

1 イントロダクション

1.1 水の特徴

まず、物質としての水とはどのようなものでしょうか。皆さんは水についてどのように説明するでしょうか。

広辞苑 (岩波, 第 6 版) には次のように書かれています。

酸素と水素の化合物。分子式 H_2O 。純粋のものは無色・無味・無臭で、常温では液状をなす。1 気圧では、セ氏 99.974 度で沸騰、セ氏 4 度で最大の密度となり、セ氏 0 度で氷結。動植物の 70~90 パーセントを締め、生存上欠くことができない。全地球表面積の約 72 パーセントを覆う。

また、理化学辞典 (岩波, 第 5 版) には次のように書かれています。

無色無味無臭の液体。水の 3 重点は温度の定点とされる。融点 (氷点) 0、沸点 99.974 (1atm)。融点は加圧により 0.0074 /atm の割合で降下する。臨界圧 22.12MPa, 臨界温度 374.15。3.98 で最大密度 0.999973 g/cm³。他の温度での値、圧力による沸点の変化および温度による蒸気圧変化は表参照。(以下省略)

理化学辞典にはこの他にも、膨張率や電気伝導度、地球上に存在する量などが記載されています。ここでは、丁寧に、こうした水の特徴を改めて詳しく説明していきたいと思えます。

物理学的な特徴

- 密度

水の密度は、おおよそ 1 g/cm³ 程度です。まず、この値がどの程度であるか実感できることが大切です。

次に、この数字が他の単位でどのように表されるかを考えてみましょう。1ℓ = 1000cm³ ですから、水の密度は 1000 g/ℓ と書くこともできます。1000 g = 1 kg ですから、1 kg/ℓ と表せることがわかります。さらに、1 m³ = 1000000 cm³ です。そこで、1000000 g/m³ と同様に、1000 kg/m³ でもあります。ところで、1000 kg は 1 t (トン) と書くこともできます。そこで、1 t/m³ であるということもできます。

整理すると、水の密度はおおよそ次のように表すことができます。

$$\begin{array}{l} 1 \text{ g/cm}^3 \\ 1000 \text{ g/}\ell \\ 1 \text{ kg/}\ell \\ 1000000 \text{ g/m}^3 \\ 1000 \text{ kg/m}^3 \\ 1 \text{ t/m}^3 \end{array}$$

比較のために、他の物質のおおよその密度を挙げておきます。

空気	1.2×10^3	kg/m^3
鉄	7.9×10^3	kg/m^3
岩石	$2 \sim 4 \times 10^3$	kg/m^3

指数と指数法則

ここで、ゼロが多くなったときの扱いについて考えてみましょう。ゼロが多い数字は見えてとても使いにくそうです。そこで、次のような表し方をすることが多いです。

$$\begin{aligned}10 &= 10^1 \\100 &= 10^2 \\1000 &= 10^3 \\10000 &= 10^4\end{aligned}$$

10の右肩に乗っている数字を指数(あるいは、べき指数)といいます。「10の3乗」というような読み方をします。 10^3 の場合、 $10 \times 10 \times 10$ であるので、何回同じものを掛け合わせたかを表しているのが指数であると考えことができます。このように表すと、大きな数字もコンパクトに表すことができ便利です。

これを見ると、

指数が1増えると10倍になる
指数が1減ると10分の1になる

という性質が見てとれます。そこで、指数がゼロとか負であるときについても、次のように決めてしまいます。

$$\begin{aligned}10 &= 10^1 \\1 &= 10^0 \\0.1 &= 10^{-1} \\0.01 &= 10^{-2} \\0.001 &= 10^{-3} \\0.0001 &= 10^{-4}\end{aligned}$$

「10を0回掛け合わせる」とか「10を-1回掛け合わせる」とかは考えにくいですが、しかし、このように表すことでコンパクトに表すことができます。さらに、次のようなルールが成り立ちます。ぜひ、自分でも確かめてみてください。

