

## 水の沸点が 100°C とは何のこと

水という物質は本当に不思議な物質です。さて、水の“沸点 boiling point”は何°Cでしょうか？という質問をしたらどのように答えますか。当然、大気圧では 100°C というのは当たり前のこととして答えるでしょう。そこで、水の沸点について考えてみたいと思います。

高校化学の教科書には大体、「水を加熱していくと、温度が上昇し、温度が沸点“100°C”に達すると沸騰が起こる」と書かれています。さらに、「沸騰が始まると、加えられた熱は、液体中の H<sub>2</sub>O 分子間の引力を断ち切って水蒸気にするためだけに用いられ、すべての水が水蒸気になるまで、温度は一定に保たれる」と書かれています。ここで注目したいのは、「100°Cの温度に相当するエネルギーで水分子間の引力を断ち切ることができるのでしょうか」というところです。

図 1 に、水面に H<sub>2</sub>O が 1 つだけくっついている雑な絵を描いてみました (笑)。実際にはあり得ませんが、極端な例で説明したいと思います。

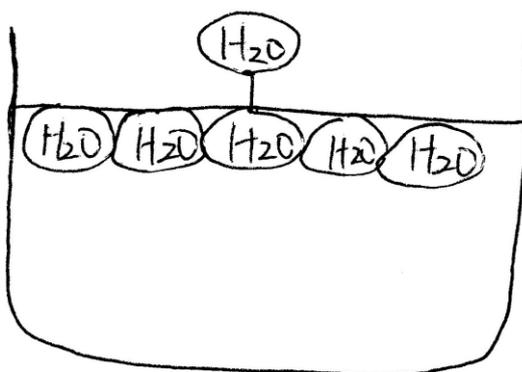


図 1

水面にはたくさんの H<sub>2</sub>O が並んでいるとします。1 つだけ H<sub>2</sub>O が水面から出て、くっついているとします。ここで、水面とその H<sub>2</sub>O の結合が切れて H<sub>2</sub>O がどこかへ飛んでいく現象を蒸発と定義します。そのためには水面と H<sub>2</sub>O 間の結合を切らなければ H<sub>2</sub>O は水面から離れることができません。つまり、蒸発させるにはその結合を切るだけのエネルギーを外部から与えなければならないということになります。

さらに簡単に、水面と H<sub>2</sub>O 間の結合は水素結合 hydrogen bond だけでできているとします。したがって、1 分子の H<sub>2</sub>O を水面から飛ばすためには、1 つの水素結合を切断しなければなりません。ここで、1 分子の H<sub>2</sub>O を蒸発させるための温度 (°C) を 2 つの方法で考えたいと思います。おおざっぱな計算なので、有効数字とかをテキトーにしています。そこは無視してくださいね。

1 つめの方法として、「水の蒸発熱」から 1 分子の  $\text{H}_2\text{O}$  を蒸発させるための温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) を求めてみましょう。高校化学の教科書では、水の蒸発熱は  $41 \text{ kJ mol}^{-1}$  ( $100^{\circ}\text{C}$ ) と書かれています。この水の蒸発熱  $\text{kJ mol}^{-1}$  を“ボルツマン定数 Boltzmann constant”  $1.380649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  ( $1.380649 \times 10^{-26} \text{ kJ K}^{-1}$ ) で割ると、 $2.9696 \times 10^{27} \text{ K mol}^{-1}$  となり、これは 1 mol あたりの水の蒸発熱を温度 (K: ケルビン) に換算した値になります。その値をさらに、“アボガドロ定数 Avogadro's constant”  $6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  で割ると 1 分子の  $\text{H}_2\text{O}$  の蒸発熱を温度 (K: ケルビン) に換算した値となり、 $4931 \text{ K}$  になります。最後に、 $273 \text{ K}$  を引くとセルシウス温度となり、**1 分子の  $\text{H}_2\text{O}$  の蒸発熱は  $4658^{\circ}\text{C}$**  になります。

