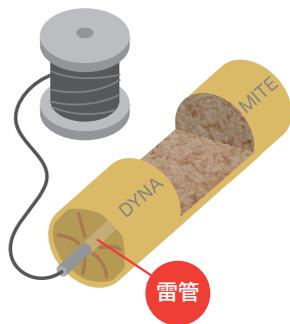
雷汞の化学式

が雷汞をはじめとする雷酸塩化合物であった。雷酸塩は窒素の3重結合を含むため反応性に富み、急速に反応してガスを発生する。

ノーベルは、ダイナマイトの起爆装置の開発にこの雷汞を用いた。そして、発明したのが「雷管」（工業用雷管）である。雷管は、円筒型をした金属性のカプセルで、導火線によりカプセル内にある少量の起爆薬に点火すると、それが添装薬（より爆発力が強い爆薬）を着火させてダイナマイト本体の爆発を誘導する。このように、感度と威力の異なる爆薬を段階的に着火させることにより、ダイナマイトを安全で確実に爆発させることができるようになったのである。

○ 科学技術発展の推進力となった雷汞

ノーベルの死後、雷汞以外にも「アジ化鉛」や「ジアゾジニトロフェノール」（DDNP）といった新たな物質が起爆薬として利用されるようになり、現在では工業用雷管に雷汞はほとんど使われていない。しかし、工業用雷管の基本構造は、現在もノーベルが発明したものと変わっていないという。仮に雷汞が無かったとしても、ノーベルは工夫してダイナマイトを発明していたかもしれない。だが、それは、より不安定で危険な製品だったかもしれない。はたしてその発明品によってノーベルは、ノーベル賞の原資となるだけの資産を得ることができたろうか。雷汞を用いた雷管は、現代の科学技術発展の推進力となっているノーベル賞自体の起爆装置でもあったと言えるのかもしれない。



ダイナマイトの構造

6 水銀が有害生物の防除に使われていた時代

「流し台に10円玉を置くとよい」「水はスズの器に入れると腐らない」など、生活の知恵を聞いたことはないだろうか。金属になぜ殺菌作用があるかについては諸説あり、統一的な作用機序があるかは定かではないが、確かに抗菌性を示す金属は少なくない。金属を抗菌材料として利用するにあたっては、その物質に殺菌能力があることはもちろんだが、ヒトや環境に対する安全性が確保されていることや、目的や用途に応じた効果の持続性があることが非常に重要である。実は水銀にも、こうした作用が認められているが、その毒性も忘れてはならない。

○いもち病の特効薬となった水銀

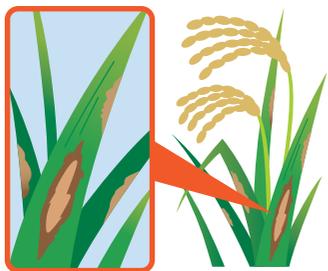
少し前の話になるが、水銀の消毒・殺菌効果を活かした農薬が存在していた。主にカビ類の防除を目的とした種子消毒用として、無機の水銀剤が古くから使われていた。しかし、無機水銀化合物は毒性が強く、かつ薬害も生じやすかったため、その後世界各国で様々な有機水銀

農薬が開発されることになり、その用途も散布用・土壌消毒用へと広がっていった。現在日本では認可されていないが、かつてはイネの「いもち病」対策として効果を発揮した実績がある。

いもち病は、カビの一種であるいもち病菌に感染した部位が、菌の生成するメラニンにより茶色に変色して枯死するという、イネが最も避けるべき病気である。このいもち病対策の特効薬として1950～60年代に広く使われていた農薬が「酢酸フェニル水銀」で、散布剤や浸漬処理による種子消毒剤の形で用いられていた。

○メチル水銀が種子を殺菌していた時代

さらに遡ると、水俣病の原因である「メチル水銀」が農薬として使われていた時代もある。メチル水銀にも殺菌作用があるためだ。イギリスの種子殺菌剤製造工場では、このメチル水銀化合物の製造に従事していた労働者が水銀中毒にかかり、「ハンター・ラッセル症候群」として報告されている。なお、水俣病の原因となったメチル水銀は、工業プロセスで非意図的に生成された



いもち病

もので、この例のようにメチル水銀を有効成分とする商品を製造したわけではないので注意しておきたい。

○快適な船旅にも水銀が

水銀の利用は農業分野ばかりではない。大海原に行く船である。船の船底部分には、貝やフジツボなど生物の付着により船舶の運航速度が落ちることを防ぐ目的で防汚塗装が施されている。船底防汚の歴史は古く、紀元前まで遡ることができ、船底を鉛板で覆うことで生物汚損から保護していたと思われる遺物も発掘されている。20世紀に入ると、この船底防汚に亜酸化銅や赤降汞（せきこうこう）・酸化第二水銀、汞は中国語で水銀のこと）、ヒ素化合物などを含む船底塗料が使われるようになった。その後、1950年代終わりから1960年代にはトリブチルスズを用いた新たな防汚塗料が開発されて広く利用されていた時期もあったが、今はその毒性から世界的に使用禁止措置が取られている。防汚塗装は防汚剤が海水に溶解することによりその効果を発揮するため、海洋生態系へのインパクトが大きい。そのため現在では、船底防汚の塗料は銅化合物が主流となり、水銀が使われることは無くなった。

○科学的知見の大切さ

水銀の毒性は古今東西変わることはない。しかし、科学的知見の蓄積や、リスクと便益の考え方の変化により、水銀の利用実態は大きく変遷している。日本では、1930年代から種子消毒剤として有機水銀剤が使われ始め、約300種の農薬が登録されていた。その後、科学的な知見として、農作物などを通じて人体に蓄積されることが分かると、1970年代にはそれらの登録が抹消され、現在は使われることもなくなった。このように判断をするのは、知見をもとにした、その時を生きる我々である。こうした時にできる限り正しい判断ができるよう、日々、科学的な知見を積み重ねていくことが大切である。

7 世界でいちばん有名な鏡

世界でいちばん有名な鏡は何だろう。白雪姫の魔法の鏡？いや、あれは童話の中の話だ。実在する鏡としては、ヴェルサイユ宮殿にある「鏡の間」(The Hall of Mirrors)ではないだろうか。鏡の間は、1678年に始まったヴェルサイユ宮殿の増築時に造られたもので、宮殿の中でも特に人気の高い場所である。17面のアーチに計357枚の鏡が埋め込まれており、対面する窓の景色を映し取っている。

○ガラス鏡の事始め

実際に訪れたことがあればご存じだろうが、鏡の間で使用されているのはガラス鏡である。そもそも、このガラス鏡が当たり前となったのは最近のことであり、日本でも明治期までは金属製の鏡が使われていた(古墳から銅鏡がたくさん出土しているから、金属鏡の歴史は古代まで遡る)。では、ガラス鏡の事始めは、いつ頃の話になるのだろうか。

ガラス鏡は、ヴェネチアのガラス職人によって14世紀に発明された水銀鏡が、その始まりと言われている。当時のヴェネチアは、高い技術と装飾性でガラス工芸品の一大産地であり、水銀鏡は、そうした中で誕生した。ガラス面にスズアマルガム(スズと水銀の合金)を形成させる方法で作られるガラス鏡は、しかし、一連の作業に手間がかかり、またその技法も秘伝とされていたため、すぐに普及することはなかった。

