

# 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** <sup>[1]</sup> 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>I</i> ntensity of current | [A]   |
| 質量     | <i>m</i> ass                 | [kg]  |
| 絶対温度   | <i>T</i> emperture           | [K]   |
| 物質質量   | <i>n</i> umber               | [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  $6.022 \times 10^{23}$  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 <sup>[5]</sup> 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  | $\times 10^6$    | $\mu$   | 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  $\mu$  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。

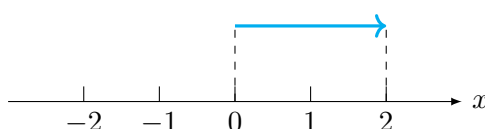


図 1: 一次元のイメージ

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。

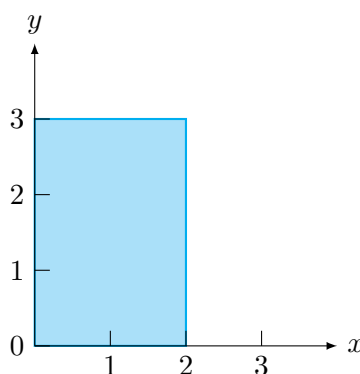


図 2: 二次元のイメージ

そこに  $[m]$  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\*\*<sup>\*1</sup>あたりの変化量は、分母に置くこと<sup>\*2</sup>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

<sup>\*1</sup> 大きさを 1 に仕立てた\*\*のこと。

<sup>\*2</sup> 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。

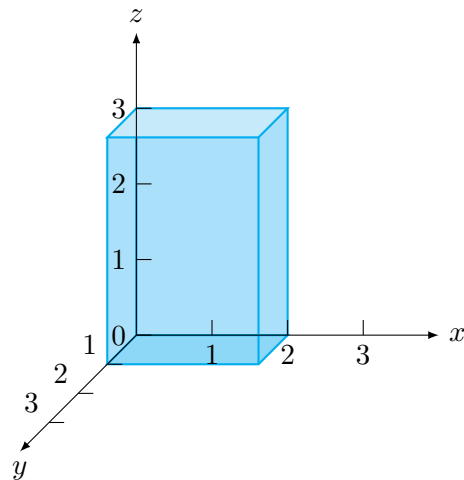


図 3: 三次元のイメージ

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)  |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|---|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 周期\族  | 1                                | 2                                    | 3                            | 4                            | 5                            | 6                           | 7                          | 8                        | 9                          | 10                         | 11                          | 12                          | 13                           | 14                        | 15                          | 16                          | 17  | 18                               | 族/周期                               |                                    |                                  |                                    |
| 1   | 1 H<br>水素<br>1.00784-<br>1.00811 |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   | 2 He<br>ヘリウム<br>4.002602         | 1                                  |                                    |                                  |                                    |
| 2   | 3 Li<br>リチウム<br>6.938-<br>6.997  | 4 Be<br>ベリリウム<br>9.0121831           |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             | 5 B<br>ボロン<br>10.811<br>10.809-<br>10.811 | 6 C<br>炭素<br>12.0096-<br>12.0116 | 7 N<br>窒素<br>14.00643-<br>14.00728 | 8 O<br>酸素<br>15.99903-<br>15.99977 | 9 F<br>フッ素<br>18.998403162       | 10 Ne<br>ネオン<br>20.1797            |
| 3   | 11 Na<br>ナトリウム<br>22.98976928    | 12 Mg<br>マグネシウム<br>24.304-<br>24.307 |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             | 13 Al<br>アルミニウム<br>26.9815384             | 14 Si<br>ケイ素<br>28.0855          | 15 P<br>リン<br>30.973761998         | 16 S<br>硫黄<br>32.059-<br>32.076    | 17 Cl<br>塩素<br>35.446-<br>35.457 | 18 Ar<br>アルゴン<br>39.948-<br>39.963 |
| <div>2つ以上の主要な同位体を持つ元素。このような元素の原子量と同位体存在度は地球上の物質の場で変動する。IUPACでは原子量の変動の下限と上限を詳細に、変動範囲として示している。</div> <div>2つ以上の主要な同位体を持つ元素。このような元素の原子量と同位体存在度は地球上の物質の場で変動するが、IUPACで示された原子量の変動の下限と上限を詳細にない、あるいは、変動が小さく小さい原子量の値に制限しないもの。</div> <div>主要な同位体が1つだけ。このような元素の原子量は一定である。</div> <div>すべての同位体が放射性で主要な同位体がないため、原子量が与えられていない元素。</div> |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
| 4   | 19 K<br>カリウム<br>39.0983          | 20 Ca<br>カルシウム<br>40.078             | 21 Sc<br>スカンジウム<br>44.955967 | 22 Ti<br>チタン<br>47.867       | 23 V<br>バナジウム<br>50.9415     | 24 Cr<br>クロム<br>51.9961     | 25 Mn<br>マンガン<br>54.938043 | 26 Fe<br>鉄<br>55.845     | 27 Co<br>コバルト<br>58.933194 | 28 Ni<br>ニッケル<br>58.6934   | 29 Cu<br>銅<br>63.546        | 30 Zn<br>亜鉛<br>65.38        | 31 Ga<br>ガリウム<br>69.723      | 32 Ge<br>ゲルマニウム<br>72.630 | 33 As<br>ヒ素<br>74.921595    | 34 Se<br>セレン<br>78.971      | 35 Br<br>臭素<br>79.904-<br>79.906          | 36 Kr<br>クリプトン<br>83.798         |                                    |                                    |                                  |                                    |
| 5   | 37 Rb<br>ルビウム<br>85.4678         | 38 Sr<br>ストロンチウム<br>87.62            | 39 Y<br>イットリウム<br>88.905838  | 40 Zr<br>ジルコニウム<br>91.224    | 41 Nb<br>ニオブ<br>92.90637     | 42 Mo<br>モリブデン<br>95.95     | 43 Tc<br>テクネチウム<br>(99)    | 44 Ru<br>ルテチウム<br>101.07 | 45 Rh<br>ロジウム<br>102.90548 | 46 Pd<br>パラジウム<br>106.42   | 47 Ag<br>銀<br>107.8682      | 48 Cd<br>カドミウム<br>112.414   | 49 In<br>インジウム<br>114.818    | 50 Sn<br>スズ<br>118.710    | 51 Sb<br>アンチモン<br>121.760   | 52 Te<br>テルル<br>127.60      | 53 I<br>ヨウ素<br>126.90447                  | 54 Xe<br>キセノン<br>131.293         |                                    |                                    |                                  |                                    |
| 6   | 55 Cs<br>セシウム<br>132.90545196    | 56 Ba<br>バリウム<br>137.327             | 57 La<br>ランタノイド              | 58 Ce<br>セリウム<br>140.116     | 59 Pr<br>プラセオジム<br>140.90766 | 60 Nd<br>ネオジム<br>144.242    | 61 Pm<br>プロメチウム<br>(145)   | 62 Sm<br>サマリウム<br>150.36 | 63 Eu<br>ユウロピウム<br>151.964 | 64 Gd<br>ガドリニウム<br>157.249 | 65 Tb<br>テルビウム<br>158.92534 | 66 Dy<br>ジスプロシウム<br>162.500 | 67 Ho<br>ホルミウム<br>164.930326 | 68 Er<br>エルビウム<br>167.259 | 69 Tm<br>ツリウム<br>168.934219 | 70 Yb<br>イットロニウム<br>173.045 | 71 Lu<br>ルネチウム<br>174.96687               |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
| 7   | 87 Fr<br>フランシウム<br>(223)         | 88 Ra<br>ラジウム<br>(226)               | 89-103<br>アクチノイド             | 104 Rf<br>ラザフォードニウム<br>(261) | 105 Db<br>ドブニウム<br>(262)     | 106 Sg<br>シーボーグニウム<br>(266) | 107 Bh<br>ボーリウム<br>(264)   | 108 Hs<br>ハッシウム<br>(277) | 109 Mt<br>ミーテネウム<br>(268)  | 110 Ds<br>ダースニウム<br>(271)  | 111 Rg<br>ローゲンニウム<br>(272)  | 112 Cn<br>コペルニシウム<br>(285)  | 113 Nh<br>ニホニウム<br>(286)     | 114 Fl<br>フルロビウム<br>(289) | 115 Mc<br>モスコビウム<br>(290)   | 116 Lv<br>リバモヴィウム<br>(293)  | 117 Ts<br>テネシン<br>(294)                   | 118 Og<br>オガネソン<br>(294)         |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |
|   |                                  |                                      |                              |                              |                              |                             |                            |                          |                            |                            |                             |                             |                              |                           |                             |                             |   |                                  |                                    |                                    |                                  |                                    |

