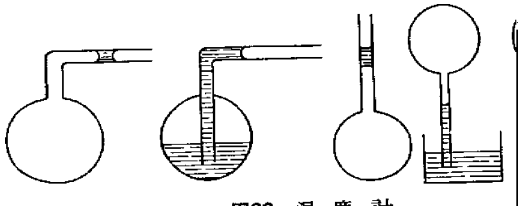
物理学 第 4 回

4　熱と温度、熱力学第 1 法則

日常生活において、「温度」と「熱」を区別して使うことは稀である。「今日は風邪気味で熱がある」というのは普段より体温が高い場合に使われる。では「熱」と「温度」とは同じものだろうか。

4.1　温度計と温度目盛

夏は暑く、冬は寒い。この感覚を数値化するのが「温度」である。通常は温度計という測定器具で測られる。では現在のような温度計が使われるようになった



のはいつ頃からだろうか。

図に示したのは中世以前の温度計である。この種の「温度計」の欠点は外部の大気圧によって左右されるということである。17 世紀になってから現在使われているような密封された液体温度計へと進歩した。

温度の尺度としては様々なものが考えられてきた。その尺度の決め方として 1 定点法と 2 定点法とがある。1 定点法とはある一つの物体 (液体) の一つの温度状態を原点、すなわち定点と定め、その液体の体積変化率を見ることで他の温度を決めるものである。しかし、18 世紀になってくると、2 つの温度状態を定点とする 2 定点法が考案され実用化された。最初のものはファーレンハイトの「華氏目盛」温度計である。これは 32 度を、氷の融点、96 度を健康人の体温 (血液温度) として 2 定点を定め、その間の温度は液体の体積に比例して決めた。我々が日常使っている摂氏目盛はセルシウスによって考案された 2 定点法の尺度 (摂氏目盛) で、1 気圧での水の氷点と沸点をそれぞれ 0 度、100 度と定めている (セルシウスの尺度では 0 度と 100 度の決め方が逆であったが、後に反転させられた)。

4.2　熱

100 ℃の水 1g と 100 ℃の水 1000g とでは (温度は同じだが) どちらが「熱い」か。この「熱い」を温度の高さの意味で使えば当然両者は等しいが、「被

せられた時の火傷のひどさ」という意味なら後者は前者より 1000 倍も「熱い」ということになるであろう。1g のお湯なら直ぐに冷めてしまうため、体にかけられてもやけどの程度は軽いが、1000g の 100 ℃のお湯だと相当ひどい火傷のなるはずである。同じ温度でも金属と水とでは「熱さ」に差があることは日常体験しているであろう。金属のスプーンを火で熱しても、空気中に数秒も放置すれば室温程度に下がってしまう。では、この「熱さ」はどのように表現できるだろうか。

温度 T_1 と T_2 の水を各々$m_1 g$ と $m_2 g$ 混ぜ合わせると最終的な温度は

$$T = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2}$$

となる。これを見ると、(質量) × (温度) で与えられる「熱の量」が混合の前後で等しくなっていることがわかる。この「熱の量」は温度と異なり、質量倍されていることからわかるように「加算的な量」である。通常は「水 1g を 1 ℃上昇させるのに必要な熱の量」を $1cal$(カロリー) という。

水以外の物質においては、その質量 m は水の m_0 と同等とすることができる。関係式

$$m_0 = cm$$

で、この c は物質に特有の量、比熱とされた。これは金属では小さい。

このように、熱の強さ (温度) と、熱の量 (熱量) とが明確に区別されるようになったのは 18 世紀以降である。

4.2.1 「熱素説」

熱量は保存する。これを質量の保存と同様に考え、熱を物質、すなわち元素と考えるのが熱素説 (caloric 説) である。熱い物体は熱素を多く含み、熱素を少ししか持たない冷たい物体と接触すると熱い物体から冷たい物体に熱素が移動する。

同じ温度でも水は熱素を多く含み、金属へ熱素を少ししか持たない。だから熱い金属を同程度の質量の冷たい水に接触させても移動する熱素が少ないために温度があまり上がらない。このように考えると前節で述べた熱量は「熱素という物質の量」で置き換えればよい。近代科学をうちたてたラボアジェはこの熱素 (caloric) を元素の一つに数えた。

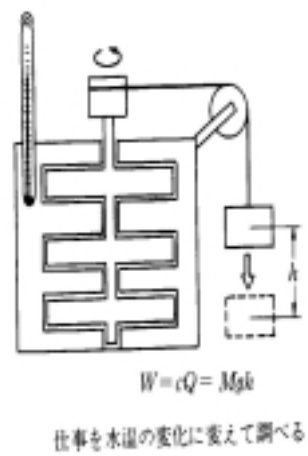
4.2.2 「運動説」

熱を物質とする見解の反証となる実験は 18 世紀の終わりに行われた。ラムフォードは 1798 年、熱は物質でありえない、とする説を打ち立てたが、その根拠は次の事実に依る。大砲の砲身な「なかぐり」という作業がある。これは金属の、金属塊になかぐり棒を回転させながら押し込み、砲身を作る。こ

