

この世界は「四元素」で できていると考えた

— 観察・実験の姿勢

化学は「物質」を研究する学問です。化学の歴史は、人間そのものの歴史といえます。

まず、古代の人々が物質をどのように考えていたのか。そこから化学の歴史を紐解いていくことにしましょう。

古代の人々も、「物質とはどのような物なのか？」について考えていました。その物質観は現代の物質観とはかなり異なるものですが、逆に、現代の最先端の物質観とは妙に似ている部分もあります。

ただ、古代の物質観の特徴は「観念的なもの」であるということです。そこには「考える」という姿勢はあってもサイエンスにとって重要な、「観察する」「実験する」という姿勢は見られず、そこが現在の物質観と大きく異なります。

● デモクリトスの原子論（古代原子論）

古代ギリシアの哲人「デモクリトスの原子論」としてあまりに有名なのが「古代原子論」です。デモクリトス（紀元前460～紀元前370年頃）は、彼の師レウキッポスの原子論を継承・完成させたと

いわれます。この古代原子論とは、「目には見えず、それ以上分割することができない原子（アトム）が、無限の空虚（ケノン）の中を運動することによって、世界が成り立つ」とする説です。

この説で重要なことは、「物質」である原子と、「真空」に相当する空虚をすでに考えていたことでしょう。なぜ重要かといえば、この考えは現代の物質観に通じるものがあるからです。

また、古代原子論では、感覚や意識は単なる原子の配列の結果に過ぎないとして、その実在を認めませんでした。「魂もまた、原子によってできている」と考えたのです。

万物を「原子が支配する法則」であると考えた唯物論的原子論は、道徳論と結びつきやすい観念論とは一線を画すものであり、その後の西洋科学思想の根幹を流れるものとして注目してよいでしょう。

● 四元素説「土、水、空気（風）、火」

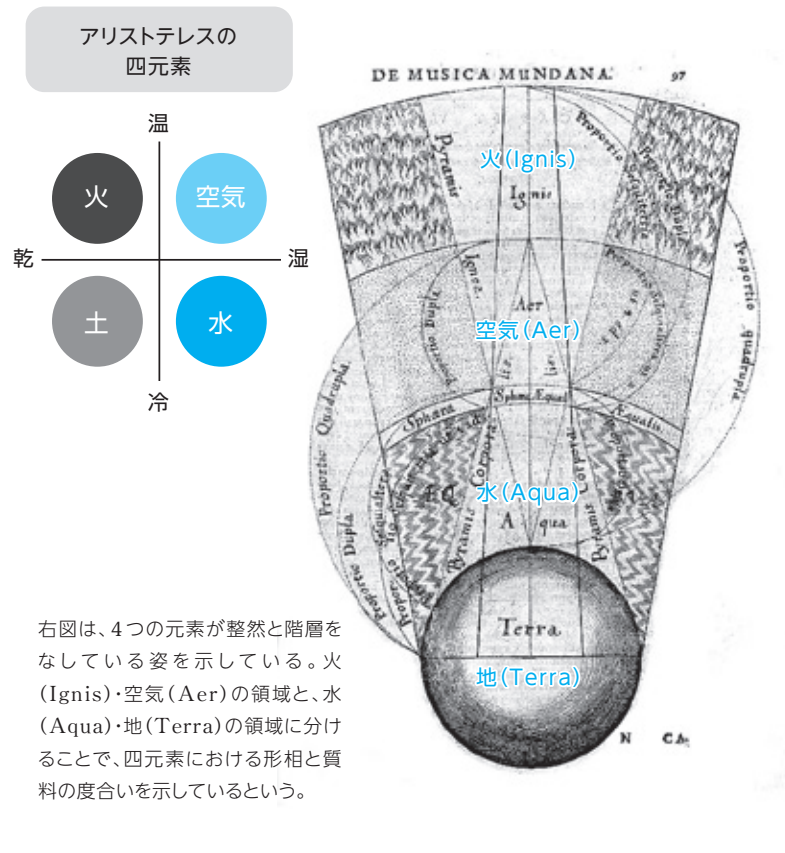
この世界を構成している物質は、4つの元素（要素）でできているとする考え方を「四元素説」と呼んでいます。この考えは、西洋、東洋を問わずに支持され、後の錬金術の思想のなかにも入りこんだだけでなく、東洋独特の倫理・道徳観のなかにも入りこんでいます。