2 つめの方法として、「水の水素結合の結合エネルギー」から求めます。それは一般的に、 $10 \sim 40 \text{ kJ mol}^{-1}$  の間の値といわれています。ここで、水の水素結合の結合エネルギーを  $10 \text{ kJ mol}^{-1}$  として上記の方法で温度に換算すると、**1 分子の  $\text{H}_2\text{O}$  を蒸発させるための温度は  $927^{\circ}\text{C}$**  になります。

これら  $4658^{\circ}\text{C}$  と  $927^{\circ}\text{C}$  という値は、水面から「1 分子の  $\text{H}_2\text{O}$  を蒸発させるための温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )」です。そうなるので、私たちが知っている「水の沸点は  $100^{\circ}\text{C}$ 」とはいったい何なのでしょう？水面から  $\text{H}_2\text{O}$  を 1 つ切り離すだけでも、水の沸点である  $100^{\circ}\text{C}$  に相当するエネルギーでは全然足りないことが分かります。そして、実際には図 2 に示したように、1 つの  $\text{H}_2\text{O}$  には水素結合が 4 つ存在します。さらに、 $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$  間の結合には水素結合だけではなくファンデルワールス力などの引力もプラスされるので、 $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$  間にはより大きな引力が働いていることになります。そう考えると余計に、どうして  $100^{\circ}\text{C}$  のエネルギーくらいで水は蒸発するのか疑問になりませんか。

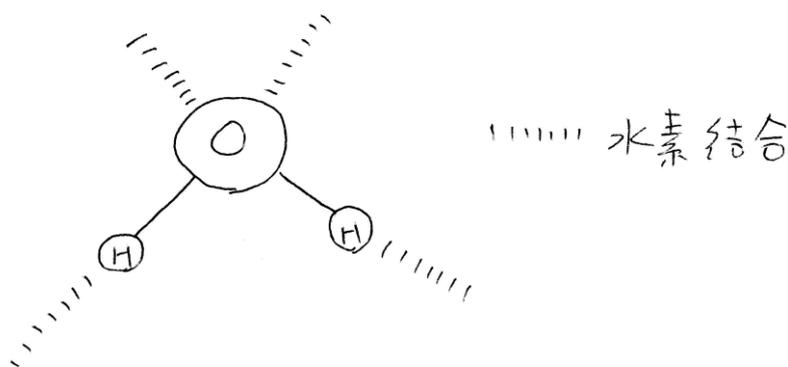


図 2

実際に、水を構成する  $\text{H}_2\text{O}$  はそれぞれが単独で存在しているわけではなく、図3のような“クラスター cluster”と呼ばれる小さな集合体を作っています。それは  $\text{H}_2\text{O}$  が2個から数十個くらい水素結合でくっついた集合体です。そして、水中では  $\text{H}_2\text{O}$  クラスターは自由

