

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。

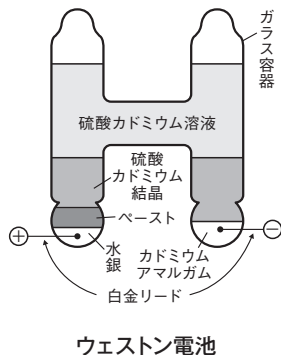
○水銀が電気の標準・基準だった!?

「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



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（83.8038K）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。

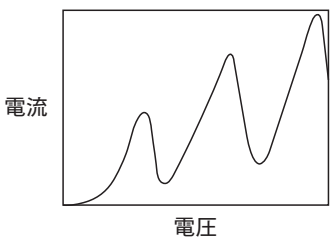
2 水銀が科学の発展の礎となる場合

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。

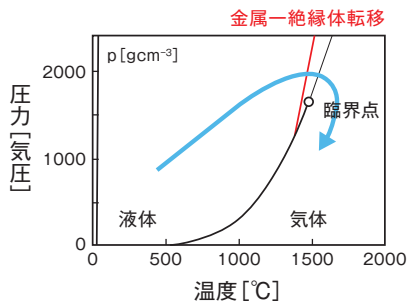
○科学者達の探求に水銀という道標

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。

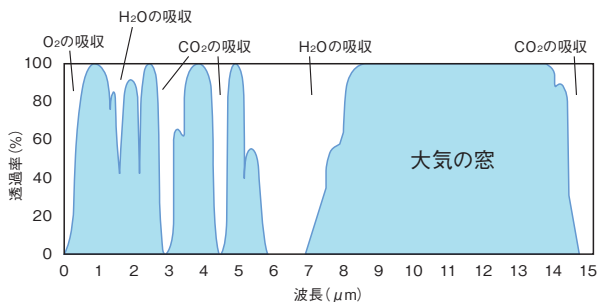
○赤外線で見ることの意義

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。

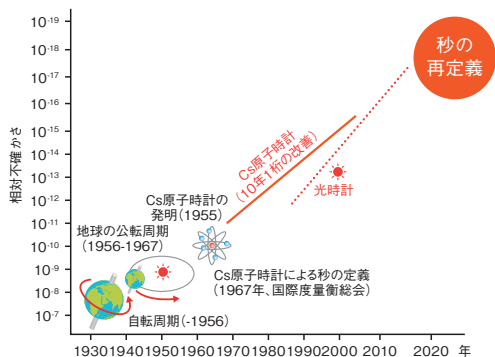
4 水銀が刻む未来の時

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

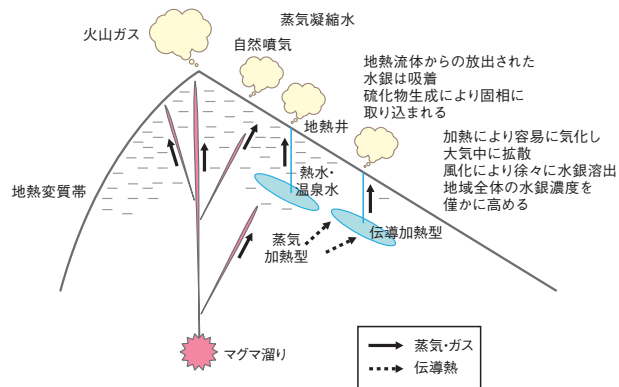
時代は一気に現代の日本に飛ぶ。日本では、噴火予知や地熱資源探査のために、火山の研究が進んでいる。日本は地熱資源に富む国である。温泉はその最たるものだが、他にも発電、暖房、融雪、温室と、地熱の利用範囲は広い。こうした地熱の探査にも、水銀が活用されている。水銀

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査手法は、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

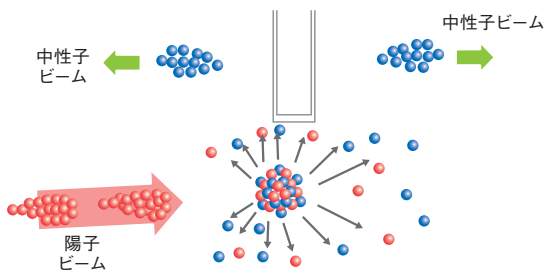
6 水銀がターゲットにされている!?