## 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<sup>\*3</sup>．

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] <sup>*4</sup>     |
| 体積と密度 | 1 [L]  | := | 1 [dm <sup>3</sup> ] | = | 0.001 [m <sup>3</sup> ] |
| 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] | := | $6.022 \times 10^{23}$ [個/mol] <sup>*5</sup> |
| 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] | := | $\frac{nm}{\rho}$ <sup>*6</sup>              |

モル質量というものは、大きく 3 つある．

## 2.5 百分率は分母に 100 が隠れてる

<sup>\*3</sup> 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．

<sup>\*4</sup> 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．

<sup>\*5</sup> 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．

<sup>\*6</sup>  $n$  を物質質量、 $m$  をモル質量、 $\rho$  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](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](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](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<sup>\*7</sup>と普遍性<sup>\*8</sup>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<sup>[1]</sup>を紹介する。

### 時間の定義<sup>[2]</sup>

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  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  を、9,192,631,770 回数えたときを 1 秒と定義した。 $[\text{Hz}]$ <sup>\*9</sup> は単位時間あたりの振動数のことであり、 $[\text{s}]$  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  $[\text{m/s}]$  と定めることによって定義した。

### 電流の定義<sup>[4]</sup>

かつては、真空中に 1  $[\text{m}]$  間隔で平行に置いた無限に長い 2 本の導体それぞれが流れ、これらの導体の長さ 1  $[\text{m}]$  につき  $2 \times 10^{-7} [\text{N}]$  の力を及ぼし合う一定の電流を 1  $[\text{A}]$  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  $e$ <sup>\*10</sup> を  $1.602,176,634 \times 10^{-19} [\text{C}]$  と定めることによって定義した。 $[\text{C}]$  は単位時間あたりの電気量のことであり、 $[\text{A} \cdot \text{s}]$  と同じ意味である。

### 質量の定義<sup>[6]</sup>

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  $[\text{kg}]$  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  $\nu$ 、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。

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

\*7 ただ 1 つに定まる性質のこと。

\*8 広く全ての場合に当てはめることができる性質のこと。

\*9 ヘルツは、回数を示す単位である。

\*10 ファラデー定数（電子 1  $[\text{mol}]$  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  $\nu$  [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<sup>[3]</sup>

かつては、氷と水、水蒸気が共存する温度  $0.01^\circ\text{C}$  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<sup>\*11</sup>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・m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] 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  $540 \times 10^{12}$  [Hz] の緑色の光を出す特定の方向に、放射強度  $K_{\text{cd}}$  が 683 [lm/W] である点光源の光度を、1 [cd] と定義した。

---

<sup>\*11</sup>  $N_A$  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。