

14. 水の性質

ここまで積み重ねてこられた方、折り返し地点へようこそ。実は 13 章までで、熱力学編の前半が終了済み・・・といっても既に 8 割は終了しているが。この章では、微分・積分を用いてさらに理解を深める後半に話を進める前に、一番身近な物質である“水”の性質について紹介することにしたい。

というのも、1 章の“物質の三態”を紹介するときに登場し、“水分子園児たち（←聖史造語）”というイメージを多用しながら話を進め、2 章の“熱容量と比熱”でもその主演にあり、そもそも、温度というものの定義に“水の 3 重点”が用いられているということで、熱力学には不可欠な物質であるからだ。

しかも、この“水”という物質は、自然界にあるその他の物質と比べて、とてつもなく特異な性質を持っている。我々生物に不可欠な“水”は、たまたま生物に不可欠の物質になったわけではなく、それが、必然であるというような、そんな印象を持つかもしれない・・・まさに、神秘的な偶然？ そんな、“水”について、その一部分ではあるが、この章で紹介しておこう。

水の構造

「化学式で“水”をかくとどうかける？」と質問すると、たいていの人は、「 H_2O 」でしょ？」と、難なく答えをかけると思う。しかしながら、「その構造は？」と聞かれると、はたして自信をもって答えられる人はどれくらいいるのだろうか？

水がとても他の物質と特異な性質を示す最大の理由は“水の構造”にある。な

ので、しっかりとここで、理解していただきたい。

ご存知のように、水分子は水素原子 **H** が 2 個と酸素原子 **O** が 1 個からなっており、それらは、**共有結合** (covalent bond) で結ばれている。また、分子は直線的ではなく、図 14-1 に示すように、2 つの **O-H** 結合の作る角度が 104.45° となっている“**折れ曲がった構造**”をしている。この折れ曲がった構造こそが、水の特異な性質を生み出しているひとつの要因なのである。ちなみに、**O-H** 結合

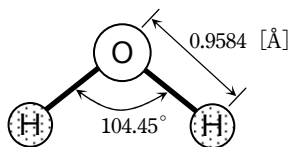


図 14-1

の間の距離は、 $0.9584 \text{ [\AA]}$ ($\text{\AA}$: **オングストローム** [ångström] $= 10^{-10} \text{ [m]}$) である。慣れ親しんでいる SI 系だと、だいたい 0.1 [nm] (ナノメートル) くらいだということになる。

また、水分子は、**極性分子** (polar molecule) である。これは、水の構成原子である水素と酸素の**電気陰性度** (electronegativity : 結合している原子が電子を引きつける能力のこと) の違いにより、**酸素原子側が電氣的に負 δ^-** (ちょこっとだけ負というような意味あいでの“ **δ : デルタ**”)を用いてあらわす) となり、**水素原子側が正 δ^+** となるからだ。よって、図 14-2 のように、水分子には極性が生まれるわけだ。

ちなみに、**電気陰性度**は、1932 年にアメリカの物理化学者**ポーリング** (Linus Carl Pauling) によって定められており (表 14-1)、ここで登場した酸素原子は 3.5 で、水素原子が 2.1 と、酸素

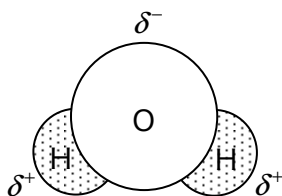


図 14-2

原子のほうがより電子をひきつける能力が高いことがそこからわかる。ポーリン

H	2.1												
Li	1.0	Be	1.5	B	2.0	C	2.5	N	3.0	O	3.5	F	4.0
Na	0.9	Mg	1.2	Al	1.5	Si	1.8	P	2.1	S	2.5	Cl	3.0
K	0.8	Ca	1.0										

表 14-1 **電気陰性度** (一部) 岩波「理化学辞典 第 5 版」による

グは、1954年にノーベル化学賞を受賞。その後、平和運動を推進し、1963年にはノーベル平和賞を受賞している。

水分子はこの極性により、分子間に**水素結合** (hydrogen bond) を作りやすい。ところで、一般の分子は、7章で紹介した**分子間力**の引力である**ファン・デル・ワールス力**で互いに引きあっている。この力は非常に弱いので、常温では、分子を結合させておくことができず、バラバラになるため、気体の状態となるのである。ところが、水分子は、よくご存知のように、**常温では気体ではない！** それは、ファン・デル・ワールス力ではない別の引力によって、**分子が結合した状態で存在しているからなのだ**。その引力こそが、水分子にあらわれる電気的な極性による引力、すなわち**水素結合**なのだ。

