

# 1. 温度と熱

## 温度

「うへえ、今日は暑い日だなあ。クーラー、クーラー！」

最近の夏は、森林伐採が進行したためか、オゾン層の破壊のせいかな、とにかく、地球温暖化が年々身をもって感じられる。さて、“暑い”というのは、感覚として暑いと感じているという場合に使う言葉なのだが、これを、科学的に表現するにはどうしたらよいのだろうか？

「うわっちちち！ 今、やかんに触ったら、すっげー熱かったぞっ！」

コンロに乗っているやかんに不用意に触ってしまったら、こんなことが起こるかもしれない。場合によっては火傷してしまうかも。この場合の“熱い”も、やはり、感覚として熱いと感じてしまう場合に用いる言葉なのだが、科学的に表現するにはどうしたらよいのだろうか？

いずれの場合も、**温度** (temperature) で表現すれば、科学的に表現できることはわかると思う。例えば、**気温** (air temperature) が 30 [°C] を超えたら“暑い”だろうし、90 [°C] 程度のお湯が入ったやかんであれば“熱い”はずだ。

このように、温度を用いれば、人が自分の感覚で漠然と感じとった暑さ、寒さ、熱さ、冷たさを、相手にしっかりと伝えることができるのである。しかし、はじめから温度というものがあつたわけではない。まずは、温度がどのようにして定義されているのかみていくことにしよう。

## 物質の三態とセルシウス温度

ご存知のように、物質は、温度によって3つの状態に変化する。これを物質の三態という。慣れ親しんでいる水で確認しよう。図1-1をみてほしい。

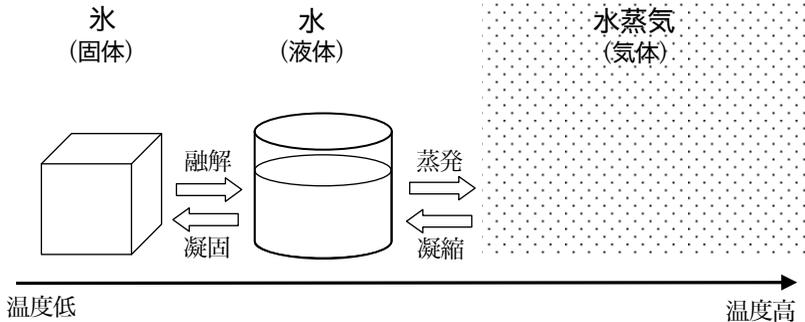


図1-1

低い温度からみていくことにしよう。まず、低温では、水は“氷 (ice)”だったとする。物質の状態では“固体 (solid)”という。外部から熱を加えてどんどん温めていくと、しだいに氷が融けはじめ (融解: fusion または melting)、“水 (water)”になる。“液体 (liquid)”の状態だ。さらに温めていくと、水が沸騰 (ebullition または boiling) しはじめ、“水蒸気 (water vapor)”となる。“気体 (gas)”の状態だ。ちなみに、液体から気体への変化を蒸発 (evaporation または vaporization) という。

高い温度からみていくと、気体である水蒸気は、温度が下がっていくと凝縮 (condensation) して液体の水になる。さらに温度を下げると凝固 (solidification または freezing) して固体の氷となるわけだ。

現在慣れ親しんで日常用いている温度 [°C] は、この水の三態と大きく関連がある。というのも、この温度 [°C] は、スウェーデンの物理学者セルシウス (Anders Celsius) が1742年に、水が凍る温度 (凝固点: solidifying point または freezing point) を100 [°C]、水が沸騰する温度 (沸点: boiling point) を0 [°C] としたからだ。よって、氏の名前をとって、[°C] をセルシウス温度、またはセ氏温度という。また、中国語で、“摂爾修斯”の字をあてたために摂氏 (せっし) 温度ともいう。