1. $10^A \times 10^B = 10^{A+B}$
2. $(10^A)^B = 10^{AB}$
3. $10^{-A} = \frac{1}{10^A}$

密度とは (比例関係)

学校で1回習っても、その知識を使うことをしなければ忘れてしまいます。残念ながら現在の学校教育では学習したことの有機的なつながりが弱いので、こうしたことはありがちなことです。おそらく、密度もその例です。

密度は「単位体積 (例えば 1cm^3) あたりの質量」のことです。ただ、このように表現してもピンとこないかもしれません。自然科学で扱う法則などには理解するときにコツがあります。そのコツをつかむと、より理解しやすいかもしれません。

そのコツとは、比例関係・反比例関係です。自然界にはいろいろな比例関係・反比例関係があり、人類はそれを発見してきましたし、それを利用してきました。そのような関係にないものを扱うのは難しいです。

話を元に戻して、密度について考えてみましょう。密度は、体積と質量について関係があります。一般に、体積が増え、質量が増します。体積が3倍になれば、質量も3倍になります。このような比例関係は、

$$\text{質量} \propto \text{体積}$$

というように書き表します。ここで、 \propto という記号は比例関係を表しています。ところが、これでは、定量的には扱いにくいので、等号 (=) を用いた式の形にしたいものです。その場合、

$$\text{質量} \propto C \times \text{体積}$$

という表し方をします。これも比例関係を表しています。 C は定数で、特に比例定数と呼ばれています。先ほどと違い、数値で表現することができました。ここで、体積の値が1であるときを考えます。単位によっては、 l かもしれません。 m^3 かもしれません。とにかく、1の場合を考えます。すると、質量の数値の部分は、 C と一致します。そこで、 C は、「単位体積」(つまり何かの体積の単位を使って数値が1)の時の質量の値を表していることになります。これを「単位体積あたりの質量」と言い表します。実は、この比例定数が密度なのです。

- 水の密度の温度変化

水の密度は温度によって変化します。まず、一般的な話として、ある質量を持つ物体を温めると膨張して体積が大きくなります。質量が同じままで体積が増えるのですから密度は減少します。ところが水の場合には、やや特別な密度の変化をします。

このように水の密度は、 3.98 の時に最大になり、それよりも温度が高くて低くても水の密度は低下します。これは何を意味しているのでしょうか。密度の違う液体が二つ存在したとすると、密度の大きい液体(「重い」液体)の方が下に、密度の小さい液体(「軽い」液体)の方が上になるように分離します。そこで、このような密度変化が起こることは、水の循環や海の構造を考える上でとても大切な性質です。

- 水の三態

一般にある純物質は温度や圧力に応じて、その様子を変えます。例えば水の場合には、固体である氷(固相)、液体である水(液相)、気体である水蒸気(気相)とがあります。なお、物質名としては「水」という名称を用いるのが普通です。「水」と表現されているものが、物質名の水なのか、液相の水なのか、区別する必要があります。

