



原子の可視化・再考—＜原子の図像科学史＞のために—

田中, 祐理子

(Citation)

化学史研究, 48(4):183-194

(Issue Date)

2021-12-15

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100477963>



原子の可視化・再考

——〈原子の図像科学史〉のために——

田 中 祐理子*

1. はじめに——「目に見えないもの」から

「再考」という語の示す通り、本稿が主題とする「原子の可視化」については、すでに厚い研究の蓄積がある。不可視が前提であった原子が自然科学研究の対象として確立するには、その「不可視性/可視性」がいかなる障壁となってきたのか、そしてこの二項対立を克服するために、いかに多様な理論的・技術的な工夫、新たな概念の構想や実験的操作の創出がなされてきたか。この主題は、科学史と哲学史の双方にとって、「現代」への転換点を観察するための重要な視座を提供してきたものだと言えるだろう¹⁾。

そのような主題に、原子物理学や原子・分子の化学の歴史を専門としてきたわけではない筆者が取り組むための手がかりとして、1943年に湯川秀樹が「目に見えないもの」とのタイトルで書いた、次の文章を読むことから始めてみたい。

医者はそれを**ばいきん**のせいだという。われわれの目にはそれはもちろん見えないのであるが、医者のいうことは本当だと思う。そして目に見えない**細菌**を徹底的に研究しなければ、この地上から病気を駆逐し得ないことを異議なく承認するのである。……/物理学の場合に、どうして同じようにいかないのであろうか。なるほど**細菌**は顕微鏡下でハッキリ正体を見ることが出来るが、原子の方はそうはいかないという違いが

ある。しかし、例えばウィルソンの霧箱を使えば、一つ一つの電子の通った跡を目に見ることも可能である。両者の相違は要するに程度の相違である。/今日の物理学にとっては、原子の存在は**細菌**の存在に少しも劣らぬ確実性を持った事実である。そして今日の斯学の隆盛それ自体が、原子論的研究法の優越性を示す最もよい事実なのである。²⁾

湯川はここで、彼にとっては「原子も確実な科学的対象だ」ということを説明している。そしてそのために、原子を「**細菌**」と比較する論法を採っている。

長らく趣味的活動としての顕微鏡観察の対象物であった微生物や細菌が、感染症の病理学、および疫学的説明のプロセスの一部に位置づけるべき要素として認識され、これを医学的・生物学的対象とする科学研究を進める体制が発展したのは、19世紀末に近づくころのことであった³⁾。しかし「目に見えない**細菌**を徹底的に研究しなければ……病気を駆逐しえないことを異議なく承認する」という状況に至るまでに、この「顕微鏡下でハッキリ正体を見ることが出来る」「**細菌**」の受容をめぐる生じた科学的・文化的・政治的衝突もまた、決して小さいものではなかった⁴⁾。

そこからおよそ半世紀が過ぎた時期に、湯川がわざわざ原子と「**細菌**」をともに「目に見えないもの」と括りながら、それらが同じくらいの確実性に達したと主張していることは、細菌の可視化と病原体理論の歴史的な関係性を考察してきた筆者にとっては、ことさらに興味深い⁵⁾。湯川が「**細菌**に少しも劣らぬ確実性を持った事実」と述べている「原子の

2021年6月26日受付

* 神戸大学大学院国際文化学研究科

連絡先: tanaka.yuriko@people.kobe-u.ac.jp

存在」を支えるような、「原子の可視化」の歴史的場面があるとすれば、それはいかなるものだったのだろうか。このような関心から、本稿では以下蜚勇を振るって、近年の優れた先行研究の力も借りながら、原子の図像をいくつか辿っていくを試みたい。

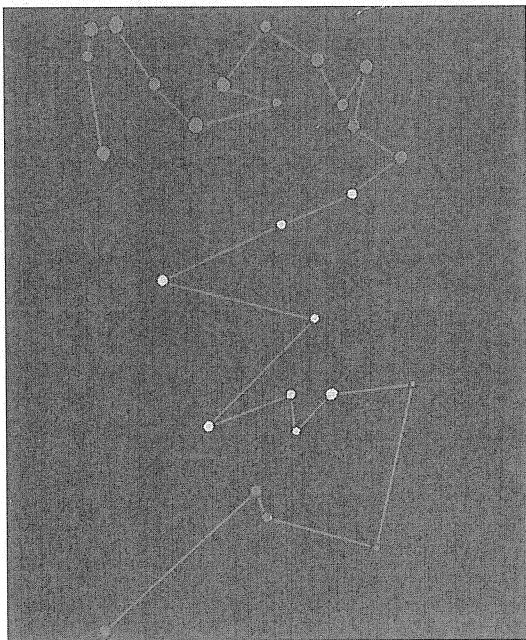
2. 「原子の存在証明」という場面

——ペランの実験と「原子のアイコン」——

その入口として、本稿がまず眺めてみたい「原子の可視化」の歴史的場面は、いわば湯川にとっての物理学の対象が確立された最初の場面であり、また江沢洋氏の古典的名著『だれが原子をみたか』の結論部に描かれた場面である。この場面を象徴するのが、『だれが原子をみたか』の表紙に掲げられている、星座図のような点と線による図像である【図1】。

周知の通り、この図はジャン・ペランの業績を象徴する「ブラウン運動の観察図」にもとづく。

分子・原子の存在証明に関わるペランの一連の実



【図1】『だれが原子をみたか』表紙の図

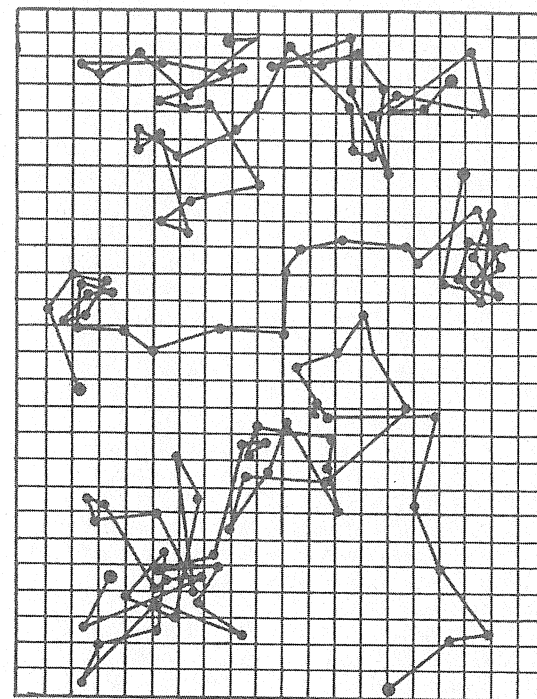
出典：江沢洋『だれが原子をみたか』（岩波書店、1976年）。図の作成には関しては、同書の第24節を参照。

