

2. 熱容量と比熱

モノの温まりやすさや冷めやすさは、温度という物理量で扱うのが実戦的でないへん便利だ。そこで、熱量と物質の温度との関係を見ていくことにしよう。

熱容量と比熱

物質の温度を 1 [K] ($\leftarrow 1\text{ [}^\circ\text{C]}$ でも同じ) 上昇させるのに必要な熱量を、その物質の**熱容量** (heat capacity) という。普通、大文字の C とかく。capacity とは、“収容能力” という意味で、**熱容量とは 1 [K] だけ物質の温度が上昇したときだけだけの熱量 (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る。

熱量とは仕事 (エネルギー) のひとつ姿であることは、既に 1 章で説明済みなので、たとえば、外部から加熱により熱量というエネルギーが与えられたとき、物質の温度が 1 [K] 上昇するとは、**与えられた熱エネルギーが温度という形になって物質内に蓄えられたのと同じことになるわけだ**。当然、その能力は物質ごとに異なる。つまり、熱容量は物質に固有な値となる。ちなみに、熱容量の単位は $[\text{J/K}]$ (ジュール毎ケルビン) もしくは $[\text{J/}^\circ\text{C}]$ となる。しかし、熱力学では絶対温度を用いるのだから、同じ目盛りの幅であるセルシウス度ではなく、絶対温度のケルビンのほうを用いよう。ただし、問題によって温度がセルシウス度のままで考えられる場合には、柔軟に対応していただきたい。

さて、一様な物質では、熱容量はその物質の質量に比例することがわかってい

る。つまり、質量 1 [g] あたりの熱容量が物質によって決まっていることを示し、物質 1 [g] あたりの熱容量のことをその物質の比熱 (specific heat) という。こちらは小文字の c とかき、その単位は、[J/K・g] (ジュール毎ケルビン毎グラム) である。ちなみに、高校の教科書では [J/(g・K)] (ジュール毎グラム毎ケルビン) とされているが、“質量 1 [g] あたりの熱容量”を“比熱”というのだから、単位は、[J/K・g] のほうが自然だと僕は思うので、この本では [J/K・g] で統一する。

ここでひとつ注意点がある。それは何かというと、比熱は 1 [g] の質量あたりの熱容量のことであるという点だ。1 [kg] の質量あたりではないということだ。なぜこんなことをあえて強調しているのかというと、力学編の 1 章“速度と加速度”の、“ブツリー戦隊 MASK マン”のところで述べているように、SI 単位系の質量の基本単位は [kg] なのである。しかし、比熱の単位は、1 [g] の質量あたりの熱容量であり、[J/K・kg] ではなく [J/K・g] なのだということだ。これにはわけがあるので後ほど紹介することにしよう。

しかし、僕は、将来的には SI 単位系にそろえられるのではないかと考えている。つまり、[J/K・kg] が一般的な比熱の単位になる日も近い・・・のかも？

熱容量と比熱

ある質量 m [g] の物質を ΔT [K] (←温度差なので Δt [°C] でも同じ) だけ上昇させるのに必要な熱量 ΔQ [J] は、

$$\Delta Q = mc\Delta T = C\Delta T$$

→ 熱容量 C [J/K]

→ 比熱 c [J/K・g]

また、熱容量と比熱には、 $C=mc$ の関係がある。

熱量はエネルギーのひとつの姿に過ぎない

エネルギー保存則が成り立つ！

ここで、熱量 Q や温度 T に“ Δ (←デルタ)”をつけている点について確認し

ておこう。力学編でも何度も出ていたように，“ Δ ”は“変化分”の意味で用いている。つまり， ΔQ は必要な熱量とは熱量の変化分のことであり， ΔT は温度差とは温度の変化分のことである。また，“比熱”は“比熱容量”とも呼ばれる。

熱量の保存

1章から何度も繰り返しているように，熱量はエネルギーのひとつの姿である。熱量がエネルギーならば，力学編でおなじみのエネルギーの保存則が熱力学へ拡張できるのではないかと思うだろう。・・・そう，できるのである。

ここでは，熱量という姿のままエネルギーが変化しないという場合のエネルギー保存則を考えることにする。これを熱量の保存または熱量保存則（熱量保存の法則）と呼ぶ場合がある。僕は，熱量オンリーバージョンのエネルギー保存則（←聖史造語）と銘打っていつも紹介している。

熱量の保存

熱量オンリーバージョンのエネルギー保存則で，たとえば二つ以上の物質の接触時に次のような熱量の関係となる。

接触により温度が下がった 物質が失った全熱量 [J]	$=$	接触により温度が上がった 物質が得た全熱量 [J]
-------------------------------	-----	------------------------------