水素結合というのは、“水素原子より電気的に陰性（より電気陰性度が大きいもの）な原子 **X** と **Y** が水素原子 **H** を介して弱く結びつく結合のこと”であり、水分子の水素結合は、図 14-3 のように、酸素原子 **O** 同士が水素原子 **H** を介して結びつくような形で形成される (**O-----H——O**)。図のように、共有結合は実線 (——) で、極性による電気的な引力（水素結合）を破線 (-----) でそれぞれ表すのが一般的だ。

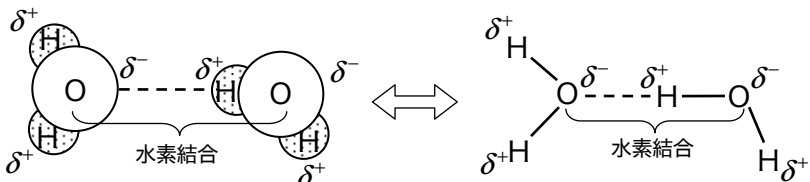


図 14-3

水分子クラスタ

一般に、**クラスタ** (cluster) とは、“原子または分子が、2 個以上、ファン・デル・ワールス力、金属結合、水素結合などの相互作用で集合した状態”のものをいう。液体の水は、**水素結合によってクラスタを形成している代表的な物質**とい

うわけだ。

図 14-4 が、液体の水分子のクラスタの例だ。このように、**液体の水は、水分子が独立して存在しているのではなく、水素結合によるクラスタを形成している。**また、最近わかってきたことであるが、水分子の水素結合の数は、1 個の水素分子に、0 個、1 個、2 個、3 個、4 個と、5 種類があり、まったく水素結合していない独立した分子の水分子もあれば、1 個～4 個の水分子とクラスタを形成している水分子もあるということになる。その割合では、2 個の水素結合をしているクラスタが最も多く、その他は2 個を頂上とした山型の分布となっているらしい。

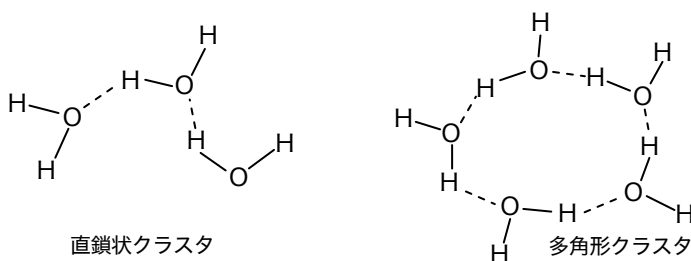


図 14-4

現在最も確からしい液体の水のクラスタの状態は、直鎖状のものや、枝分かれしたもの、そして、四角形から十一角形までの多角形クラスタ（このうち五角形のものが多い）が、混合された状態であるというように考えられている（図 14-4 参照）。しかも、これらのクラスタはとても動的だということもわかってきているようで、おおよそ 1 [ps]（ピコ [pico] 秒： $=10^{-12}$ [s]）くらいの時間で、クラスタが新たに形成されたり、壊れたりを繰り返しているらしい。

どうだろうか。液体の水の状態が、なんとなくおわかりいただけただろうか？

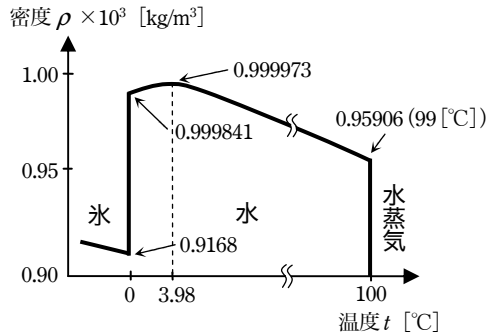
水の密度

さて、水素結合によってクラスタを形成している水は、**温度による密度の変化が実には変わっているのが大きな特性のひとつだ。**実際に、水の密度特性をグラフで確認していただくのが良いだろう。

