

13. 熱力学第 2 法則

6 章で紹介した“ジュールの実験”が示したことは、仕事と熱が同等なもの（エネルギーの姿の違いに過ぎないということ）であり、仕事から熱へエネルギーを変換できるということだった。言い換えれば、これは、エネルギーが保存しているということである。仕事と熱との相互変換は可能であることを予言していた。これが、熱力学第 1 法則（←“熱力学的”エネルギー保存則）である。

一方、12 章で紹介した“カルノー・サイクル”が示す“カルノーの定理”は、熱から仕事への変換にはその効率に上限があり、すべての熱を仕事に変換することができないことを示した。これは、“ジュールの実験”が予言したエネルギー保存則が、条件付きであったことに相当するわけだ。こちらが、熱力学第 2 法則と呼ばれているものだ。

熱力学第 2 法則

“カルノーの定理”が意味することは、一般に、熱と仕事の変換では、仕事から熱への変換は 100% 可能であるのだが、熱から仕事への変換には制限があるということだ。つまり、熱から仕事への変化は、完全にもとの状態に戻せない、不可逆変化（irreversible change）であるといっているわけだ。これは、さまざまに異なった表現がなされており、熱力学第 2 法則（second law of thermodynamics）と呼ばれている。有名なものを紹介しておこう。

1851 年、ポーランドのクラウジウス（Rudolf Julius Emmanuel Clausius）は、“他

に何の変化を残すことなく、低温の物体から高温の物体へ熱を移すことはできない”と表現した。これは、“**クラウジウスの原理** (Clausius theorem)”として知られている表現である。

同じ 1851 年、イギリスの**トムソン** (William Thomson : ケルヴィン卿のこと) は、クラウジウスとは別に、“1 つの熱源から熱を受け取り、これを全て仕事に変えることができる熱機関は存在しない”と表現した。これを、“**トムソンの原理** (Thomson's principle)”という。

そのほかにも、ギリシアの数学者である**カラテオドリ** (Constantin Carathéodory) の表現や、ドイツの化学者である**オストヴァルト** (Friedrich Wilhelm Ostwald) の表現などがあるが、この本では、**クラウジウスの原理**と**トムソンの原理**の 2 つの表現を、熱力学 2 法則の代表例として扱うことにする。まとめておこう。

熱力学第 2 法則 (second law of thermodynamics)

熱を仕事に変換する場合には制限があり、100%変換することができないという法則で、次の 2 つの表現が代表的である。

1. ク라우ジウスの原理 (Clausius theorem)

他に何の変化を残すことなく、低温の物体から高温の物体へ熱を移すことはできない。

2. トムソンの原理 (Thomson's principle)

1 つの熱源から熱を受け取り、これを全て仕事に変えることができる熱機関は存在しない。

ところで、クラウジウスの原理も、トムソンの原理も、共に、熱力学第 2 法則であるから、**結局は同じことの言い換えに過ぎないはずである**。そこで、次の問題で本当にそうであることを確かめることにしよう。

問題

クラウジウスの原理からトムソンの原理を導け。

さすがに何のヒントも無しでこれを解くのは酷というものだろう。ヒントとしては、“トムソンの原理を否定したときに、それがクラウジウスの原理に反することになるから、トムソンの原理が正しい” というように導こう。

まずは、図 13-1 を見てほしい。

トムソンの原理を否定すると、1つの熱源（高熱源 T_H ）から熱量 Q を吸収し、それを全て仕事 W に変えることができる、左側の熱機関“ $\textcircled{C}$ ”が存在することになる。このときの W と Q の関係は次のようになる。

$$W=Q \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

これと、低熱源 T_L から熱量 Q_1 を吸収して、高熱源 T_H に熱量 Q_2 を放出するような、逆カルノー・サイクル“ $\textcircled{\bar{C}}$ ”（右側の熱機関）を図 13-1 のように組み合わせる場合を考えよう。逆カルノー・サイクルでの W , Q_1 , Q_2 の関係は、