○贅を極めたヴェルサイユ宮殿「鏡の間」

ガラス鏡の普及・発展に大きな役割を果たしたのが、フランス王朝の贅沢嗜好であった。ヴェルサイユ宮殿の「鏡の間」の建設に当たり、当時の国王ルイ14世は、水銀鏡を国産化すべく、ヴェネチアのガラス職人を招集、王立のガラス製造所まで設立してしまった。1665年のことである。この王立ガラス製造所は、試行錯誤の結果、大型の鏡の製作に成功し、鏡の間は無事完成することとなる。

これによりフランスでは、板ガラスや鏡への需要が高まり、多くのガラス工場が設立されて国の主要産業へと育って



ヴェルサイユ宮殿「鏡の間」

写真PIXTA

いった。そして、王立ガラス製造所も、のちに建設材料やセラミックスなどの高機能材料を製造するサンゴバン社（トムソン・ロイター社が選定する「グローバルイノベーター」100社にも選ばれている、名だたる世界企業の一つ）となっていく。その後、19世紀になり、ドイツで硝酸銀溶液を用いた「銀引き法」が開発され、それが普及すると、スズアマルガム法は衰退し、やがて禁止されることとなった。ちなみに、この銀引き法は、現在もガラス鏡の製造方法として広く用いられている。

○日本では遅れたガラス鏡の普及

日本では、ガラス窓自体が普及していなかったこともあり、（工芸品ではなく）建材としての板ガラスは、海外からの輸入品に頼っていた。板ガラスが国産できるようになったのは明治末のことである。そのため、ガラス鏡も大阪の岸和田周辺で鬢鏡（びんきょう）というコンパクトな懐中鏡を製造している程度だった。また、同時期にドイツの銀引き法が日本に伝わったこともあり、水銀鏡の普及は限定的であったと考えられる。

○「鏡の間」が建設当時の輝きを取り戻す

話を「鏡の間」に戻そう。1979年、ヴェルサイユ宮殿はユネスコの世界遺産に登録された。登録された世界遺産を後世まで伝えるには、伝統的な手法に則り建物を修復し、保全していかねばならない。そのため、鏡の間も、今世紀初めに大規模な修復工事と、天井画や調度品類の復元作業が行われた。このとき「鏡の間」の鏡も、修復のため、一度全て取り外されたという。しかしながら、温かみのある銀色の光を放ち、その中にスズの粒がきらめいて見える水銀鏡は、すでに製造が禁止されている。そこで、修復しきれない場合は、水銀鏡の修復士が同時期に製作された古鏡を探し出し、そこから使用可能な部分を切り出して入れ替えられたという。ガラスの歪みや中に入っている気泡など、当時の製作技術でしか再現できない雰囲気大切にするため、こうした作業が不可欠だったのだ。そして、建設当時の輝きを取り戻した水銀鏡は、今も鏡の間であって、世界中の訪問者を静かに迎えている。

8 時代の一瞬を切り取った銀板写真

「ダゲレオタイプ」とは、フランスのパノラマ絵画の画家だったダゲールが1837年に発明、1839年に発表した写真撮影法である。「銀板写真」とも呼ばれるこの手法は、世界初の実用的写真技術として、フランス政府が特許を買い上げて公開したことから、爆発的に普及した。

写真の技術は、大きく「光学的に被写体をとらえる技術」と、「映像を固定する技術」とに分けることができる。前者の技術開発の歴史は古く、「カメラ・オブスキュラ」というピンホールカメラの原理が紀元前から知られており、15世紀頃には絵画の写生にも活用されていた。他方、後者については、開発に少し時間を要している。17世紀には、銀化合物に光化学反応性があることは知られていたものの、写真への導入と、その革新的な技術開発が一気に進むのは、19世紀になってからになる。

○映像の固定技術が一気に進んだ19世紀

世界初の写真は、1825年頃、フランスの発明家ニエプスが撮影に成功した風景写真と言われている。アスファルトの感光性を用いた写真は、しかし、露光に8時間もかかり、実用的ではなかった。このニエプスと知り合い、共同で写真の研究を始めたのがダゲールだ。ニエプスが亡くなってしまった後であるが、彼は、銀の化合物の感光作用を利用して、ダゲレオタイプを発明した。その後、前述のとおりに普及したこともあり、ダゲールこそが写真の発明者と考える者もいる。ダゲレオタイプは、ヨウ化銀が感光した時に、その光量に応じて銀が析出（特定の物質が分離して出てくること）する性質を利用して、銅板にヨウ化銀を塗って露光させ、析出した銀を水銀蒸気によって銀アマルガム（水銀と銀の合金）とし、映像を可視化する。最後に、チオ硫酸ナトリウムでその映像を定着させることで写真となるしくみであ



ダゲールが撮影した1837年のパリ

る。露光時間はまだ数分〜10分程度かかっていたが、「露光ー現象ー定着」という写真撮影技術の基本がこの時に確立した。

イギリスの発明家タルボットも、ダゲールとほぼ同時（1839年）に、「カロタイプ」と呼ばれる写真術を発表した。硝酸銀をしみ込ませた感光紙を使い、初めて「ネガーポジ式」の撮影法を開発した点は画期的だったが、紙を用いていたため映像のシャープさについてはダゲレオタイプにかなわなかった。一方のダゲレオタイプにも、原版がそのまま写真になるため複製（焼き増し）できないという欠点があった。このような両者の欠点を改良すべく、1851年にイギリスの彫刻家アーチャーが、ガラス板を硝酸銀溶液に浸し、湿っているうちに撮影するという「湿板写真」を発明した。湿板写真は、露光時間が10秒ほどで複製も可能だったため、その後、ダゲレオタイプを駆逐していくことになる。

○幕末の日本にカメラが登場

ダゲレオタイプのカメラは、やがて日本にも上陸する。ペリー艦隊の写真家が撮影し、日本最古（1854年）の写真とされるものは、ダゲレオタイプで撮影されたものであり、重要文化財に指定されている。新し物好きで知られる島津斉彬は、このカメラを購入し、1857年には自らの肖像を撮影していたという。しかし、この時期になると、少し遅れて開発された湿板写真も写真を用いて撮られている。

○銀板写真が映像技術の革新をもたらした

写真技術は、その後も長足の発展を遂げ、1871年にはイギリスの医師マドックスが「乾板写真」を発明し、湿板写真を市場から追い落としした。1884年になると、アメリカの実業家イーストマンが「ロールフィルム」を開発し、写真撮影を専門家だけのものから一般大衆のものへと、その裾野を広げた。こうして見ると、ダゲレオタイプの時代はとても短い。だが、時代の一瞬を切り取ったダゲールの銀板写真は、映像の世紀と言われる20世紀に技術革新の波を引き起こした、最初の一石とすることができらるだろう。

9 水銀ボイラ式火力発電所

スコットランド生まれの物理学者ランキンは、「蘭氏温度」(°R…絶対零度から華氏と同じ間隔で刻まれている)という不思議な温度スケールを提唱した人物だが、熱力学にとっても熱心に取り組んだ研究者でもある。中でも、「ランキンサイクル」という理想的な熱機関の理論を確立したことで、特にその名が知られている。ランキンサイクルは、ボイラと蒸気タービンを構成要素とする熱機関の運転サイクルを表現しており、それは、発電所や大型船舶のエンジン設計の基礎となっている。

