

モル計算と濃度計算

ほうじ茶

2025 年 11 月 10 日

概要

本稿では、モル計算と濃度計算を扱う。当然ながら、試薬の調整に必要な知識である。微生物を扱う上では、寒天培地をつくる際にどのくらいの寒天が必要なのか？、植物の成分抽出をする上では、エタノールの濃度はどのくらいが適切なのか？などを考える必要がある。これらの計算ができない限り、実験系を組むことができず実験のスタートラインに立てない。そのため、まずは計算できるようになることを目的とする。

化学 Chemistry の基本的な考え方は、すべての物質は粒で構成されているということである。その粒の構造や運動を、実験的に導かれ帰納的に体系化されていることを忘れないで欲しい。

目次

1	国際単位系 International System of units	2
1.1	基本単位 Basic units	2
1.2	物質質量 Amount of substance	2
1.3	接頭辞 Prefix	3
1.4	単位換算 Unit conversion	3
2	組立単位とその意味	4
2.1	2 乗, 3 乗のイメージ	4
2.2	単位の構成	4
2.3	間違いやすいが変換できる単位	6
2.4	mol を含む組立単位	6
2.5	百分率は分母に 100 が隠れてる	6
	参考文献	a
	付録 A 基本単位の定義	b

[青文字](#)をクリックすると、対応したページに遷移する。

1 国際単位系 International System of units

科学 Science の世界では、測定や計算に**国際単位系** ^[1] という国際的に統一された単位系を使用する。この単位系を用いて**数値と単位の組**でデータを示す。この組のことを**物理量** Physical quantity という。7つの**基本単位**を組み合わせ**組立単位**にすることで、さまざまな単位を作ることができる。組立単位を知ることによって、求めたい単位に変える**単位換算** Unit conversion を行うことができるようになる。

1.1 基本単位 Basic units

基本単位は次の7つである。

表 1: 基本単位

データの種類	英語	単位
時間	<i>time</i>	[s]
距離	<i>route</i>	[m]
電流	<i>Intensity of current</i>	[A]
質量	<i>mass</i>	[kg]
絶対温度	<i>Temperture</i>	[K]
物質質量	<i>number</i>	[mol]
光度	Luminous <i>I</i> ntensity	[cd]

モル計算や濃度計算においては、**質量** m [kg]、**物質質量** n [mol] のみ登場する。それ以外は参考として載せておくので、眺めてみると良いだろう。

1.2 物質質量 Amount of substance

原子 1 粒同士を比較しても、非常に小さいため明確に重さの違いは分からない。しかし、何万、何億の粒を集めて比較すると、違いが分かるようになる。かつては、炭素原子を基準として 12 [g] になるために必要な数である 6.022×10^{23} 個 (アボカドロ数) を 1 [mol] としていた。ただし、「炭素」依存での定義であり普遍性に欠ける。

ここでアボガドロ定数 N_A を $6.022, 140, 76 \times 10^{23}$ [/mol] と定義 ^[5] することで、単位の大きさを定めた。簡単に言えば、原子や分子の粒を N_A 個のことを 1 [mol] と置いた。この考えは、12 個を 1 ダースと置くのと同じである。

物質質量以外が何を基準として定義されているのかは、[付録 A 節](#)に記載した。

1.3 接頭辞 Prefix

接頭辞とは、基本単位よりも**大きい・小さいことを表す指標**のことである。Si 接尾辞では $\times 10^{\pm 30}$ まで定まっているが、よく使われる $\times 10^{\pm 12}$ までを紹介する。

表 2: Si 接頭辞

(+) 接頭辞	英語	指数乗	(-) 接頭辞	英語	指数乗
T	Tera	$\times 10^{12}$	p	pico	$\times 10^{-12}$
G	Giga	$\times 10^9$	n	nano	$\times 10^{-9}$
M	Mega	$\times 10^6$	μ	micro	$\times 10^{-6}$
k	kilo	$\times 10^3$	m	milli	$\times 10^{-3}$
h	hecto	$\times 10^2$	c	centi	$\times 10^{-2}$
da	deca	$\times 10^1$	d	deci	$\times 10^{-1}$

マイナス乗は、プラス乗にすると**逆数**になる。例えば、 10^{-6} は $\frac{1}{10^6}$ である。また、 10^{-6} は μ と置き換えられる。この考え方ができるようになると、単位換算が容易になる。