## 1. 温度と熱

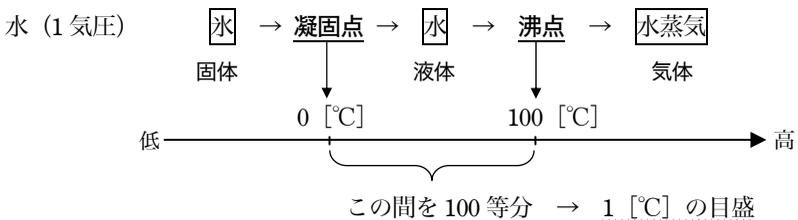
・・・ん？ 水が凍るのは 0 [°C] ではないのか？ 印刷ミスはつけ～～ん！  
などといっではいけない。実は、セルシウスははじめに、水の凝固点を 100 [°C]、  
沸点を 0 [°C] として、その間を 100 等分するように温度を定めたのである。現  
在は、水の氷点を 0 [°C]、沸点を 100 [°C] として慣れ親しんでいることからわ  
かるように、後になって改められたのだ。

現在では、1 気圧（地表の気圧）での水の氷点を 0 [°C]、沸点を 100 [°C] と  
して、その間を 100 等分するように温度目盛を定めたものを**セルシウス温度**とい  
う。また、[°C] を“度シー”と読むことが多いが、正しくは、“**セルシウス度**”  
と読むようなので、注意しよう。

他にも、1724 年に、ドイツの物理学者**ファーレンハイト**（Gabriel Daniel  
Fahrenheit）が、同じく水の三態を用いて、水の凝固点を 32 [°F]、沸点を 212 [°F]  
とし、その間を 180 等分するように温度を定めたものもある。こちらは、日本で  
はあまり主流ではないが、英米ではセルシウス温度とともによく用いられている  
らしい。ちなみに、ファーレンハイトの中国語のあて字が“華倫海特”であった  
ため、**華氏温度**、または**カ氏温度**とよばれる。

### セルシウス温度 (Celsius' temperature scale) [°C] (←セルシウス度)

1 気圧での水が凍る温度（凝固点）を 0 [°C]、水が沸騰する温度（沸点）を 100 [°C] と定め、その間を 100 等分したものを 1 [°C] とした温度目盛のこと。



なお、セルシウスはもともと凝固点 100 [°C]、沸点 0 [°C] と定めた。

## 絶対温度

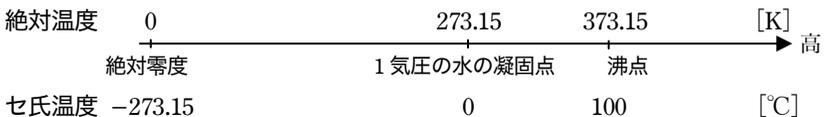
セルシウス温度 [°C] やカ氏温度 [°F] のように、水という物質によって温度が定められたような温度を経験温度または便宜温度といい、熱力学ではあまり用いない。熱力学では、物質に依存しない温度目盛である絶対温度 (absolute temperature) [K] (ケルビン) を用いる。こちらを熱力学温度という。

絶対温度 [K] とは、SI 単位系の温度の基本単位である。1848 年、イギリスの物理学者であったケルヴィン卿 (Lord Kelvin [本名 William Thomson]) により、物質に依存しない温度目盛として定義された温度である。ケルヴィンがはじめて導入したのでケルヴィン温度 (Kelvin scale) ともいう。国際温度目盛として 1927 年の国際度量衡総会で採用され、1968 年の同総会で 1 [K] は、水の 3 重点 (氷と液体の水と水蒸気とが共存する状態：温度 0.01 [°C]，圧力 611.73 [Pa]) の熱力学温度の  $\frac{1}{273.16}$  と定義された。水の 3 重点は、熱力学温度の基本定点である。

つまり、0.01 [°C] が 273.16 [K] となり、さらに、絶対温度はセルシウス温度と同じ目盛り間隔というわけだ。よって、0 [°C] が 273.15 [K] となり、100 [°C] は 373.15 [K] となる。この本では有効数字 3 桁で扱うこととし、以降、セルシウス温度と絶対温度の変換には、273 度を引いたり足したりすることにする。ちなみに、正確に -273.15 [°C] が 0 [K] となる。この温度を絶対零度 (absolute zero point) といい、熱力学的に考えられる最低の温度となる。

### 絶対温度 (absolute temperature) [K] (←ケルビン)

1 [K] は、水の 3 重点の熱力学温度の  $\frac{1}{273.16}$  である。ケルヴィンにより、物質に依存しない温度目盛として定義された。単位は [K] で、ケルビンとよむ。



