

第 I 編 物質の構成

見本

第 1 章 原子の構造

本章では物質の最小単位である原子について、その構成要素について理解を深める。すなわち、原子は陽子と中性子からなる原子核とそれを取りまく電子からなっており、陽子の数が原子番号を規定している。また、同位体は中性子数の異なるものであり、それらの表記法についても学ぶ。なお、本章では現在認識されている事実を列挙しているが、ここへ至る変遷については第 2 章を参照していただきたい。

1.1 原 子

原子 (atom) の直径は $1 \sim 5 \times 10^{-10}$ m 程度で、1 個の原子核 (atomic nucleus) とそれを取りまく $1 \sim 100$ 個余りの電子 (electron) から成り立っている。原子核は 10^{-14} m \sim 10^{-15} m 程度の直径をもつ粒子で、陽子 (proton) と中性子 (neutron) からなり、両者合わせて核子といい、原子の大部分の質量を占める¹⁾。これに対し、電子の質量は陽子や中性子の約 $1/1840$ と非常に軽い。原子核の電荷は、原子中の電子 1 個の電荷に等しいかあるいはその整数倍である。すなわち、電子の電荷は $-e$ 、原子核の電荷は $+Ze$ である。Z は整数であり、原子番号 (atomic number) とよばれ、中性原子では電子の数も Z に等しい。ここで、 e は素電荷 (elementary charge) であり、その値は $e = 1.60218 \times 10^{-19}$ C である。陽子、中性子や電子のように物質の根元的な構成粒子のことを素粒子という。表 1-1 にこれらの質量と電荷を示す。

表 1-1 原子の構成粒子とその性質

素粒子	記号	質量 /kg	原子質量 /u	電荷 /C
陽子	p	$1.6726231 \times 10^{-27}$	1.007276	$+ 1.60217733 \times 10^{-19}$
中性子	n	$1.6749284 \times 10^{-27}$	1.008665	0
電子	e	$9.1093897 \times 10^{-31}$	0.000549	$- 1.60217733 \times 10^{-19}$

ある元素 (element) の原子核中の陽子の数はその元素の原子番号 (Z) に等しく、その元素に特有である。一方、中性子の数 (N) は陽子の数と同じか多いが、その数は陽子のように各元素について一定していない。すなわち、同じ元素の陽子数は一定で Z に等しいが、中性子数はまちまちである。中性原子ではこのような原子核を Z 個の電子がとりまいている。

核子の総数、すなわち陽子と中性子の数の和を質量数 (mass number) といい、A で表す。電子の質量は陽子や中性子に比べて非常に小さいので、

1) 原子と原子核の大きさをたとえると、原子を甲子園球場とするとボールが原子核にほぼ対応する。なお、原子内での電子の存在状況については第 2 章で詳しく述べる。

原子の質量は質量数にほぼ等しい。これらをまとめると、原子番号、質量数は以下のように表される。

$$\text{原子番号 (Z)} = \text{陽子数} = \text{電子数}$$

$$\text{質量数 (A)} = \text{陽子数 (Z)} + \text{中性子数 (N)}$$

1.2 同位体

先に述べたように、同じ元素でありながら質量数が異なる原子が存在する。このような原子を互いに**同位体** (isotope) という。いいかえると、同位体とは陽子数と電子数が同じで、中性子数が異なる原子である。また、同位体は原子番号が同じであるので、それらの化学的性質は同じである。特定の原子を元素記号 E で表すときには、元素記号の左下に原子番号を、左上に質量数を付記する。

$${}^A_Z\text{E} \quad \text{E: 元素記号, Z: 原子番号, A: 質量数}$$

このように指定された原子または原子核のことを**核種** (nuclide) という。

同位体の例を表 1-2 に示す。水素は質量数 1 のものに加えて、質量数 2 の重水素 (deuterium)、質量数 3 の三重水素 (tritium) の存在が知られている²⁾。