1.4 単位換算 Unit conversion

単位は、**定義に基づいて組み立てることで新しい単位ができる**。基本的には、**同じ意味を持つもの同士を分母と分子に置き、約分する**ことで求めたい単位へと変える。式 (1.1) は、「1 日は何秒か？」を求めたものである。恐らく、一度は計算したことがあるだろう。

$$1 [\text{day}] = 1 [\text{day}] \times \frac{24 [\text{hr}]}{1 [\text{day}]} \times \frac{60 [\text{min}]}{1 [\text{hr}]} \times \frac{60 [\text{sec}]}{1 [\text{min}]} = 86,400 [\text{sec}] \quad (1.1)$$

単位換算を行う上で押さえるポイントは、最初の単位と**求めたい単位に注目し定義としてどの物理量同士が等しいか**を考え約分する必要がある。今回の場合、1 [day] と 24 [hr] は定義より等しいので、分母と分子に置くことで理論上約分でき 1 と同じ意味となる。

次に、1.3 節の接頭辞を用いた単位換算を扱う。一例として、[mL] を [L] に変える場合を考える。

$$1,000 [\text{mL}] = 1,000 \times 10^{-3} [\text{L}] = 1 [\text{L}] \quad (1.2)$$

[mL] の m は、表 2 を参照すると指数乗は 10^{-3} である。そのため、まず**接頭辞を指数乗に変える**。そのあと、指数乗を掛けることで単位を換算できる。

当然ながら接頭辞を付けたす場合は、その指数乗の符号を変えたものを掛ければよい。一例として、式 (1.2) の逆を考える。

$$1 [\text{L}] = 1 \times 10^{+3} [\text{mL}] = 1 [\text{mL}] \quad (1.3)$$

2 組立単位とその意味

国際単位系を乗除算して表現したい単位を新たに作り出すことができる。この単位のことを**組立単位**という。各論的に次に述べる。

2.1 2 乗, 3 乗のイメージ

乗算して作り出した単位としては, square meter $[m^2]$, cubic meter $[m^3]$ が挙げられる。meter $[m]$ は一次元でありただの直線 (図 1) である。

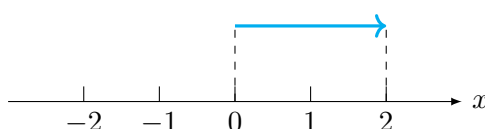


図 1: 一次元のイメージ

そこに $[m]$ を掛けると二次元となり**平面** (図 2) である。これは、**面積**と同じ意味を示している。

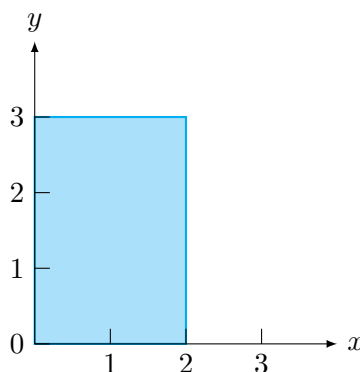


図 2: 二次元のイメージ

さらに $[m]$ を掛けると三次元となり**空間** (図 3) である。これは、**体積**と同じ意味を示している。

2.2 単位の構成

単位**^{*1}あたりの変化量は、分母に置くこと^{*2}で表現できる。そのため、一例として 1.4 節の式 (1.1) の単位は $[hr/day]$ と表記でき、 $[/day]$ は**1 日あたり**という意味となる。

質量は、化学の計算においては**モル質量** $[g/mol]$ の形で計算をする。モル質量とは、**1 $[mol]$ あたりの質量** のことである。各原子ごとに一義の値が経験則から計算されているため、そ

^{*1} 大きさを 1 に仕立てた**のこと。

^{*2} 一般に $[/x]$ や $[x^{-1}]$ と表記されるが、本稿では分かりやすさより $\frac{1}{x}$ を用いる。

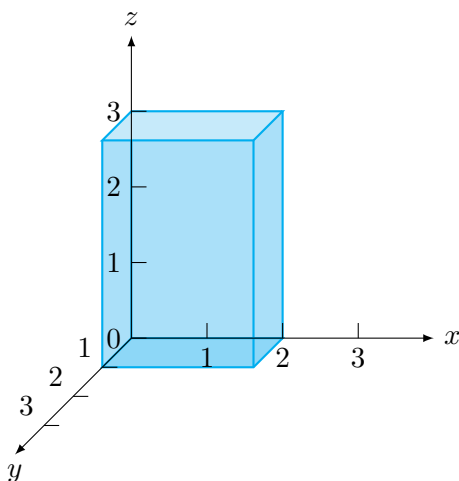


図 3: 三次元のイメージ

の値を使えばよい。基本的には周期表に記載されている。日本化学会が公開している周期表を図 4 に示した。

元素の周期表(2025)

