

11-9-1 ポリエチレンにもいろいろある	140
11-9-2 網目状の高分子	141
11-10 高分子が集合したかたち／結晶と非晶が共存する	142
11-11 生分解される高分子	143
コラム／発展 分子の世界では鏡の中の世界も現実	145
演習問題	147

第12章 化学と環境

12-1 地球の大気	148
12-2 フロン	149
12-2-1 フロンとは	149
12-2-2 オゾンホール現状	150
12-3 二酸化炭素	151
12-3-1 二酸化炭素の性質	151
12-3-2 地球温暖化	153
12-4 PCB・ダイオキシン	154
12-4-1 PCBとは	154
12-4-2 ダイオキシンとは	155
コラム／発展 二酸化炭素濃度はどのようにして測るのか：赤外線ガス分析計	156
演習問題	158
演習問題解答	159
索引	164

第1章 化学の世界

1-1 化学の世界へようこそ

私たち自身はもちろん、私たちの身の周りのすべてのものがさまざまな物質からなり、そして私たちはプラスチック、ファインセラミックス、半導体・集積回路、バッテリー、医薬品・農薬などの新しい物質やそれを用いた製品を作り出し、利用して生活をより豊かなものになっている。一方で、新しく作り出された物質が環境に影響を与え、私たちの生活を脅かすようになることもある。これまで新物質の創出や応用を支えてきたのが「化学」であり、今後のさらなる発展ばかりでなく、エネルギー問題や環境問題の解決にも「化学」の力が不可欠である。

化学とは物質を対象とし、私たちの生活に密接に関連している学問である。物質が原子や分子^{*1}などの粒子によってどのように組み立てられているのか（「構造」）、その物質の示すさまざまな「性質」、そして物質が原子・分子レベルでどのように「変化」（化学変化、あるいは化学反応）するのかを研究・応用するのが化学であり、自然科学の1つの分野である。

したがって、私たちが新しい物質を作り出したとしても、その性質や反応はあくまでも自然の法則にしたがい、決して不思議なことが起こるわけではない。化学を学ぶ上で大切なことは、どうして物質がそのような性質を示し、反応するのかを理解することであり、つまり自然を学ぶことに他ならない。しかし、あとの章で学ぶように原子や分子の世界はあまりにも小さく^{*2}、直接目で見ることができないため、このことが私たちの理解を難しくしているという面もある。

1 原子については第2章を参照。また、一般にいくつかの原子が主として共有結合^{}で結びついてきた粒子を分子という（*共有結合については4-3節を参照）。

*2 原子の直径はおよそ 10^{-10} m (100億分の1 m)である。

1-2 身の周りの元素

すべての物質は原子からできている。そして原子の種類のことを元素という。自然界には約90種類の元素が存在しており、日本で発見され、名称決定がニュースにもなった「ニホニウム」は人工的に作り出された元素である^{*3}。元素は元素記号によって表わされる。たとえば、水素は

*3 第2章「コラム／発展」参照。

“H”，酸素は“O”という記号で表わされる^{*4}。ちなみにニホニウムの元素記号は“Nh”である。この章に出てくる元素の元素記号をまとめた（表1-1）。

表1-1 元素名と元素記号

元素名	元素記号	元素名	元素記号
水素	H	アルミニウム	Al
ヘリウム	He	ケイ素	Si
炭素	C	硫黄	S
窒素	N	塩素	Cl
酸素	O	アルゴン	Ar
ナトリウム	Na	カルシウム	Ca
マグネシウム	Mg	鉄	Fe

^{*4} 水素 H : Hydrogen
酸素 O : Oxygen
元素の詳細については2-1-2節参照。

私たちの身の周りにはどのような元素が多く存在しているのか見てみよう（図1-1）。

宇宙（太陽系）を構成する元素の割合と地球（地殻），そして私たちの体を構成する元素の割合はまったく異なっている。宇宙に存在するほとんどの元素は太陽などに集まっている^{*5}。また，地球の地殻を形成する岩石の多くがケイ素Siと酸素Oを基本骨格^{*6}とするものであるため，これらが主成分となっている。私たちが特別な環境の中で生きていることがよくわかる。

