

第2章 モノの構成とそのふるまい

日ごろたいてい人間のことがらに意識を向けて生活しているあなたも、自分自身と身のまわりの物質が微小な原子から構成されていること、分子という原子の集合体があなたの生命にとって本質的な働きをしていることを知っている。また、地球内部の物質が流動状態にあってあなたの立っている大地が動いていることを、大地の震えによって告げられる。その上、宇宙や星の映像を見せられて、ビッグバンにまつわるモノの誕生というべき理論を説かれ、その後の自然史を教わる。あなたは、天地人万物の在り方を理解することを促されているのだ。その促しに応じて束の間日常性を離れてみれば、少しばかり世界観を養うことができるかもしれない。

この章では、身のまわりの物質を語るができる程度に、モノとは何かということを中心に簡単に復習しておこう。

2.1 モノは階層構造をなして存在する

上の文がすでに、物質が階層的に構成されて存在していることを告げている。モノは構造化された系列の一段階として存在しているのだ。しかも、一つの階層にあるモノを観察すると、そのモノ自身がまた構成物から成り階層構造をもつことが分かる。われわれの大宇宙から始めると、銀河団、天の川銀河、太陽系、地球と続く階層がある。地球の物質も何階層か経て分子や原子の集合という描像にたどりつくのだが、さらに原子、原子核・電子、素粒子、クォークへと至る系列がある。生態系の中に位置する生物の一種で、ミクロコスモスと称えられるあなたの身体も、

器官、組織、細胞、細胞核・ミトコンドリア、DNA、アミノ酸という階層構造を成している。これを読んでいるあなたの行為も、神経組織、脳、脳内諸器官、神経細胞、シナプスといった系列をなすモジュールの多層のシステムによる、情報の入出処理を繰り返す働きとして出現するのだ。

繰り返せば、森羅万象はある構造をもって構成実現されるのである。階層的に構成され、どの階層で見てもその構成要素は無構造ではなく内部構造をもつ。もっとも、それには限界があり、電子などの少数の基本的な素粒子には内部構造がないと考えられているが。さて、自然がこのようであるとき、科学を数多くの項目の羅列的な知識として記憶しようとする学習法は成功しないであろう。ある階層系列でより基本的なモノ・コトは何か、それがどのように組み立てられ枝分かれしていくかを体系的に考えながら進むほかはない。それを理解する中で学習法も学ぶのである。人間のことがらもそのようなものであろう。

しかし、相手は森羅万象である。モノの構成と性質やふるまいの物理的側面を見るだけでも、長大な時間が要るだろう。この章では、ただ眼にとまる物質世界の概略を整理して把握することを目指し、物質が原子からどのように構成されるかを考えよう。そうすれば、身のまわりの出来事理解が進むだろう。原子がどのようにして構成されるかは第9章で見よう。

2.2 身のまわりのモノ

原子から構成される物質

古代ギリシアのデモクリトスは、すべてのモノが原子から出来ていると考えた。そうすれば、「万物の流転」を原子の離合集

散として理解できる。原子論である。その原子論は修正が必要であったけれども、ただ思惟によってこのように有効な原理的概念に至ったことは感嘆すべきことだ。

現代の原子論は、眼に見える物質を構成する原子という階層を超え、素粒子と呼ばれるものにまで到達して、ニュートン力学で培われたわれわれの常識でとらえきれないモノとコトを明らかにした。素粒子は、粒子性と波動性を併せ持つ存在として、場の量子論という理論で記述される。“素粒子”と呼ぶけれども、ニュートン力学的な意味の粒子ではないのである。知識の深まりによって、「粒子」という概念が広義の意味に変化したことになる。この書物でも、混乱を招くかもしれないけれど、「モノ」という言葉をそのような広義の意味を含むように使う。実際、日本語では、「もの」という言葉は幅広い意味をもち、「こと」という言葉とも重なりをもって使われてきた。日本語ではないが、朱子の「格物致知」の論でも、「物」は「事」であるという註がついているようだ。この意味の広がりを踏まえて、「物理的世界」を「モノとコトの世界」と表現しているのである。