期数\族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	注・備考
1	<div> <div> <div>1 H</div> <div>水素</div> <div>1.00784-1.00811</div> </div> <div> <div>2 He</div> <div>ヘリウム</div> <div>4.002602</div> </div> </div>																		1
	<div> <div> <div>3 Li</div> <div>リチウム</div> <div>6.938-6.997</div> </div> <div> <div>4 Be</div> <div>ベリリウム</div> <div>9.0121831</div> </div> </div>																		2
	<div> <div>5 B</div> <div>ホウ素</div> <div>10.811</div> </div> <div> <div>6 C</div> <div>炭素</div> <div>12.0096-12.0116</div> </div> <div> <div>7 N</div> <div>窒素</div> <div>14.00643-14.00728</div> </div> <div> <div>8 O</div> <div>酸素</div> <div>15.99903-15.99977</div> </div> <div> <div>9 F</div> <div>フッ素</div> <div>18.998403163</div> </div> <div> <div>10 Ne</div> <div>ネオン</div> <div>20.1797</div> </div>																		

2	11 Na ナトリウム 22.98976928 12 Mg マグネシウム 24.304-24.307																		3
13 Al アルミニウム 26.9815386 14 Si ケイ素 28.0855-28.086 15 P リン 30.973761998 16 S 硫黄 32.059-32.076 17 Cl 塩素 35.446-35.457 18 Ar アールゴン 39.96238317																			
19 K カリウム 39.0983 20 Ca カルシウム 40.078 21 Sc スカンジウム 44.955907 22 Ti チタン 47.867 23 V バナジウム 50.9415 24 Cr クロム 51.9961 25 Mn マンガン 54.938043 26 Fe 鉄 55.845 27 Co コバルト 58.933194 28 Ni ニッケル 58.6934 29 Cu 銅 63.546 30 Zn 亜鉛 65.38 31 Ga ガリウム 69.723 32 Ge ゲルマニウム 72.630 33 As ヒ素 74.921595 34 Se セレン 78.9718 35 Br 臭素 79.904-79.907 36 Kr クリプトン 83.798																			
3	37 Rb ルビ듐 85.4678 38 Sr ストロンチウム 87.62 39 Y イットリウム 88.905858 40 Zr ジルコニウム 91.224 41 Nb タングステン 92.90637 42 Mo モリブデン 95.95 43 Tc テクネチウム (99) 44 Ru ロジウム 101.07 45 Rh パラジウム 106.42 46 Pd 白金 106.9288 47 Ag 銀 107.8682 48 Cd カドミウム 112.414 49 In インジウム 114.818 50 Sn スズ 118.710 51 Sb アンチモン 121.760 52 Te テルル 127.60 53 I ヨード 126.90447 54 Xe キセノン 131.293																		
55 Cs セシウム 132.90545196 56 Ba バリウム 137.327 57 La ランタニウム 138.9047 58 Ce セリウム 140.90768 59 Pr プラセオジム 144.242 60 Nd ネオジム 145.90653 61 Pm プロメチウム (145) 62 Sm サマリウム 150.36 63 Eu ユークレピウム 151.964 64 Gd ガドリニウム 157.25 65 Tb タービュラム 158.92534 66 Dy ホルミウム 162.500 67 Ho ホウメイト 164.930329 68 Er エルビウム 167.259 69 Tm テンプテム 168.934219 70 Yb ユビウム 173.040 71 Lu ルテチウム 174.96689																			
4	71 La ランタニウム 138.9047 72 Hf ハフニウム 178.49 73 Ta タンタル 180.94788 74 W タングステン 183.84 75 Re ロゼンバウム 186.207 76 Os オースミウム 190.23 77 Ir アイリウム 192.221 78 Pt 白金 195.084 79 Au 金 196.966570 80 Hg 水銀 200.592 81 TI 鉛 206.14-206.385 82 Pb 鉛 206.14-206.385 83 Bi ビスマス 208.98040 84 Po ポロニウム (210) 85 At アスタット (210) 86 Rn ラドン (222)																		
87 Fr フランシウム (223) 88 Ra ラザール (226) 89-103 アクチノイド (227) 104 Rf ラファエル (261) 105 Db ドブニウム (262) 106 Sg シーボグム (266) 107 Bh ボーヘリウム (264) 108 Hs ハセニウム (277) 109 Mt ミーテネウム (268) 110 Ds ダウジウム (271) 111 Rg ローゲンチウム (272) 112 Cn カニヒウム (285) 113 Nh ニホニウム (284) 114 Fl フルロウィウム (289) 115 Mc モクロウィウム (288) 116 Lv リモフウィウム (293) 117 Ts テネシウム (294) 118 Og オガネソン (294)																			