## 1. 温度と熱

ただ、絶対零度まで、人類は温度を実際に下げることができず、その温度での物質の状態は理論的にしか予想できない。また、有限な温度の状態から絶対零度までにまで温度を下げることは不可能（熱力学第3法則：third law of thermodynamics）であるから、今後も、絶対零度まで実際に温度を下げることはできない点を付け加えておこう。

### 熱

“熱い”，“冷たい”をセルシウス温度や絶対温度を用いて客観的にあらわせることはわかった。しかし、よく考えてみると、熱くても冷たくても熱をもっている状態であるという点は変わらない。そのもっている熱が多いか少ないかの違いなのだ。では、この“熱”について理解するために次の問題に取り組んでほしい。

#### 問題

図1-2のように、温度の高い物質と、温度の低い物質を接触させたとする。温度が高い物質の温度が  $T_H$  で、温度が低い物質の温度が  $T_L$  だったとしよう。この後十分時間がたつと、それぞれの物質の温度はどうなるのだろうか。図1-3のような、温度-時間グラフ ( $T-t$  グラフ) で示せ。

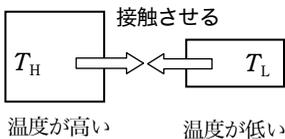


図1-2

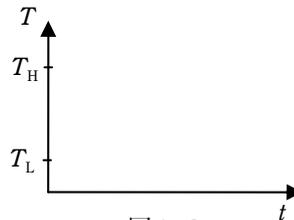


図1-3

問題に入る前に、この問題で用いている文字について説明しておこう。温度 (temperature) は通常  $T$  でかく。既に述べたように、SI 単位系の温度の基本単位は絶対温度 [K] なので、物理学では温度といえば絶対温度である。セルシウス

温度を用いたい場合は [°C] と単位を明記しないと誤解を招く。以後、注意しよう。ここでは、高い温度を  $T_H$ 、低い温度を  $T_L$  とした。H とか L とかいう添字は、それぞれ、high (高い)、low (低い) の意味で用いている。時間 (time) は、 $t$  であらわしている。大文字の  $T$  か、小文字の  $t$  かで物理量が異なるので要注意。

さて、実際に問題を解いていくのだが、**力学編**から繰り返しているように、**自分で絵をかいてから考えてほしい**。これも、繰り返しているのだが、**なぜ絵をかくのがいいのか**かというと、**より現象を理解しやすくなるから**だ。この問題の場合は、たいした絵をかくこともできないが、少なくとも、**図 1-4** のように、**二つの物質を接触させた絵**はかけるはずだ。



図 1-4

ここで、少し考えてみよう。熱いものと冷たいものをくっつけると、最終的にはどうなるのか? ……かなり長い時間がかかるかもしれないが、きっと、同じ温度になるだろう。夏の暑い最中にキャンプに行ったときに、冷たい川の水でスイカを冷やした経験があるだろう。それとだいたい同じような感じだ。

つまり、温度が高い物質の温度は低くなり、温度の低い物質の温度は高くなる。最終的には、 $T_H$  より低く  $T_L$  より高い温度になり、**そこで安定する**のである。よって、温度-時間グラフは、**図 1-5** のようになるわけだ。

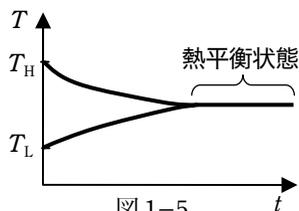


図 1-5

(答→)

このように、最終的に同一温度で安定する状態のことを、物理学では**熱平衡** (thermal equilibrium) または、**熱平衡状態**という。二つの物質は互いに同じ温度なので熱の移動がない状態である。一般に、二つ以上の温度の異なる物質を接触させると、最終的には熱平衡となり、すべてが同じ温度になる。

ちなみに熱平衡の状態であれば同じ温度であるということは経験的によく知られており、これをとくに**熱力学第 0 法則** (zeroth law of thermodynamics) という。この法則があるので温度計が意味をもつのだ。

**熱力学第 0 法則** (zeroth law of thermodynamics)

物質 A と物質 B が熱平衡にあり、物質 B と物質 C が熱平衡にあれば、物質 A と物質 C とを直接接触すると必ず熱平衡にある。

さて、温度の異なる物質が接触することで最終的に熱平衡になるという事実は、かなり古くからわかっていた。

18 世紀には、熱平衡は、高温物質から低温物質への熱の移動を用いるとうまく説明できるので、“熱”というものを**熱素**（カロリック：caloric）という物質だと考えていた。熱素という物質が高温物質から低温物質に移動したから熱が移動したのだというわけである。