一般に相 (状態) の変化 (相転移) には名前がついています。

融解	固相	液相
凝固	固相	液相
蒸発	液相	気相
凝縮 (凝結)	液相	気相
昇華 (蒸発)	固相	気相
昇華	固相	気相

水の場合で考えてみましょう。これらの相転移が起こる条件は、温度と圧力によって決まります。

1. 氷と水

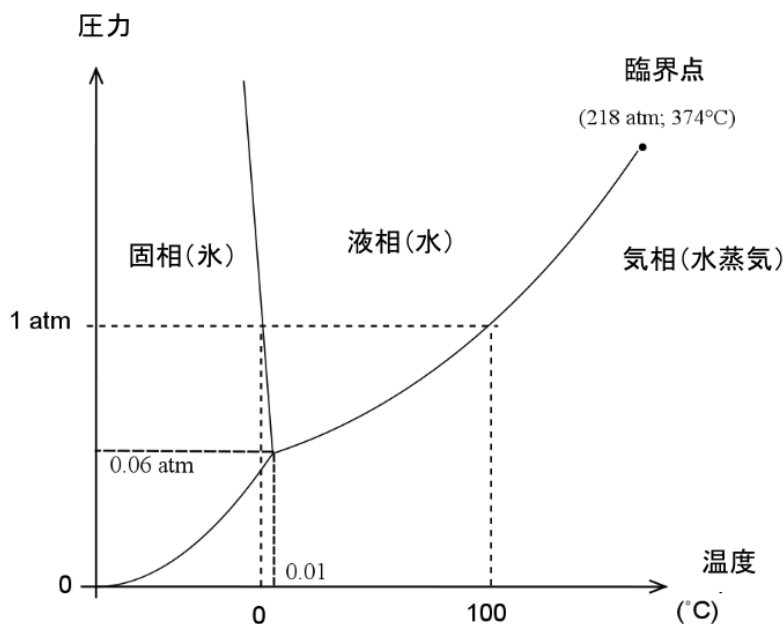
氷を温めたとき、氷が融ける温度は、1 気圧の下では、0 です。このように氷が融ける温度を融点といいます。

逆に、水の温度を冷やしたとき、水が凍る温度も 1 気圧の下では、0 です。このように氷が融ける温度を凝固点といいます。

2. 水と水蒸気

水を温めたとき、水が水蒸気になる温度は、1 気圧の下では、99.974 です。このように水が水蒸気になる温度を沸点といいます。

逆に、水蒸気を冷やしたときに、水蒸気が水になる温度も、やはり 99.974 です。これを凝結点といいます。



この図をいきなり見ると分かりにくいと思うので、順番に考えていきましょう。まず、ここで言っている水とは、どのようなものでしょうか。空気中の水蒸気を考えるとややこしくなるので、とりあえず、ビニール袋に入っている水を想定してください。すると、この水は、1 気圧の場合には、0 ~ 100 の間は液相の水のままで存在するでしょう。ところが、0 以下では氷になり、100 以上では水蒸気になるでしょう。

これを、横軸に温度をとって表示すると、この様になります。

氷	水	水蒸気
	0	100

次に、気圧が変わったらどうなるでしょうか。私たちは、「山の上ではご飯が上手に炊けない」「山の上でご飯を炊くときには圧力釜が必要である」ということを知っています。つまり、山の上に登って気圧が下がると、低い温度で沸騰し、水が気化してしまうということです。これは圧力が低くなると沸点は低下することの現れです。逆の場合もあります。圧力鍋では、鍋の圧力を上げることによって沸点を上げています。水は100

では沸騰せず、より高温で沸騰するようになります。そのため、圧力鍋では、味や水分が染み込みやすくなります。このようなことを考え合わせると、図の気体と液体を分ける境界線は右上に傾くこととなります。

- 水と氷

今度は、氷と水の境界線について考えてみましょう。それを考えるためには、スケートを思い浮かべると良いと思います。スケートでは、鋭い刃の上に体重をかけます。単位面積当たりに作用する力が圧力ですから、同じ体重の人に対して、支える部分の面積が狭いと、圧力が大きくなります。水の場合、圧力が高くなると氷は融けます。そこでスケートの刃の下の氷が局所的に融けて滑りやすくなります。

ル・シャトリエの平衡移動の法則

何らかのバランス状態にあることを「平衡状態」といいます。ところが、何らかの条件が変化すると、最初の平衡状態から別の平衡状態に変化します。このような平衡状態の変化は「平衡移動」と呼ばれています。