^{*5} 太陽では水素Hが融合してヘリウムHeになる反応（核融合）が起きて，エネルギーを放出している。

^{*6} ケイ酸塩 SiO_4^{4-} （10-3-1節参照）。

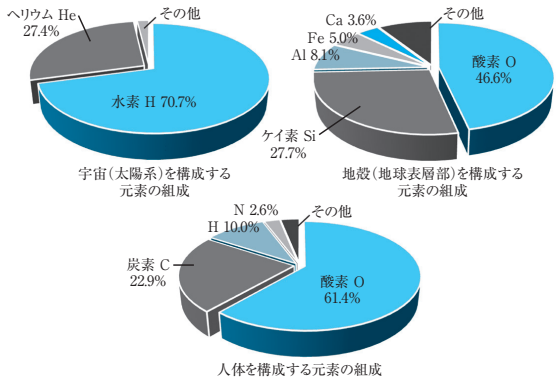


図1-1 身の周りの元素（質量パーセント*）
（*濃度については5-4節を参照）

1-3 身の周りの物質

1-3-1 混合物とは，純物質とは

つぎに身の周りの物質を見てみよう。たとえば空気は窒素 N_2 ，酸素 O_2 ，アルゴン Ar などから，また海水は水 H_2O ，塩化ナトリウム NaCl ，塩化マグネシウム MgCl_2 など^{*7}の物質からなり，いずれもいくつかの物質が混じり合った混合物^{*8}である（図1-2）。身の周りにあるものはほとんど混合物であり，たとえば食塩であっても原料や製造方法の違いにより NaCl 以外の複数の微量な金属成分などを含んでいるものが多い。

^{*7} 元素記号を使って物質の構造や組成を表した式のことを化学式という。

^{*8} 2種類以上の物質が混じり合っているものをいう。

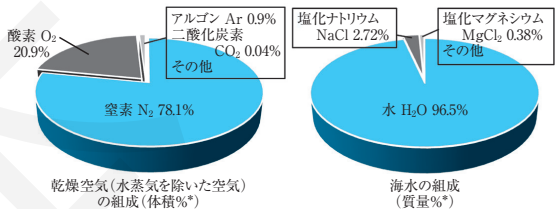


図1-2 空気と海水を構成する物質の組成
（*濃度については5-4節を参照）

これに対して，1種類の物質だけからなるものを特に純物質という。1円硬貨はアルミニウム Al で作られており純物質である。パソコンやスマートフォンなどの様々な電子機器に使われている半導体基板材料^{*9}であるシリコンウェハーは極めて高純度のケイ素（シリコン） Si で，またグラニュー糖や氷砂糖は高純度のショ糖（スクロース）（図1-3）の結晶からなっており，これらもやはり純物質である。

^{*9} 半導体については10-5-1節参照。

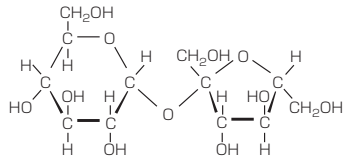


図1-3 ショ糖 ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) の構造

1-3-2 化合物とは，単体とは

“窒素 N_2 ”，“酸素 O_2 ”，“水 H_2O ”，“塩化ナトリウム NaCl ”はいずれも1種類の物質だけからなる純物質である。たとえば水分子は $[\text{H}_2\text{O}]$ （分子式^{*10}）と書き表されるが，これは水分子が水素原子 H 2個と酸

^{*10} 化学式のうち，分子について組成や構造を表わした式のこと。

素原子 O 1 個で構成される粒子（分子）であることを示している（酸素原子の数「1」は省略される）。同じように窒素は「N₂」で示され、窒素原子 N 2 個で構成される粒子（分子）であることを示している。