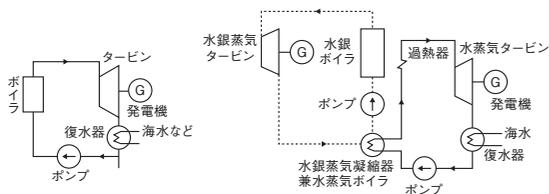
○ランキンサイクルが示す限界と可能性

最も単純なランキンサイクルは、ポンプでボイラに水を供給し、発生させた蒸気でタービンを回すものである。タービンから戻った蒸気は、復水器で冷却・凝縮されて水に戻り、またポンプに入る(イラスト左参照)。理想的なランキンサイクルの場合、システム効率がタービンの出入

り温度差で決まるため、効率を上げるためには、できるだけその差を大きくする方が良いとされる。

この蒸気を用いたサイクルは、液体-気体の相変化(蒸発や凝縮)を利用することで、等温で熱の出し入れ(これを潜熱という)ができるため、高い熱効率に寄与している。とはいえ、物質には、それぞれ臨界点(液体と気体が相変化をすることができる限界)と呼ばれる温度-圧力状態があり、それ以上の温度では気体は液化せず、相変化の潜熱も利用できない。水の場合、その臨界点温度(374℃)が、装置自体の耐熱温度に比べて低く、そのため、高温側温度を余り高くできない。したがって、復水器から冷却水(通常は海水)に捨てられる熱損失も相対的に大きくなる。

これを改善し、さらなる高効率化のために考えられたのが、「水銀と水という物性の違う2つの流体を用いた「二流体サイクル」である。このシステムでは、水銀を用いた高温サイクルと水を用いた低温サイクルが、「水銀蒸気凝縮器」兼「水蒸気ボイラ」で連結されている(イラスト右参照)。これにより、本来復



ランキンサイクルの系統図
左は基本形、右は二流体サイクル

水器によって捨てられるはずの熱が、低温サイクルの熱源として再利用可能となり、総合的な効率が大きく改善される。このような運転が可能なのは、水銀の臨界点温度が水に比べて著しく高い（約 500°C ）という熱的な特性によるのが大きい。この二流体サイクルにより、発電所の総合的な出力を50%程度増すことができる。

○アメリカで導入された二流体サイクル方式

二流体サイクル方式は、1922年にアメリカ・コネチカット州にあるハートフォード電力会社の火力発電所で初めて導入された。1800kWの水銀蒸気タービンを用いて試験操業されたこのシステムでは、約14トンの水銀が用いられ、水銀蒸気タービンに加え、その排熱を利用して2200kWの水蒸気タービンを駆動可能としていた。その後、数万kW級の商用発電施設が、ニューヨーク州、ニュージャージー州、ニューハンプシャー州などでも導入されたが、1950年代以降、水銀ボイラの運転実績は無い。この二流体サイクル方式自体は、当時（大正時代末）から日本にも紹介されていたが、幸か不幸か国内で導入されることは無かった。

○そして誰も水銀ボイラを使わなくなった

1950年代以降、水銀ボイラが用いられなくなったのには、いくつかの理由が考えられる。ちょうどアメリカと旧ソ連において原子力発電の開発競争が盛んだった時期であり、技術開発の趨勢がそちらに向かっていったこともその一つだろう。水銀蒸気が人体に有害であることは、当時からよく知られていたにも関わらず、水銀ボイラが開発されたのは、「技術によって課題は克服できる」という、驕った考えが見え隠れする。そして、その驕りが、水銀よりもさらに危険性の高い原子力についても、「厳重な管理を行えば使ってよい」という発想につながったのかもしれない。そう考えると、原子力開発の先史として、水銀ボイラが、技術者に技術至上主義的な思考を植え付けてしまったのではないかとも思えてしまう。

それ以外にも、水銀ボイラが使われなくなった一因に、二流体サイクルと類似の「コンバインドサイクル」という技術が普及したことも考えられる。一段目にガスタービン（航空機のジェットエンジン）に用いられている内燃機関と同じものを用いるコンバインドサイクルは、水銀ボイラの代替技術として開発されたわけではないが、これにより、水銀を用いた二流体サイクルの技術的優位性は完全に失われたと言える。最後のトドメが刺されたというわけだ。

10 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Ⅱ「ヨードチンキ」に対して赤いヨードチンキⅡ「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。

○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、



消毒用マーキュロクロム液

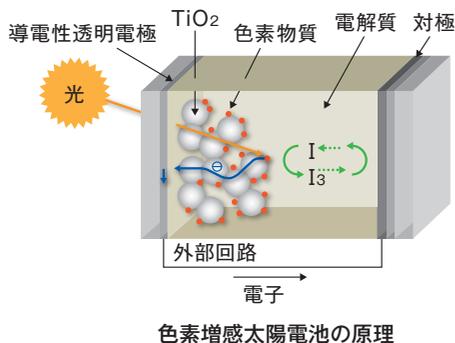
水銀剤ということで、徐々に製品規制の網がかけていって、アメリカの食品・医薬品局（FDA）が1998年にマーキュロクロムの安全性分類を変更し、米国内の流通を止めることに踏み切ると、その後、ドイツやフランスでも販売が停止された。日本では、メルブロミン原液の製造こそ行っていないが、輸入した原液を国内で精製水と調合し、製品として販売している。しかし、「水銀に関する水俣条約」の規定により、2020年以降水銀を使用した局所消毒剤の製造が規制されるため、マーキュロクロムは日本の市場からも早晚消えていくことになる。

○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。

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
色彩バ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。



色素増感太陽電池の原理

11 ロケットサイエンスで水銀が活躍

英語の「Rocket science」とは、「過度に複雑なこと」や、「高度な知識が必要であること」の表現として否定的に使われるケースが多い。「これはロケットサイエンスじゃない」「あなたにも十分理解可能なはずだ」という感じである。実際、ロケットに用いられる技術の開発には様々な困難があり、科学技術の英知が極限まで詰め込まれている。

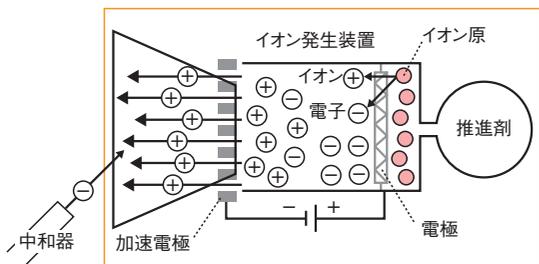
○作用・反作用でロケットを飛ばす「イオンエンジン」

過去に、水銀を積み込んで宇宙に向かったロケットがある。イオンエンジンの「推進剤」(燃料のようなもの)とするためだ。イオンエンジンについては、小惑星探査機「はやぶさ」のニュースで知名度が一気に上がったのでご存じの方も多いただろう。「電気推進型」と呼ばれるそのエンジンは、推進剤をイオン化して電場で加速させ、その反動で推進するという原理に基づく。推進剤をイオン化させると、電気的に一方方向に引っ張ることができ、何であつても後ろに噴

き出せば、作用・反作用の原理でロケットは前進するのだ。

これをイラストにすると真空管に似ているかもしれないが、この場合、電子よりはるかに重い原子のイオンが飛び出すため、その運動エネルギーは電子よりはるかに大きい。最後は、静電気が宇宙船にたまらないよう、宇宙空間に飛んでいくイオンに電子を混ぜて電気的に中和すればよい。