14. 水の性質

図 14-5 を見てほしい。縦軸には水の密度 $\rho \times 10^3$ [kg/m³] を、横軸にはセルシウス温度 t [°C] をそれぞれ目盛りにとった、温度による水の密度の変化を表したグラフである。

セルシウス温度が 0 [°C] より低いと氷の状態であり、0 [°C] ～100 [°C] で水の状態、100 [°C] より高いと水蒸気の状態であることはいまさら説明するまでも無いだろう。



温度による水の密度の変化

図 14-5

さて、この図 14-5 の、温度による水の密度の変化のグラフを見て、何か気がつくことはないだろうか？ そうだ、**水の密度が最大となるのは、とても中途半端なかんじがする 3.98 [°C] のときなのである！** 同じ質量の水であれば、その**体積が最小になるのがちょうど 3.98 [°C] のときに他ならない**ということだ。どうだい？ 知らなかった人も多いのではないだろうか？

図 14-5 をしっかりと見ていこう。0 [°C] で固体の状態の氷の密度は 0.9168×10^3 [kg/m³] であり、0 [°C] でその氷が融解して液体の状態の水になると密度が 0.999841×10^3 [kg/m³] となるから、同じ質量ならおおよそ 9% ほど体積が小さくなるわけだ。そして、水の温度を上昇していくと、3.98 [°C] で密度が最大となり、それよりも温度を上昇させると、どんどん密度は小さくなるものの、沸点手前の 99 [°C] のときの密度は 0.95906×10^3 [kg/m³] であり、0 [°C] の氷の密度よりも 5% ほど大きいことがわかる。そして、沸点をむかえ、気体になると一気に密度が小さくなるわけだ。

たとえば、封のできる容器に液体の水を隙間無く詰めて、その後封をして冷凍庫に入れる。次の日の朝にでも冷蔵庫を開くと、その容器は膨らんでいるか、場合によっては破裂している。あなたがチャレンジャーであれば、もっと簡単に実験できる。市販のウーロン茶や、緑茶の缶やペットボトルで試してみればよいの

だ。これは、水よりも氷のほうがその密度が5～8%程度小さいことによる現象だ。体積で言うと、水よりも氷のほうが5～8%程度膨らむということである。500 [mL] のペットボトルだと、40 [mL] 分も中の水の体積が膨らむことになるのだ！

ところで、普通に経験していることかもしれないので、いったいこの話のどこが特異なのだ？ と思いの方もいるかもしれない。実は、**液体の状態よりも固体の状態のほうが密度が小さくなるような物質は世の中には水くらいしかないのだ！** つまり、あまりに身近すぎるため気がついていないかもしれないのだが、水は、世の中の大半の物質とは大きく異なった性質を持っていたのだ。

では、なぜ、水はこのようにその他の物質とは異なる性質を示すのか？ それは、すでに紹介した、水分子の構造にその理由がある。

水分子は、図 14-1 で紹介したように 2 つの O-H 結合の作る角度が 104.45° の“折れ曲がった構造”をしている。それゆえ、凍って氷になる場合、**集まった水分子は六方晶系の構造となる**。これは、雪の結晶を思い出してみればわかっていただけるだろう。この六方晶系の構造には隙間があるため、分子がぎっしりと詰まって結晶になっているのではなく、スカスカであるわけだ。よって、氷の密度は水よりも小さくなる。

では次に、なぜ液体の水は図 14-5 のように $3.98 [^\circ\text{C}]$ で密度が最大となるのかを説明しよう。

すでに述べたように、液体の水では、水分子は互いに独立して存在しているのではなく、水素結合によるクラスタが形成されているのだった。この水素結合の強さは、水分子間の距離や、分子の方向で変化する。水として最も安定した構造をとるような構造となるには、特定の方向にある分子と水素結合し、他の分子は入り込めない構造となるわけだ。つまり、液体の水の状態でも、スカスカであるといってよいこととなる。