では、平衡移動についてどのような規則があるのでしょうか。実は一般的な傾向があって、それを「ル・シャトリエの平衡移動の法則」と呼んでいます。その法則は、

変化を減らすような向きに平衡が移動する

と表現されます。

例えば、氷が平衡状態としてあったとします。そこに圧力を加えたとします。すると、平衡は、氷は圧力を減らすような向きに変化します。

ル・シャトリエの平衡移動の法則を考えると、氷に圧力を加えて圧力が減る向きに平衡が移動する場合、体積を減らせば圧力を下げられますので、体積が減ると予想されます。ところが、圧力が加わると、氷は融けて水になります。これは、水の方が氷よりも体積が小さいこと、すなわち、氷の方が水よりも密度が小さいことを意味しています。「氷に圧力をかけると融ける」ということと、「氷よりも水の方が密度が大きい」という全く別のことのように思われます。しかし、これらの事実は、実は、ル・シャトリエの法則で結びついているのです。このように、ル・シャトリエの法則は、互いに別々と思われる性質を結びつけて考えるときにとても便利なので、ぜひ覚えておいてください。

- 臨界点

気体と液体の違いは何でしょうか。どちらも、容易に変形するという意味では同じです。最も重要な違いは密度です。水は、おおよそ、 1 cm^3 あたり 1 g 程度です。ところが、

水蒸気の密度は、概ね、その 1/1000 以下です。

ところが、圧力が高まると、気体でも分子間の距離が縮まり、液体と区別がつかなくなるようになります。臨界点とは、そのような点で、その点よりも高温・高圧側では液体と気体の区別が事実上なくなってしまいます。臨界点付近の水は、気体の性質を持ったような領域と液体の性質を持ったような領域が、それぞれいろいろな大きさで存在するために、白く濁ったように見えるそうです。

- 三重点

水-氷、氷-水蒸気、水蒸気-水の 3 種類の境界線があると、平面上ではどこかの 1 点で交わる可能性があります。三重点はそのような点です。三重点では、水は、液体でも、気体でも、固体でも存在できます。

水の三重点は、圧力が 0.006 atm, 温度が 273.16 K = 0.01 °C です。このうち、温度については、ぴったり、0.01 °C となっています。なぜならば、温度を決めるときに、そうなるように決めたからです。

低温での沸騰

真空調理器：水の中の泡, 水の沸騰, 沸点の変化

分圧の考え方

- 蒸発熱

例えば、水 (液体) が蒸発すると、温度が低下します。このときのことを「蒸発熱が奪われるために温度が下がる」というように表現します。それでは、この実態はどうなっているのでしょうか。それは、分子の運動を考えることによってある程度説明できます。前提は二つです。一つは、温度は分子の運動と関係していることです。正確には、分子の運動エネルギー $\frac{1}{2}(\text{分子の質量})(\text{分子の速さ})^2$ が温度に比例します。実のところ、温度とは、分子の運動エネルギーの平均だと考えていいのです。

もう一つは、分子の間には互いに引き合う力 (引力) が作用しているということです。もちろん、引き合うといっても、全く重なる訳にはいきません。ある程度接近すれば、衝突して跳ね返ります。しかし、分子の間の平均的な距離から引き離そうとするときには、分子間の引力が重要になります。この二つを前提にして話を進めましょう。

それでは分子に着目して水の表面での蒸発を考えてみます。水の表面でも分子は運動しています。水の表面から外側に向かう分子は、分子間に作用する力が、水の中に引き戻すように作用します。これは、片側 (水の側) に水の分子が沢山あり、もう片側 (蒸気の側) には水の分子がほとんど存在しないことからわかります。ところが、分子の速度は皆同じという訳ではありません。分子は互いに衝突を繰り返しているのです。速いものもあれば遅いものもあります。このうち速い分子は、引力を振り切って水の中から抜け出すことができます。このとき、どのようなことが起こるのでしょうか。

速い分子ばかり飛び出すと、残りの分子の平均的な速さは小さくなります。これは、温度が下がったことを意味します。一方で、飛び出した方はどうでしょうか。水から飛び出すときに、他の水分子から引力を受けるために、飛び出した時よりも速さは減っているはずですが、つまり、飛び出した分子も、飛び出す前よりも温度が下がってしまう訳です。

このように、蒸発の過程で温度が下がることとなります。ちなみに、凝結 (蒸発の逆) の過程では逆のことが起こります。蒸気の中でも遅いものが水に戻り、蒸気の中には速