電気推進ロケットの研究は、米ソの宇宙開発競争華やかだった1960年代に始まったもので、その歴史はかなり古い。1964年に米国が打ち上げた「宇宙電気ロケットテスト1号機」(SERT-1)には、セシウム駆動と水銀駆動のイオンエンジンが搭載されており、短時間であったがイオンエンジンが実際に宇宙空間で動くことが確認された。日本では、1982年に打ち上げられた技術試験衛星「きく4号」に2台の水銀イオンエンジンが搭載され、良好に作動し予定通りの推力を発生した。その後、推進剤がキセノン利用に移っていったが、これは主に噴射後の推進剤の機体への付着(汚れ)を考慮したものであった。



イオンエンジンの原理

○広がるイオンエンジンの活躍の場

イオンエンジンが出せる推力はそよ風程度であり、また、真空中でしか動作しないため、ロケットの打ち上げには使えない。しかし、重力から解放され、空気抵抗も無い宇宙空間では、少しの力でも大きな物体を動かすことができる。また、イオンエンジンの推進剤は、実のところ後ろに噴射するための重りであり、機体を動かすためのエネルギー源は電気になる。その電気は太陽電池で発電されるため、予めロケットに搭載しておく必要が無い。従来の化学推進（燃料を燃やして推進するロケット）に比べてはるかに燃費が良いイオンエンジンは、少ない燃料（推進剤）で長時間動作可能であり、また、搭載量の減少は、ロケットの軽量化にも貢献する。このような特性を活かして、小惑星を地球の近くまでけん引してそこに宇宙飛行士が取りに行ったり、役割を終えた人工衛星を早期に大気圏に突入するよう自力で降下させてスペースデブリを増やさないようにしたり、イオンエンジンの可能性は工夫次第で無限大だ。

○ロケットサイエンスに惑わされないうために

ここからは脱線するが、インドの神秘主義者が20世紀初頭に執筆した、「ヴィマニカ・シヤストラ」という疑似科学の本がある。ヒンズー教の物語にたびたび現れる、「ヴィマーナ」と呼ばれる空飛ぶ戦車（あるいは要塞）の、「航空工学に関する技術書」であるとされており、その飛行原理について、次のように説明されている。

「ヴィマーナの下部には、水銀渦巻エンジンの鋼鉄製の加熱装置が設置されている。エンジン接合部はしっかりと溶接し内部に水銀を充填する。熱が装置上部に達すると、水銀の力で旋風が発生し、ヴィマーナの乗員は空中を旅することができる。」

このエンジンは、今日のイオンエンジンの先駆けになった…と、ここまでの説明を聞いて、どれほどの人がこれを疑似科学と見破ることができるだろうか。ロケットサイエンスは確かに難解であるが、思考停止に陥ることなく、フェイクニュースに惑わされないうだけの最低限の眼力は培っておきたい。

12 真空技術の発展と水銀ポンプ

真空は、現代の花形技術と言ってもよい。「真空」と言っても、宇宙空間のようなものではなく、大気圧(約10万パスカル・Pa)以下の低圧状態を含めると、その用途は様々だ。断熱(魔法瓶)、減圧(布団圧縮袋)、吸引(掃除機)、酸化防止(真空パック)、乾燥(フリーズドライ)などは一般家庭でもお世話になっている技術である。そればかりでなく、半導体製造時の薄膜蒸着、照明ランプ製造時の内部の排気、プラスチックの真空成型、電子ビームを用いた電子顕微鏡などの最先端技術も、真空によって支えられている。

○エジソンも使った水銀液柱ポンプ

ドイツの理化学機器工ガイスラーは、真空実験用の放電管「ガイスラー管」を製作(1857年)したことで知られる。彼は、細いガラス管に水銀を滴下

させることで、水銀と水銀の間に閉じ込められた空気を排出するというアイデア(「水銀液柱ポンプ」と呼ばれる)を用いて、ガイスラー管を真空(100Paレベル)にした。この方式を、自動・連続運転できるように改良したのが「スプレングルポンプ」だ。このポンプは、1Paレベルまで排気することができ、エジソンの白熱電球の生産プロセスにも使われている。フィラメントの焼損を防ぎ電球の寿命を延ばすためには、電球内部の材料を脱気して、表面に吸着したガスを取り除く必要があったのである。

○エレクトロニクス時代を切り開いた水銀回転ポンプ

20世紀はエレクトロニクスの時代とも呼ばれているが、その源流はイギリスの電気技術者フレミングが発明した「真空管」と言ってもよいだろう。当時、エジソン効果(白熱電球の中に金属板を置くと、加熱されたフィラメントとの間に電流が流れる現象)を研究していた彼は、その際、真空中の放電現象に弁作用(一方向には容易に電流を通すが、逆方向にはほとんど通さない作用)があることを発見、それを利用して、1904年に整流器として機能する「二極真空管」を發表した。

真空管は、通信技術の大きな発展を促したが、その結果、大量の真空管供給が必要となった。しかし、スプレングルポンプは、ガラスの細管で作られた華奢な装置で、実験用としてはまだし

真空の分類

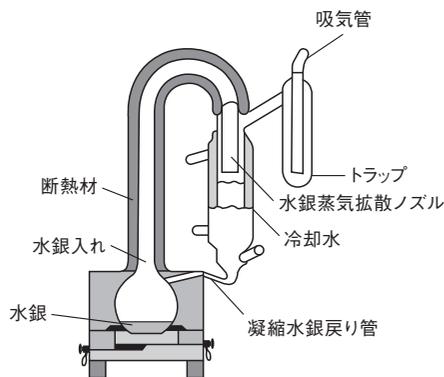
真空の分類	低真空	中真空	高真空	超高真空
圧力範囲	大気圧~100Pa	100Pa~0.1Pa	0.1Pa~10 ⁻⁵ Pa	10 ⁻⁵ Pa~

も、およそ大量生産を行う工業機器らしくなかった。そこでドイツの物理学者ゲーデは、回転機構で内部の体積を変化させることによって排気を行う「水銀回転ポンプ」を発明（1905年）し、 10^{-3} Paレベルの真空を可能にした。続けて彼は、排気速度を向上させるため、水銀の代わりに油でシールする「油回転ポンプ」を発表する。このタイプのポンプは、現在でも使われている優れものだ。

○水銀拡散ポンプは超高真空ポンプのプロトタイプ

一方でゲーデは、油回転ポンプが到達圧力（真空の度合い）の点では水銀回転ポンプに及ばないことに満足せず、さらなる真空ポンプの研究を行った。彼が着目したのは、水銀蒸気の拡散現象で、加熱し気化した水銀が管の中を流れる際に、管の横に開いた小さなスリットから気体が吸い込まれる現象を利用して新しいポンプを開発、これを「水銀拡散ポンプ」と名付けた。そして、1916年、アメリカの化学者ラングミュアは、この原理を改良して、 10^{-7} Paレベルの実用的な真空ポンプとした（イラスト参照）。これが、その後、作動液を水銀より蒸気圧の低い油にすることによって、 10^{-5} Paレベルの超高真空を達成可能な「油拡散ポンプ」へと進化していく。超高真空技術の確立により、加速器を始めとする大型科学機器の利用は大きく進展した。