それでは，具体的な話として，・・・そうだな，次の問題に取り組んでみてほしい。料理をした事のある人なら，こんなところに熱力学がっ！ と驚くのではなからうか？

問題

夏といえば，キャンプだ！ そして，キャンプといえば昔からバーベキューかカレーだ。ここでは，カレーを作る場合を考えることにしよう。

80 [°C] のお湯 500 [g] の中に、クーラーボックスに入れてあった 15 [°C] のジャガイモ等の野菜を合計で 200 [g] 入れた。加熱することではなく、外に熱が逃げないとした場合、十分に時間がたった後、全体は同じ温度になるが、その温度は何 [°C] か。水の比熱は 4.2 [J/K・g]、野菜の比熱は平均して 2.5 [J/K・g] として求めよ。

さて、いつものように、まずは自分で絵をかいてから考えよう。この問題のように状態が変化する場合は、変化前の状態と、変化後の状態をそれぞれ絵にかくのが比較しやすくてよい。さあ、鉛筆をもって自分でかいてみよう！

どうだろうか。図 2-1 のようにかけただろうか。お湯の情報や、野菜の情報など、図の中にかき込むとわかりやすいだろう。

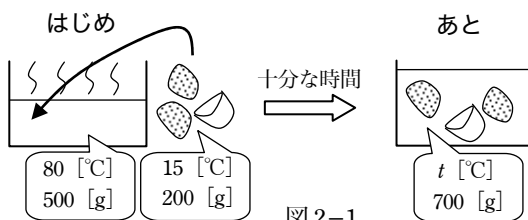


図 2-1

ところで、問題文中の“十分に時間がたった後”という表現は、“熱平衡になったとき”という意味である。熱平衡の温度を t [°C] としよう。これが、求める温度である。

では、温度関係をしっかり把握しておこう。今登場している温度で、一番低いのはどの温度だろうか。・・・そう、15 [°C] である。では、その次に高いのは？ 熱平衡の温度 t [°C] だ。そして、一番高いのがお湯の 80 [°C]。

$$15 \text{ [°C]} < t \text{ [°C]} < 80 \text{ [°C]}$$

熱力学でもエネルギー保存則である、熱量オンリーバージョンのエネルギー保存則が常に成り立つので、温度が下がった物質が失った全熱量と、温度が上がった物質が得た全熱量が等しくなる。これを式で表してみよう。

温度が下がる物質はお湯だ。これを左辺に。一方、温度が上がる物質は野菜だ。こちらは右辺に。それぞれの比熱を用いて、温度変化を [J] の単位の熱量変化としてかいてみよう。また、比熱の単位が絶対温度 [K] であるが、既に述べたよう

2. 熱容量と比熱

に単位温度は $1\text{ [K]} = 1\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ であるので、そのままの比熱の値を用いればよい。

$$\begin{aligned}\Delta Q_{\text{お湯}} &= \Delta Q_{\text{野菜}} \\ m_{\text{お湯}} c_{\text{水}} \Delta T_{\text{お湯}} &= m_{\text{野菜}} c_{\text{野菜}} \Delta T_{\text{野菜}} \\ \underbrace{500 \times 4.2 \times (80 - t)}_{\text{お湯が失った全熱量 [J]}} &= \underbrace{200 \times 2.5 \times (t - 15)}_{\text{野菜が得た全熱量 [J]}} \\ 168000 - 2100t &= 500t - 7500 \\ 2600t &= 175500 \\ \therefore t &= 67.5\text{ [}^{\circ}\text{C]}\end{aligned}$$

ちなみに、実際にカレーを作るときは、はじめに玉ねぎを炒めて半透明になったら、肉を炒め、ニンジンやジャガイモ等の野菜を炒める。ここで水を入れて、水で煮る。少々カレー粉やガラムマサラなどを入れるとよい。さて、この水で煮るときに、この問題のようにするとかなり短時間で野菜に火が通り、少しだけ入れたカレー粉の味も染み込むのだ。実際に確かめてみるとよいが、**ずっと加熱し続けて沸騰させたままよりも、はるかに短い時間で火が通る**。保温装置などがあれば $90 \sim 80\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ になった状態で 1 時間程度ほかっておけば、かなり火が通る。それがない場合は、5 分加熱して 20 分程度なべをほかっておき、また 5 分加熱して・・・を 5 セットほど繰り返すとよい。市販の固形ルーを入れるときも $80\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ 程度にて完全に溶かし込んでから加熱すると、ダマができずにスムーズにカレーができる。仕上げに、ピターチョコレートひとかけらか、ブラックコーヒー小さじ一杯を隠し味に入ると高級カレーに早変わり。