2 種類以上の元素からなる物質を**化合物**という。したがって水 H₂O や塩化ナトリウム NaCl は化合物である。これに対して 1 種類の元素のみからなる物質を**単体**といい、窒素 N₂、酸素 O₂ は単体である。化合物は化学的な方法、たとえば電気分解などで 2 種類以上の成分に分解でき、逆に、単体を化合することにより化合物が作られる^{*11}。

以上の物質の分類を図 1-4 にまとめた。

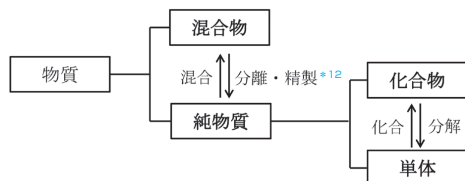


図 1-4 物質の分類

1-4 物質の状態の変化を粒子のレベルで考える

地球は水の惑星といわれるように、私たちの身の周りにはたくさんの水が存在し、私たち自身の体も水が最大の構成成分である。そして水は氷、水蒸気としても存在している。このように物質は氷のような**固体**状態、水のような**液体**状態、水蒸気のような**気体**状態の 3 つの状態をとりうる。これを物質の三態という。そして、温度や圧力が変化するとこの状態は変化する。このとき、物質の種類が変わるわけではないので、このような変化を**物理変化**といい、前出の化学変化（1-1 節参照）とは区別される。物質の状態変化をまとめると図 1-5 のようになる。

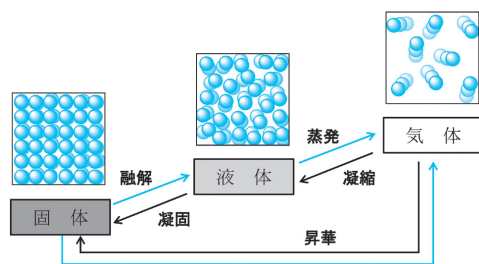


図 1-5 物質の三態の関係

*11 化合物どうしが原子を組み換えて（化合して）新たな化合物をつくる場合もある。

*12 混合物から純物質を分離して取り出すことを**精製**という。

ではこのような変化はなぜ起こるのだろうか。

物質粒子は常に運動をしており、この運動のことを**熱運動**^{*13}という。また粒子間にはお互いに“引力”がはたらく。状態の変化はこれら熱運動と粒子間の距離・引力の大きさが変化することによって引き起こされる。

たとえば水分子 H₂O を考えてみよう。低温の氷の状態では熱運動が小さく、分子間の距離が小さいため引力が互いに強くはたらく、固体としての決まった形を与える（分子相互の位置が変わらない）。これを加熱していくと 0 °C（常圧）^{*14}で融解して水になる。加熱することによって熱運動が激しくなり水分子は絶えず動いて位置を変えるが、分子間の距離は比較的小さく、互いに弱い力がはたらくて集合状態を保っている。したがって、液体は、たとえば氷のように決まった形はないが、一定の体積をもつことになる。

水分子は絶えず運動して位置を変え、互いに衝突しあい、表面付近では分子間の引力を断ち切って飛び出して水蒸気（気体）となる分子が現れる。これを**蒸発**という。そして 100 °C ^{*15}（常圧）に達すると内部からも蒸発（沸騰）が起こる。水蒸気は、分子間の距離が大きく引力がほとんどはたらかない。したがって分子はばらばらになって自由に動き回り、決まった形をもたず、体積も固体や液体に比べ、急激に大きくなる。

このように粒子レベルで考えることによって、目で見える現象を理解することができる。

二酸化炭素 CO₂ は -78.5 °C（常圧）以下では固体であり、アイスクリームなどの保冷剤、ドライアイスとしてよく見かける。そして、常圧では固体から液体になることなく直接気体になる（**昇華**）。たとえば防虫剤などとして使われるナフタレン^{*16}も同様に昇華性を示す。では、水と二酸化炭素ではどうしてこのように大きく異なった状態変化を示すのであろうか。しかも状態変化が起きる温度は水の方がはるかに高い。二酸化炭素が昇華性を示す原因はおもに分子間の引力が弱いことにより説明される。ではなぜ、二酸化炭素は分子間の引力が弱いのだろうか。