原子について基本的なことが3つある。第1に、原子はそれ以上分割できないものではない。物質の階層構造がここでも当てはまり、原子は内部構造をもつ。すなわち、原子核とそのまわりを運動する電子から成る。第2に、原子核は陽子と中性子から成り、最大100個余りの陽子をもつ。第3に、原子は原子核中の陽子と同じ数の電子を引きつけて形成される。

原子を構造体として形成する条件をもう少し言うておこう。まず電子の質量が原子核の質量に比べて圧倒的に小さく軽いということ。次に、陽子と電子の荷なう電気量の大きさが等しく符号が逆で、+電荷の原子核が-電荷の電子を電氣的な力で引き

寄せること。その際原子は電氣的に中性になろうとして、陽子数と同じ数の電子が原子核のまわりに集まる。さらに、原子核は電子に比べて質量が大きいのでほとんど動かない一方、電子の運動を律する量子力学が、電子を原子核に落ち込ませないで、原子核のまわりを定常的に運動するようにするのである。

その電子の運動の規則によって、原子核の外側を運動している電子の数がその原子の性質を左右するように働き、原子を電子数によって特徴づけられるようにする。さらにその規則は、電子の数が増えるとき、周期的に似た性質をもつ原子が現われるようにする。ところが原子の電子数は陽子数に等しいから、原子の性質を決定しているのは原子核中の陽子数ということでもある。だから陽子数の同じ原子は、中性子の数がちがっても同じ元素に分類できる。原子核中の中性子数は陽子の数と同程度かそれよりも多く、原子を陽子数の順に並べると、ほぼ原子の質量の順に並ぶ。つまり元素を軽い順に並べることになる。その番号が原子番号である。結局、元素を区別する原子番号は、原子のもつ陽子数 = 電子数のことであり、物質を構成する元素は 100 余種に分類される。こうしてわれわれは、元素を原子番号順に並べたあの周期表を得ることになる。

その 100 余種の元素が集合離散することによって身のまわりの出来事が起きるのである。ひるがえって考えてみると、地上に数えきれない種類の物質があり、複雑極まりない現象が起きるのは、種類の異なる元素があるということに負っている。100 余種の元素があれば、それから構成される物質が数えきれないものになることは、数学の順列・組み合わせを思い出せば理解できるだろう。

原子の結合

あなたが身のまわりで見える現象では、原子の基本構造を決める原子核は変化しない。つまり、身のまわりの物質を構成する 100 余種の元素は変化しないと考えてよい。原子が集合して多種多様な物質の要素をつくるのは、原子どうしを結合させる力があるからだ。その力は電気的な力である。原子が集合して結晶や分子などを形成するとき、原子の外辺部にゆるく拘束されている電子が仲介して原子の間を結びつけるのである。

一般にある階層のモノが集合体をつくるのは、構成要素間に相互作用(力)が働いて、エネルギーのより小さい状態を実現できるからである。そのときどれだけエネルギーの低い状態になったかという「エネルギー利得」を結合エネルギーという。集合体をつくる要素は、結合エネルギーを最大にするような結合の仕方を選ぼうとする。自然界ではエネルギーのより低い状態が好まれるのである。逆にエネルギーの高い状態への移行が起きるのは、外部から光などによりエネルギーを供給される場合である。あなたの知っている光合成はそういう化学変化で、葉緑素は太陽からふりそそぐ光のエネルギーを取り込んで炭水化物を合成する。その恩恵にあずかってわたしたちは生きている。

原子の結合の仕方をいくつかの典型例に分けることができる。ネオンガスのように他の原子とほとんど相互作用しない原子は単原子で分子(Ne)になる一方で、あなたになくってはならない酸素は 2 原子で分子(O₂)をつくる。熱しやすく展性があり電気をよく通す金属である金は、多数の金原子(Au)の集合で、規則正しい配列をなして結晶を作ろうとする。同じく結晶構造をもつダイヤモンドは炭素(C)の結晶体であるけれども、その性質は金と大きく違う。ガラスのように、結晶をつくらないで固形化するものもある。ところで、金塊は詳しく見れば純粋な金原子