水の状態から温度を上昇させると、“**水分子園児たち**”のフラダンスが始まるのだが、園児たちは好きなお友達同士で手をつないでいると考ええると、水素結合をしているクラスタのイメージに近くなろう。手をつなぎながらフラダンスをはじめ、全体でぎりぎりまで寄り添ったような状態が、ちょうど $3.98 [^\circ\text{C}]$ の瞬間な

のである。科学的に言えば、水分子のクラスタの分子配置が熱振動によって崩され、隙間がほんの少しだけ小さくなる瞬間なのである。それよりも温度が高くなると、“水分子園児たち”はフラダンスをより広がって行うようになるため、膨張し、密度は小さくなっていくのだ。

このような、水の密度に関する特異な性質は、フランスの化学者であるラヴォアジエ (Antoine Laurent Lavoisier) によって発見された。質量保存の法則 (1774 年) の発見者としてご存知かと思う。ラヴォアジエは、1790 年にフランス政府の命によって、キログラム原器 (←力学編の 5 章“運動の法則”参照) の製作のための基礎研究をする中で、1 [dm³] (デシ [dec] 立方メートル： $=10^{-1}$ [m³]) の水の質量の精密測定を繰り返しているときに、水の密度が温度によって変化し、約 4 [°C] のときに最大となることを見つけた。

問題

湖や池の水は、なぜ表面のみが凍っており、下層のほうは液体のままであるのかを説明せよ。

これは、温度による水の密度の変化によって説明できる。つまり、図 14-5 のような密度変化を水がするからこそ、このような現象がおきるのだ。

外気温がゆっくりと下がっていくような場合で順番に説明しよう。

まず、表面の水の温度が冷えてくる。3.98 [°C] に近づくにつれて、密度が大きくなるので、下層のまだ温度の高い密度の小さい水が上に上昇し、温度が下がった水が下層へと沈んでいくこととなる。つまり、密度差によって自然に上層部の水と下層部の水が入れ替わるわけだ。そうして、全体が 3.98 [°C] になると、水の入れ替わりが終わる。さらに外気温が下がって、表面が 3.98 [°C] より下がっても、その密度は小さくなるため、下層の水との入れ替わりは起こらない。そのまま表面の水が冷えていき、0 [°C] になると、凍りは始めるわけだ。

このようにして水が凍るため、湖や池では表面から氷が成長していくことになり、水底のほうでは、3.98 [°C] で凍っていない液体の水のままであるわけだ。

テレビなどでエスキモーの生活を見たことが無いだろうか。氷に穴をあけてそこから釣り糸をたらし、極寒の生活環境でも魚を釣って生活をしている様子のことである。厚い氷の上で生活し、穴をあければ、下層には、3.98 [°C] の水が広がっている。これは、人類にとってもとてもありがたいことだが、同時に、水の中に生きる生物すべてに当てはまるのだ。もし、冬が来るたびに、湖や池の水が全部凍ってしまったら、その湖や池で暮らす生物は、冬ごとに冷凍されてしまう。そうならないのは、水分子が折れ曲がった構造をしており、かつ水素結合によるクラスタを形成しているからといった、**神秘的に近い偶然が重なったため**である。・・・これはほんとうに偶然なのか、はたまた必然なのか、さて、あなたはどちらだと思う？

水の状態図

1 章の“温度と熱”で述べたように、物質は**温度**によってその状態が、固体、液体、気体と変化する。また、それ以外にも**圧力**によっても変化する。ある物質が、いろいろな温度や圧力のときに、固体、液体、気体のどの状態であるかを示した図を**状態図** (phase diagram) または**相図**という。

ここでは、水の状態図を紹介し、そこからわかる水の特異性をみていこう。まずは、図 14-6 を見てほしい。左側が水の状態図で、右側は二酸化炭素の状態図である。縦軸は圧力 p [MPa] (メガ [mega] パスカル： $=10^6$ [Pa]) で、横軸がセルシウス温度 t [°C] である。

図 14-6 中の固体、液体、気体とかがいてある領域は、その状態で安定している領域である。固体と気体の領域の境界線を**昇華曲線** (sublimation curve) といい、この線上では、**固体と気体が共存している状態**である。固体と液体の領域の境界線は**融解曲線** (fusion curve または melting curve) といい、**固体と液体が共存している状態**にあたる。また、液体と気体の領域の境界線は**蒸発曲線** (evaporation curve) といい、**液体と気体が共存している状態**にあたる。