ところが、1798 年に、アメリカ出身の政治家、軍人、物理学者であるランフォード（Graf von Rumford [本名 Benjamin Thompson]）が、ドイツのミュンヘン滞在中に、大砲にドリルで孔をあける中ぐり作業の監督をしていたとき、砲身が熱くなることや、鉄クズが熱くなっていることに気づいた。そこで、砲身の地金の先を水の中に入れ、そこに中ぐりの棒を当て、砲身の地金を回転させる実験を行い、作業を続ける限り水の温度が上昇し続け、最後には沸騰することを確認した。熱素説では、熱素が物質なので有限であり、物質内の熱素がなくなったら、それ以上熱が移動しないはずであるが、熱が限りなく発生し続けるこの実験により、力学的な仕事と発生する熱との間に密接な関係のあることを示して、熱素説を否定した。

つまり、ランフォードによつて、熱とは力学的な仕事、言い換えると、エネルギーにほかならない！ と結論付けられたわけだ。要は、**熱はエネルギーのひとつの姿だった**ということだ。

## 熱運動

“熱い”物質も“冷たい”物質も、ともに、それぞれ熱をもっている。そして、その二つが接触すると熱の移動がおこるわけだった。そこで、ランフォードによ

る、熱がエネルギーであるということを受けて、熱の移動と、熱平衡の謎を解き明かしていくことにしよう。

物質の例として、一番おなじみの水でかんがえてみよう。温度が低いということは、もっている熱（これを熱量という）が少ない。言い換えると、エネルギーが少ない。一方、温度が高いということは、もっている熱量が多い、つまりエネルギーが多いわけだ。

水は、ご存知のように  $H_2O$  という、水分子からなっている。図でかくと、図1-6のように、 $H_2O$  分子がたくさん集まっているわけだ。この水分子が熱をもっている状態とは、どのような状態であればいいのかを考えてみよう。

ランフォードによって、熱とはエネルギーのひとつの姿に過ぎないといわれたものの、いったいどのような状態なのだろうか。1827年、イギリスの

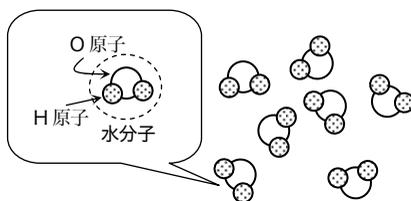
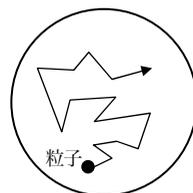


図1-6 水

植物学者ブラウン (Robert Brown) が、水を吸って破裂した花粉から出る微粒子が水中では不規則に激しく動くことを顕微鏡下で発見した。ブラウンは、はじめは生命による運動かと思ったのだが、化石や鉱物の粉などの微小粒子なら同じような運動をすることを発見した (図1-7)。これをブラウン運動 (Brownian motion) という。後に、これが、水分子が実在することと、ブラウン運動が水分子の熱運動によるものであることを、あの有名なアインシュタイン (Albert Einstein) の1905年の論文を元に、フランスの物理化学者のペラン (Jean Baptiste Perrin) が証明した (1908-1911年)。



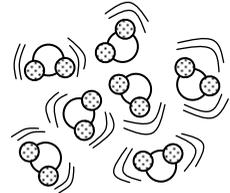
ブラウン運動  
図1-7

ここで、前著力学編の9章“エネルギー”の項を思い出していただきたい。エネルギーをもった状態とはどんな状態だったかいうと、・・・そうだ、相手に仕事ができる状態のことをいうのだった。また、“エネルギーとは何か”といわれれば、“蓄えられた仕事量”のことだった。

# 1. 温度と熱

つまり、熱をもっている状態とは、エネルギーが蓄えられている状態であり、相手に仕事ができる状態なのである！

相手に仕事ができる状態の水分子の状態とはどのような状態なのか。それは、常に振動している状態であればよい。これを、**熱運動** (thermal motion) という。大体のイメージは図 1-8 のような感じだと思っていただければよい。