$$Q_1+W=Q_2 \quad \cdots \cdots \textcircled{2}$$

である。

①式と②式から、

$$Q_1+Q=Q_2 \quad \therefore Q_2-Q=Q_1$$

となり、全体で1つの熱機関だと考えた場合、図 13-2 に示したように、低熱源 T_L から熱量 Q_1 を吸収して、高熱源 T_H に熱量 Q_1 ($=Q_2-Q$) を放出するような熱機関となる！ すなわち、トムソンの原理に反する熱機関の存在を認めると、他に何の変化を残すことなく、低温の物体から高温の物体へ熱を移すことができることになる。これは、クラウジウスの原理に反してしまう。

よって、トムソンの原理が正しいということ をクラウジウスの原理から導けたわけだ。

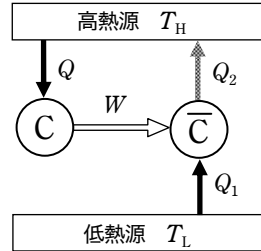


図 13-1

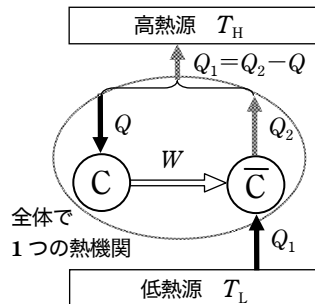


図 13-2

問題

トムソンの原理からクラウジウスの原理を導け。

逆もまた導ける。こちらも同様に，“クラウジウスの原理を否定したときに，それがトムソンの原理に反することになるから，クラウジウスの原理が正しい” というように導いてほしい。

右の図 13-3 を見ながら，導いてみよう。

クラウジウスの原理を否定すると，低熱源から高熱源に他に何の変化も残すことなく熱量を移すことが可能となる。つまり，図 13-3 の左側の矢印のような熱量 Q の移動が可能となる。

一方，右側には，高熱源 T_H から熱量 Q_1 を吸収して，低熱源 T_L に熱量 Q_2 を放出するような，カルノー・サイクル“(C)”を動かす。カルノー・サイクルでの W ， Q_1 ， Q_2 の関係は，

$$W = Q_1 - Q_2 \quad \cdots \cdots \textcircled{3}$$

である。

ここで，もし，左側の矢印であらわした低熱源 T_L から高熱源 T_H へ移動する熱量 Q の大きさが，右側のカルノー・サイクルの低熱源 T_L へ放出する熱量 Q_2 と等しかったとしたとき，全体で 1 つの熱機関と考えるとどのような熱機関になっているのかを考えてみよう。

全体で 1 つの熱機関だと考えた場合，図 13-4 のように右側のカルノー・サイクルで放出された熱量 Q_2 の大きさの熱量が，そのまま左側の矢印で示すように高熱源 T_H へ移動していることになる。これは，高熱源 T_H から $Q_1 - Q_2$ の熱量を熱機関が受け取り，低熱源 T_L にまったく熱量を放出することなく，仕事 W を外にしていることになる。この仕事の大きさ W は，③式からわか

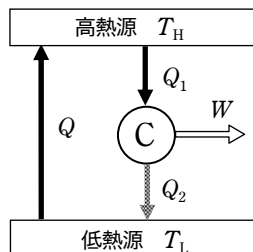


図 13-3

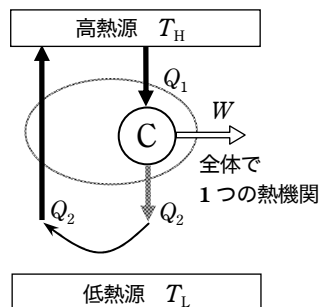


図 13-4

るように、高熱源 T_H から吸収する熱量の大きさと同じである。

つまり、図 13-4 の全体で 1 つと考えた熱機関は、**高熱源からのみ吸収した熱量をすべて仕事に変換していることになるわけだ！** これは、トムソンの原理に反している。