の集まりではなく、不純物として他の金属を含んでいることは、歴史で小判の改鑄のことを習った通りである。異種の金属原子のあいだにも結合が生じる。

異種の原子の結合を考えれば、構成の仕方は飛躍的に増える。われわれの地球が天体の中でも例外的に多量にもつ水分子 (H_2O) がすぐ思い浮かぶ。これまたなくてはならない食塩 (NaCl) は、分子のような単位を形成しないで結晶体の集まりだ。このように数え上げてみてもきりが無い。化学結合の区別の他に言うべきことがあるとすれば、イキモノであるヒトにとって物質を無機物と有機物とに分けることの重要さであろうか。炭素を主要元素とするこれまた多種多様な有機化合物がある。今では生物の教科書に、数十種のアミノ酸から書き示すことが困難な高分子の化学式まで出てくる始末である。わたしのような者にはお手上げだ。今まで挙げたモノは多くの場合物質の素材にすぎない。眼に見える物質はたいがい、それらの素材からさらに何段階もある構造物や混合物や溶液やから成っているのである。その上に、時間の経過とともに、それらは離合集散する動的なモノとして存在する。

ここで重要なことは、1つ1つの原子は 10^{-10}m の単位で測るような想像もできないほど微小なもので、その質量もまたとてつもなく小さいモノだということである。「けしつぶ」というたとえが意味をなさない。ヒトが手に取るぐらいの大きさの物質にはアボガドロ数 6×10^{23} 個もの分子や原子がある。これだけ分子なり原子なりが集まってグラム (g) で測る程度の物質になるのである。ヒトが一握りのモノをつかんだら、その中にはとほうもない数の分子や原子があるのだ。したがって、上に見た多種多様な素材から眼に見える物質が出来るとき、砂浜の真砂のようなあり方のほかに、何段階にも構造をつくりながら形作られるものがあ

りふれて存在するのである。人間の身長や体重ぐらいあれば、まさしくミクロコスモスと言えるほどの身体が構成されるのである。そして、人間が作業できるぐらいの大きさと質量の対象も、複雑な構造物をつくりうるほど莫大な数の原子や分子から出来ていて、現に人間が行なっている営みが可能なのだ。時間のことも考えてみると、生体内で酵素の助けを借りて進む1つ1つの化学反応の進行時間はごく短いものである。実際、カビのような生き物が細胞分裂を繰り返して繁殖する速度は、ヒトから見るとかなり早い。ヒトぐらい大きくなると成長の時間ももっとかかる。ここでも、原子や分子の数の大きさと種々の反応の速度との関係が、人間の時間のスケールを決定する要因であることが分かる。

物質の3態：固相・液相・気相

人間の不思議を考えるのはあなたにまかせて、ここでは、ヒトが手に取ることのできるようなさまざまな構成要素の集合物をもう少し考えてみよう。

考えている構成要素間に弱いながらも相互作用があるとすれば、それらが結合して眼に見える大きさになるとき、固有の結合の仕方集合する。われわれ生き物にとって不可欠な水を例にとって考えてみよう。水は誰でも知っているように H_2O という分子を単位にしている。酸素と水素が結合するとき、それぞれの原子構造から H_2O という結合様式がもっともエネルギーの低い状態で安定なのである。水素燃料を燃やすと大きなエネルギーを取り出せるのは、その事情を示している。コップに入った水を飲もうとするとき水は流動的だが、こぼれた水滴は丸く集まる。つまり、液体の H_2O 分子はばらばらではなく、分子がゆるやかに結合して存在している。しかし、その結合は、個々の分子が眼に見えるほどの距離にわたって位置が固定されるほど強いもの