表 1-2 同位体の種類と存在率

元素	原子番号	核種	陽子数	中性子数	同位体の 相対質量 /u	存在率 /%	原子量
水素	1	${}^1\text{H}$	1	0	1.007825	99.985	1.00794
		${}^2\text{H}$	1	1	2.014102	0.015	
		${}^3\text{H}$	1	2	3.01695	0 ^{a)}	
炭素	6	${}^{12}\text{C}$	6	6	12	98.893	12.011
		${}^{13}\text{C}$	6	7	13.003355	1.107	
窒素	7	${}^{14}\text{N}$	7	7	14.003074	99.634	14.007
		${}^{15}\text{N}$	7	8	15.000109	0.366	
酸素	8	${}^{16}\text{O}$	8	8	15.994915	99.762	15.999
		${}^{17}\text{O}$	8	9	16.999131	0.038	
		${}^{18}\text{O}$	8	10	17.999159	0.200	

a) 放射性同位元素であり、天然には極めて微量にしか存在しない。

2) 水素の元素記号は H であるが、重水素は D で、三重水素は T で表すことがある。これを用いると H_2O は軽水、 D_2O は重水を表す。

1.3 原子量

原子の絶対質量は極めて小さく、これを使うのは煩雑である。そこで、 ${}^{12}\text{C}$ の質量を基準にして厳密に相対質量を 12 と定め、これを基準にした各原子の相対質量 (原子質量) が用いられている。ここで、 ${}^{12}\text{C}$ 原子の 1 個の質量の $1/12$ を**原子質量単位** (atomic mass unit; amu) とよび、 $1 \text{ amu} = 1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$ である。

ある元素において、同位体それぞれの原子質量と存在率から計算した平

均相対質量を，この元素の原子量 (atomic weight) という。一例として，炭素の場合では以下のようなになる。

$$\text{炭素の原子量} = \frac{(12.000000 \times 98.893 + 13.003355 \times 1.107)}{100} = 12.011107$$

第Ⅱ編 物質の反応

見本

第7章 化学反応と化学量論

身のまわりにはいろいろな物質が存在し、あるものは燃えたり、またあるものはさびたりして、物質は変化する。このような物質の相互変換を表すのが化学反応であり、それを定量的に扱うことは重要なことである。化学反応の特徴は、反応する物質の量が必ず一定比になることである。それぞれの化学反応における固有の量的関係を決めているのが、原子や分子の存在とその構成、さらには反応の形式である。そのような物質の組成や化学反応を定量的に取り扱うことを化学量論といい、化学計算の基礎になる。この章では化学反応と化学量論について学習するが、これらを理解するのに必要な物質量、濃度、化学式についても考える。

7.1 物質量

原子や分子の粒子は非常に小さいため、それらの数を数えることは困難である。また、金や白金などはきれいな光沢を示す単体であり、このような光沢を放つ特性は原子1個だけでは現れることはなく、多数の原子の集合体となってはじめて物質としての性質が現れる。そこで、これらの集団を一つの単位として考えるとわかりやすくなるので、SI基本単位である**物質量** (amount of substance) (SI基本単位：モル (mole), 単位記号：mol) が定義されている。物質量の定義は、「0.012 kg の ^{12}C に含まれる炭素原子と同数の構成粒子を含む系の物質量を 1 mol とする」である。

物質 1 mol あたりの粒子数はすべての原子、分子、イオンに共通の値であり、これは**アボガドロ定数** $N_{\text{A}} = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (精確な値は $6.02214129 \times 10^{23}$) という。これに対し、単位のないものは**アボガドロ数**という。また、物質 1 mol あたりの質量を**モル質量** (molar mass) といい、原子量・分子量・式量に単位 g mol^{-1} をつけたものである。例えば、水 H_2O のモル質量は 18.02 g mol^{-1} であり、これは H_2O 分子が 1 mol (アボガドロ数個、 6.022×10^{23} 個) 集まれば 18.02 g になることを意味している。ここで、分子量と式量の違いを示しておこう。分子量は、分子式に含まれるすべての原子の原子量の和である。一方、式量は原子量や分子量も含んだより広い意味の用語である。イオンの場合、原子量ではなく式量である。例えば、「 Na^+ の原子量は 22.99 である」とはわず、「 Na^+ の式量は 22.99 である」という。また、イオン結晶のように分子を形成しない物質については、組成式中の原子量の和を式量という。「 NaCl の分子量は 58.44 である」とはわず、「 NaCl の式量は 58.44 である」という。また、共有結合性物

質に対しては、分子量と式量のどちらを使ってもよい。例えば、「 H_2O の分子量は18.01である」でも、「 H_2O の式量は18.01である」のどちらでもよいことになる。

例題 7-1 白金 Pt 3.000 g 中の Pt 原子の個数を求めなさい。

解 答

Pt のモル質量 : 195.1 g mol^{-1}

Pt 3.000 g の物質量は

$$\frac{3.000 \text{ g}}{195.1 \text{ g mol}^{-1}} = 1.538 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

したがって、Pt 原子の個数は

$$1.538 \times 10^{-2} \text{ mol} \times 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 9.262 \times 10^{21}$$