真空度が低い初期の真空ポンプは、ピストンで空気を引くだけの単純な構造だった。それが中真空、高真空と、産業の発展に伴い、真空に対する要求度も上がっていく。「困ったときの水銀頼み」ではないが、次々と生まれる新たな形式の真空ポンプ、その技術を下支えたのが、水銀が持つユニークな物性だった。しかしその後は、その物性（水銀が持つ毒性）によって別の物質に代替されていき、水銀ポンプの時代も終わっていくことになる。



水銀拡散ポンプの原理

終章

1 「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出来るだろう。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

关于水俣的水俣条約

مؤتمر الموصين المعني باتفاقية ميناماتا بشأن الزئبق

Минаматской конвенции о ртути

Minamata Convention on Mercury

Convention de Minamata sur le Mercure

Convenio de Minamata sobre el Mercurio

国連公用語による水俣条約の正式名称

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。

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が、よほど条約のイメージがわかりやすい。その中であって水俣条約は、「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。

2 不思議な水銀の話

英語に「Myth or Fact?」という表現がある。「それって神話（作り話）?それとも真実?」というような意味になるが、色々な情報が大量に出回る今の時代、何を信じればいいのか迷うことも多いだろう。水銀は、そうした神話のようなトピックを数多く持つ元素である。現在知られている化学元素は、数年前に認定された二ホニウム（Nh）を含めて118種類あるが、その中で発見年が知られていない（つまり太古より存在が知られていた）元素は、水銀を含め10種類程度しかない。昔から人類と深い関わりのある水銀は、その歴史の長さに対応しく、数多の物語を紡いできた。

水銀に関する水俣条約が採択され、グローバルな水銀対策を進める必要が高まってきた今日、その水銀について我々はどれほど知り得ているのだろうか。病気を引き起こす毒としての性質はもちろんであるが、生活に利便性をもたらす物質あるいは歴史的な遺産として、水銀は人間社会のあちらこちらに姿を見せている。環境省は、このような水銀の様々な顔を、できるだけ平易に解説することを目的として、小冊子『不思議な水銀の話』翼を持った悪戯元素の秘密』を制作、公開した。化学物質を取り上げている関係で、理科の基礎的な知識が必要となる項目も少なくな

いが、高校レベルの知識があれば十分理解できるものとなっている。気軽に読み始められるように、トピックごとの「読み切り」とし、気の向くまま好きなページから読むことのできる構成としている。

小冊子を読んで水銀に興味を持ち、「より広く知りたい」と思われた方のために、取り上げるトピック数を大幅に増やしたが、本書『詳解 不思議な水銀の話』である。本書では、トピックをいくつかの章にまとめて、それぞれの視点から理解を深められるようにしている。とは言え、トピックごとの「読み切り」という形式は維持しており、どこから読んでいただいても結構である（そのために説明の重複箇所があることについてはご容赦願いたい）。本書を読み進め、さらに深く理解しようと希望するなら、巻末に記載した参考文献にもあたってみてほしい。専門書や技術文書なども多く難解ではあるが、詳細な情報に触れることで、水銀の世界の広がりを感じられることと思う。

「水銀及び水銀化合物の人為的な排出及び放出から人の健康及び環境を保護すること」を目的とする水俣条約だが、その達成に当たっては、水銀のライフサイクル全体に渡って、適切な管理を進めることが求められる。その時に重要となるのが、正しい情報に基づき「適切に恐れる」ことである。巷間の噂には、真偽の怪しいものも少なくない。そのため、常に、「Myth or Fact?」と自問し、水銀に関する正しい知識を吸収することで、条約に基づき水銀対策への理解も進むものと期待している。

※本書の記載には正確を期していますが、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。

●参考資料

第1章

- 1 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/emergng-issues/lead-and-cadmium>
- 2 UNEP (2019) Global Mercury Assessment 2018. 3. Mercury emission to air. Geneva : United Nations Environment Programme, pp10-19
- 3 渡辺正 (2007) 元素大百科事典、4、地球化学、東京：朝倉書店、pp45-55
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
- 4 木原諄二ほか編 (1999) 金属の百科事典、青化学、灰吹法、東京：丸善、p401、527
渡辺正 (2007) 元素大百科事典、5、金、6、銀、東京：朝倉書店、pp56-76
総山孝雄 (1953) 成形充填、アマルガム編、東京：永末書店、pp27-51
木原諄二ほか編 (1999) 金属の百科事典、アマルガム、東京：丸善、p193
- 5 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
山本伊勢雄 (1956) イトムカ鉱山大町精錬所の概要、日本鉱業会誌 (72) 822、東京：資源・素材学会
- 6 pp875-878
David J. St. Clair (1994) New Almaden and California Quicksilver in the Pacific Rim Economy. California History (73) 4, Oakland : University of California Press, pp278-295
関礼子 (1998) 環境危機への技術的対応、水銀をめぐる技術転換・北海道イトムカ鉱業所の試み、技術と人間 27 (2)、東京：技術と人間、pp11-25
- 7 UNEP (2019) Global Mercury Assessment 2018. 2. Understanding the global mercury cycle. Geneva : United Nations Environment Programme, pp6-9
UNEP (2015) Updated handbook for the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and its Protocols. Geneva, p11
清水誠、土井陸雄 (1973) トムロの水銀蓄積—ローネの実態、生物・医学的意義、科学 43 (6)、東京：岩波書店、pp357-362
- 8 Rawls, James J., and Richard J. Orsi, editors (1999) A Golden State: Mining and Economic Development in Gold Rush California. 2-Making Old Tools Work Better: Pragmatic -Adaptation and Innovation in Gold-Rush Technology. Berkeley : University of California Press, pp20-47, <http://ark.cdlib.org/ark:/13030/tf758007r3/>
- 9 Fisher, J., Jacob, D., Soerensen, A. 編 (2012) Riverine source of Arctic Ocean mercury inferred from atmospheric observations. Nature Geoscience 5 (7), London : Nature Pub. Group, pp499-504
Ornst, D., Agnan, Y., Jiskra, M. 編 (2017) Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution. Nature 547 (7662), Tokyo : Springer Nature Asia-Pacific, pp201-204
Paul F. Schuster, Kevin M. Schaefer, George R. Aiken. 編 (2018) Permafrost stores a globally significant amount of mercury. Geophysical Research Letters (45) 3, United States : American Geophysical Union, pp1463-1471
- 10 国立水俣病総合研究センター、小規模金属水銀漏出時の緊急対応マニュアル (パンフレット)、http://nind.env.go.jp/docs/emergency_manual_jpn.pdf

11 環境省 (2016) 水銀含有農薬眠っていませんか。(リーフレット)。
https://www.env.go.jp/recycle/waste/mercury-disposal/12803_guide4.pdf
山浦弘之、八尋秀典 (2016) 活性炭を利用した水銀処理の開発動向。『フラインクミカル』(7)、東京:
シーエムシー出版、pp14-19
山田淳也、川崎緑、大塚町恵、金田英伯 (2016) 原油・天然ガス生産における水銀への対応、石油技術協
会誌81(5)、東京:石油技術協会、pp401-407