4つの元素とは、「土、水、空気（風）、火」のことであり、物質の外観と状態に対応するものと考えられました。

「土」と「水」は目に見える元素ですが、この2つの元素は目に見えない2つの元素「空気」と「火」をその内部に含んでいると考えます。

4つの元素の間には「プラトンの輪」と呼ばれる循環があり、「火」

図 1-1-1 ● 四元素説 (左) と四元素のピラミッド (右)



は凝結して「空気」になり、「空気」は液化して「水」になり、「水」は固化して「土」になり、「土」は昇華して「火」になるとします。

「土、水、空気の3元素が物質をつくる」というのは現代化学の見方と似ています。現代人が考える固体、液体、気体の元素はすべてこの「3元素」の中に含まれています。

しかし、火は何でしょうか。実は、火に相当する元素は近代西洋

科学においても「**フロギストン**」の名前で残っていました。

これを現代化学に翻訳すれば「火=エネルギー」というところでしょうか。エネルギーが物質をつくるという変に聞こえますが、これこそは、

アインシュタインの式 $E = mc^2$

の意味するところです。

この式で E はエネルギー、 c は光速、 m は質量、すなわち物質です。つまり、この式は「**エネルギーと物質とは変換可能**」、いい換えれば「**同じ物だ**」といっているのです。

それどころではありません、最先端の素粒子論、宇宙論によれば、宇宙を構成する物のうち、手で触れ、観測できる物質は5%に過ぎず、25%はダークマター (暗黒物質)、70%はダークエネルギー (暗黒エネルギー) だといえます。

ダークマターは通常の「物質」の5倍も存在し、観測できない物質です。ダークエネルギーはこのダークマターよりさらに多く、観測できません。その正体は宇宙を加速膨張させているエネルギーとされます。

このように考えると、宇宙を構成するモノの大部分は古代人のいう「火」である、ということになりそうです。

もちろん、古代の人々がそこまで考えていたとは思えませんが、「考えれば通じる」のかもしれませんが。

3-1



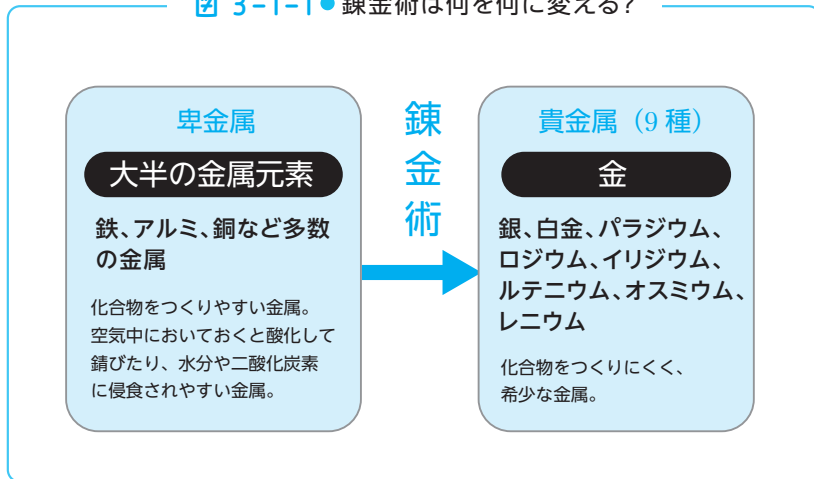
卑金属を貴金属に変えるマジック

—— 錬金術の時代

錬金術の「錬金」とは、鉱石を溶かし、そこから金きんをとり出すこと、あるいは「卑金属を金（貴金属）に変えようとする化学技術の方法」をいいます。

昔は「卑金属」というと、「金・銀以外の金属」を指す時代もありましたが、現在は一般に、化合物をつくりやすい金属のことを卑金属といいます（卑金属と非金属とは「音」は同じですが、意味は異なります）。

図 3-1-1 ● 錬金術は何を何に変える？



このように錬金術は、安価な鉛やスズのような「卑金属」を、高価な金、銀、白金のような「貴金属」に変える「いかがわしい妖術」のこと、あるいは卑金属を金に変えるといつて騙す「詐欺」のような意味にとられがちです。