のとき、ラムフォードは「ただ十分に長くなかぐり作業をつづければいくらでも多くの熱をはっせいさせられること、測定された熱量は使用された仕事量に対応すること」を確かめ、「熱の仕事当量」として、$5.6J/cal$ を出している。

4.3 ジュールの実験と熱の仕事当量

熱の運動説を決定付けたのはジュールの実験である。図にあるように錘を落下させ、水車をまわして水を攪拌する。



その時の、水の温度上昇を測定し、錘が落ちる時の仕事量 (錘の質量を m とし、落ちる高さを h とすると、mgh、単位はジュール (J)) と、水に与えられた熱量 (水の温度上昇に水の質量をかけたもの、単位はカロリー (cal)) とを比較し、

$$1cal = 4.2J$$

を得た。この値は先のラムフォードの値よりは小さいが、ほぼ同程度担っていることが見て取れる。

このように「熱」と「仕事」とが比較、換算できる、ということはこれらが同じ量と言うことである。

力学的エネルギー保存則を思い出そう。振り子を振ってみると確かに運動エネルギーと位置エネルギーが交互に大きくなり、それらを加えたものはほぼ一定の値になっていることが推測される。しかし、長い時間振り続けているといつかは静止する。力学的エネルギーは保存されず減少することになる。これは空気の抵抗や、振り子の中心での摩擦によるものである。しかし、ジュールの実験でわかるように、空気の抵抗を受けて力学的エネルギーが減少して

も、「空気の温度は上昇する」のである。その結果、力学的エネルギーの減少分は「熱量」となったのである。こうすると、

$$\text{エネルギー} = \text{力学的エネルギー} + \text{熱量}$$

という等式を立てると、左辺のエネルギーは保存するのである。

エネルギーの種類はここに挙げたものだけではない。水力発電所を考えてみよう。ダムの上のある水 (位置エネルギー) が下に放流され、早く落ちるとき (運動エネルギー)、タービンを回して発電する。これで、「電気的エネルギー」に形を変えたのである。火力発電所では、石油を燃焼させ (化学エネルギー)、タービンを回して (力学的エネルギー)、差う主的に電気のエネルギーを得ている。このように、いろいろに形を変えるが、エネルギー保存則として述べているのは、全体としての量は増えても減ってもいない、よいうことである。

4.4 人間のエネルギー摂取と仕事

人が生きてゆくためにもエネルギーが必要である。人は一日あたりどの程度のエネルギーを必要とするのだろうか。

我々のエネルギーは我々が摂取する食物から取られる。食べ物と体内で消化 (すなわち燃焼) し、その際に発生する熱がエネルギーとして使われる。栄養学での 1Cal(カロリー) は水 1g を 1 ℃上昇させる熱量の 1cal の 1000 倍、すなわち、1Kcal である。だから、1Cal = 1000Kcal = 4.2KJ である。

炭素 1mol(mol とは分子量にグラムをつけた質量の単位) が燃焼 (燃焼とは酸化のこと) すると、

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 97.2Cal$$

と、97Cal= 97Kcal 熱が発生する。これを「発熱反応」というが、角砂糖一つ程度の摂取でこれだけの熱量が得られる。大人一人一日あたり 2000 〜 3000Cal だけのエネルギーが必要といわれている。

逆にエネルギーの消費ということを考えてみよう。例えば、5Kg のダンベルを左右に 1 個ずつ持ち、50cm50 回持ち上げるとどれだけのエネルギーを消耗するだろうか。

$$\text{必要な力} = 5KgW = 5Kg \times 9.8m/s^2 = 49N$$

$$\text{仕事量} = 49N \times 0.5m = 24.5J$$

$$\text{2 つ 50 回だから、}24.5J \times 100 = 2450J$$

$$2450J \div 4.2 = \text{約 } 585cal = 0.585Cal$$

これだけの運動では砂糖一かけらのエネルギーも消費しない。脂肪が 1 グラム燃焼することで約 9Cal=9Kcal のエネルギーを出すといわれているが、この運動では

$$0.585Cal \div 9Cal/g = 0.06g$$

と、0.06 グラムの脂肪がへるだけであり、ダイエットもなかなか難しい。

人間のエネルギー摂取を一日当たり 2400Cal = 2400Kcal としよう。1 日は 24 時間なので、1 秒あたりでは

$$2400 \times 1000 \times 4.2dvi(24 \times 3600) = 116J/s$$

となる。この「毎秒何ジュールか」という単位を W(ワット) というが、人は大体 100 ワットの仕事率である。小さな電熱器程度で、寂しい限りである。ちなみに、馬力といわれる馬の仕事率は約 750W で人間が摂取した熱を全部仕事に変えたとしてもその約 7 倍の仕事率である。

燃焼で発生した熱が全てエネルギーになるとして計算したが、実際にはそうならない。例えば人の仕事率は約 1/20 馬力と言われている。なぜ、熱を全部仕事に変えられないか、ということは「熱機関」での話題になる。