第2章

1 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用途とその変遷、丸善、東京、pp111-121
橋本毅彦、梶雅範、廣野喜幸訳 (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/fnms/suigin_leaflet_law.pdf
平凡社 (1988) 炎色反応、世界大百科事典3、インナーン、東京:平凡社、p718
Willey J. Masschelein、海賀信好訳 (2004) 紫外線による水処理と衛生管理、2・利用可能なランプ技術、
東京:技法堂出版、pp11-57
乾昭文、山本充義、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
田内亮彦、藤岡純、峯山智行 (2015) 産業分野の多様な用途に対応した紫外線ランプ及び紫外線LEDモ
ジュールの最新技術(特集あかりから広がる総合ソリューション技術)、東芝レビュー70(11)、東京:
東芝研究開発統括部、pp20-24
3 電気便覧編集委員会 (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
石原顕光 (2015) 触媒能を表すパラメータ、トコトンやさしい電気化学の本、東京:日刊工業新聞社、

4 pp150-151
日本化学会 (1977) 環境汚染物質シリーズ、水銀、2用途とその変遷、東京:丸善、pp111-121
浮田忠之進 (1965) 水銀と生体・水銀の利用と中毒について、化学20(7)、東京:化学同人、pp23-29
株田高士、山下仁、江川雅人、山田信之、鍋田理恵、宮本俊和、濱田淳、形井秀一 (2001) 鍼灸の安全性
に関する和文文献(8)ー水銀塗布・内臓直刺ー、全日本鍼灸学会雑誌51(2)、東京:全日本鍼灸学会、pp47-
58、

5 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
環境省 (2016) 医療機関に退職される水銀血圧計等回収マニュアル、http://www.env.go.jp/recycle/waste/mercury-disposal/h2803_guide1.pdf
小学館 (1985) 伊勢白粉、日本大百科全書2、インターナショナル、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 lightening products. https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/mercury_flyer.pdf?ua=1

6 US Food & Drug Administration (2019). Prohibited & restricted ingredients in cosmetics. <https://www.fda.gov/cosmetics/cosmetics-laws-regulations/prohibited-restricted-ingredients-cosmetics>
小学館 (1985) ガイヌラー管、日本大百科全書4 (おおこーかき)、東京:小学館、pp625-626
乾昭文、山本充義、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
電気設備技術史編纂委員会 (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

7 球の特性、東京:日本照明工業会、pp5-15
高島芳弘、辰砂の精製、徳島県立博物館、<http://www.museum.tokushima.ac.ed.jp/cc/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こころ、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
- 8 環境省 (2017) あなたの心ごかいが、この星を微笑ませる。、グローバルな水銀汚染を防ぐために (パンフレット) http://www.env.go.jp/chemi/unms/suigin_leaflet_AK1.pdf
- 厚生労働省 (2010) われが、あなたを、あなたを、お魚に、ごちそう知って、お魚に、ごちそう (パンフレット) <https://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/ryaku/syoku-anzen/suigin/dl/100601-1.pdf>
- 9 村尾智 (2013) エシ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 (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
- 10 角南英夫 (2008) 半導体メモリ、1.3μmワークメモリの歴史、東京：コロナ社、pp22-30
- 日刊工業新聞社 (1978) 超音波技術便覧新訂版、3.1超音波遅延線、東京：日刊工業新聞社、pp765-789
- 情報処理学会、インターネットコンピュータ博物館、黎明期のコンピュータ、誕生と発達史の歴史、<http://museum.jpst.or.jp/computer/dawn/history.html>
- 11 情報処理学会歴史特別委員会 (1985) 日本のコンピュータの歴史、第2部手作りの電子計算機、第2章 FUJIC、東京：オーム社、pp63-89
- 久保田博南 (2010) 血圧測定の歴史、医療機器学80 (6)、pp615-621
- 白崎修 (2010) 循環器分野における血圧計の役割と進化、医療機器学8080 (6)、pp622-631
- 橋本毅彦、梶雅範、廣野喜幸訳 (2005) 科学大博物館：装置・器具の歴史事典、血圧計、東京：朝倉書店、pp208-210

第3章

- 1 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5.1版 (パンフレット)、http://nimd.env.go.jp/kenko/archive/suigin_kenko_da5.pdf
- 2 Shirley T. Wajda (2019) Ending the Danbury Shakes: A Story of Workers, Rights and Corporate Responsibility. <https://connecticuthistory.org/ending-the-danbury-shakes-a-story-of-workers-rights-and-corporate-responsibility/>
- Sarah Tziporah Lerman-Sinkoff (2014) Transport and Fate of Historic Mercury Pollution from Danbury, CT through the Still and Housatonic Rivers, 3.Local setting. A thesis submitted to the faculty of Wesleyan University, Middletown, USA : Wesleyan University. pp27-37
- 3 大前 効 (1987) 酢酸ニール製法の過去、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
- 4 水上勉 (1960) 海の牙、東京：河出書房新社、pp6-250
- 国岡彬一 (1996) 特集＝水上勉の世界、「海の牙」、国文学：解釈と鑑賞61 (2)、至文堂編、東京：ぎょうせい、pp65-68
- 橋本道夫 (2000) 水俣病の悲劇を繰り返さないために、水俣病の経験から学ぶもの、東京：中央法規出版、pp30-114
- 5 Staffan B. Skerfving, J. F. Coplestone (1976) Poisoning caused by the consumption of organomercury-dressed seed in Iraq. Bulletin of the World Health Organization 54 (1). Geneva : WHO. pp101-112
- 6 村田勝敏 (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
- 7 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への発達に与える影響を語る、東京：講談社、pp164-189
- IOMC (2008) Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure. Issued by UNEP DTIE Chemicals

- Branch and WHO Department of Food Safety, Zoonoses and Foodborne Diseases, Geneva, pp44-46
- 8 国立水俣病総合研究センター (2014) 水銀と健康, 第5・1版 (パンフレット)
- 9 早川直, 早川智 (2018) 梅毒の疫学: 歴史と現在の遺伝子解析から (特集実は増えている「梅毒」, 臨床研究62 (2)), 東京: 医学書院, pp162-167
- 10 Infectious diseases at the Edward Worth Library, Treatment of Syphilis in Early Modern Europe, Dublin: Edward Worth Library, <https://infectiousdiseases.edwardworthlibrary.ie/syphilis/treatment/>
- 11 宗田一 (1965) 日本製薬技術史の研究, 第三節駆梅用洋法水銀剤の製造, 日本医史学雑誌11 (3), 東京: 日本医史学会, pp81-104
- 12 厚生労働省「毒物劇物の安全対策」<http://www.mhlw.go.jp/mhlw/chemical/doku/dokuidex.html>
- 13 環境省 (2018) 廃棄物となった水銀 (廃水銀等) に対する新たな最終処分方法が規定されました。東京: 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課 (パンフレット) https://www.env.go.jp/recycle/13003_guidel.pdf
- 14 安永玄太, 藤瀬良弘 (2002) 鯨類研究における環境毒性学という分野ー水銀研究を例にー, 鯨研通信413, 東京: 日本鯨類研究所, pp1-8
- 15 坂本峰至 (2015) セレンによるメチル水銀毒性抑制及びセレンと水銀のヒトや海洋生物での存在形態に関する研究, 国立水俣病総合研究センター年報第35号平成26年度, 水俣: 国立水俣病総合研究センター, pp123-127
- 16 環境省 (2013) 水俣病の教訓と日本の水銀対策, 水俣病の発生と拡大, 東京: 環境省, pp2-5
- 17 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 第7節中毒の病態と症状ならびに治療, 東京: 日本公衆衛生協会, pp10-13