しかし、本来の意味での錬金術は、そのようないかがわしいものとはまったく違いました。それは、「人格を金のような高貴なものにする」という意味を持った、純粋で、真面目な哲学、倫理学、科学的な思考体系だったのです。

いずれにせよ、錬金術師たちが存在しなかったら、無謀とも思えるさまざまな実験もなく、結果として「現代化学も存在しなかった」といえることだけは確実です。最近、錬金術を見直す研究が進展していますが、研究の発展を祈るばかりです。

● 錬金術の起源は古代エジプト？

卑金属を精錬して金にし、金属に限らずさまざまな物質、人間の肉体や魂をも、より完全な存在に錬成しようとしたのが錬金術だといいました。

このような錬金術の起源は、古代エジプトや古代ギリシアに求めることができます。古代エジプトのパピルス文書には、「金属を加えることで金や銀を増やす方法」といった「まさしく、これぞ錬金術」と思わせるような記述もあります。

錬金術は、古代エジプトから古代ギリシアをってイスラム文化のアラビアに伝わり、やがてヨーロッパを席卷しました。「万物は四元素から構成されている」と考えたアリストテレス（紀元前384～紀元前322）ら古代ギリシアの哲学者の物質観は、中世アラビア



のイスラム文化圏の錬金術に多大な影響をもたらしました。

12世紀にはこのイスラム文化圏で発展した錬金術の文書がラテン語訳され、ヨーロッパでも盛んに研究され、ヨーロッパの化学の基礎をつくるようになったのです。

しかし、研究が盛んになる一方で、人間がこうしたものをつくり出すことは神が創造した「自然」に反する傲慢な^{ごうまん}ことではないかという反対意見も多くなってきました。

●エセ錬金術の横行

錬金術が一般的になると、それを利用して偽物の金、まがいものの貴石などを販売する詐欺も横行するようになりました。このような「エセ錬金術師」たちは、欲の皮の突っ張った地方貴族を食い物にし、彼らに金^{きん}をつくってやるからといっては貴族の館に泊まり込み、実験室の設備費、研究費と称して多額のお金を巻き上げ、いつ

図 3-1-2 ● 数多くの貴族が錬金術師に金を出した



しか姿をくramしていました。

こうした風潮を懸念した法王ヨハネス22世は（1244頃～1334）、1317年に錬金術を禁止する決定を行ないました。

しかし、禁止令が出たにもかかわらず、錬金術が衰退することはありませんでした。錬金術に反対意見がある一方で、人間がその能力を駆使して新たなものを生み出すことは「神への助力」であるという説もあったからです。

ところが、それが不可能なのが自然現象に裏付けられた科学なのですが、当時はまだ実験科学の理念ができていなかった時代でした。

錬金術師たちは、「多様な鉱物は本来1種類のものであり、複数の要因によって本質的な鉱物になったり、非本質的な鉱物になったりしているに過ぎない」と考えました。そして、「要因は定まったものではなく、変更可能であるから鉱物の変成も可能である」と考えたのです。

このような考えから、錬金術師たちは大地の奥底で数千年かかって劣位の金属が高位の金属に変成する自然のプロセスを、人為的に加速させる技術があるに違いないと考え、研究に励むことになったようです。



4-4



一度罹ると、 二度は罹らない？

—— ワクチン誕生

大航海の時代は病魔との闘いにおける武器、すなわち医薬品の開発においても大きな進展がありました。

● 牛痘に罹った人は、天然痘に罹らない！

先に大航海時代の節でも見たように、**天然痘**は感染力が強く、しかも死亡率が高く、そのうえ、運よく治っても顔に凸凹（アバタ）が残ることがあるという、非常に恐ろしいウイルス性疾患でした。

しかし、**一度、天然痘に罹ると、二度と罹らない**ということも経験的に知られていました。そこで、予防のために天然痘の膿を皮膚に植え付けるということが行なわれていました。ただ、これはたいへん危険な行為であり、悪くすると全身に痘瘡が広がって死亡することもあり、命がけの予防法でした。