験は、1908年から10年にかけて精力的に発表されたのち、最終的に11年の第1回ソルヴェイ会議において決定的な承認をもって迎えられ、それまで根強かった原子論反対者たち、特にエネルギー論者たちを説得することに大きな影響力をもった⁶⁾。これは、先述した病原理論が、その主要な反対者であった化学物質説や環境説の論者を論駁していった場面から見ると、四半世紀ほど遅れた時期の出来事ということになる。ただし、ここで確認しておくべき重要な違いとして、原子に関しては、いかなる意味においても、その像を観察できるような顕微鏡はこの時点で開発されていない。湯川はここにある違いを「要するに程度の相違」と評しているが、その「相違」を「程度」ととるか、「本質的」ととるかは、それ自体が一つの論点となるべきだろう。

すなわち、『だれが原子をみたか』が描き出す歴史においては、誰も実際には「原子をみる」ということはしない。そこではペランも、そして彼の業績にとって決定的な存在であった1905年のアインシュタインも、原子や分子それ自体を観察することはどうしてもできないのだが、だからこそ、ペランの成功は科学哲学の文脈でも⁷⁾、あるいは視覚文化論の視点からも⁸⁾、今日なお新しい議論を惹起するものであり続けているのではないだろうか。

そのような新しい視野を提示する論者のひとりであるシャーロット・ビッグは、ペランの「原子の可視化」を支えた方法を詳細に跡付けた2008年の論文において、結論として次のことを述べた。「彼の研究発表の最後、この投影される微粒子のランダムな動きは、原子の実在性の証拠となり、そして、その「移動の図」というアイコン (its icon the displacement diagram) になったのだ⁹⁾。

ここで、ビッグが「原子のアイコン」と名づけた図像を、あらためて見ることにしたい【図2】。「いかなる数字も、文字も、記号も、この図を見る者がどのようにこの図を持つべきなのかを教えはしない。実際に、その作成者（あるいは編集者の意図によるものだったのか？）は、場面によってこの図を横向きにして発表した¹⁰⁾。そう書いたうえで、ピ



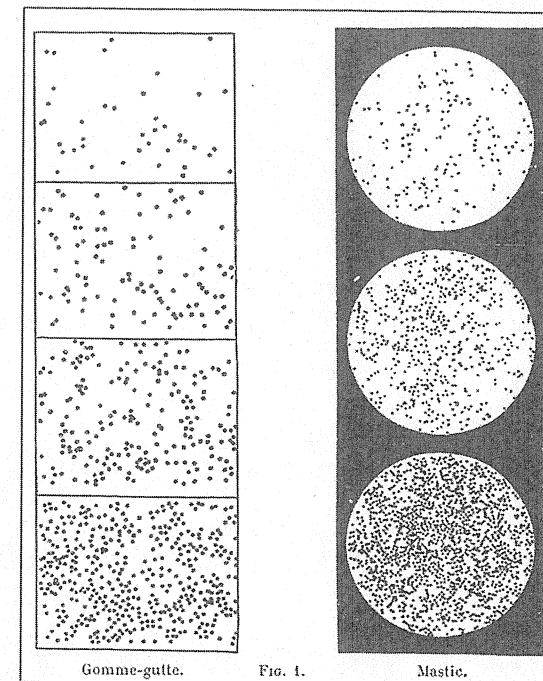
【図2】ペランによる微粒子の移動記録図

出典：Perrin, 『Mouvement brownien et réalité moléculaire』, *Annales de Chimie et de Physique*, 18 (1909), p. 81. ただし本稿では図の鮮明さのため Bigg, "Evident Atoms: Visuality in Jean Perrin's Brownian Motion Research," *Studies in Histories and Philosophy of Science*, 39 (2008), p. 319 より引用。

ッグは以下のように続けている。「しかしこの図を物理学者か数学者に見せれば、すぐに返答があるだろう。『これはブラウン運動だ』¹¹⁾。

このような喚起力を備えた「原子のアイコン」を、ペランはいかに作りあげたのか。本稿では、1910年に発表された、それまでの数々の実験の意義を総括するものとなった論文『Mouvement brownien et molécules』から、その手法を辿ってみることにしたい¹²⁾。

同論文では、2点の図像が使用されている。まず、観察用に準備された2種類の樹脂（ガンボージとマスティック）の微粒子を用いて作製した溶液を、数枚のガラス板を組み合わせる形でプレパラートに密閉し、そのうえで顕微鏡の焦点（溶液の深度）に応じて、それらの微粒子がどのように分布（沈降）しているかを描いた図が figure 1 である【図3】。さ



【図3】顕微鏡写真に基づいて作成された微粒子の分布図

出典：Perrin, 『Mouvement brownien et molécules』, *Journal de Physique théorique et appliquée*, 9 (1910), p. 28.

らに、次はマスティック樹脂の微粒子が溶液のなかで30秒ごとにどのような位置にあったかを、今度はいわば水平的に観察し、そのうち3個の微粒子の移動を記録したものとして（先に見た図2がちょうどビッグの言うように「横向き」にされた状態で）、figure 2が「ブラウン運動の分子運動論は厳密な形で証明される」という宣言とともに挿入されている【図4】。

なお、総35頁の同論文で、これらの図が登場するまでの24頁は、ここで扱われる試料についての説明に割かれている。この説明は、試料の具体的な作製法に関わる部分、および、その試料に懸けられている理論的意義に関わる部分に、大きく分けることができる。そのうち前者についてはビッグの研究が、そして後者に関してはメアリー・ジョー・ナイの *Molecular Reality* の第3章“The Essential Debate”と『だれが原子をみたか』の第7章が、この論文においては一連の流れとして記述されている

34 PERRIN
En résumé, la théorie moléculaire cinétique du mouvement brownien se vérifie de façon rigoureuse et conduit, soit par l'étude de la distribution des grains, soit par l'étude de leur agitation, à la même valeur précise de la constante d'Avogadro, invariant essentiel de la structure de la matière.