第4章

- 1 小幡重一, 海老原要 (1914) 電気抵抗原器の製作, 研究報告第4号, 電気試験所第一部, pp1-6
- 2 国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター, 基本単位の標準 (電気) <https://unit.aist.go.jp/ann/j/library/units/electric/>
- 3 日本化学会 (1993) 化学便覧基礎編2改訂4版, 12・2標準電極電位, 東京: 丸善, pp464-474
- 4 国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター, 圧力真空標準研究グループ, 校正装置, <https://unit.aist.go.jp/riem/pv-std/standards.html>
- 5 河村泰樹 (2020) 水銀の三重点の代替となる温度定点の開発に関する調査研究, 計量標準報告10 (2), <https://unit.aist.go.jp/riem/pv-std/standards.html>
- 6 大鹿謙, 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
- 7 矢沢潔 (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
- 8 Nao Takashita, Ayako Yamamoto, Akira Iyo, and Hiroshi Eisaki (2013) Zero Resistivity above 150 K in HgBa₂Ca₂Cu₃O₈+, [arXiv:1308.0808](https://arxiv.org/abs/1308.0808)
- 9 High Pressure, Journal of the Physical Society of Japan 82 (2), Tokyo: The Physical Society of Japan, pp023711-14
- 10 田村剛三郎, 乾雅祝 (1999) 超臨界金属流体の構造研究ー膨張する水銀ー, Spring-8利用者情報 (5), 日本: 高輝度光科学研究センター, pp38-42
- 11 赤外線技術研究会編 (1991) 赤外線工学: 基礎と応用, 6章赤外線センサ, 東京: オーム社, pp115-154
- 12 国立天文台, すばる望遠鏡, すばる望遠鏡の観測装置, <https://subaru.ulelescope.org/jp/about/instrument/>
- 13 香取秀俊 (2018) 実用デバイスへと進化する光格子時計, パリティ = Parity: 物理科学雑誌33 (10), 東京: 丸善出版, pp6-12
- 14 洪鋒雷 (2018) 新しい秒の定義へのロードマップ, パリティ = Parity: 物理科学雑誌33 (10), 東京: 丸善出版, pp28-32
- 15 矢沢潔 (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2

- 章生物大絶滅の臨界点。東京：技術評論社。pp29-48
- David S. Jones, Anna M. Martini, David A. Fike, Kunio Kaiho (2017) A volcanic trigger for the Late Ordovician mass extinction? Mercury data from south China and Laurentia. *Geology* (45) 7, Boulder, Colo. : Geological Society of America. pp31-634
- 野田徹郎 (1982) 金線による気体水銀の捕捉とその地熱探査への応用。日本地熱学会誌 (3) 3。東京：日本地熱学会。pp149-163
- 羽賀勝洋、粉川広行、浦井隆、花野耕平、二川正敏 (2008) J-Parc水銀ターゲットシステムの完成ー概要とベリタスナー。FAPIG No.177。東京：第一原子力タービン事務局。pp12-17
- Hickson, Paul, Lanzetta, Kenneth (2004) Large Aperture Mirror Array (LAMA) - project overview. Proceedings of SPIE 5382 - July 2004, Bellingham, Wash., USA : SPIE-the International Society for Optical Engineering. pp115-125
- Daniel Clerly (2019) Moon gazing. *Science* (365) 6450, Washington, D.C. : American Association for the Advancement of Science. pp234-237
- Borra, E., Seddiki, O., Angel, R. et al. (2007) Deposition of metal films on an ionic liquid as a basis for a lunar telescope. *Nature* (447), London : Nature Research. pp979-981
- 濱幸雄、阿波稔、新大軌 (2018) コンクリートの凍害メカニズムと気泡の役割・制御 (特集ブレイクスルーのための材料研究：劣化メカニズム)。コンクリート工学56 (5)。東京：日本コンクリート工学会 pp431-435
- 日本非破壊検査協会編 (2010) 新コンクリートの非破壊試験。Ⅲ-8 コンクリート組織の試験方法、東京：技報堂出版。pp112-132
- 考古学ジャーナル編集委員会編 (1998) 特集考古資料としての赤色顔料。月刊考古学ジャーナル (438)。東京：ニュー・サイエンス社。pp1-31
- 南武志、河野摩耶、古川登、高橋和也、武内章記、今津節生 (2013) 硫黄同位体分析による西日本日本海沿岸の弥生時代後期から古墳時代の墳墓における朱の産地同定の試み。地球科学 (4)。東京：日本地球
- 11 化学会。pp237-243
- 熊谷寛夫 (1983) 真空の物理と応用、第1章真空とは何か、東京：裳華房。pp1-26
- 10 日本真空学会 (2018) 真空科学ハンドブック、0 真空科学・技術の歴史。東京：コロナ社。pp1-7
- 橋本毅彦、梶雅範、廣野喜幸訳 (2005) 科学大博物館：装置・器具の歴史事典、気圧計。東京：朝倉書店。pp135-138
- 11 Bridget A. Bergquist, Joel D. Blum (2007) Mass-Dependent and -Independent Fractionation of Hg Isotopes by Photoreduction in Aquatic Systems. *Science* Vol. 318, Issue 5849, 19 Oct 2007, Washington, D.C. : American Association for the Advancement of Science. pp417-420
- 日本環境化学会編著 (2019) 地球をめぐる不都合な物質。第3章水俣病だけではない「世界をめぐる水銀」。東京：講談社。pp88-116

第5章

- 1 Brenner, Erich (2014) Human body preservation-old and new techniques. *Journal of Anatomy* 224, Anatomical Society, New Jersey : Wiley. pp316-344
- 蒲池明弘 (2018) 邪馬台国は「朱の王国」だった。文春新書1177。東京：文芸春秋。pp111-164
- 鈴木尚、矢島恭介、山辺知行編 (1967) 増上寺徳川將軍墓とその遺品・遺体。東京：東京大学出版会。pp28-120
- 2 鶴田榮一 (2002) 顔料の歴史。色材協会誌75 (4)。東京：色材協会。pp189-199
- ホルベイン工業技術部 (1997) 絵具材料ハンドブック。東京：中央公論美術出版。pp16-80
- 橋時政敏 (1990) 示温塗料・塗装工学25 (3)。東京：日本塗装技術協会。pp124-128
- 3 山本洋一 (1973) 日本と世界における防錆防食の歴史：金属の生産と使用を含めて。第1巻。東京：表面処理ジャーナル社。pp13-40
- 桶谷繁雄 (1965) 奈良の大仏はいかにして造られたか。金属35 (12) (449)。東京：アグネ技術センター。pp89-95

- 4 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?水銀鉱山をもとめて?、東京:弘文堂 pp51-66
- 5 吉元昭治 (2009) 日本全国神話・伝説の旅、朱・水銀(空海とも関わりも)、東京:勉誠出版、pp118-1129
- 6 松田壽男 (2005) 古代の朱、五 日本のみい、ちくま文芸文庫、東京:筑摩書房、pp62-74
- 7 都築洋次郎 (2012) 世界科学・技術史年表、II 中世からルネサンス期(8世紀~16世紀)、東京:日本図書センター、pp36-44
- 8 道野鶴松 (1967) 古代金属文化史:その化学的研究、第6章古代中国の金属、東京:朝倉書店、pp106-108
- 9 勢和村史編集委員会編 (1999) 勢和村史通史編、第二章古代・中世の勢和、第二節鎌倉時代の勢和、三重県:勢和村、pp125-138
- 10 野田只夫 (1957) 伊勢白粉座と軽粉株、日本歴史(105)、東京:吉川弘文館、pp15-21
- 11 宗田一 (1965) 日本製薬技術史の研究、第四節朱の製造、東京:薬事日報社、pp42-53
- 12 母利美和 (1989) 井伊家伝来の大名美術、3-1 井伊の赤備えと甲州武田遺臣、日本美術工芸(606)、大阪:日本美術工芸社、pp72-76
- 13 中村達夫 (1970) 彦根藩朱具足と井伊家の軍制、彦根:八光社、pp56-82
- 14 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
- 15 近藤川之 (2011) トナンアメリカ銀と近世資本主義、大津:行路社、pp93-103
- 16 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>
- 17 日本公衆衛生協会 (2001) 水銀汚染対策マニュアル、第一章総論、東京:日本公衆衛生協会、pp3-19
- 18 UNEP (2017) Global Mercury Supply, Demand and Trade, United Nations Environment Programme.