イギリスの田舎で開業していた医師ジェンナー（1749～1823）は、アバタを持った女性は田舎より都会の女性に多いことに気づいていました。

また、乳搾りの女性から「**牛痘に罹った人は、天然痘には罹らない**」という話も聞いていました。そこで、牛痘（天然痘に比べると死亡

図 4-4-1 ● 医師が乳搾りの女性の牛痘の成長を検査



率の低い病気）に罹ったことのある19人に天然痘の膿を植えつけてみると、なんと、すべての人で手の皮膚が赤くなるだけで、天然痘にはならなかったのです。

● ワクチンの誕生は「たまたま」だった？

この結果に自信を得たジェンナーは、1796年に8歳の少年の腕に、乳搾りの女性の手でできた牛痘病変から採った試料を接種したのです。すると、その後の1週間は微熱が出ましたが、すぐに下がりました。そこで、6週間後に、今度は天然痘を接種しましたが、発症しなかったのです。

これが**ワクチン**の始まりでした。このワクチンのおかげで天然痘の死亡者が激減し、瞬間に種痘が広まっていったのです。

ただしその後の調査によると、本物の牛痘ウイルスには天然痘ウ



イルスに対する抗体をつくる能力がないことがわかりました。ジェンナーが用いた牛痘病変には、おそらくは牛痘以外の動物痘瘡ウイルス、たぶん、馬の物がたまたま混じていたのではないかと推測されています。

しかし、その偶然が天然痘から人類を救うきっかけをつくり、それ以後、ワクチンが次々に開発されていったのです。

● 医療用化学薬品(アスピリン等)の開発

観音菩薩は人間を悩みから救ってくれる仏様であり、いろいろの姿で現れます。その一つに「楊柳観音」というお姿があります。柳やなぎの小枝を持っているのです。

ヤナギの樹皮が痛風や神経痛に効くことは古代ギリシア時代から知られていました。前に見たギリシアの医師ヒポクラテスも、ヤナギの樹皮を鎮痛・解熱に使っていたといえます。日本でも、歯痛にヤナギの小枝を噛む治療法があり、小枝の根元を叩き潰して歯ブラシとして使っていたといえます。

1819年、イギリスの神父エドワード・ストーンは、ヤナギの樹皮の抽出エキスが、悪寒、発熱、腫脹などに強い効果があることを発見し、ヤナギの学名サリユックに因んでサリシンと名づけました。

サリシンは本体の分子にグルコース（ブドウ糖）が結合した、一般に配糖体といわれるもので、大変に苦い物でした。そこで分解して糖を除こうと、化学反応を行なっているうちに、1838年、本体が酸化されてサリチル酸になってしまいました。

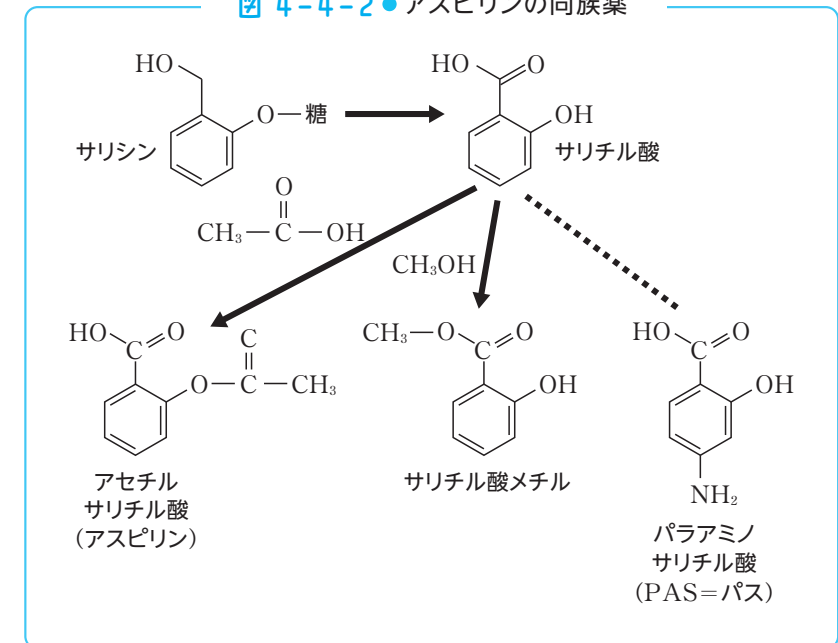
サリチル酸は苦味が強い上に酸性がとても強く、胃に孔のあく胃穿孔いせんこうになることさえありました。そこでサリチル酸の酸性の原因