以上により、クラウジウスの原理が正しいということをトムソンの原理から導けたわけだ。

永久機関

人類が絶えず追い求めてきた熱機関を、ここでは紹介しておこう。

それは、熱エネルギーを 100% 仕事に変換できるような熱機関である。トムソンの原理によって、現在ではその存在がありえないと主張されている、**熱力学第 2 法則に反するような熱機関**だ。これを**第 2 種永久機関** (perpetual motion machine of the second kind) と呼ぶ。

ところが、人類はそれでも第 2 種永久機関の存在を模索し、思考実験を続けた。有名なものとしては、1871 年に、スコットランドの物理学者である**マクスウェル** (James Clerk Maxwell) の考えた“**マクスウェルの魔物** (Maxwell's demon)”が番人をする部屋に関する思考実験がある。他には、1962 年に、アメリカの理論物理学者**ファインマン** (Richard Phillips Feynman) が考えた“**ブラウン・ラチェット** (Brownian ratchet)”という装置がある。いずれも、はじめは熱力学第 2 法則に反するように感じられるのだが、そうではないことがきちんと証明されている。

さらに、“熱力学的”エネルギー保存則である、**熱力学第 1 法則に反するような熱機関**をも、人類は追い求め続けている。たしかに、外部からエネルギーを得ることなしに仕事が続けられるのなら、そんなすばらしい話は無い。このような熱機関を、**第 1 種永久機関** (perpetual motion machine of the first kind) と呼ぶ。また、熱機関に限らず、エネルギー保存則に反するような、外部からエネルギーを得ることなしに仕事を続けられるような装置も、**第 1 種永久機関**と呼ばれている。

こちらは、驚くべきことに、古代ギリシアの**アルキメデス** (Archimedes) がす

でに、その装置を考えている。**アルキメデスの無限螺旋**として有名だ。螺旋状の揚水装置で水を高所に持ち上げ、それを落とす。水の落ちる先には水車があり、その水車を動力として螺旋状の揚水装置を動かすというものだ。同じようなものには、1618年にイギリスの錬金術師である**フラッド**（Robert Fludd）の考えた**循環式挽き臼**（closed-cycle mill）がある。・・・無論、動かないが。

そのほかに有名なものとしては、種々の**自己回転輪**（overbalanced wheels）がある。1161年頃のインドの数学者**バスカラ**（Bhaskara）にはじまり、1235年のフランスの建築家**ヴィラルール・ド・オヌクール**（Villard de Honnecourt）によるもの（図13-5：時計回りに回転させると棒が倒れ、装置の右側に重心が移動するので回転が続けると考えたもの）、1638年にイギリスの**ウースター侯爵**（Edward Somerset, the Marquis of Worcester）が考案したものなどがある。いずれも、はじめは回転するようだが、しばらくすると回転は止まってしまう。

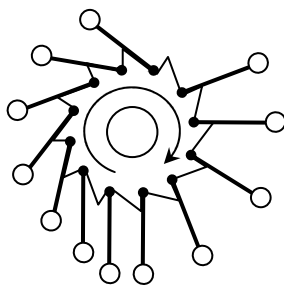


図13-5

また、4章で登場した**ボイル**（Robert Boyle）の考えた**毛細管現象**（capillary action）を利用した**永久機関**（図13-6）などにも有名だ。実際には液体の**表面張力**（surface tension）で毛細管の上まで水は上がってくるのだが噴き出すことは無いため、水車を回すことは残念ながらできない。

ちなみに、現在でも毎年数件の特許出願が提出されているそうである。もちろん、全部実現不可能なのだが・・・今回インターネットで調べてみてびっくりしたのは、**アメリカでは、10件程度の永久機関が特許を得ているという事実だ**。特許を与える専門家が、なぜにエネルギー保存則を知らない？・・・信じられないが本当の話だ。ちなみに、日本では永久機関という発明には“まだ”特許は出ていないようである。

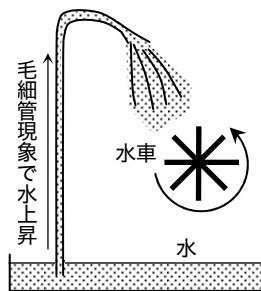


図13-6