

# 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。

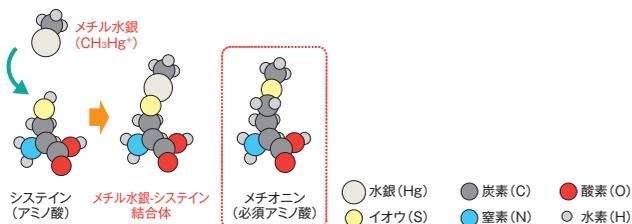
## ○「リスク管理」とは？

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ばく質の一部として合成されてしまい、そのたんば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、生体が持つ「血液脳関門」という防御バリアを通過、脳などの中枢神経にまで達してしまう。脳内に入ったのち、金属水銀が生体の代謝を受けて無機水銀（水銀イオン）になると、前述の「無機水銀化合物の腐食作用」によって、部位に応じた障害を発現することになる。

メチル水銀の場合は、主に食事から経口的に摂取され、消化管から高率で吸収される。メチル水銀も次第に代謝、排出されていくのだが、一部は前述のようにアミノ酸と誤認されて輸送され、たんば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。たんばく質は、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、たんば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。

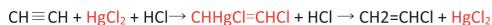
触媒は、反応の前後で変化しないとされているが、実際にはいくつもの中間体が生成され、それが反応条件によつては元に戻らないことも珍しくない（触媒が失活したとも言われる）。その中間体から毒性の高いメチル水銀が生成したことで水俣の悲劇が起きた。その後、水俣病の教訓から水銀を使用しない製造プロセスが求められ、近年は、アセチレンの代わりにエチレンを原材料とすることに、水銀触媒の使用を避けている。

### ○水銀触媒削減の道のり

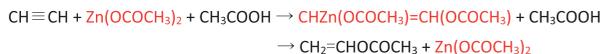
アセチレン（石炭から合成）からエチレン（石油から合成）へ原材料を変更するというのは、言うのは簡単だが、その実態は産業構造を石炭化学から石油化学に大転換するということである。日本では、1960年代まではアセチ

#### ビニル樹脂製造の反応系

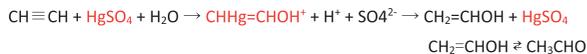
塩化ビニルモノマー（触媒：塩化第二水銀  $\text{HgCl}_2$ ）



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  $\text{HgSO}_4$ ）



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「チッソ」（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。今でもチッ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ッソは、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、チッソは増産を続けていた。水上は、可塑剤におけるチッソ（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、種用を支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。

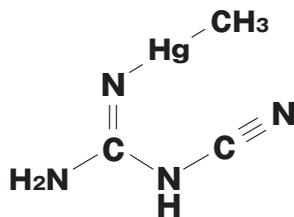
### ○イラクで水銀中毒が発生した経緯

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、畑に蒔いた種用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用は着色され、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も、フェロー諸島で認められたような心理・発達試験の



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

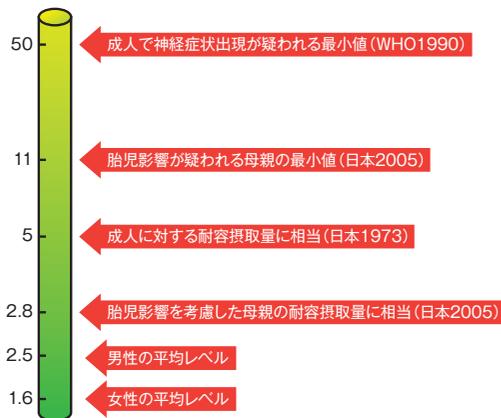
水銀のばく露（危険因子にさらされること）を測る上で、毛髪はとても有用な媒体である。水銀、特にメチル水銀は、1価のカチオン（陽イオン）で、多くのアニオン（陰イオン）と化合物を作るが、そのアニオンの一つにチオール基（ $-SH$ ）を持つアミノ酸のシステインがあり、チオール基の水素を置換する形で結合体となる。その結合体が構造的類似性のため、別のアミノ酸であるメチオニンと誤認され、たんぱく質として合成されてしまう。毛髪はケラチンと呼ばれるたんぱく質でできているため、メチル水銀がたんぱく質として毛髪に組み入れられることになる、それゆえ毛髪を調べることで、体内の水銀量を推し量ることができるのである。

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 ー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附着してしまい、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  
（小型のハクジラの一つ）

写真:PIXTA

さらに「セレン化水銀」( $\text{HgSe}$ )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( $\text{HgS}$ )と類似する部分があると考えられる。「タイムナイト」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取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明らかでない」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。