これらの曲線が交わる点 T が、固体、液体、気体の共存する唯一の平衡状態で

14. 水の性質

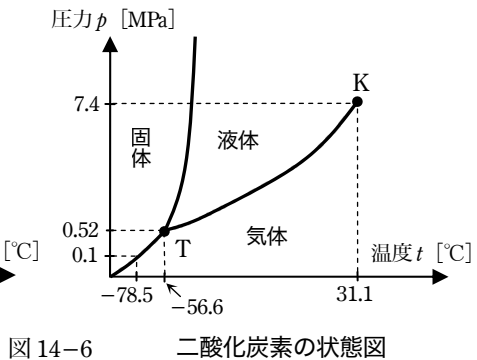
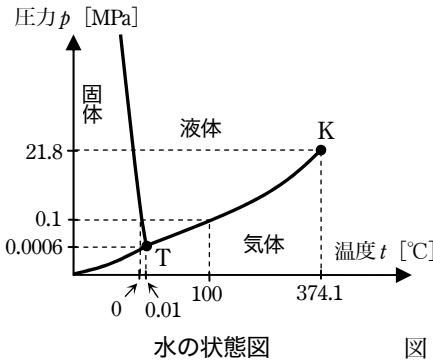


図 14-6

あり、この点のことを **3 重点** (triple point) という。**水の 3 重点**は、温度 0.01 [°C] (273.16 [K]), 圧力 0.0006 [MPa] (正しくは 611.73 [Pa]) である。この 3 重点を用いて、熱力学温度 (絶対温度) が定義されたのはすでに 1 章で述べたとおりである。

また、蒸発曲線を追っていくと、右端の点 K で切れている。この点は**臨界点** (critical point) と呼ばれ、この外側では、気体的状態と液体的状態が連続的に変化する。

さて、だいたい図の見方はわかっていただけたかと思うので、水と二酸化炭素を比較してみることにしよう。大きく異なるのはひとつだけだ。それは、**固体と液体の境界である融解曲線の傾き方の違い**である。水では圧力が高くなると固体が液体になりやすい (融解曲線が左上に伸びている) のに、二酸化炭素では圧力を高くすればするほど固体になりやすい (融解曲線が右上に伸びている)。

具体的な例を挙げてみよう。二酸化炭素の固体のことを一般には**ドライアイス** (dry ice) というが、ケーキ屋さんなどでもらったドライアイスを思い切って踏みつけると、圧力が大きくなるのだが、結果としては、よりドライアイスの固体としての状態が安定することになる。一方、氷を思い切って踏みつけると、圧力が高くなればなるほど液体の水になってしまうわけだ。これは、アイススケートで、氷のリンク上を快適に滑ることができる理由でもある。アイススケートでは、スケート靴で氷面を滑るのだが、そのスケート靴には靴底にブレードとよばれる

金属部分がついており、氷面とはさらにブレードをスリムにしたエッジ部分で接している（図 14-7 参照）。人の体重がエッジ部分の面積で氷面にすべてかかるので、その圧力はかなり大きいはずだ（圧力とは単位面積あたりにはたらく力の大きさのこと→3章）。実際、転んでしまった拍子に指の上を他の人のエッジが通過す

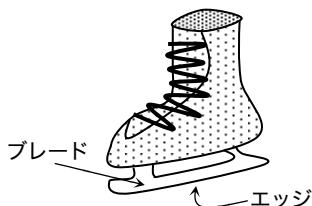


図 14-7

ると、指が切断されることもあるというくらいだ。つまり、アイススケートでは、氷面に大きな圧力をエッジでかけることで、エッジ部分のみの氷を融解して液体の水にし、その水が氷面とエッジとのあいだの潤滑剤のように振る舞うため、摩擦がかなり小さくなって、滑りやすくなるというわけだ。圧力が元に戻れば、また固体の氷に戻るため、そんなことがエッジ部分で起こっているとはまったく気がつかなかったという人も多いのではないだろうか？