水分子と二酸化炭素分子の分子モデル（空間充填模型）を図 1-7 に示す。

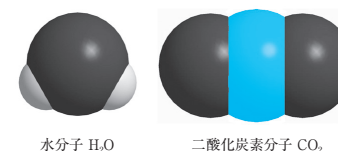


図 1-7 水と二酸化炭素の構造

*13 9-1-2 節、図 9-3 参照。

*14 固体が溶けて液体になる温度を**融点**という。また、逆に水を冷却していくと 0 °C で凍りはじめる。液体が固体になる温度を凝固点といい、融点と凝固点は一致する。また、純物質の固体は固有の値をもち、純度の検定やその物質の識別にも利用される。

*15 液体が気体になる温度を**沸点**という。沸点は圧力によって変化するが、純物質では固有の値をもち、その物質の識別にも利用される。

*16 ナフタレン（C₁₀H₈）の構造（有機化合物の構造に関しては、第 11 章を参照）。

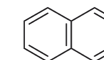


図 1-6

水分子も二酸化炭素分子もいずれも3つの原子から構成される。しかし、その形は大きく異なる。水分子は「折れ線型」といわれる曲がった分子の形であるのに対して、二酸化炭素は「直線型」の構造をとる。なぜこのような構造の違いが生じるのか、そして、どうしてこの構造の違いが分子間の引力の違いに結びつくのかは第2章以降で明らかになる^{*17}。

つまり、状態変化は粒子の挙動を考えることで説明されたが、物質による挙動の違いをより詳細に理解するためには、その物質の真の姿（構造）を知る必要がある。

最初に述べたように（1-1節）、化学は物質の「構造」「性質」「変化」を研究する学問である。これらはお互いに密接に関連しあっており、構造を知ること、その挙動、性質や反応を理解することに直結するのである。

*17 たとえば第4章「コラム／発展」参照。

たとえば硫酸 H_2SO_4 は630万トン／年、エチレン C_2H_4 は690万トン／年、水酸化ナトリウム NaOH は390万トン／年ほどが生産されている。硫酸は主に二酸化硫黄 SO_2 から接触法というプロセスで製造され^{*19}、肥料や薬品の製造など、化学工業で広く用いられている。エチレンはナフサ（原油を蒸留して得られる粗製ガソリンのこと）を熱分解して得られ、代表的なプラスチック（高分子化合物）であり広く使われているポリエチレンの原料（モノマー）として（第11章参照）、また、その他の高分子化合物のモノマーの製造原料としてなど、多くの薬品の製造に用いられている。水酸化ナトリウムは塩化ナトリウム NaCl 水溶液を電気分解して、塩素 Cl_2 、水素 H_2 と共に製造されている（電解法^{*20}）。石油の精製や石けん、紙や繊維などの製造に用いられるほか、アルミニウムの原料であるボーキサイトからアルミナといわれる酸化アルミニウム Al_2O_3 を取り出す際などにも利用されている。

*19 接触法
酸化バナジウム(V) V_2O_5 を触媒（6-3節参照）として SO_2 を空気中の酸素 O_2 と反応させて二酸化硫黄 SO_3 とし、これを濃硫酸中の水 H_2O と反応させるプロセス（第10章参照）。

*20 具体的には主に「イオン交換膜法」という方法で行われている（第10章参照）。

「コラム／発展」

実は身近な私たちの生活を支える化学工業

化学は私たちの身の回りのすべての物質を取り扱い、そして私たちの生活に密接にかかわっている学問である。実際、多くの化学製品が製造され、それらが私たちの生活を支えている。その中には通常は直接目にするものではないが、なくてはならないものがたくさん含まれている。こうした化学製品を作り出す化学工業（プラスチック製品やゴム製品も含む）の日本における出荷額（2014年）は約43兆円にのぼり、産業の中の大きな部分を占める。そしてこれは中国、アメリカに次いで第3番目の額に相当する^{*18}。