になっているヒドロキシ基（OH原子団）をマスクするため、酢酸と反応させることで副作用の少ないアセチルサリチル酸をつくりました。

これは1899年にバイエル社からアスピリンの商品名で発売されました。アスピリンは市場から圧倒的な好意で迎えられ、発売以来120年経つ現在でも、アメリカだけで年間1万6000トン、200億錠が消費されているといえます。

サリチル酸はアスピリン以外にもいろいろの薬に使われます。まず、本体は食品の防腐剤や、足の裏にできる魚うおの目をとるにも使われます。また、メタノールと反応したサリチル酸メチルは筋肉の消炎鎮痛剤として使われます。さらに、アミノ基（NH₂原子団）を導入したパスは結核の治療薬として使われます。

図 4-4-2 ● アスピリンの同族薬



「定量的」化学をもたらした 秤量器

—— 定性・定量

● 観念的な科学から、実験的な科学へ

古代の科学はその宇宙観や物質観からわかるとおり、「観念的な科学」だったといつてよいでしょう。古代人も空想しました。彼らの考える力は高く、現代の私たちと同じ程度に持っていたと思われる。

しかし、その考えを確認する力と意思、道具がなかったのです。自分の知っている知識・世界の範囲内で矛盾がなければ、それで理論は完成したと思っていたのでしょう。

たとえば、ギリシア人が考えた「火、空気、水、土」の4つが循環して世界をつくる四元素説は、とても魅力的で、^{とりこ}虜にさえなってしまうそうです。ただ、残念ながら、実際の世界とはかけ離れているといわざるをえません。

中世になると、科学の中心は「ヨーロッパからアラビアへ」と移ります。

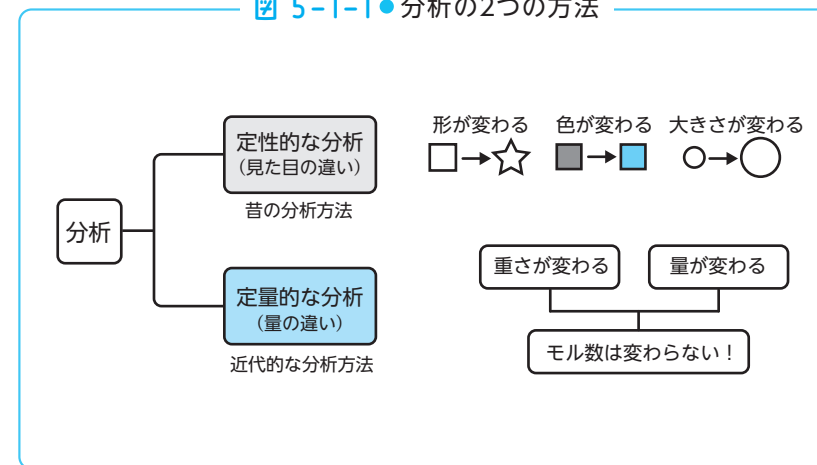
アラビア（中東）で錬金術が盛んになると、科学の世界に大きな変化が起きたのです。それは、観念論の一角に具体的な「物質」が登場したことです。

錬金術師など、当時の科学者は実際に各種の物質をいじり、操作し、元の物質を変化させ、その様子を克明に観察しました。そのプロセスから、実験的な化学が生まれてきたのです。

● 定性と定量ではどんな違いがあるか？

一般に、実験には定性的な方法があります。これは「物質の変化の様子」だけを問題にします。これに対して、定量的な方法では物質の変化を見るだけでなく、その「量の変化」をも問題にします。

図 5-1-1 ● 分析の2つの方法



たとえば、 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ という反応に対して、定性的表現では……

- 水素と酸素が反応して、水（水蒸気）ができた

となります。定性的なとり扱いでは、反応を注意深く観察すればよいだけであり、見た目の変化しか記述しません。それに対し、

定量的表現では（いろいろ表現できる）……

- 2モルの水素と1モルの酸素が反応して、2モルの水蒸気ので

きた

- 2リットルの水素と1リットルの酸素が反応して、2リットルの水蒸気ができた
- 4グラムの水素(2モルに相当)と32グラムの酸素(1モルに相当)が反応して、35グラムの水(水蒸気：2モルに相当)ができたとなります。

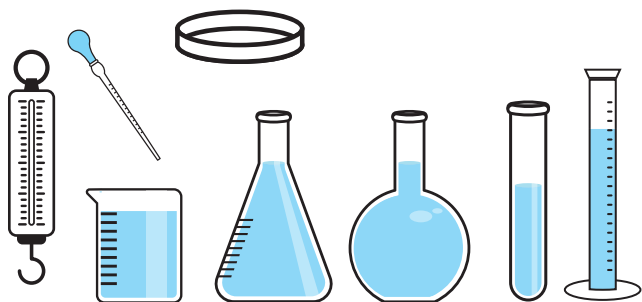
●「秤量器」の登場が化学を変えた!