7.2 溶液の濃度

液体状態にある均一な混合物を**溶液** (solution) という。このとき、溶かしている液体を**溶媒** (solvent)、溶けている物質を**溶質** (solute) といい、溶液は溶媒と溶質の両方をあわせたものである。溶液の組成は、いろいろな濃度で表される。よく用いられている濃度表示として、モル濃度 (容量モル濃度) (molarity)、質量モル濃度 (molality) および質量パーセント濃度があり、次のように定義されている。

モル濃度 (c) : 溶液 1 dm^3 (L) に含まれる溶質の物質量 [mol]

単位 : mol dm^{-3} (mol L^{-1} , M)

$$c = \frac{\text{溶質の物質量}}{\text{溶液の体積}} \quad [\text{mol dm}^{-3}]$$

質量モル濃度 (m) : 溶媒 1 kg に含まれる溶質の物質量 [mol]

単位 : mol kg^{-1}

$$m = \frac{\text{溶質の物質量}}{\text{溶媒の質量}} \quad [\text{mol kg}^{-1}]$$

質量パーセント濃度¹⁾ : 溶液 100 g に含まれる溶質の質量 [g]

単位 : %

$$\frac{\text{溶質の質量}}{\text{溶液の質量}} \times 100 \quad [\%]$$

ここで注意すべきことは、モル濃度は溶液の体積 1 dm^3 (L) に溶けている溶質の物質量であるのに対して、質量モル濃度は溶媒の質量 1 kg に溶けている溶質の物質量である点である。溶液を扱う場合、モル濃度はよく用いられるが、溶液の体積は温度によって変化するのでモル濃度は温度によって変化してしまう。そこで、沸点上昇や凝固点降下など温度が変化す

1) 溶質が微量なときには、ppm (parts per million), ppb (parts per billion), ppt (parts per trillion) が用いられる。

$$\text{ppm} = \frac{\text{溶質の質量} [\text{mg}]}{\text{溶液の質量} [\text{kg}]}$$

$$\text{ppb} = \frac{\text{溶質の質量} [\mu\text{g}]}{\text{溶液の質量} [\text{kg}]}$$

$$\text{ppt} = \frac{\text{溶質の質量} [\text{ng}]}{\text{溶液の質量} [\text{kg}]}$$

る現象を取り扱う場合は、モル濃度の代わりに質量モル濃度が用いられる。

例題7-2 濃塩酸は密度が 1.18 g cm^{-3} で、HCl (モル質量 36.46 g mol^{-1}) の質量パーセント濃度が 36.0% である。この濃塩酸の (a) モル濃度と (b) 質量モル濃度を求めなさい。

解 答

(a) モル濃度

濃塩酸 1000 cm^3 ($1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ L}$) の質量は

$$1000 \text{ cm}^3 \times 1.18 \text{ g cm}^{-3} = 1180 \text{ g}$$

この 1180 g のうち 36.0% が HCl であるので、HCl の質量は

$$1180 \text{ g} \times 0.360 = 425 \text{ g}$$

HCl の物質量は

$$\frac{425 \text{ g}}{36.46 \text{ g mol}^{-1}} = 11.7 \text{ mol}$$

11.7 mol の HCl が溶液 1000 cm^3 ($1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ L}$) に含まれているので、濃塩酸のモル濃度は 11.7 mol dm^{-3} (M) となる。

(b) 質量モル濃度

濃塩酸 1180 g 中には HCl が 425 g 含まれているので、水の質量は

$$1180 \text{ g} - 425 \text{ g} = 755 \text{ g}$$

したがって、濃塩酸の質量モル濃度は

$$\frac{11.7 \text{ mol}}{0.755 \text{ kg}} = 15.5 \text{ mol kg}^{-1}$$

7.3 化学式

元素記号を用いて物質を表したものが**化学式** (chemical formula) である。化学式には、元素の比率を示す**組成式 (実験式)** (compositional formula)、含まれる元素の数を表す**分子式** (molecular formula)、化合物の特性を示す原子団を表す**示性式** (rational formula)、さらには化合物の構造がわかる**構造式** (structural formula) がある。化合物の中には組成式と分子式が同じものもある。酢酸を例に挙げると、次のようになる。

組成式 (実験式) CH_2O

分子式 $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$

示性式 CH_3COOH

構造式 $\text{H}_3\text{C}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$

化合物を表すには主に示性式が用いられる。例えば、エタノールとジメチルエーテルは分子式 (組成式でもある) がともに $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ と同じであるが、示性式はそれぞれ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ と CH_3OCH_3 となり、二つを区別することがで