水分子の熱運動  
図 1-8

そして、温度が高いとは、多くの熱量をもつことに相当するから、多くのエネルギーが、分子の激しい熱運動によって蓄えられていることになる。逆に、温度が低いとは、分子の熱運動が激しくないことに対応する。

これは、固体、液体、気体を通して同じように考えたらよいから、水の三態と分子の熱運動の関係を図 1-9 をみながら理解していくことにしよう。

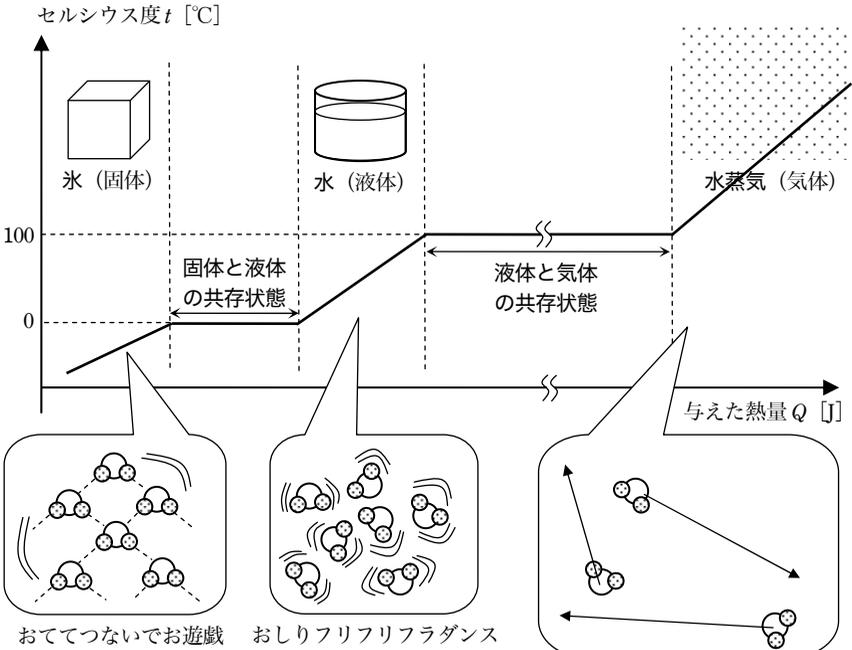


図 1-9 フィーバー状態で走り回っている

縦軸は温度である。ここでは、理解しやすいようにセルシウス温度 [°C] を用いた。絶対温度が大文字の  $T$  [K] を用いるのに対し、セルシウス温度は小文字の  $t$  [°C] を用いる場合が多い。ただ、小文字の  $t$  は時間 (time) の文字としてもよく使われるため、混乱しないように注意しよう。横軸は、与えた熱量である。要は、このグラフは、マイナス数十セルシウス度の氷の塊に、たとえばバーナーで加熱するといった方法で、外部からどんどん熱を与えた場合の温度変化を示したグラフである。また、熱量とはエネルギーのことだったので、その単位はエネルギーの単位と同じジュール [J] となる。また熱量は文字  $Q$  で表すことが多い。

当然のことながら、氷は 0 [°C] で融解し、水となる。さらに熱量を与えると、やがて水は沸騰し、100 [°C] で水蒸気になる。温度が高いほうが熱運動が激しいので、その激しさをそれぞれの状態で吹き出しの中にイメージをかいた。話をわかりやすくするために水分子を保育園の園児にたとえて説明しよう (←聖史式)。

まずは水だ。氷の状態では、水分子園児たち (←聖史造語) は、図 1-9 の左下の吹き出しの中にあるようにきれいに並んでいる。実際に手をつないでお遊戯をしているようなイメージでよいだろう。ここで“手”と表現したのは、水素 H と酸素 O の間にはたらく電気的な引力のことで、正しくはこれを水素結合 (hydrogen bond) という。水素結合という手で、みんなでおてつないで、各自がお遊戯しているのだ。だから、激しく体をゆすろうと思っても、あまり激しくゆすることができないというのはわかるだろう。

次に水だ。氷の状態では、まだ水素結合の手があるのだが、もともと水素結合の引力は弱いので、一部では手を離して一人で体をゆすって楽しむ園児も出てくるような状態だと思えばよい。各自で体をゆすっている、まさにおしりフリフリフラダンス状態だ。さらに熱量を与えると、水分子園児たちの熱運動はかなり激しくなっていくわけだ。