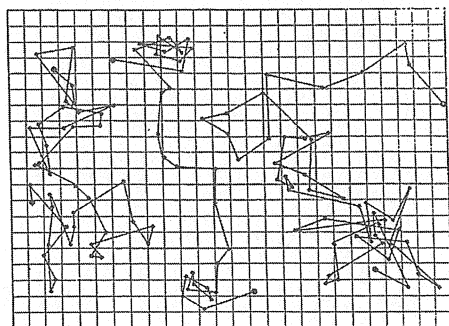


FIG. 2.

Or il y a encore d'autres moyens d'atteindre cette constante. Bien que, pour la plupart, ils ne comportent pas autant de précision, leur concordance est extrêmement significative en ce qui regarde la réalité objective des molécules, à cause de leur extrême diversité. Sans pouvoir les expliquer en détail, je veux au moins les énumérer, afin que cette conférence vous facilite une perspective d'ensemble des phénomènes où la réalité moléculaire sous-jacente s'impose le plus fortement à notre intelligence.

III

21. La formule de diffusion d'Einstein, extrapolée aux molécules, donne l'indice des moyens, si l'on assimile les molécules à des sphères. Elle donne alors, en effet, N_A et le raisonnement de Van der Waals

【図4】ペランの論文における図像の提示例

出典：Perrin (1910), p. 34.

「証明」の手順に辿り着くため、1908年から10年のペランがいかに超人的な試行錯誤を重ねていたのかを詳らかにしてくれている。

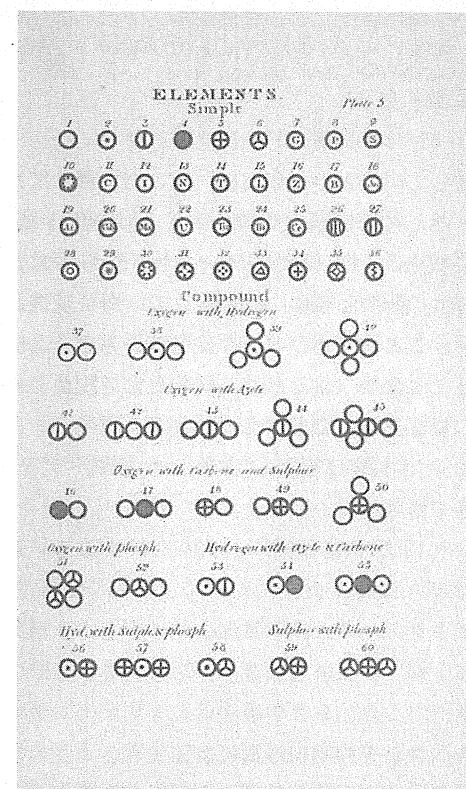
このペランの道程は、1905年にアインシュタインが提出していた式のうち、媒質の粘度、ブラウン運動をなす微粒子の半径、そしてその移動の距離の二乗の平均値と、その移動が観測された時間に当てはまる数値を自らの観察にもとづいて提供すること（それが可能な試料を作製すること）と、これらの数値を気体定数・絶対温度という定数とともに式に当てはめれば、残るもう一つの定数であるアボガドロの法則における気体中の分子の定数を計算できること（計算される数値がきちんと「定数」となること）を目指して、その一步一步が設計されている。たとえば図3は溶液中に分布する微粒子が、気体中

のそれと同様にストークスの法則に当てはまる動きをしていることを確かめるべく、ミクロンの単位で深度を調整しつつ、時間ごとに微粒子がいかなる沈降の動きを見せたかを観察するためになされた作業を示している。この観察と、それにもとづく証明を成立させるために、ペランと弟子たちは観察するための樹脂のコロイド粒子の大きさをほぼ揃える——つまり似た大きさのものごとに、溶液からつまみあげ、集める——という驚異的な準備作業をしている。その作業によって、図3に示された「点」はストークスの式における「粒子径」を満たす数値を備えたものとなり、したがってその移動の記録は、当該の「粒子径」とその沈降の「速度」の関係を表象することになる。なお、これらの粒子を選び出す過程から、その動きを観察する過程へて移行していくなかで、ペランが巧妙に限外顕微鏡と通常の顕微鏡とを使い分けていたことに、ナイは目を向けている¹³⁾。限外顕微鏡を用いている段階では恐らくぼやけた姿で観察されていたであろう粒子が、最新の瞬間撮影によって得られる試料の顕微鏡写真と組み合わせられることによって、実に鮮やかに読者に提示され得たのだとするナイの指摘は、図像作成の技術史としても興味深い。

そのうえで、ストークスの法則に一致するものとしての、この「粒子=点」のうちの3つが、今度はブラウン運動という動きのなかにあるものとして示されたのが図4である。したがって、この図4の「点」については、図3の「点」が示していた性質がそこにも読み込まれながら、その移動、しかも「移動の二乗の平均値」という値に結びつくことができるように、背景としての溶媒を「格子」で区切った形式において、示されているということになる。そして、その「移動の二乗の平均値」は、きちんとアインシュタインの式にあてはまるものとして現れたのだった。それゆえに、この「格子」と「点」と「線」を見たら、思わず移動の計算を始めてしまう物理学者と数学者にとっては、「これはブラウン運動だ」と言うしかない、見事な「アイコン」がここに成立したのだと言えるだろう。

3. 「原子の可視化」を支えた「視覚文化」的文脈？——「数える」と「コマ送り」

ペランの証明実験はアインシュタイン本人が不可能と思っていた、まさしく「体験」を通じてなされる「実証」であり¹⁴⁾、しかもそれによって、「アボガドロ定数」に内包されるものとしての原子・分子の存在に、「観察」という人間の身体的実践を結びつける道を開くものとなった。これによって、それまではあくまで仮説的にとらえられ、計算されてきたものであった気体および液体中の分子数、特にその等量が実際に特定の数値として計算できるということになる。この出来事は、たとえばドルトンが純粋にモデル図として描いたあれらの丸い粒子【図5】を、「目に見える世界」につながる顕微鏡的領域のさらに



【図5】ドルトンが描いた原子・分子を表す記号

出典：John Dalton, *A New System of Chemical Philosophy* (Manchester: S. Russell for R. Bickerstaff, 2 vols., 1808 & 1810), plate V.