「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

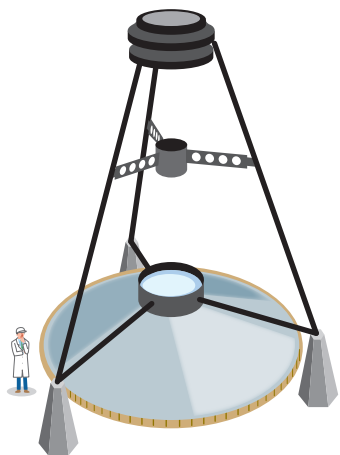
「天頂望遠鏡」とは、個々の星の動きを追わず、真上（天頂）を向いて固定された天体望遠鏡を指す。なぜこのような形にするかと言えば、「安く作れるから」である。巨大かつ繊細な反射鏡を歪み無く動かすには、高精度の制御技術が必要となる。しかし、反射鏡を固定してしまえば、そのような装置は不要だ。いきなりお金の話をすると、いささか夢の無い話と思われるかもしれないが、観測装置の普及も、天文研究の発展に欠くことのできない重要な要素の一つなのである。

○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。

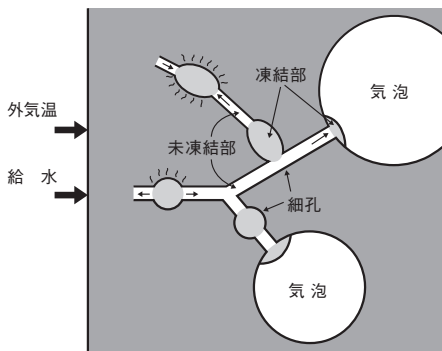
○コンクリートの凍害には表面の微細孔が影響

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サイズのサイズで、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、金属水銀が持つ、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

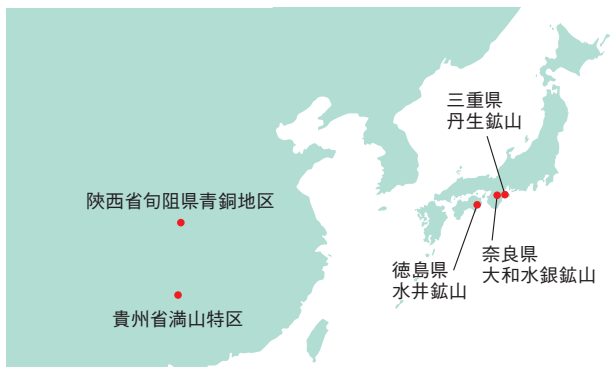
朱（硫化第二水銀）は、縄文時代以降、ベンガラ（酸化第二鉄）とともに彩色土器の赤色顔料として利用されていた。注目すべきは、ベンガラが黄土・赤土など土性顔料として比較的容易に採取できたのに対し、朱は、辰砂（しんしゃ・硫化水銀鉱）という鉱物を採掘・粉碎の上、精製を必要としたため、貴重な資源だったという点である。そのため、朱で彩色された土器は、日用品というより、祭祀用として用いられていた可能性が高い。そして、大陸との交易が盛んになっ

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。

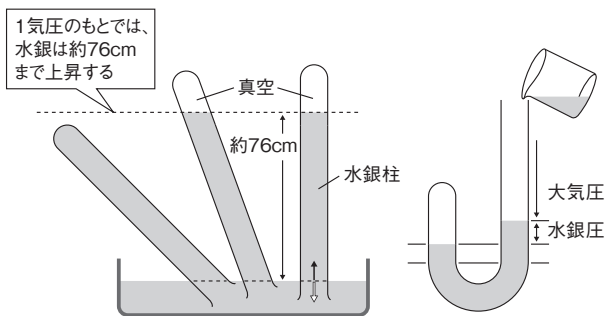
○真空は「存在する」という明らかな証拠

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レーション（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。

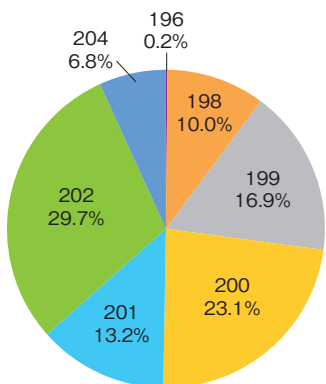
11 同位体で探る水銀の足跡

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。