定量的な取り扱いをしようとする、
 反応前の物質(反応系)の量(質量や体積)
 →反応後の物質(生成系)の量
 のように「量」を測定しなければなりません。

「量」を測定するためには、ある程度正確な計り、升、メスシリンダー等、化学で使う「ひょうりょうき秤量器」がなければならないのです。

現代化学では当たり前前の秤量器ですが、このような装置が生まれ

図 5-1-2 ● さまざまな秤量器が「定量的分析」を支えた



る前までは、定量的な観測・実験をしたくても、することはできなかったのです。

実際に、これらの秤量器が使われはじめたのは、近代もかなり後の方のことで、それ以前の化学はもっぱら定性的な手法でのみ、進行してきたといえます。

そして、定量的な計測が進むことで、化学は次の節で見えるように、次々に革命的な発見をもたらし、大きく飛躍することになるのです。

● 定量的手法の成果

化学に定量的な手法が持ち込まれると、定性的な手法では隠れていた「反応の真の姿」が現れてきます。そもそも定性的な方法では、反応式の係数、つまり「 2H_2 」や「 $2\text{H}_2\text{O}$ 」の2は見えてきません。

ということは、原子の個数が見えない、つまり、原子は見えてこないということです。見えているのは「概念としての水素」、「概念としての酸素」、「概念としての水」だけなのです。

近代前期までの化学が原子ではなく、「元素」を前提にしていた理由は、このようなところに根本的な問題があったのです。

しかし定量的な手法が持ち込まれると、途端に原子が顔を見せはじめます。それが、反応する原子の個数の比を問題にしたいいくつかの法則として現れてきたのです。





すべての物質は「粒子性と波動性」を併せ持つ

—— 量子理論の指摘

● 相対性理論と量子理論が同時に現れた！

西暦1900年からの20年ほどは、科学史だけでなく、人類史においても特別な時代だったとして、人々の記憶に刻まれるのではないのでしょうか。「相対性理論」と「量子理論」という、後の物理学に決定的な影響を与えた二大理論が同時発生的に出現したからです。

しかし、この二大理論の出現と成長の仕方は違っていました。相対性理論はアインシュタインという1人の巨人によって産みだされたものです。対する量子理論は誰が産みだしたかを特定することは困難です。理論の芽が現れると、それに誰かが何かを継ぎ足し、その足されたものを見て別の誰かが新しい何かを継ぎ足すという具合に、徐々に成長していったからです。

● 爆発する「知のカンブリア紀」

生物の発展史にカンブリア紀という時代があります。5億4000万年前から4億8000万年前ぐらいのことですが、この時代に目が3つ、頭から足が出ているなどという、それまでの生物の形からはみ出したような生物が次から次へと現れました。

量子理論の成長の過程はまさしく「知のカンブリア紀」というにふさわしいものでした。1905年に出現した**相対性理論**（特殊相対性理論）は、それまでのバイブルだったニュートン力学を書き換える威力を持っていました。

ところが、この相対性理論とほぼ同時に出現した**量子理論**は、実は相対性理論など消し飛んでしまうほど、きわめて突飛な理論の集大成だったのです。

「量子理論」は「相対性理論」に比べて華々しさはありません。しかし、現代の素粒子論の根幹を支えるものであり、相対性理論より「先を見る」理論といえるでしょう。

なによりも、現代化学の根底を支える「量子化学」の基礎理論なのですから。

● 光は波か？ 粒子か？

この頃に現れた画期的な考えは、フランスの科学者ド・ブロイ（1892～1987）が1924年に発表した「物質波」の考えでした。この考えはあまりに突拍子のないものだったので、発表後もしばらくは誰も相手にしませんでした。