微小な内奥に潜んでいるものとして、観察者たちの目前でまさに動いている微粒子の「可視性」に接続させるような力を持っていたのではないだろうか¹⁵⁾。

この点に関わって、ナイの研究は、非常に興味深い前史を示してくれている。*Molecular Reality* の第1章は、ペランの研究がなされる直前の時代状況として、19世紀の反原子論の展開を概観している。そこで執拗に原子論を攻撃した人物として、化学者のマルセラン・ベルトロが登場するのである。

ナイによれば、ベルトロは、まさに江沢の本のタイトルそのままの言葉を発したという。「誰がかつて気体の分子あるいは原子を見たことがあるのか？ (Qui a jamais vu, ...une molecule gazeuse ou un atome?)」¹⁶⁾。ナイが言及しているベルトロの挿話の記録は、1877年の科学アカデミーの週報によって辿ることができる。この数年後、ベルトロはルイ・パストゥールの *germe* 理論——その時点ではブドウの腐敗の原因は空気中の微生物の作用によるものだという主張——に対し、クロード・ベルナールの遺稿を用いて激しく攻撃をしかけることになる¹⁷⁾。これらのベルトロの議論を貫く背景としては、同時代の主流フランス化学と実証主義的姿勢の存在を見ることができよう。

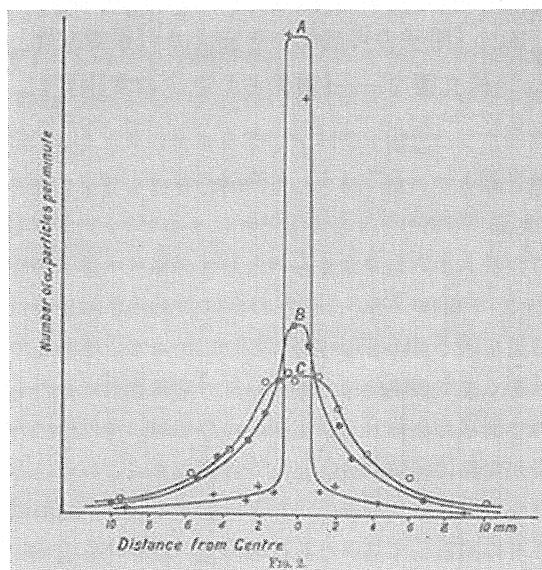
ところで、上述の言葉の直前に、ベルトロは「我々は分子を見ることはない」とことと並べて、「気体の分子を数える方法がない」とも述べている。

たとえばアボガドロとアンペールは次のように述べることで、法則ではなく仮説を述べたのである。すなわち、「あらゆる気体は、同じ体積のうちに同じ数の分子を含んでいる」。しかし実際に、我々は分子を見ることはなく、そして我々はそれらを数えるいかなる方法も持っていない。……/古代原子論の信奉者たちはこの命題を次のように言い換えてきた。「単一の気体の分子は、すべて同じ数の原子を含んでいる」と。そこには2つの仮説的概念が存在している。つまり分子と原子という概念である。繰り返そう、誰がかつて分子あるいは原子を見たことがあるのか？¹⁸⁾

ペランの実験と図像はまさしく「分子・原子を数える方法などない」なかで、それらの代わりに数えられるものを数え、それらの代わりに見えるものを描き出すものである。しかもそれらは「点」で示されている。これらの点は単なる記号ではなく、そこでは「ほぼ同径の微粒子を選び出す」という困難な準備作業がなされていた。その結果として、そこで数えられた「点」は、アボガドロらの「仮説」を支えていた、そもそものドルトンのモデル図ときわめて似た姿をもって現れている。ここには、ビッグが「ペランの業績は、彼の時代における文化的・科学的素地のうちに織り込まれたものだ」¹⁹⁾という表現で指摘した事実の、一つの側面を認めることができるのではないだろうか²⁰⁾。「丸い点を数える」ことには、「彼の時代」の以前から紡がれてきた文化的・科学的文脈をも結ぶ意味を読み取れる。

なお、この「点」を「数える」という行為と「不可視の原子の存在」との関連性に目を向けるとすれば、同じく1908年から1911年にかけてなされていた、ラザフォード、ガイガー、マースデンの「物質による α 粒子の散乱」に関わる一連の実験についても、ここで思い起こすことができるのではないか。ラザフォードらの実験では、 α 線を照射されるスクリーン上に塗布された亜鉛スルフィドと接触して発生する蛍光を通じて、肉眼では観察されることのない原子が、「数える」という作業の対象とされた。ペランの実験と同様に、ラザフォードらの実験においても、複数の視覚的体験を組み合わせる間接的・複合的な方法が駆使され、 α 線に含まれる α 粒子の数を一定時間ごとに数えあげられた²¹⁾。それによって、実験装置に挟み込まれたスリットに使用された物質に含まれる原子と α 粒子の「衝突」の痕跡がとらえられ、最終的には原子核の模型化につながる「散乱」の発生を提示することまでが実現された【図6】。

ペランの図像と同じくラザフォードらの業績においても、一定の間隔の時間の経過と、それぞれの瞬間の粒子の位置の記録を示すことが、目に見えない原子の次元で生じている運動と、可視的な事象における運動の記録とを、最終的に統合するような論理



【図6】 燐光性塗料が塗布されたスクリーン上での α 線の衝突点=発光点の中心からのずれを示すグラフ

出典：Geiger, "On the Scattering of α -Particles by Matter," *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 81, 1908: 174-177, p. 176.