そして、水蒸気。どんどん熱量が与えられた水分子園児たちは、興奮状態になり、やがてフィーバー状態となって、走り回るのである。その走り回る向きはばらばらで、しかも、もう手なんかつないでいられない。園児たちは各々が勝手気ままに走り始めるので、そう、今までは限られた場所での運動だったものが一気に

## 1. 温度と熱

にその場所が運動場いっぱいに広がるわけだ。水蒸気になると体積が増える理由もなんとなくわかっていただけたかと思う。

このように、水分子園児たちの運動にたとえたような熱運動が、実際の分子でも起こっているわけだ。

さて、図1-9のグラフを見ると他にも気がつくことがあるはずだ。そう、水から氷へ変化する[←このように状態が変化することを相転移 (phase transition) または相変化 (phase change) という]ときに、熱量を与えているにもかかわらず、**まったく温度が 0 [°C] のままで変化していない**ということだ。これはいったいどういうことだと思われるかもしれないので説明しておこう。水分子園児たちは、全員が氷から水に状態変化した後でないと、水として振舞えないわけだ。要は、日本の学校制度のようなもので、**みんなで足並みそろえて学年があがる**のと同じようなものだと思えばよい。

つまり、同じ 0 [°C] の状態でも、その大半がまだ氷のままなのか、半分くらいが水になっているのか、ほとんど水になっているのか、まったく温度だけからはわからないというわけだ。この状態を**氷と水の共存状態**という。一般的には**固体と液体の共存状態**という。そして、完全に相転移するまでに必要な熱量 (温度上昇を生じない熱量) を、1755 年にイギリスの化学者**ブラック** (Joseph Black) が**潜熱** (せんねつ: latent heat) と名づけた。この熱量は、**転移熱** (heat of transition) ともいう。

同様に、水から水蒸気になる相転移でも、同じように潜熱が必要である。図中の“§§”は、“かなり長いのだが略しましたよ”という記号なので、**液体と気体の共存状態はかなり続く**のである。

このように、固体から液体への相転移に必要な潜熱を**融解熱** (heat of fusion) といい、液体から気体への相転移に必要な潜熱を**蒸発熱** (heat of vaporization) という。逆に冷やしていく場合は、気体から液体への相転移に必要な潜熱を**凝縮熱** (heat of condensation) といい、その量は蒸発熱と同じである。液体から固体への相転移に必要な潜熱は**凝固熱** (heat of solidification) という。こちらも融解熱と同じ量である。

## 熱伝導

ここで、高温物質と低温物質を接触させるとやがて熱平衡になるという現象が、水分子園児たちのイメージで説明できるのかを確認しておきたい。

たとえば、ほぼフォーバー状態となった水（高温）と、低温の水との接触を考えてみることにしよう。図 1-10 をみてほしい。水は液体なので図のように接触させることはできないが、互いに混ざらないと仮定して考えていこう。