例として特に原材料となる化学製品がどの程度生産されているのかをいくつかピックアップして表1-2にまとめた。

表1-2 主な化学製品の生産量（2015年度）

化学製品名	化学式	生産量（千トン）	主な用途
苛性ソーダ （水酸化ナトリウム）	NaOH	3,849	アルミニウムの製造、中和剤、石けん等
アンモニア	NH_3	901	肥料、合成繊維原料等
塩酸*	HCl	1,862	薬品の製造等
硫酸	H_2SO_4	6,295	肥料、薬品の製造等
エチレン	C_2H_4	6,882	プラスチック・薬品原料等
ベンゼン	C_6H_6	4,061	薬品原料等

*塩酸の生産量は35%換算値
統計データ：経済産業省、日本肥料アンモニア協会、日本ソーダ工業会、硫酸協会、石油化学工業会

*18 日本化学工業会「グラフで見る日本の化学工業」参照。

演習問題

1. 図 1-8 は海水の元素組成を表している。(a)～(d) がどの元素に相当するかを予想せよ (図 1-2 を参考にせよ)。

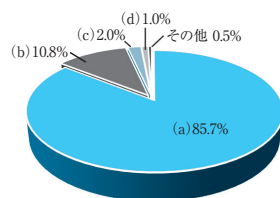


図 1-8 海水を構成する元素の組成 (質量パーセント*)
(*濃度については 5-4 節を参照)

2. 次の物質を単体、化合物、混合物のいずれかに分類せよ。
- (1) 牛乳 (2) 氷 (3) 石油
(4) ダイヤモンド (5) ナフタレン
3. 次の変化は物理変化であるか、化学変化であるかを答えよ。
- (1) 洗濯物が乾く。
(2) 鉄くぎがさびる。
(3) ガスコンロに火をつける。
(4) 砂糖を水に溶かす。
(5) お風呂に発泡入浴剤を入ると泡が出る。

第2章 原子の構造

2-1 原子

2-1-1 原子の構造

物質をかたちづくる最小の基本粒子である原子は、陽子と中性子からなる原子核と、原子核の周囲を運動する電子によって構成されている (図 2-1)。陽子と中性子はほぼ等しい質量をもち、電子はこれらの 0.05% 程度の質量しかない*1。陽子は正電荷を、電子は負電荷を帯びており、正負は反対だが、それらの電荷の大きさは等しく、電気素量*2をもとに陽子 1 個の電荷を +1、電子 1 個の電荷を -1 で表す。中性子は電氣的に中性な粒子で電荷をもたない。原子は同じ個数の陽子と電子をもち、お互いの電荷を打ち消すので全体として電氣的に中性である。

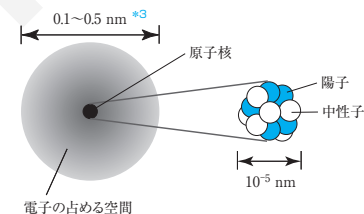


図 2-1 原子の構造

*1

表 2-1 原子を構成する粒子

	質量 / kg	質量比	相対電荷
陽子	1.673×10^{-27}	1836	+1
中性子	1.675×10^{-27}	1839	0
電子	9.109×10^{-31}	1	-1

*2 電気素量

電子もしくは陽子 1 個がもつ電気で $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ である。e で表される。

*3 $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$

である。n はナノと読み、 10^{-9} を表す SI 単位系の接頭語 (接頭辞) である。

2-1-2 元素という分類 (原子番号・質量数・同位体)

陽子、電子、中性子の 3 種類の粒子の組み合わせで構成される原子は、その組み合わせの違いにより数千種類が存在する。このように膨大な種類の原子をわかりやすく分類して物質を理解するために、いくつかの数値が定義されている。

原子の性質は電子の状態 (個数や配置など) によって決まる。そして、このような電子の状態は原子核内の正電荷の大きさ、つまり陽子の個数に支配されている。そこで陽子の個数を原子番号と決めて原子に“背番号”を付け、原子番号ごとに原子を区別する元素という分類ができた。中性子の数が異なっていたり、電子の数が異なっても、陽子の数 (=