

(はじめに)

流れるものには、川の水や風の流れるように、実質的に空間と時間を通して移動し変形していくものと、物質的な実体を伴わない熱の流れや磁力線の流れるように広い意味での流れの場合に存在するある物理的な量とがある。この章では実体を伴う流れとして流体、実体を伴わない流れとしての熱に焦点を絞り、それらの基本的性質を述べる。

#### 学習のポイント

- (1) エネルギーの流れ
- (2) 流れの基本的性質

### 1. 流れ現象とエネルギー

流れと言えば、日常我々がよく経験する水や空気の流れだけを想像しやすいが、上述のように目に見えないものも一つの流れとしてとらえることができる。流れるものの一般的性質には

- (1) 流跡がある。
- (2) 保存性 (連続性) がある。
- (3) 流れるものの速さを決める方程式がある。

の3つがある。

このような特性をもつ流れ現象は、工学的応用という立場からはエネルギーの流れとして考えるべきものである。このエネルギーを利用して実際には所要の仕事を行なうことができるのである。このことは、“エネルギーとは何らかの仕事を行なう能力” というエネルギーの定義からも明らかであろう。エネルギーの利用のためには、その実体である流体の流れや熱の流れに関する基本

的性質を理解することが大切である。

### 2. 流体の基本的性質

自然界に存在する物体は、普通は固体、液体、気体の3つに分類される。このうち液体と気体を総称して流体と定義する。従って流体という限りにおいては、水とか空気とかいう特定の物質を意識するものではない。流体に対する最も基本的な性質は、周知のように、**外部から加えられた力に対して自由に変形すること**である。すなわち「水は方円の器に随う」わけである。

次に重要な性質は、水飴、油などに代表される流体のねばさ、すなわち粘性である。実在の流体は程度の差こそあれ、すべて粘性という性質を有している。これに対し、粘性を有しない非粘性流体を普通、**完全流体**または**理想流体**という。ここで完全流体という概念は、問題の取り扱いを簡単にするために導入された抽象的な概念であるということは特に留意すべきことである。

さらに重要な性質として、流体の**圧縮性**がある。液体などに代表されるように、その体積変化が小さいため密度が一定であると理想化される流体を**非圧縮性流体**、これに対し気体などのように密度が変化する流体を**圧縮性流体**という。実在の流体はもちろん全て圧縮性を有するが、非圧縮性流体と考え得る基準は密度変化がないか、もしくは非常に小さいということが本質的であって、対象とする流体が、液体であるか気体であるかという事にはよらない。

### 3. 熱の基本的性質

熱とは微視的に見れば、物質を構成する原子や分子の運動エネルギーの流れに基づく現象論的結果である。物質の構成粒子間で、運動エネルギーの不均一があれば、これを平均化しようとする方向に粒子相互の衝突が起こる。この運動エネルギーの流れを我々は巨視的に熱の流れと理解している。日常我々が経験する、この物体は暖かいとか、冷たいとかの感覚的認知は以上の微視的な力

学機構に基づいている。熱の本性を明らかにするための基本法則には次の2つがある。

### (1) 熱力学の第一法則

力学におけるエネルギーの保存則では、「物体のもつ位置エネルギーと運動エネルギーの和が一定に保たれ、一定量の位置エネルギーが失われた場合には、それに等しい運動エネルギーの増加がある」ことが述べられている。しかし現実の物体の運動においては、失われた位置エネルギーに対し、増加した運動エネルギーは常に小さくなり、エネルギーの保存則は成立しない。ここでエネルギーの一部が摩擦によって熱に変わったものとして、摩擦による発熱量をも考慮に入れるならば、実在の現象についてもエネルギー保存則が成立することになる。このようにエネルギーと熱の関係、すなわち熱と仕事の間を明白に記述した法則が熱力学の第一法則である。これは通常次の言葉で表現される。

「熱と仕事とは共にエネルギーの一種であって、熱を仕事に変えることも、仕事を熱に変えることも可能である。」

このように熱力学の第一法則は熱と仕事の可換性についてのエネルギー保存則である。仕事もエネルギーの一つの形である以上、エネルギーを消費することなしに、仕事を継続して取り出す機械を作ることは不可能である。エネルギーの消費なしに動力を発生する機関を**第一種の永久機関**という。熱力学第一法則はこの機関の不可能性を示したものである。

### (2) 熱力学の第二法則

熱力学の第一法則は上述のように、熱と仕事の等価性を示しているが、しかし、熱が仕事に変わる過程、すなわち熱を仕事に変化させるためには、それをどのように移動させればいいのかということについては何も述べていない。これを規定する法則が熱力学の第二法則である。普通次のように表現される。