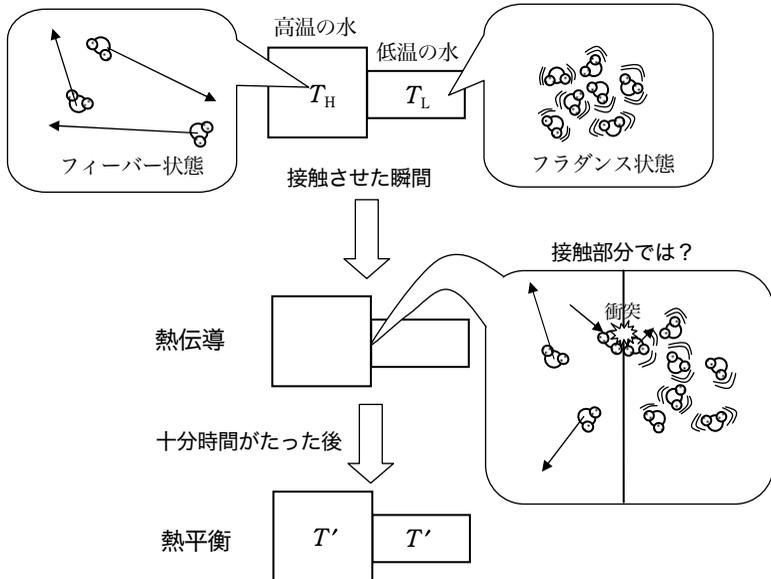


図 1-9

接触させた瞬間は、高温 ( $T_H$ ) のフィーバー状態の水分子園児たちと、低温 ( $T_L$ ) のフラダンスをしている状態の水分子園児たちには交流がないが、やがて、図の真ん中のように、接触部分で交流が生じる。フィーバー状態の園児のほうがエネルギーが大きいのので走り回るスピードは速い。いずれは、フラダンスしている接触部分の境界面にいる園児にぶつかることもあるだろう。その瞬間、何が起こるのか。想像していただければいいのだが、フラダンスしている園児をフィーバー状態の園児が押すことになる。いわゆる衝突現象が起こる（力学編 13 章“モノと

## 1. 温度と熱

モノがぶつかるとき”参照)。運動量が保存されるので、結果的には、フィーバー状態の園児は遅くなり、フラダンスしている園児は少し走り始めることになる。走り始めた元フラダンス状態の園児は、自分の隣のこれまたフラダンス中の園児にすぐぶつかる、そしたら、その園児はまた隣の園児に・・・。

フィーバー状態の園児の1回の衝突によって、エネルギーが園児の振動運動という形でまるでバケツリレーのようにどんどん拡散していくことになるわけだ。実際には、フィーバー状態の園児も次々に連続的にやってくるのだから、最終的には、かなり時間がかかるのだが、全体が同じ振動状態になるところまで続くはずである。これが、熱が移動する仕組みであり、**熱伝導** (conduction of heat) という。最終的には熱平衡となり、全体が等温度  $T'$  (均一熱運動状態) となるわけだ。

注意点は、今挙げた例では、接触させた物質が同じ水であったが混ざらないと仮定している点だ。つまり、**接触させる二つ以上の物質は、互いに混ざること**はなく、**接触部分のみで熱の移動が実現できる**ということだ。また、同一物質内でもバケツリレーのようにして熱が次々に伝導していくことも含まれる。そして最終的には熱平衡になるのだ。

ちなみに、熱の伝わり方は、物質によって異なる。それは温度や圧力などによって変化し、**熱伝導率** (thermal conductivity または heat conductivity), または**熱伝導度**とよばれる。熱伝導率の単位は  $[W/m \cdot K]$  であり、単位時間に単位面積を通過する熱量 (エネルギー) を温度で割ったものである。つまり、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  $[m^2]$  の棒の断面を1秒間に通過する熱量 [J] のことである。表1-1に0 [°C] での主な物質の熱伝導率をのせた (理科年表より)。

たとえば、調理器具としてよく利用されている鉄と銅を比べると、銅のほうがかなり熱伝導率が大きいことがわかる。鍋だったならば、**鉄鍋より銅鍋のほうが熱が5倍くらい伝わりやす**

**い**わけだ。ただしこれは、温まるときは速く温まるが、冷えるときもはやく冷え

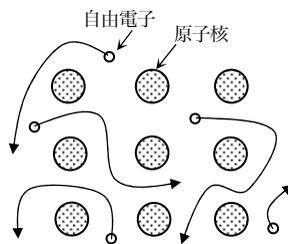
0 [°C] での熱伝導率

物質	熱伝導率 $[W/m \cdot K]$
金	319
銀	428
銅	403
鉄	83.5
アルミニウム	236
石英ガラス	1.4
水	0.561

表1-1

るということである。こういった性質をよく知っておけば、作る料理ごとに使い分けることも可能となる。

最後に、金属はご存知のように金属結合物質なので分子ではない。つまり、図 1-10 のように、原子核が格子状に並んでおり、そのまわりを自由電子 (free electron) と呼ばれる電子が動き回っているのだ。よって、ここまで例としてあげてきたような水分子園児のようにして分子の衝突で熱が伝わるのではない。金属中の自由電子が熱伝導の担い手になって熱伝導がおこるのだ。つまり、熱伝導の仕組みが大きく異なるのである。この点のみ誤解のないよう



金属結合  
図 1-10

うにここで紹介しておくことにした。ただし、熱力学では主として分子の物質 (共有結合物質) をメインに扱う。よって、金属については、これ以上深入りしないことにしよう。