ではないということだ。液体の水を冷やすと氷になる。水分子の動きがゆるやかになるにつれて、ほぼ決まった位置にいて結合したほうがエネルギー的に得をするからだ。

このように液体から固体が変わるとき、結合のようすは質的に変化する。これを相転移という。この相転移におけるエネルギー低下はとても大きい。氷が融けて水になるときまわりから熱を奪うのは、このエネルギー・ギャップを埋めて、水分子間の結合をゆるめなければならぬからである。これがあなたの知っている融解熱だ。こう考えると、まだいっしょに動く液体の水が結合を解いて1つ1つの H_2O 分子に別れて自由に動ける水蒸気になるのも、相転移であることが分かる。水分子の結合を切り離すために大きなエネルギーが必要になる。すなわち蒸発熱である。庭に打ち水をする、水が蒸発して水蒸気になるときまわりから熱を奪って、涼しくなるのはこのせいだ。

こうして、構成要素である分子(今の例では H_2O)は変化せずに、集合体は質的に異なる3つの状態をとりうること、つまり物質の3態(固相、液相、気相)について概略を知ることができた。固相で分子をつくらない物質も、液相、気相という状態をとりうることを言い添えておこう。

ある要素が集まって3態のうちどの状態になるかは、上の話だけでは終わらない。その物質がどのような圧力下でどのような温度にあるかに依る。それらの物理量は要素あたりのエネルギーに関係しているから、どのようなエネルギーの結合状態になるかが、圧力や温度によってちがうことになる。たとえば、水は高地と低地で沸騰する温度が違う、つまり圧力が違うと状態変化の起こり方が違う。また、低温下で圧縮された二酸化炭素(CO_2)分子はドライアイスという固体になるが、地上の普通の

気圧・温度では気体である。だから、ドライアイスが液体を経ずに気体に昇華し、固相 - 気相間のエネルギー・ギャップ分の昇華熱をまわりから奪い、物を冷やすことができる。いきなり気体になるから、ケーキを冷やすのに使えばケーキや紙箱を汚すこともない。こういうわけで、あなたの吸っている空気も液体や固体にすることができる。あなたは液化プロパンガスのボンベを見たことがあるだろう。さらに言えば、3 態をとる物質も、高温では液相・気相を区別できない状態になり、きれいな結晶をつくらないガラスのような非晶質な物質では、固相と液相との区分はデリケートである。

1 つの相にある物質の性質とふるまい

さっきまであなたがクルミを掌でもてあそんで思案していたのは、クルミが硬くて心地よい音を出すからだだろう。われわれは多くの場合、固体・液体・気体のどれか 1 つの相にある物質を対象として何事かを為し、その物質の性質が関心事である。ヒトのとらえるモノの特徴はその物理的な性質に基づいている。人間の知識が進んで今では、物質が熱しやすいか（熱容量）、電気をよく通すか（電気伝導度）、磁石にくっつくか（磁性）、温度を上げたら膨張しやすいか（膨張率）、圧縮や引っ張りに対して変形しやすいか（弾性率）など、さまざまな性質を識別できるようになった。ヒトがモノを使って道具や機械をつくる時、それらの性質が関係するから、それらを測定して知ることが人間の活動にとって実際に有用だからだ。それらの物理的性質は、もともとその物質を構成する原子や分子の構造あるいはその物質の構成の仕方から来ると考えられる。しかし、ここまでくれば話は複雑になって、多くの場合われわれは現象をなぞって解釈することで満足せざるをえない。

固体をもてあそんでも、その物質は何ほどの変化も示さない安定したもののように思える。固体は、構成要素が決まった位置に並んで構造体をつくっているから、眼で気づくほどの体積変化をしない。実際には、原子や分子は固定点付近で振動している。温度が上がるとその運動が激しくなり、原子間あるいは分子間の平均距離がわずかに大きくなる。熱膨張である。液体も温度が上昇すると、構成要素の運動が激しくなって膨張する。細いガラス管をつくってアルコールを封入すれば、温度が上昇すると、アルコールの膨張がガラス管の膨張よりも勝って、アルコールがガラス管を上昇することになる。この現象を利用して温度を測る道具をつくることができる。赤い色でもつければ見やすいだろう。これがアルコール温度計である。個々の分子が衝突を繰り返しながらかってに動きまわっている気体は、温度が上がると大きく体積を増やそうとする。開口部のないやかんに水を入れて火にかければ、ついには爆発するだろう。この気体の運動エネルギーを使って蒸気機関をつくることできる……。