潜熱を考慮しなくてはならない場合の熱量の保存

1 章で述べたように、温度によって物質の状態が変化する場合は、状態変化のために潜熱とよばれる熱量が必要であった。そういった場合でも、当然**熱量オンリーバージョンのエネルギー保存則**が常に成り立つ。ここでは、氷から水へ状態変化する場合の潜熱である**融解熱**を例に挙げて、熱量の保存について確認することにしたい。まずは、融解熱の単位の確認から始めよう。

融解熱

融解熱は物質によって決まっており、その物質 1 [g] を固体から液体に完全に相転移させるのに必要な熱量のこと。この本では、 q [J/g] とかくことにする。

よって、 m [g] の物質を固体から液体に完全に相転移させるのに必要な全熱量が ΔQ [J] のとき、

$$\Delta Q = mq$$

の関係になる。

では、融解熱を考えなくてはならないような**問題**に取り組むことにしよう。

問題

水の比熱を c_0 [J/K・g]、氷の比熱を $\frac{c_0}{2}$ [J/K・g]、鉄の比熱を c [J/K・g]、氷の融解熱を q [J/g] として、次の問いに答えよ。ただし、熱は他へもれないとする。

- (1) 0 [°C] で $2m$ [g] の水に、0 [°C] で m [g] の氷の塊を入れた。ここに t_1 [°C] (>0 [°C]) に熱した $3m$ [g] の鉄球を入れ、十分時間がたつと、全体の温度は何 [°C] になるか。
- (2) 0 [°C] より低い温度の氷の塊 m [g] と、 t_1 [°C] (>0 [°C]) に熱した $3m$ [g] の鉄球を、同時に 0 [°C] で $2m$ [g] の水の中に入れた。十分時間がたつと、氷が全部融けて、全体の温度はちょうど 0 [°C] になった。はじめの氷の塊の温度はいくらだったか。

では、図 2-1 のように、**まずは自分で絵をかいてみよう**。この**問題**のように、**何を何に入れたのか**ということや、**十分時間がたった後の状態はどうなのか**といった**状況理解**が**絵をかくことではっきりわかる**はずである。手を抜かず、自分の手で絵をかいてから次へ進んでほしい。

(1) 十分時間がたった後の温度を t' [°C] としよう。そして、水に氷の塊と鉄球を入れた瞬間と、十分時間がたった後の状態を絵でかいてみよう。図 2-2 の

2. 熱容量と比熱

ような絵がかけたらどうか？

ここで、注意
してほしいこ
とは、氷の存在
である。図2-2
を見れば一目
瞭然であるが、

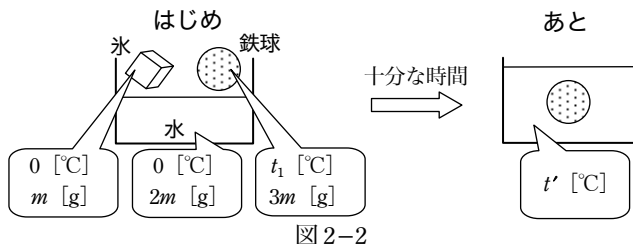


図2-2

はじめに存在した氷の塊は、十分時間がたった後には融けて水になっているとい
うことだ。

では、**熱量オンリーバージョンのエネルギー保存則（熱量の保存）**を式でかい
てみよう。はじめとあとで温度が下がるものの熱量変化を左辺に、温度の上がる
ものの熱量変化を右辺にかくことになる。

$$\Delta Q_{\text{鉄球}} = \Delta Q_{\text{氷}} + \Delta Q_{\text{水}} \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

ところで、ここで水の熱量変化について考えよう。氷として温度が $0 [^{\circ}\text{C}]$ から
 $t' [^{\circ}\text{C}]$ に上昇したわけではないことは、図2-2を見ればわかると思う。氷の
塊は、まず、氷から水への状態変化をして（この間は $0 [^{\circ}\text{C}]$ のまま）、完全に水
になってから、今度は水として $0 [^{\circ}\text{C}]$ から $t' [^{\circ}\text{C}]$ に上昇するわけだ。つまり、

$$\Delta Q_{\text{水}} = \Delta Q_{\text{氷から水への融解熱として}} + \Delta Q_{\text{水としての温度上昇分}} \quad \cdots \cdots \textcircled{2}$$

よって、②式を①式に代入すれば、熱量の保存の式が完成する。

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{鉄球}} &= \Delta Q_{\text{氷から水への融解熱として}} + \Delta Q_{\text{水としての温度上昇分}} + \Delta Q_{\text{水}} \\ 3mc(t_1 - t') &= \frac{mq}{\quad} + \frac{mc_0(t' - 0)}{\quad} + 2mc_0(t' - 0) \end{aligned}$$