に帰結していたという事実には、ここで注目しておきたい。そしてその事実に関わって、「運動」の記録および表象という側面においても、恐らく重要な「文化的・科学的素地」が関与していた可能性があるということ、再びビッグの研究から確認しておくこととしたい。すなわち、瞬間として捉えられた事物の姿を連続的に並置することで「運動のイメージ」を産出する技術としての、「シネマトグラフ」の関与である。

ビッグによれば、ペランの1908年からの一連の実験は、きわめて直接的な形で、1908年に発表されたヴィクトール・アンリによる「ブラウン運動のシネマトグラフによる研究」から触発されたものだという²²⁾。このアンリの手法は、エティエンヌ＝ジュール・マレーの連続写真による生理学研究の遺産を、同時代的な顕微鏡技術の発展と組み合わせることで実現されたとされる。

断続的に捉えられた点を線でつなぐことによって、空間的・時間的な「運動」を想像するという

「コマ送り」への感受性は、「世紀転換期のバリ」という場所に生まれていた歴史的な「視覚文化」の果実にほかならない²³⁾。今日の映像文化を当然のものとしている身では看過しやすいことだが、ペランの業績が同時代の文化・科学の複合的な産物によって支えられていたものであるとするビッグの指摘には、先述した図3の作成での顕微鏡写真技術の活用に関するナイの指摘とも相俟って、大きな説得力がある。

4. むすびに代えて——現在に向けて

ここまで見てきた場面において、「原子の可視化」の図像とは、主に、不可視の原子の動きの「余波」としての可視的事物の運動を写すものであった。それはいわば「不可視の原子が可視的世界に刻む痕跡」を、それ自体は不可視なままに留まる原子の「存在証明」として掲げるようなものだったと言えるのではないだろうか。痕跡を通して、その痕跡を生み出す原因としての、原子の存在を人々に「見させる」。そこには確かに、「シネマトグラフ」をも含む、視覚を支える異種多様な諸条件が動員されていたものと考えられる。

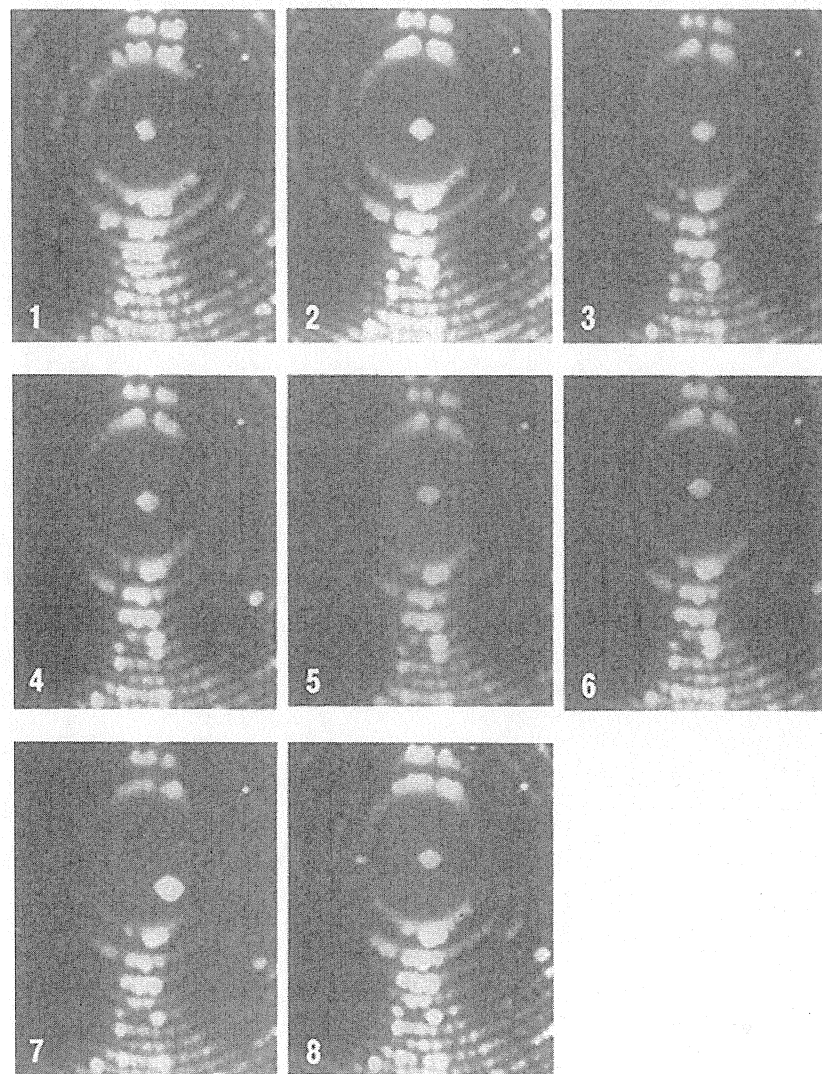
「原子の可視化」のそのような困難さ、精妙さを考えれば、湯川があっさりと書いている「ウィルソンの霧箱を使えば、一つ一つの電子の通った跡を目に見ることも可能である」という文言も、もちろん決して単純に受け止めるわけにはいかない。ピーター・ギャリソンは20世紀への世紀転換期に「ウィルソンの霧箱」が「可能」にした視界について、それがいかに——当の霧箱が開発される以前から時間をかけて築かれてきた——観察者の思考における、「雲」なる存在をとらえるための理論的準備に支えられたものであったかを活写した²⁴⁾。このギャリソンの記述する歴史にとって「霧箱」の提供した視野はいわば出発点をなすものであり、そこから原子および分子をめぐることは、さらに複数の異なる「確実性」の根拠が生成し、かつ、激しく対立する場面が訪れることになる。「誰が原子を見たのか」という問いに答える歴史は、ペランにおいてひとつの「完成」を見ることができるとしても、そこで「原子を見る」