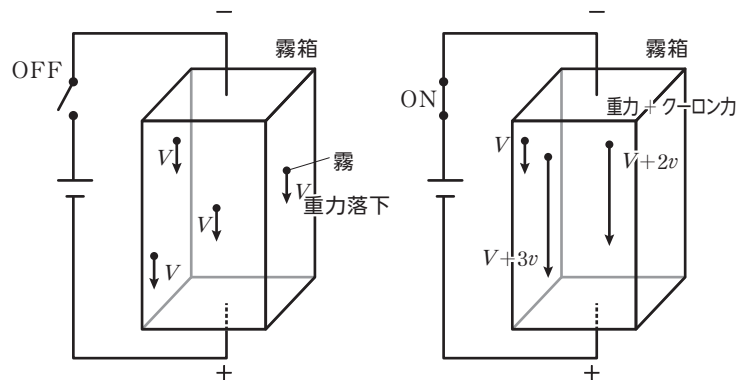
物質波の考えがド・ブロイの頭脳に浮かんだのは、電子と光に関する一連の実験結果でした。

①霧箱で「電子は粒子」と解明

電子に関する画期的な知見をもたらしたのは「霧箱」と呼ばれる実験装置でした。これは真空の箱の中に粒の揃った霧を立ち込めさせる装置です。霧の粒子は重力にしたがって落下しますが、その速



図 6-1-1 ●霧箱の中を霧の粒子が速度を変えながら落下する



度は霧粒子の大きさが揃っているのほぼ一定の V です。

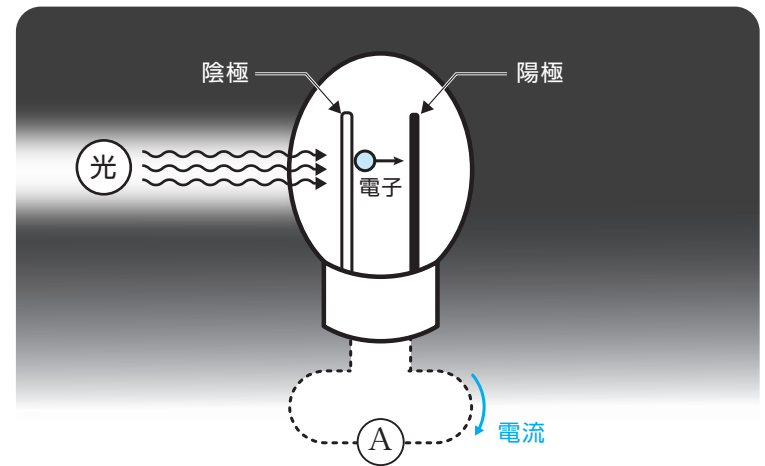
この霧箱に通電すると、霧粒子の落下速度が不連続に変化します。その速度は $V+v$ 、 $V+2v$ 、 $V+3v$ 等々と v を単位として不連続に変化するのです。

落下速度が速くなったのは、霧粒子に付着した電子と陽極間の静電引力に基づくものです。そして速度が v 、 $2v$ 、 $3v$ という単位量で変化するのは、1個の霧粒子に電子が1個、2個、3個等と付着したことを示すものであり、電子が粒子であることを示す証拠なのです。

②光電管でも「光は粒子」という結果が

次にヒントとなったのは光電管の実験でした。光電管というのは真空管の一種であり、陰極に外部から光を当てると電子が飛び出し、

図 6-1-2 ●光電管の実験で「光は粒子」とわかった



それが陽極に当たることで電気が流れるという装置です。この際に照射した光の量、光量と流れた電流の間により比例関係のあることがわかりました。

これは流れた電子の個数と照射した光の個数がよい対応を示した結果と考えることができ、光が電子と同じように粒子性を持っていることを示した結果でした。しかしそれまでは、光は波長 λ (ラムダ) と振動数 ν (ニュー) を持った波と考えられていたのです。

③粒子性と波動性を併せ持つ！

以上のことから、ド・ブロイは「すべての物質は粒子としての側面と、波(波動)としての側面を併せ持つ」と考えました。

波であるからには波長 λ (ラムダ) を持つはずですが、ド・ブロイによれば、その波長は次の式で求められます。



$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

λ : 物質（粒子）の波長 [m]

h : プランク定数 = 6.6×10^{-34} [J・秒]

m : 物質（粒子）の質量 [kg]

