

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。

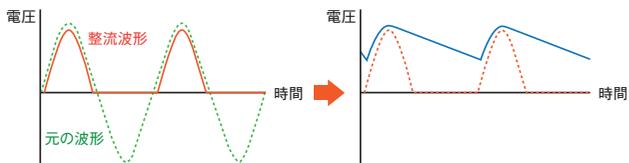
SLの場合、排煙による大気汚染に加えて、一緒に排出される火の粉が周辺の火災を引き起こすとの懸念から、木造の住宅密集地への鉄道敷設には反対の声が大きかった。その問題を解決して都市内の大量輸送を可能にしたのが電気機関車、すなわち鉄道の電化である。鉄道の近代化は、鉄道電化の歴史でもあるのだ。

○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

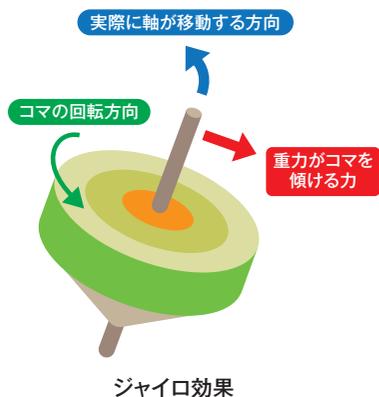
「水銀が船の安全を守る」と聞いて、どう思うだろう。まず、バロメータ（晴雨計）や温度計に使われている水銀を思い浮かべるかもしれない。悪天候は航行の直接的な脅威となるため、気象情報は船舶の安全には欠かせない。確かに水銀を用いた計測器は、電源を必要とせず目盛りを読み取るのも容易で、現場で使う器材として重宝されている。

○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。それもあって、大型船舶のほとんどに装備され、航海の安全を支えている。

ジャイロコンパスは、回転軸が地球と同じ、つまり常に北極星を向くようにあらかじめ調整されているが、地球の自転により重力の方向が変わった場合、それを修正する機能が必要となる。この修正機能に、実は水銀が役立っている。ス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。

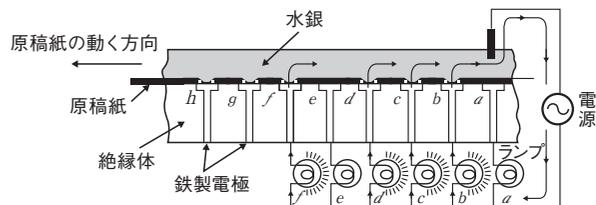
○ニユースを流す看板に使われた水銀

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



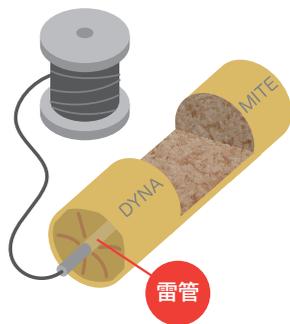
雷汞の化学式

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

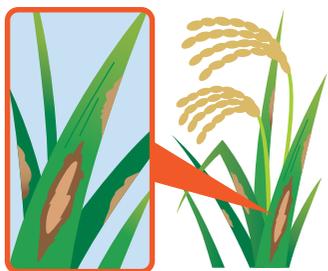
少し前の話になるが、水銀の消毒・殺菌効果を活かした農薬が存在していた。主にカビ類の防除を目的とした種子消毒用として、無機の水銀剤が古くから使われていた。しかし、無機水銀化合物は毒性が強く、かつ薬害も生じやすかったため、その後世界各国で様々な有機水銀

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。

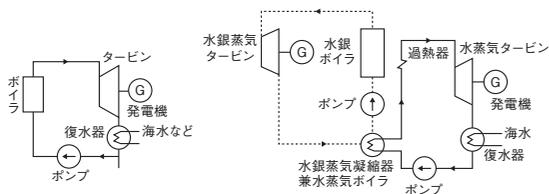
○ランキンサイクルが示す限界と可能性

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°C)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

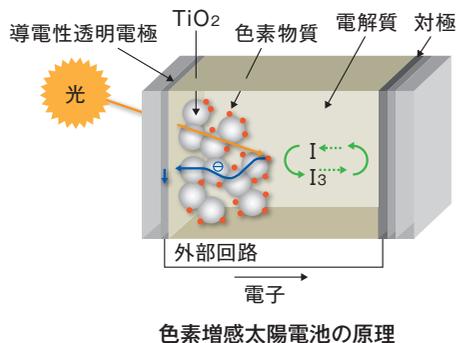
水銀剤ということ、徐々に製品規制の網がかけていく。アメリカの食品・医薬品局（FDA）が1998年にマーキュロクロムの安全性分類を変更し、米国内の流通を止めることに踏み切ると、その後、ドイツやフランスでも販売が停止された。日本では、メルブロミン原液の製造こそ行っていないが、輸入した原液を国内で精製水と調合し、製品として販売している。しかし、「水銀に関する水俣条約」の規定により、2020年以降水銀を使用した局所消毒剤の製造が規制されるため、マーキュロクロムは日本の市場からも早晚消えていくことになる。

○あの「色」が新たな可能性を生むか!?

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

感太陽電池は、シリコン太陽電池に比べて光電変換効率
は劣るが、低コストで、構造上、変形可能な材料で作る
ことができるなど、メリットもある。ただ、現状では劣
化が早く、耐久性の向上が課題となっている。

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。



11 ロケットサイエンスで水銀が活躍

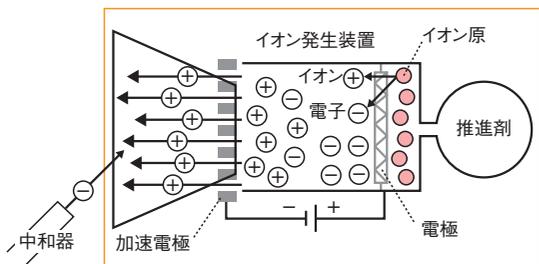
英語の「Rocket science」とは、「過度に複雑なこと」や、「高度な知識が必要であること」の表現として否定的に使われるケースが多い。「これはロケットサイエンスじゃない」「あなたにも十分理解可能なはずだ」という感じである。実際、ロケットに用いられる技術の開発には様々な困難があり、科学技術の英知が極限まで詰め込まれている。

○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

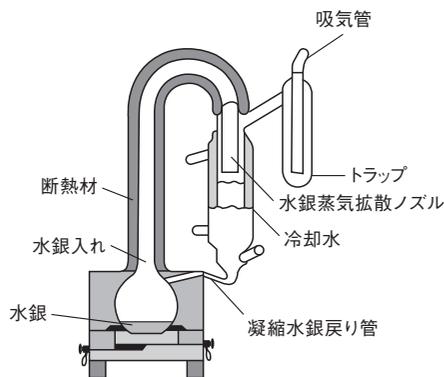
真空の分類	低真空	中真空	高真空	超高真空
圧力範囲	大気圧~100Pa	100Pa~0.1Pa	0.1Pa~10 ⁻⁵ Pa	10 ⁻⁵ Pa~

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