ことに関わる歴史が「完遂」されるわけではない。

現在も展開し続けている、そのような「原子の可視化」の歴史を描き切るにはとても至らないが、その一端に僅かでも触れることを念じて、3種の原子の図像を掲げながら、本稿を閉じることにしたい【図7】【図8】【図9】。

「誰が原子を見たか」をめぐる歴史は、ペランの実験で終わるものではない。実はそのことについては、2013年になって江沢氏が『だれが原子をみたか』増補版に追加した図版が、伝えてくれている。増補版には2種類の図版を追加されているが、その一つが、図7の電界イオン顕微鏡 (Field Ion Microscopy, FIM, 以下FIMという) による画像である。光による「視覚」に代わる、電子線を用いた原子的空間の「画像化」に関わる技術開発が加速した1930年代以降、「原子の可視化」が新たな段階を迎えたことは周知の通りである。その「画像化」の試みは1990年、有名なIBMのアイグラーとシュヴァイツァーによる論文に掲載された、走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy, STM, 以下STMという) による「原子を動かす」画像、つまり図8に到達する。

図7・8で実現されている「原子の可視化」は、それぞれに高度に操作された空間での現象を、さらに各々に独自の処理を経て可視的な画像としたものであり、20世紀初頭の実験室設備と光学顕微鏡を駆使してなされたペランの「実証」とは、異なる理路での解釈を要するだろう。たとえば、アイグラーとシュヴァイツァーの論文のタイトルがPositioning single atomsという語を使っており、同様のSTMによる原子像を紹介するために江沢が「原子をつかむ、移す」²⁵⁾という表現をしていることに注目するなら、そこにおいて原子は「可視性」との関係からその「存在」が問われるのではなく、もはや、これを「操作」することに主な関心が寄せられるべき、すなわち技術的干渉にとっての対象としての「確実性」を獲得しているかのようにも感じられる。これらの「原子の可視化」はペランとも、そして湯川にとっての「確実性」とも異なる、また別の歴史的段



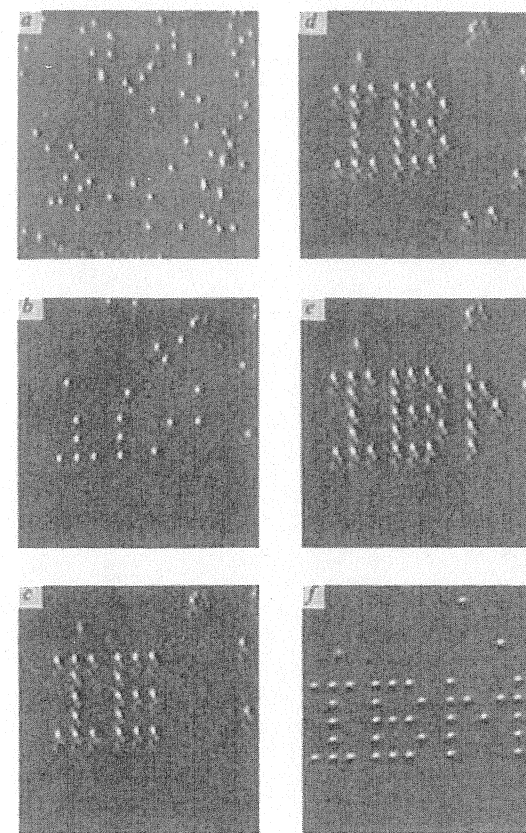
【図7】電界イオン顕微鏡によるタングステン原子のブラウン運動の像

出典：江沢、『だれが原子をみたか』（岩波現代文庫版、2013年）、p.378.

階にあるものなのだろうか²⁶⁾。これについては本稿では問いとして確認するに留まるが、今後も探究すべき課題としたい。

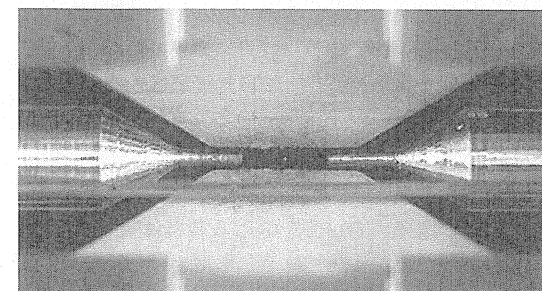
ところで、上に述べた原子を対象とする「操作」とは、今日では量子コンピュータの量子ビット操作における活用の模索にまで——すなわち、ごく基本的な「部品」としての段階にまで——展開してきているものでもある。図9はその研究のさなか、「普通のカメラ」で撮影したとされるイオントラップ装

置内のストロンチウム原子の姿である²⁷⁾。レーザーを照射されたストロンチウムイオンが光の粒子を放出する過程を、長時間露光の技法を用いて撮影したこの写真は、2018年度の英国・工学物理科学リサーチカウンシル最優秀科学写真に選出された。撮影したデビッド・ナドリンガーはイオントラップ型量子コンピュータの開発に従事する大学院生であり、彼の専門領域から判断すれば「このイメージの科学的価値は実質上ゼロ」だと述べている²⁸⁾。「科学的



【図8】走査型トンネル顕微鏡によるキセノン原子の像

出典：D. M. Eigler and E. K. Schweizer, "Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope" *Nature*, 344 (1990) : 524-526, p. 525.