注 1： 元素記号の右側の「s」はその元素には安定同位体が存在しないことを示す。そのような元素については放射性同位体の質量数の一例（ ）内に示した。ただし、Bi、Th、Po、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Md、No、Lr、Rf、Ta、W、Re、Os、Ir、Pt、Au、Hg、Tl、Pb、Bi、Po、At、Rn、Fr、Ra、Ac、Pa、U

图 4: 周期表^[7]

2.3 間違えやすいが変換できる単位

ここから先の内容は、知っているか知らないかの 0 と 1 である。そのため、簡単に表にまとめる程度にする。まずは、一見では変換できなさそうだけど定義上同じものである^{*3}。

表 3: 間違えやすいが変換できる単位

体積と質量	1 [cc]	=	1 [mL]	=	1 [g] ^{*4}
体積と密度	1 [L]	:=	1 [dm ³]	=	0.001 [m ³]
モル濃度	1 [M]	:=	1 [mol/L]		

2.4 mol を含む組立単位

やっと本題の話。mol を含んだ組立単位を表 4 に示す。

表 4: mol を含む単位

物質質量とアボガドロ定数	1 [mol]	:=	6.022×10^{23} [個/mol] ^{*5}
物質質量と気体の体積	1 [mol]	:=	22.4 [L]
物質質量と液体・個体の体積	1 [mol]	:=	$\frac{nm}{\rho}$ ^{*6}

モル質量は大きく 3 つある。原子量、分子量、式量である。この 3 つは無単位量として扱われている。

表 5: mol を含む単位

物質質量とアボガドロ定数	1 [mol]	:=	6.022×10^{23} [個/mol] ^{*7}
物質質量と気体の体積	1 [mol]	:=	22.4 [L]
物質質量と液体・個体の体積	1 [mol]	:=	$\frac{nm}{\rho}$ ^{*8}

2.5 百分率は分母に 100 が隠れてる

^{*3} 通常の = は同じことを示しているが、:= は左辺を右辺と定義するという意味である。

^{*4} 4°C の水基準である。それ以外では、値が前後することがあるので正確に量り取る時には適さない。

^{*5} アボガドロ定数の単位は、一般には「個」を省略して [/mol] を用いる。

^{*6} n を物質質量, m をモル質量, ρ を密度とする。

^{*7} アボガドロ定数の単位は、一般には「個」を省略して [/mol] を用いる。

^{*8} n を物質質量, m をモル質量, ρ を密度とする。

参考文献

- [1] 産総研 計量標準総合センター. 国際単位系 (si). <https://unit.aist.go.jp/nmij/library/si-units>.
- [2] 科学技術振興機構 香取創造時空間プロジェクト. 世界を変える 1 秒の誕生. <https://www.jst.go.jp/erato/katori/feature>.
- [3] 中野 享 山田 善郎. 熱力学温度の単位「ケルビン」の定義改定. https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/si-brochure/pdf/5_SI_%E3%82%B1%E3%83%AB%E3%83%93%E3%83%B3.pdf.
- [4] 森北出版. 「アンペア」の定義のこれまでといま. <https://note.com/morikita/n/n0d9537d45ce1>.
- [5] 倉本直樹. 物質量の単位「モル」の基礎解説とアボガドロ定数にもとづく新たな定義を導いた計測技術. https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/si-brochure/pdf/6_SI_%E3%83%A2%E3%83%AB.pdf.
- [6] 藤井賢一. プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/61/10/61_716/_pdf/-char/en.
- [7] 日本化学会. 原子量表／化学で使われる量・単位・記号. <https://www.chemistry.or.jp/know/atom-unit>.