↑
これだけが $\Delta Q_{\text{水}}$ の熱量変化分

求める温度は $t' [^{\circ}\text{C}]$ なので、これを解けばよい。

$$\begin{aligned} 3mct_1 - 3mct' &= mq + mc_0t' + 2mc_0t' \\ (3mc + 3mc_0)t' &= 3mct_1 - mq \\ \therefore t' &= \frac{3mct_1 - mq}{3mc + 3mc_0} = \frac{3ct_1 - q}{3c + 3c_0} [^{\circ}\text{C}] \end{aligned}$$

また、水としては全体で m （氷が融けた分）+ $2m$ （もともとの水）= $3m$ [g]

が0 [°C] から t' [°C] へ上昇している点になっている点に気がついてほしい。

(2) はじめの氷の塊の温度を t_2 [°C] (<0 [°C]) として、まずは絵をかいて

みよう。図 2-3

のようにかけ
ただろうか。

さて、じっと

図 2-3 をみて

いると、あるこ

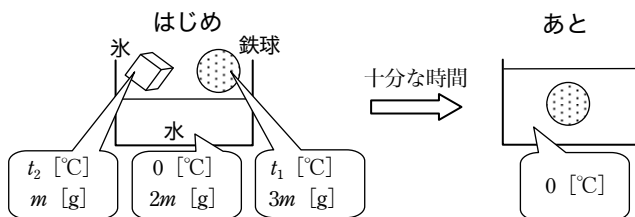


図 2-3

とに気がつくのだが、どうだろうか？・・・そう、 $2m$ [g] 分の水は、0 [°C] のままで、はじめとあとで変化していないということだ。つまり、水の熱量の変化はないということである。

では、熱量オンリーバージョンのエネルギー保存則（熱量の保存）を式でかいてみよう。はじめとあとで温度が下がるものの熱量変化を左辺に、温度の上がるものの熱量変化を右辺にかくことになる。ここに水の熱量変化は登場しない。

$$\Delta Q_{\text{鉄球}} = \Delta Q_{\text{水}} \quad \dots\dots\dots ③$$

右辺の氷の熱量変化について考えよう。氷として温度が t_2 [°C] から 0 [°C] に上昇するだけではないことに注意が必要だ。図 2-3 を見ればわかると思うが十分な時間がたった後には氷はすべて融けてしまっている。つまり氷の塊は、氷として t_2 [°C] から 0 [°C] に温度が上昇し、その後 0 [°C] のままで氷から水への状態変化をして完全に水になるわけだ。つまり、

$$\Delta Q_{\text{水}} = \Delta Q_{\text{水としての温度上昇分}} + \Delta Q_{\text{氷から水への融解熱として}} \quad \dots\dots\dots ④$$

よって、④式を③式に代入すれば、熱量の保存の式が完成する。

$$\Delta Q_{\text{鉄球}} = \Delta Q_{\text{水としての温度上昇分}} + \Delta Q_{\text{氷から水への融解熱として}}$$

$$3mc(t_1 - 0) = \frac{m \cdot c_0 (0 - t_2)}{2} + mq$$

↑
これだけが $\Delta Q_{\text{水}}$ の熱量変化分

求める温度は t_2 [°C] なので、これを解けばよい。

$$\text{両辺を 2 倍して, } 6mct_1 = -mc_0 t_2 + 2mq$$

2. 熱容量と比熱

$$mc_0t_2 = 2mq - 6mct_1 \quad \therefore t_2 = \frac{2mq - 6mct_1}{mc_0} = \frac{2q - 6ct_1}{c_0} [^{\circ}\text{C}]$$

氷の一部が融けないで残るような場合

氷全部が融けてしまう場合のほか、氷の一部が融けない場合も当然考えられる。よく冷えた水に氷の塊を入れると、ある程度は氷が融けるものの小さくなっているが氷が融けないで残っているという現象に相当し、レストランなどでジュースを飲むときなどに見られるような**大変身近な現象**だ。こうした場合には、**融解熱を融けた氷の質量分だけ考えればよい**ことになる。

問題

0 [°C] の氷の塊 M [g] に熱量を与えたら、 m [g] が融け残った場合、融解熱を q [J/g] として、与えた熱量を求めよ。

与えた熱量を ΔQ とすれば、

$$\Delta Q = \underline{(M - m)q} \text{ [J]}$$

となる。なぜなら、**融けた氷の質量が $M - m$ [g] だから**だ。

また、このように氷の一部が融け残った場合でも、当然**熱量オンリーバージョンのエネルギー保存則（熱量の保存）**は成り立つ。