【図9】オックスフォード大学物理学部イオントラップ・コンピューティング研究グループのDavid Nadlingerが撮影した写真。

出典：<https://www2.physics.ox.ac.uk/research/ion-trap-quantum-computing-group> [accessed 06/25/2021]

価値ゼロ」であり、それでいながら実に美しいと感じずにいられないこの写真は、図7・8と比すればむしろペランの用いた顕微鏡写真とつながる、人間にとって可視的な光によって実現されたものである。この「単一の原子」の「可視化」についても、独自の歴史的な位置づけが可能かもしれない。

ここに駆け足でとりあげた3点の画像が作成された各時期の、「原子の可視化」をめぐる理論的・技術的実践について包括的に論じることは、言うまでもなく本稿の分を大きく超えている。ただ20世紀半ば頃、金属の結晶内転位をめぐって金属学者たちがいかなる態度を示したか、ことにその「实在」と「理論的有用性」に関する否認と受容を詳細に辿った山口まり氏の研究²⁹⁾は、当該の時期に原子の水準にある対象を「操作」すること、すなわち「技術化」という価値と、事物の「实在」に関わる高度に理論的な理解（もしくは単なる受容）とが、きわめて複雑に、ときに説明不可能にすら見える一種の「時代的趨勢」のような流れのなかで変遷を見せていたことを、私たちに教えてくれている。そこでもなお、「転位など存在しない。あるなら見せろ」³⁰⁾という要求をめぐって、その理解の歴史が展開したのだとされる。「見せること」と「信じさせること」が結びつくかぎり、科学の歴史における画像の役割は消えることがないだろうと思われる。この役割の意味について、筆者なりに今後も考察を続けていきたい。

謝辞：本稿は2020年度化学史学会におけるシンポジウム「科学史における画像」での報告にもとづくものです。画像科学史研究グループの方々をはじめ、報告に際してご教示いただいた皆様、とりわけ、門外漢の筆者が学ぶべき重要な論点やそのために参照すべき貴重な資料・文献について、大変細やかに教えてくださった菊池好行氏と山口まり氏のご厚意に、心より感謝申しあげます。

注

- 1) なかでも本稿の問題関心は以下の三点の文献に多くを負うものである。Mary Jo Nye, *Molecular Reality: A Perspective on the Scientific Work of Jean*

- Perrin (New York: Elsevier, 1972); Alan Chambers, *The Scientist's Atom and the Philosopher's Stone: How Science Succeeded and Philosophy Failed to Gain Knowledge of Atoms*, (Dordrecht: Springer, 2010); 江沢洋『だれが原子をみたか』(岩波現代文庫, 2013年[初版: 岩波科学の本, 1976年]).
- 2) 湯川秀樹『目に見えないもの』(講談社学術文庫, 1976年), p. 149.
 - 3) 顕微鏡の技術的改良と, その観察の科学的位置づけの変遷に関しては以下を参照できる. Jutta Schickore, *The Microscope and the Eye: A History of Reflections 1740-1870* (Chicago: Chicago University, 2007); Marc J. Ratcliff, *The Quest for the Invisible: Microscopy in the Enlightenment* (London & New York: Routledge, 2009).
 - 4) 細菌病理学の発展と受容をめぐる政治的・科学的・文化的水準での葛藤を詳細に描出した研究として, 小川眞理子『病原菌と国家——ヴィクトリア時代の衛生・科学・政治』(名古屋大学出版会, 2016年). および, 同時代における科学的対象としての細菌の表象の確立の歴史に関して, 拙著『科学と表象——「病原菌」の歴史』(名古屋大学出版会, 2013年).
 - 5) 顕微鏡による微生物の観察と細菌学の開始は同時ではなく, 細菌学が感染症の病理学と結びつくまでにもいくつかの歴史的段階が必要だった. この過程は, 原子の可視化と理論の発展と並置すると, 外観的には「正反対」とも捉えられる. 両者の比較研究は筆者にとって今後の課題であり, 本稿はその準備的考察に留まることを許されたい. cf. 拙稿「生きているものをとらえる難しさ」『病む, 生きる, 身体』所収(青土社, 2019年), pp. 305-313.
 - 6) Nye, op. cit., pp. 143-157. 当該の時期のペランによる代表的な業績としては以下. Jean Perrin, 《L'origine du mouvement brownien》, *Comptes rendus*, 147 (1908): 530-532; idem, 《Mouvement brownien et réalité moléculaire》, *Annales de Chimie et de Physique*, 18 (1909): 1-114; idem, 《Mouvement brownien et molécules》, *Journal de Physique théorique et appliquée*, 9 (1910): 5-39; idem, 《La réalité des molécules》, *Revue Scientifiques*, 19 (1911): 774-784; idem, *Les Atoms* (Paris: Librairie Felix Alcan, 1913); idem, 《Les preuves de la réalité moléculaire》in *La théorie du rayonnement et les quanta*, (eds.) P. Langevin and M. De Broglie (Paris: Gauthier-Villars, 1913), pp. 153-251.
 - 7) 先述のChambersに加えて筆者はKlodian Cokoの議論からも重要な示唆を得た. cf. Klodian Coko, “Jean Perrin and the Philosophers' Stories: The Role of Multiple Determination in Determining Avogadro's Number,” *HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science*, 10-1 (2020): 143-193.
 - 8) 本稿が「図像と科学史」という主題に取り組む際の主要な参照軸としてクラウス・ヘンツェルが提起した「科学・技術と視覚文化」の視角がある(Hentschel, *Visual Cultures in Science and Technology: A Comparative History* (Oxford: Oxford University Press, 2014); cf. 橋本毅彦「W. L. ブラッグとL. ポーリングの分子構造研究と視覚表現技法」, 『化学史研究』第48巻第1号(2021): 35-47, p.35). ヘンツェルは1890年から1910年にかけてのペリを舞台に表出した「視覚文化」の事例に言及している(Hentschel, op. cit., p.388)が, これは本文でも詳述するビッグの以下の研究を参照している. Charlotte Bigg, “Evident Atoms: Visuality in Jean Perrin's Brownian Motion Research,” *Studies in Histories and Philosophy of Science*, 39 (2008): 312-322; idem, “A visual history of Jean Perrin's Brownian motion curves, in *Histories of Scientific Observation*, (eds.) L. Daston and E. Lunbeck (Chicago: University of Chicago Press, 2011), pp. 156-179.
 - 9) Bigg (2008), p. 321.
 - 10) Bigg (2011), p. 156.
 - 11) ibid.
 - 12) 1910年の論文で論じられている各実験についてのより詳細な説明として, 1909年の記述も補完的に参照する.
 - 13) Nye, op. cit., p.107. ペランが限外顕微鏡を使用していたことに注目する視座の重要性は, 査読者のご指摘による. すべてを挙げることはできないが, 他の箇所での貴重なご教示とも併せ, 査読者に深謝申しあげる.
 - 14) Bigg (2011), p. 156.
 - 15) 本稿では紙幅の事情により詳しく言及することはできないが, これらの原子=粒子のイメージの歴史をさらに遡り考察した重要な研究としては以下を参

