

熱機関と熱サイクル

Heat engine and heat cycle

内山 洋司 (うちやま ようじ) 一般社団法人 日本エレクトロヒートセンター会長 (筑波大学名誉教授)

自動車、航空機、船などの輸送機関、火力発電や原子力発電など発電技術、社会の動力源の多くに熱機関が使われている。産業の発展や人々の生活は、熱機関なくして成り立たない。熱機関は熱を動力に変換する技術であり、その基本的な理論は熱力学第二法則になる。ここでは、熱機関の状態変化の基礎理論だけでなく各種熱サイクルについて熱効率の算出方法を学ぶ。

1. はじめに

熱力学の第一法則はエネルギーの量的な関係を表しており、第二法則はエネルギーの変化の過程を表している。第二法則は、熱エネルギーの変換、特に動力変換を理論的に解明する学問として発展してきた。熱機関は、作動物質を介して高温の熱源を利用して動力となる仕事に変換し、変換後の低熱源の熱を廃棄することで作動物質を元の状態に戻すサイクルを形成している。

熱機関には、石炭を熱源とする蒸気機関車、ガソリン、ディーゼル、重油などを使用した自動車や船などの輸送機関、また石炭、重油、天然ガスを燃料に発電する火力発電やウラン燃料の原子力発電、さらにバイオマス燃料や地熱、あるいは太陽熱など再生可能エネルギーを熱源とした発電技術がある。それらは、使用される作動流体がガスであるか蒸気であるかにより、ガスサイクルと蒸気サイクルに大きく分けられる。

熱機関の最高効率となる理想的な熱サイクルは、カルノーサイクルと呼ばれており、実際の熱機関はこの効率を超えることはできない。熱機関の発達は、変換過程の熱損失をできるだけ減らし、カルノーサイクルの効率に近づけていくかであった。取り分け、石炭、石油、天然ガスといった化石燃料を熱源にしている熱機関は、動力を得るためには大量の化石燃料を消費している。化石燃料の燃焼によって発生する二酸化炭素は、大気に放出されており、地球の気候を変動する地球温暖化の原因となっている。化石燃料の消費をできるだけ少なくするためにも高効率の熱機関の開発が望まれる。ここでは、熱機関の状態変化の基礎理論だけでなく各種熱サイクルについて熱効率の算出方法を学ぶ。

2. 熱機関の状態変化と理想サイクル

2.1 熱機関の状態変化

熱機関 (heat engine) とは熱エネルギーを動力に変換するエンジン (原動機) のことで、それにはガソリン機関、ディーゼル機関、ガスタービン機関、蒸気機関などがある。熱機関の内部では作動物質 (working substance) または作動流体 (working fluid) と呼ばれる空気、ガス、水蒸気などの媒体により、これが高温熱源の状態から Q_1 の熱を熱機関に与え低熱源に Q_2 の熱を捨てることで、その差 $Q_1 - Q_2$ の仕事をした後に再び元の状態に戻る変化をたどるサイクル (cycle) が形成されている。仕事に変換された熱と受け取った熱の比を熱効率 (thermal efficiency) η といい、次式で示され熱機関の性能を表す指標となる。

$$\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = 1 - Q_2 / Q_1$$

実際の熱機関の効率を求めるためには作動流体の状態変化を定量的に理解していく必要がある。作動流体を理想気体とすると、その状態方程式は

$$PV = mRT$$

となる。ここで、 m : 気体の質量、 R : ガス定数 = 定圧比熱 (C_p) - 定容比熱 (C_v)、である。

サイクルに現われる基本的な状態変化には、等容変化、等圧変化、等温変化、断熱変化がある。表 1 は、それぞれの状態変化に対して作動流体が状態 A から状態 B に変化したときの、温度、圧力、熱量の変化を示したものである。表に示した基本的な状態変化の式を使うことによって、さまざまなサイクルの効率が定式化できる。

2.2 理想サイクル

理想的な可逆変化だけから組み立てられたサイクルをカルノーサイクルという。カルノーサイクルは理想サイクルで、その効率は熱機関の最高効率であり、実際の熱機関はこれを超えることはできない。