付録 A 基本単位の定義

基本単位には、一義性^{*9}と普遍性^{*10}を持った基準が必要であり世界共通のものである。その厳密な定義^[1]を紹介する。

時間の定義^[2]

原子や分子には、固有の振動数の光や電波を吸収し放射する性質がある。その性質を利用して、セシウム原子のマイクロ波の振動 $\Delta\nu_{Cs}$ を、9,192,631,770 回数えたときを 1 秒と定義した。 $[Hz]$ ^{*11}は単位時間あたりの振動数のことであり、 $[/s]$ と同じ意味である。

距離の定義

真空中の光の速さ c を 299,792,458 $[m/s]$ と定めることによって定義した。

電流の定義^[4]

かつては、真空中に 1 $[m]$ 間隔で平行に置いた無限に長い 2 本の導体がそれぞれを流れ、これらの導体の長さ 1 $[m]$ につき 2×10^{-7} $[N]$ の力を及ぼし合う一定の電流を 1 $[A]$ としていた。ただし、電流の単位を力として定義している。これは**電流は素粒子の流れ**であるという本質が分かっていたいなかったためである。そのため、2019 年に改定された。

新たに電気素量 e ^{*12}を $1.602,176,634 \times 10^{-19}$ $[C]$ と定めることによって定義した。 $[C]$ は単位時間あたりの電気量のことであり、 $[A \cdot s]$ と同じ意味である。

質量の定義^[6]

かつては、国際キログラム原器（白金とイリジウムの合金で出来た円柱）の質量を 1 $[kg]$ としていた。ただし、経年劣化により一義性に欠けるため、電流と同様に 2019 年に改定された。

物体の静止質量を m 、光子の周波数を ν 、プランク定数を h とすると、アインシュタインの相対性理論と量子仮説によれば式 (付録 A.1) である。

$$E = mc^2 = h\nu \quad (\text{付録 A.1})$$

^{*9} ただ 1 つに定まる性質のこと。

^{*10} 広く全ての場合に当てはめることができる性質のこと。

^{*11} ヘルツは、回数を示す単位である。

^{*12} ファラデー定数（電子 1 $[mol]$ が持つ電気量の値のこと）を F 、アボガドロ定数を N_A とすると、 $e = \frac{F}{N_A}$ でも求められる。

ここでプランク定数 h を $6.626, 070, 15 \times 10^{-34}$ [J・s] と定義することで、周波数 ν [Hz] の光子のエネルギー E と等価な質量が m [kg] である。

絶対温度の定義^[3]

かつては、氷と水、水蒸気が共存する温度 0.01°C の約 273 分の 1 を 1 [K] としていた。ただし、「水」という物質に依存しており、かつ三重点の実現可能性が低いため電流と同様に 2019 年に改定された。

理想気体の場合、個々の分子は他の分子と衝突するとき以外は自由に動く。1 個の単原子の平均の運動エネルギーは、質量を m 、2 乗平均速度を $\overline{v^2}$ 、ボルツマン定数 k 、絶対温度 T とすると式 (付録 A.2a) である。

$$\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT \quad (\text{付録 A.2a})$$

一方で、理想気体の分子 nN_A 個^{*13}を体積 V の容器に入れた場合、その圧力 p は、質量 m と 2 乗平均速度 $\overline{v^2}$ とすると式 (付録 A.2b) である。

$$p = \frac{1}{3} \frac{nN_A m \overline{v^2}}{V} \quad (\text{付録 A.2b})$$

式 (付録 A.2a) と (付録 A.2b) より、式 (付録 A.2c) の理想気体の状態方程式が得られる。

$$p(T)V = nN_A kT \quad (\text{付録 A.2c})$$

エネルギーは [J] = [kg・m²/s²] で表される。ここでボルツマン定数 k を $1.380, 649 \times 10^{-23}$ [J/K] と定義することで、単位の大きさを定めることと同じになる。

光度の定義

特定の周波数 540×10^{12} [Hz] の緑色の光を出す特定の方向に、放射強度 K_{cd} が 683 [lm/W] である点光源の光度を、1 [cd] と定義した。

^{*13} N_A はアボガドロ定数であり、ボルツマン定数 k と乗算することで気体定数 R となる。