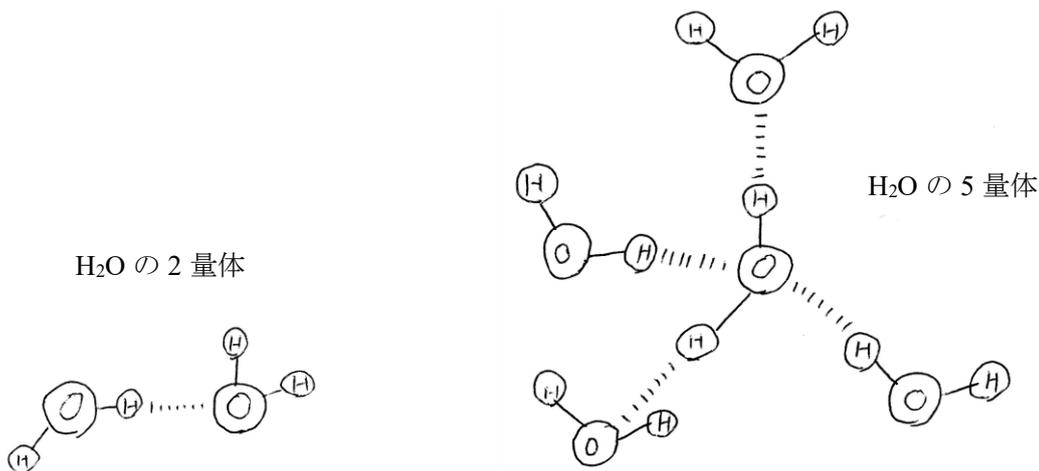


図3

に動くこと（並進運動）ができます。したがって、 $\text{H}_2\text{O}$  クラスター同士が衝突しくっついて大きな  $\text{H}_2\text{O}$  クラスターができたり、 $\text{H}_2\text{O}$  クラスター同士が衝突してそのクラスターが壊れて小さな  $\text{H}_2\text{O}$  クラスターになったりしています。 $\text{H}_2\text{O}$  自身も回転したり、O-H間で振動（伸縮振動や変角振動）したりしているので、水の中の  $\text{H}_2\text{O}$  クラスターだけではなく、それを作っている  $\text{H}_2\text{O}$  はじっと止まっていることはありません。 $\text{H}_2\text{O}$  クラスターは並進運動だけでなく、その  $\text{H}_2\text{O}$  の振動運動や回転運動のために、グニャグニャと動いています。そして水を温めると  $\text{H}_2\text{O}$  の運動（並進 translation, 回転 rotation, 振動 vibration）が激しくなり、激しく運動している“ホットな  $\text{H}_2\text{O}$  クラスター”になります。さらに、ホットな  $\text{H}_2\text{O}$  クラスター同士が衝突すると、瞬間的に、よりホットで大きな  $\text{H}_2\text{O}$  クラスターができます。その  $\text{H}_2\text{O}$  クラスター内の  $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$  の分子間振動が激しくなり、水素結合による引力よりも振動運動が激しすぎて、 $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$  間の結合が切れてしまう。そのようなホットな  $\text{H}_2\text{O}$  クラスターが水面近くにいると、 $\text{H}_2\text{O}$  クラスターの一部の  $\text{H}_2\text{O}$  が水面からでっばっていたとき、 $\text{H}_2\text{O}$  が水面から飛んでいってしまいます。つまり蒸発してしまったということです。

18 gの水には  $\text{H}_2\text{O}$  が  $6.02 \times 10^{23}$  個存在していますよね。それは6兆円を1000億倍した金額みたいなものです。すごい数の  $\text{H}_2\text{O}$  が含まれているということです。室温が  $20^\circ\text{C}$  のキッチンのテーブルの上に、18 gの水がこぼれていたとすると、どれくらいの時間で蒸発してしまうのでしょうかね。1日経てば蒸発しちゃいますか？少なくとも1カ月経てば蒸発してテーブルの上には何も無くなってしまうことでしょうか。つまり、 $20^\circ\text{C}$  でも水は蒸発してし

## 「直観」で理解する化学の講義

まうということ、私たちは見ているし理解しています。わかってくれましたか。18 g の水の中にもたくさん  $\text{H}_2\text{O}$  クラスタが存在していて、その  $\text{H}_2\text{O}$  クラスタは並進運動しているので何度も何度も衝突しています。衝突を繰り返すことにより、振動が激しくなり、ある時、水面近くにいた  $\text{H}_2\text{O}$  クラスタの  $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$  間の結合が切れて  $\text{H}_2\text{O}$  が飛んでいってしまったということです。だから、気温が  $40^\circ\text{C}$  だったら、机はさっさと乾いてしまいますね。結局、水を温めれば温めるほど、水の中にはホットな  $\text{H}_2\text{O}$  クラスタが多くなるので  $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$  間の結合が切れて  $\text{H}_2\text{O}$  の飛んでいく確率が上がるということです。水の沸点は  $100^\circ\text{C}$  というのは、沸騰という現象が起こる温度と考えれば納得はいきますね。