このように、水は、その状態図もかなり特異であるわけだ。ちなみに、図 14-6 の固体としてかいた氷は、実際には、氷 I_h 、氷 I_c 、氷 II、氷 III、氷 IV、氷 V、氷 VI、氷 VII、氷 VIII、氷 IX、氷 X といったいろいろな種類があるが、六方晶系の結晶を作る、一番身近でポピュラーな氷 I_h の場合である点を補足しておく。その他の氷 II～氷 X は、圧力がより大きくなった状態において、水分子同士の水素結合の網目が入り組んだ状態となり、その入り組み具合で密度が大きくなった氷のことである。

水の比熱・融解熱・蒸発熱・熱伝導率

次は、熱と関係した水の特性をみていこう。水は、とにかく、ほかの物質とは異なっている。その特異さをぜひわかってもらいたい。また、それらの特異な性質をなぜ示すのかというと、何度も繰り返しているように、水分子同士が水素結合で互いに結合していることがその主たる理由である。

まずは、水の比熱と他の物質の比熱との違いを知っていただくことにしよう。

水の比熱

室温付近でのさまざまな物質の比熱を表にしたものが表 14-1（物理データ事典ほか）だ。“比熱”（または比熱容量）というのは、2 章で紹介したように、“物質 1 [g] あたりの熱容量のこと”であり、“熱容量”とは、“1 [K] だけ物質の温度が上昇したときどれだけの熱量（エネルギー）が蓄えられるのかというその物質のもつ性質のこと”であった。

つまり、比熱が大きい物質ほど、温まるのに多くの熱量が必要となるため温まりにくく、逆に、冷める場合はとても冷めにくい物質ということになるわけだ。

さて、表 14-1 を見て水がどう他の物質と異なっているのかを確認したい。破線よ

り下の金属と、その上の液体の物質とは比熱の桁が一桁違うのは別として（金属は大変温まりやすく冷めやすい）、水は、他の液体の物質と比較してかなり（およそ 2 倍くらい）比熱が大きいことがわかる。これは、水分子の水素結合による結びつきが、他の液体分子の結びつきに比べて極めて大きいことによるものである。

たとえば、人類のからだでいうと、体重の約 6 割が水であるから、人類は、からだ自体が大変温まりにくくかつ冷めにくいといえるわけだ。これは、気温の高い場所や、気温の低い場所でも体温を維持して生活できることと関係があるのはお分かりだろう。また、地球上の他の生物も、そのほとんどのからだの大部分が水で占められているのは、たまたまなのではなく、水で占められていなければ生きていけなかったからなのではないかと思ってしまうほどである。・・・そう、水で占められているのは、なるべくしてなった結果だと思えてくる・・・。

物質名	比熱 [J/K・g]
水	4.175
エタノール	2.416
メタノール	2.55
ベンゼン	1.743
水酸化ナトリウム	1.492
金	0.1289
銀	0.2363
銅	0.3848
鉄	0.4471
アルミニウム	0.9021

25 [°C] (1.013×10^5 [Pa]) におけるさまざまな物質の比熱

表 14-1

水の融解熱・蒸発熱

次は、融解熱と蒸発熱についてみてみよう。固体の状態から液体の状態に変化するのに必要な潜熱が“融解熱”で、液体の状態から気体の状態に変化するのに必要な潜熱が“蒸発熱”である。さまざまな物質と比較して、水の性質を知ろう。

表 14-2 を見てほしい（物理データ事典ほか： 1.013×10^5 [Pa] での値）。

物質名	融点 [°C]	融解熱 [J/g]	沸点 [°C]	蒸発熱 [J/g]
水	0	335	100	2250
窒素	-209.9	25.7	-195.8	199
酸素	-218.4	13.8	-183.0	213
塩素	-101.0	90.4	-34.15	288
水銀	-38.9	11.6	356.6	290
金	1063.9	64.5	2857	1580
銀	964.8	105	2162	2330
銅	1084.7	209	2570	4800
鉄	1536	270	2863	6340
アルミニウム	66.04	397	2520	10900