- 9 Global, regional and sectoral consumption of mercury, Geneva: United Nations Environment Programme, pp44-63
- 10 Sebastião Salgado, Léila, Wanick Salgado, Alan Riding (2019) Sebastião Salgado Gold, Serra Pelada gold mine, Cologne, Germany: Taschen GmbH, pp5-9
- 11 所莊吉 (1996) 図解古銃事典、点火法の種類、東京:雄山閣、pp14-41
- 12 岩堂憲人 (1995) 世界銃砲史(上)、第七章連発銃と後装銃、燧石にかわるものー雷管の発明とパーカッション・ロケット、東京:国書刊行会、pp393-405
- 13 山田克哉 (2004) 核兵器のしくみ、第6章なぜ太陽は46億年も輝き続けられるのか?水素爆弾のしくみ、講談社現代新書1700、東京:講談社、pp185-222
- 14 T. Giegerich, K. Batters, J.C. Schweitzer, C. Day (2019) Development of a viable route for Lithium-6 supply of DEMO and future fusion power plants, Fusion Engineering and Design 149 (2019), Amsterdam: Elsevier, pp1-10

第6章

- 1 日本鉄道電気技術協会 (2012) き電・変電技術変遷史、東京:日本鉄道電気技術協会、p15
- 2 草野光男 (1955) 水銀整流器、京都:電気書院、pp1-12
- 3 河井貞治、浅野弘、山崎良夫、益富文男、前川愛一 (1957) 单相商用周波交流電気車、日立評論別冊20号、東京:日立評論社、pp4-18
- 4 吉中百合雄 (1972) 各種シャイロコンパスの解説「上巻」、シャイロコンパスの原理、東京:成山堂書店、pp15-19
- 5 海上保安庁交通部 (2018) 海を照らして150年、航海路標識の歴史と現在、p11(パンフレット)、<https://www.kaiho.mhl.go.jp/soshiki/koutsuu/kitaku/koutrouyousikipanfu.pdf>
- 6 日本機械学会、機械遺産第83号、榎野埼灯台の光学系機械装置、https://www.jsme.or.jp/kikaisan/heritage_083_jp.html

- 谷内琢也 (1986) 特殊潜水船の最新技術、マリンエンジニアリング(21)2、東京：日本船用機関学会、pp99-104
- 3 オーム社 (2017) 電気の世界ウラ話 (第17幕) 電流計ができるまで、OHM104(11)、東京：オーム社、pp43-45
- 日置高志 (1936) 電子工学及電子管、第七章 三極瓦斯又は蒸気封入管、東京：尚賢堂、pp106-116
- 真野国夫ほか (1992) リレーハンドブック、第8章リードスイッチとリレー、東京：森北出版、pp213-222
- 誠文堂新光社 (1958) 無線と実験401回路集、53・電光ニュース回路、東京：誠文堂新光社、p27
- 4 明治大正昭和新聞研究会編集制作 (2012) 新聞集成昭和編年史昭和34年版6 (自11月ー至12月)、電光ニュースで水銀病・技術者に中毒続出、東京：新聞資料出版、p167
- TBSブリタニカ (1973) 水銀法、ブリタニカ国際大百科事典、小項目事典3、コセーセト、東京：TBSブリタニカ、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
- 慈道裕治 (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
- 5 テニー・デービス、訳：姉川慎一、細谷文夫 (2006) 火薬と爆薬の化学、IX章 起爆薬、雷管、火管、秦野：東海大学出版会、pp272-278
- 6 小学館 (1985) こもろ病、日本大百科全書2、いーうう、東京：小学館、p612
- 岡橋正三 (1965) 水銀と農業、化学20(7)、東京：化学同人、pp18-22
- 7 岡村秀雄 (2006) 船底防汚剤による海洋汚染と生態系への影響、安全工学45(6)、pp399-407
- Lucie Nicolas-Vullierme (2017) Vincent Guerre : l'homme qui discute avec les miroirs. Les Carnets de Versailles (ヴェルサイユ宮殿発行のオンライン季刊雑誌)、20 juillet 2017、http://www.lescarnetseversailles.fr/2017/07/vincent-guerre-l'homme-qui-discute-avec-les-miroirs/
- 先田与助 (1971) 日本ガラス鏡工業百年史、第一章大阪ガラス鏡工業の起源と生産のしくみ、大阪：日本
- 8 ガラス鏡工業百年史編集会、pp6-18
- 鎌田弥寿治 (1956) 写真発達史 (写真技術講座：別巻)、東京：共立出版、pp1-16
- 9 林立尚紀 (2012) 図解カメラの歴史 (ブルーバックスBIT81)、第一章カメラの黎明、東京：講談社、pp17-29
- 赤沢政五郎、内野稔 (1936) アルス電気工学大講座第9巻、火力発電所、東京：アルス、pp7-28
- 夏見寛治 (1924) 電力を二重に発生する水銀ボイラーの画時代的發明、電気：通俗文化雑誌4(3)、東京：家庭と電気社、pp14-17
- 10 荒川裕則 (2001) 色素増感太陽電池の最新技術、第12章マーキエロクロム色素太陽電池の開発、東京：シーエムシー、pp143-150
- 11 竹ヶ原春貴 (2019) イオンエンジン (電気推進) の歴史と今後の将来、航空と宇宙：日本航空宇宙工業会会報788、東京：日本航空宇宙工業会、pp1-7
- 宮澤政文 (2016) 宇宙ロケット工学入門、非化学ロケットの現状、東京：朝倉書店、pp24-25
- 12 Glenn Research Center at Lewis Field. Space electric rocket test I (SERTI). NASA. https://www.grc.nasa.gov/WWW/ion/past/60s/ser1.htm
- 熊谷寛夫 (1983) 真空の物理と応用、第1章真空とは何か、東京：裳華房、pp1-26
- 日本真空学会 (2018) 真空科学ハンドブック、0 真空科学・技術の歴史、東京：コロナ社、pp1-7
- 最新実用真空技術総覧編集委員会 (2019) 最新実用真空技術総覧、第2部真空応用システム、第1編低・中真空の利用、東京：エヌ・ティー・エス、pp457-465

終章

1

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

環境省環境保健部水銀対策推進室 (2021)

[詳解] 不思議な水銀の話、東京：環境省

第1版 2021年3月15日発行

文：齊藤 貢

イラスト：プロセスユニーク

本書は、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。

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>