- 照. Christoph Lüthy, “The Invention of Atomist Iconography,” in *The Power of Images in Early Modern Science*, (eds.) W. Lefèvre, J. Renn & U. Schoepflin (Basel/Boston/Berlin, Birkhäuser Verlag, 2003) pp. 117-138.
- 16) Nye, op. cit., p.7; “Atoms and Equivalents,” *Nature*, 16 (1877): 293-294; *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, t.84 (1877): 1189-1195, p. 1194.
 - 17) 詳細は拙稿「パストゥールとベルナールの論争——19世紀医学のある転回点について」金森修編『合理性の科学——フランスの科学思想史』(東京大学出版会, 2012年)所収.
 - 18) *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, op. cit., pp. 1193-1194.
 - 19) Bigg (2011), p. 158.
 - 20) この「文化的・科学的素地」に関しては, 同時代において化学式が果たしていた機能を考慮することでもできるのではないかという重要な示唆を, 菊池好行氏よりいただいた. 本稿ではこの主題を深めるまでには筆者の力が及ばないが, ご教示いただいた重要文献のなかでも, 特にベルトロの発言が直接的に向けられていた対象であったアドルフ・ヴェルツを接点として同主題に接近できるものとして, 以下がある. Alan J. Rocke, *Image and Reality: Kekulé, Kopp, and the Scientific Imagination* (Chicago: Chicago University Press, 2010). 分子構造の立体性に関わる「想像力」の発展はパストゥールの科学的経歴とも直結する主題であり, 引き続き筆者が学ぶべき課題としたい.
 - 21) Hans Geiger, “On the Scattering of α -Particles by Matter,” *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 81, 1908: 174-177, p. 176. cf. Ernest Rutherford and Hans Geiger, “An Electrical Method of Counting the Number of α -Particles from Radioactive Substances,” *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 81 (1908): 141-161; Hans Geiger and Ernest Marsden, “On a Diffuse Reflection of the α -Particles,” *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 82 (1909): 495-500; Ernest Rutherford, “The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom,” *Philosophical Magazine*, series 6, 21 (1911): 669-688. なお, ここで触れている実験において発光を観察するために活用されたスピンスコープは, ウィリアム・クルックスによって開発されたのち, 同時代には遊具としても広く普及した. ペランの初期の研究とクルックス管の直接的な関係性, そのペランの研究関心へのH・G・ウェルズの影響などを考慮すると (cf. Nye, op. cit., Chapter 2), ラザフォードらの実験とペランの実験とのあいだには, さらなる「文化的・科学的素地」を読み取ることができるよう考えられる. スピンスコープに注目する観点とは, 査読者のご教示による.
 - 22) Bigg (2011), p. 171.
 - 23) 当該の視覚文化・視覚性に関わる表象文化論研究の重要な仕事として, 松浦寿輝『表象と倒錯——エティエンヌ＝ジュール・マレー』(筑摩書房, 2001年).
 - 24) Peter Galison, *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics* (Chicago: Chicago University, 1997), esp. Chapter 2.
 - 25) 江沢 (2013), p. 379.
 - 26) 図7・8について, 画像製作技術としてペランの写真術とは大きく異なる一方, 両者とも「コマ送り」の効果を活用して「原子の動き」を伝えていることを, 山口まり氏からご指摘いただいた. ビッグによる「文化的・科学的素地」の分析を, この事例までつなげる歴史的文脈として援用することが可能かもしれない. また「操作」と「確実性を持った事実」の関連という主題を考察するという点から, ここでイアン・ハッキングの「私にかんする限り, 吹きかけることができれば, それは実在する。」という言葉想起することもできるだろう (Ian Hacking, *Representing and Intervening: Introductory topics in the philosophy of Natural Science*, (Cambridge, Cambridge University Press, 1983), p. 23.; 邦訳『表現と介入 科学哲学入門』渡辺博訳(ちくま学芸文庫, 2015年), p. 62).
 - 27) David Nadlinger, “WIP: Photographing a Single Atom (/blog/2018/02/photographing-a-single-atom/),” <https://klickverbot.at/blog/2018/02/photographing-a-single-atom/> [accessed 06/25/2021]
 - 28) ibid.
 - 29) 山口まり「顕微鏡による視覚化と実在の信念について——1940年代から60年代における結晶内転位の顕微鏡観察から」『科学哲学』第53巻第2号(2020): 115-131.
 - 30) ibid., p. 118.

Retracing the 'Visualization of the Atom': Toward a Graphical History of Atomic Science

Yuriko TANAKA (Kobe University)

In a 1943 essay, Yukawa Hideki used the argument of comparing atoms with bacteria, pointing to the fact that they are both invisible to the human naked eyes, to maintain that for him "the existence of atoms is a fact with no less authenticity than that of bacteria." Those words on the atom as the authentic scientific object were written just about half a century after the historical scene at the end of the 19th century, when the system for scientific research on bacteria as medical and biological objects dramatically developed. In the background of these historical shifts, however, the procedures practiced in the 'visualization' of atoms, that seems to have supported "the existence of the atom" for Yukawa, would have been intrinsically different from those of bacteria, long-time familiar observable objects for optical microscopy.

This paper attempts to trace, with a great deal

of help from previous studies, some historical scenes of the 'visualization of the atom.' Especially this paper examines in detail the images that composed Jean Perrin's proof of the existence of atoms and molecules, published in his papers from 1908 to 1910 and finally received with approval at the First Solvay Conference in 1911, which was highly influential in persuading the opponents of the atomic theory. As Charlotte Bigg's study argues, the procedures of Perrin's experimental confirmation and 'visualization' of atoms and molecules can be considered deeply interwoven into "the cultural and scientific fabric of his times." After tracing diverse components of this "cultural and scientific fabric," this paper will look at some images that may indicate the transformations in the history of atomic visualization following the Perrin's moment until today.