表 14-2 さまざまな物質（単体）の融点・融解熱・沸点・蒸発熱

まずは、融解熱から。どうだろうか？ アルミニウムを例外と考えると、この表で挙げた物質の中では、**水の融解熱が極めて大きいことがわかる**と思う。水は、破線より上の非金属物質の中ではズバ抜けて融解熱が大きく、さらに、金属と比較しても融解熱が大きい。つまり、氷を融解して水にするには、非常に多くの熱量（エネルギー）が必要となるということであり、それは同時に、水を凍らせるためには、非常に多くの熱量（エネルギー）を失わなければならないことでもある。すなわち、**水は、他の物質と比較して、大変融けにくく、かつ、凍りにくい物質であるというわけだ！**

次は、蒸発熱をみてみよう。水は、破線の上の非金属物質の中では、ケタ違いにその蒸発熱が大きいことがわかる。これは、蒸発する際に多くの熱量（エネルギー）が必要となるということを意味しているため、言い換えると、非常に蒸発しにくいと言えるわけだ。また、水蒸気を水にするのにも多くの熱量（エネルギー）を失う必要があるため、水は、他の非金属物質と比較して、大変蒸発しにくく、かつ、液化もしにくいといえる！

この点でも、生物には大変ありがたいのである。なぜなら、他の非金属物質で体が占められていたとすると、寒い場所で生活しているとたちどころに凍ってしまい、暑い場所だと、からだが沸騰をはじめてしまうわけだ。・・・どうだろうか？ つくづく、水という物質でからだが占められていてよかったと思うだろう？

水の熱伝導率

すでに1章でも紹介しているのだが、あらためて、他の物質と水との熱伝導率の違いを確認しておこう。表14-3を見てほしい（理科年表2002ほか）。“熱伝導率”とは、“1 [m] あたり 1 [K] の温度差のある棒状物質に熱が伝導するとき、1 [m²] の棒の断面を1秒間に通過する熱量 [J] のこと”であったから、この値が大きいほど熱が伝わりやすいわけだ。

さて、表14-3の破線より下の金属物質が熱が伝わりやすいのは日常生活の経験どおりとして、破線より上の非金属物質と比較した場合、水や氷の熱伝導率が非常に大きいことに注目してほしい。

特に氷は、空気や二酸化炭素などの気体と比べると100倍ほど熱が伝わりやすいの

物質名	熱伝導率 [W/m・K]
水	0.561
氷	2.2
アルコール	0.15
石英ガラス	1.4
硬質ゴム	0.2
空気	0.024
二酸化炭素	0.0145
メタン	0.0302
金	319
銀	428
銅	403
鉄	83.5
アルミニウム	236
白金	73

表14-3 0 [°C] における

さまざまな物質の熱伝導率

だ。これは、いったん水が多く熱量（エネルギー）を失って凍ると、その後、氷としては大変熱を伝えやすくなるということを意味している。ちなみに、身近なところで氷といえば雪であろう。そこで、雪を使った“かまくら”についての問題を考えてほしい。

問題

雪国などでよく見かける，“かまくら”という雪を掘って作ったドームのようなものは、外では冷気がビュービュー吹き荒れていても、その中に入るとなぜか暖かい。・・・氷の熱伝導度が大きいことから、よく考えると、これはとても不思議であるということに気がつくだろう。さて、なぜ“かまくら”の内部は暖かいのか？

その種明かしは、雪が氷の塊ではないということにある。

雪の結晶自体は氷なのだが、**降り積もった雪の中には多量の空気が含まれる**。そこを掘って“かまくら”を作るので、“かまくら”は、氷と多量の空気の壁で外気を遮断していることになるわけだ。よって、表 14-3 が示すように、空気の熱伝導率はとても小さく、外の冷気は“かまくら”内部に伝わるまでにかなり時間がかかるというわけだ。また、内部に人がいれば、人の熱も“かまくら”の外部へ伝わるのに時間がかかるため、“かまくら”内部は暖かいのである。

水の表面張力

水の特性で、そのほかに特異なものとしては、**表面張力（surface tension）**がある。液体には、その表面積をできるだけ小さくしようとするような力がはたらき、外力がはたらいていない場合は球形になる。雨滴が球形であったり、蛇口からしたたり落ちる水滴が球形であるといった日常経験を思い出せばわかると思う。このようにはたらく力を表面張力という。