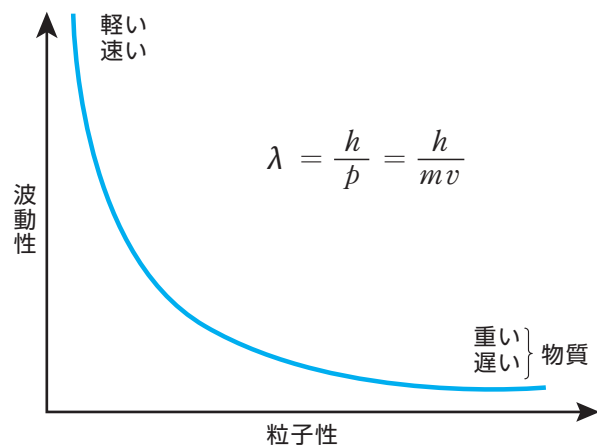
v : 物質（粒子）の速度 [m/秒]

この式の意味は（分母・分子から考えて）、

- 物質の質量が大きく、速度が速くなればなるほど
→波長は短くなる
- 物質の質量が軽く、速度が遅ければ遅いほど、
→波長は長くなる

ということになります。

図 6-1-3 ● 光の粒子性と波動性の関係



●なぜ、人間の波長は観測されないのか？

すべての物質が波（波動）としての側面を持っているのであれば、われわれ人間も例外ではないはずです。せっかくだので、人間の波長を計算してみましょう。

〈ド・ブロイの問題〉

いま、体重66kgの人が時速3.6km（秒速1m）でゆっくりめに歩くと、先ほどのド・ブロイの式（ λ ）から、どのくらいの波長になるか、計算してください。

恐れることはありません。前ページの λ の式に各数値を入れていけばよいだけです。

h は定数（プランク定数）なのでそのまま。 m は体重で、kg表示ですから、これも66（kg）のまま。そして速度 v は時速3.6kmだとありますが、m（メートル）表示に変換する必要があります。けれども、これはカッコ書きで「秒速1m」とあるので、これも1としてそのまま使えます。よって、以下の計算をすると、

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{66 \times 1} = 1 \times 10^{-36} \text{m}$$

よって、その人の波長は 10^{-36} mとなります。

しかしながら、 10^{-36} mという波長はあまりに短いので、実測することは不可能です。つまり、この人の波動性はほとんどない、ということになります。

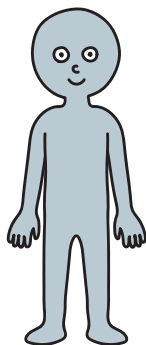
それに対して電子の場合には、質量を 10^{-30} kg、速度を秒速 10^8 mとすると、波長は 6.6×10^{-12} mとなります。この波長はレントゲン写真を撮るX線の波長と同程度であり、十分、波として認識



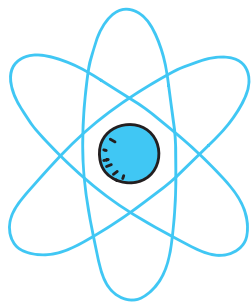
できる値です。

このように、人間も含めてすべての物体は波としての性質を持ちますが、それが意味を持つのは「電子、原子、分子」のような「極小物質」の場合だけであり、日常生活には無関係ということなのです。

図 6-1-4 ● 人間の波長は短すぎて計測できない！



10^{-36}m



6-2



「量子化学」は量子理論をとり入れた化学

— 不確定性原理

量子化学は量子理論を化学に応用した理論のことです。実は、化学の世界には数学に弱い人が集まりやすいのですが、量子化学が現れてからは、化学にも数学が必要になりました。

● 量子化とはどういう意味か？

量子理論ではその名前のとおり、量子が重要な役割を演じます。量子の考えは、水で考えるとわかりやすいです。水道の蛇口から流れ出る水は連続量です。どのような量でも自由に汲みとることができます。

しかし、自動販売機で売っているペットボトルの水は、だいたい1本で0.5Lです。本当は0.3Lだけ欲しかったとしても、0.5L単位で買わなければなりませんし、0.8L欲しかったら2本、買わなければなりません。これが**量子化**です。

ただし、このような「量子」が明瞭な形で現れるのは光子、電子、原子、分子などという、極小の微粒子の世界においてだけです。

その後、研究が進むと「**量子**」という単位量が存在するのは運動量やエネルギーだけではないことが明らかになりました。