さて、なぜ液体では表面張力が生まれるのかを簡単に説明しておこう。図 14-8

を見てほしい。図は、液体分子の平面模式図である。ひとつひとつの円が液体分子を表すと考えよう。図中の網をかけた分子が、まわりの分子から受ける力を考えてみよう。

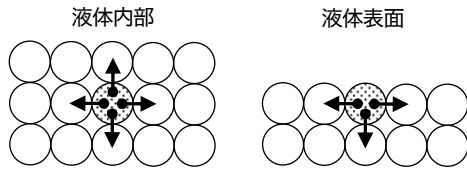


図 14-8

まずは、液体内部の分子（左側）の場合。網をかけた分子は上下左右に他の分子があるため、それぞれの分子から同じ大きさの引力（ファン・デル・ワールス力や水素結合による引力）が図の力の矢印のようにはたらいている。よって、上下左右の力は、上の分子から受ける引力と下の分子から受ける引力がつりあい、左の分子から受ける引力と右の分子から受ける引力がつりあう。つまり、**液体内部の網をかけた分子は、力がつりあって、静止していることになるわけだ。**

ところが、液体表面の分子（右側）の場合はそうではない。網をかけた分子は液体の最上部にある分子であるが、下左右からは、同じ大きさの引力がはたらいているが、上には分子が無いため、上方向には力がはたらかない。つまり、左右方向には力がつりあうのだが、上下方向では力がつりあっていないのだ。よって、**液体表面の網をかけた分子は、下の分子からの引力の分だけ、液体の内側へ引かれることになるわけだ。**この液体表面における引力こそが、表面張力なのである。よって、より分子間にはたらく引力の大きい物質ほど、表面張力が大きいことになる。

表 14-4 は、20 [°C] におけるさまざまな液体の表面張力のわかる表だ（理科年表より）。表面張力は、**液体の表面に平行に、液面上の単位長さの線に直角にはたらく力の大きさとして表すた**

物質名	表面張力 $\times 10^{-3}$ [N/m]
水	72.75
酢酸	27.7
硫酸 (98.5%)	55.1
クロロホルム	27.28
ベンゼン	28.86
ニトロベンゼン	43.35
ヘキサン	18.42
グリセリン	63.4

表 14-4 20 [°C] における
さまざまな液体の表面張力

め、単位は $[\text{N/m}]$ となる。この値が大きいほど、より球形になりやすいわけだ。ちなみに、13 章の永久機関のところで登場した毛細管現象はこの表面張力によるものである。

さて、表 14-4 を見て、水とそのほかの液体とを比較しよう。さまざまな液体の中で、最も表面張力が大きいのが水であることがわかる。酢酸やベンゼンは、まあ、サラッとしているので、表面張力が小さくても納得できるが、どちらかというととねっとりしたイメージの硫酸 (98.5%) や、3 価のアルコールで代表的なグリセリン (glycerin または glycerine) も無色透明で粘稠かつ甘味のある液体なので、それらのほうが表面張力が大きそうなのだが、それらよりも水のほうが表面張力が大きいのは意外かもしれない。その理由は、何度も繰り返しているように、水は、水素結合によって強く分子同士が結合しているからに他ならない。

表 14-4 には挙げていないが、身近なところで水よりも表面張力が大きい物質は、常温で唯一液体の金属である水銀がある。水銀は金属結合で結合しているため、水素結合より遥かに結合の力は強い。表面張力は、だいたい $480 \times 10^{-3} [\text{N/m}]$ くらいというから、水の約 7 倍にあたる。

水の性質

水分子には極性があり、水素結合で分子同士がクラスタを形成している。

1. 水の密度は、 $3.98 [^{\circ}\text{C}]$ で最大となる
2. 水の状態図では、融解曲線が左上に傾いて伸びている
3. 水の比熱 (比熱容量) は、他の液体の物質と比較してかなり大きい
4. 水の融解熱は、他の物質と比較して極めて大きい
5. 水の蒸発熱は、非金属物質の中ではケタ違いに大きい
6. 水や氷の熱伝導率は、他の非金属物質と比較した場合非常に大きい
7. 水の表面張力は、他の液体と比較して最も大きい

とても身近な“水”であるが、その性質はとても“特異”なのである。ここで挙げたのはその一部にすぎない。・・・“水”に興味津々になったのでは？