「熱はそれ自身では、低温より高温へ移動することができない。」

このように熱力学の第二法則は自然界に起る熱移動現象の方向性を示す法則である。

第二法則はまた次のようにも表現される。

「自然界に何も変化を残すことなしに、ある熱源の熱を継続して仕事に変える熱機関を製作することは不可能である。」

これは自然界に存在する無限の熱量を利用して、第一法則に反することなく運転が可能な機関、すなわち**第二種の永久機関**が存在しえないことを示している。

(はじめに)

我々技術者は通常、流体の流れ、すなわちエネルギーの流れを利用して所要の仕事を行なうことを意図する。このためには対象としている流体は如何なる流れ方をしているのか、またその流体の流れによって個々のエネルギー量がどのように変化するかを知らなければならない。本章においては、このような観点から流体の流れを理解するために必要な基礎的事項を述べる。

### 学習のポイント

- (1) 静水の圧力
- (2) 流れの形態とその特徴
- (3) 連続の式とベルヌーイの式
- (4) 物体が受ける力
- (5) 各種流れの損失

### 1. 流体の流れの基礎的事項

#### (1) 密度と比重

流体の単位体積あたりの質量を密度といい、記号  $\rho$  (ロー) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] を用いて次のように表される。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

ここで、 $m$  は流体の質量 [ $\text{kg}$ ]、 $V$  は体積 [ $\text{m}^3$ ] である。

流体の密度  $\rho$  と、標準気圧のときの  $4^\circ\text{C}$  の水の密度  $\rho_w$  との比を比重という。

表 2-1 標準気圧 (101.3kPa) における水と空気の密度  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

温度 [ $^\circ\text{C}$ ]	水	空気
0	999.8	1.293
5	1000.0	1.270
10	999.7	1.247
15	999.1	1.226
20	998.2	1.205
25	997.1	1.184
30	995.7	1.165
40	992.2	1.128
50	988.0	1.093
60	983.2	1.060
70	977.8	1.029
80	971.8	1.000
90	965.3	0.972
100	958.4	0.946

注) 空気は乾燥空気

#### (2) 比体積

流体の単位質量あたりの体積を比体積といい、記号  $v$  を用いて

$$v = \frac{V}{m} \quad (2-2)$$

のように表される。単位は [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] である。

表 2-2 標準気圧における比重 ( $4^\circ\text{C}$  の水を基準とした値)

液 体	温度 $^\circ\text{C}$	比 重	液 体	温度 $^\circ\text{C}$	比 重
アセトン	15	0.790	ブタン (ノルマル)	-0.5	0.601
ガソリン	15	0.66~0.75	四塩化炭素	10	1.614
原 油	15	0.7~1.0	"	15	1.604
コールタール	15	1.2	"	20	1.594
ひまし油	15	0.97	四クロロエタン	10	1.620
オリーブ油	15	0.92	"	15	1.612
綿実油	15	0.93	"	20	1.604
エチルアルコール	100%	0.794	海 水	15	1.01~1.05
	90%	0.822	グリセリン	15	1.264
	80%	0.848	"	20	1.261
メチルアルコール	100%	0.796	ベンゾール	15	0.884
	90%	0.825	"	20	0.879
	80%	0.851	水 銀	0	13.595
純 硫 酸	20	1.831	"	10	13.571
純 硝 酸	20	1.513	"	15	13.559
純 酢 酸	20	1.049	"	20	13.546

表 2-3 水の比体積  $v$

圧力 [MPa]	[ $\times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ ]						
	5	10	20	50	100	200	500
0	0.9977	0.9953	0.9904	0.9767	0.9565	0.9241	0.8627
温 20	0.9995	0.9972	0.9929	0.9804	0.9616	0.9321	0.8707
度 50	1.0099	1.0077	1.0034	0.9914	0.9733	0.9447	0.8829
100	1.0412	1.0386	1.0337	1.0200	0.9999	0.9681	0.9038
[ $^\circ\text{C}$ ] 200	1.1530	1.1480	1.1387	1.1144	1.0821	1.0368	0.9511
300		1.3979	1.3606	1.2874	1.2155	1.134	1.007

#### (3) 粘性係数

流体が流れるとき、互いの分子の引力によって流体相互、または流体と接触している壁との間に、流動を妨げるような抵抗が働く。この流体のねばりの度合を粘性という。粘性の大きい流体ほど流れにくく、たとえば、重油と水を同一条件で流した場合には、粘性の大きい重油の方が流れにくい。

今、図 2-1 に示すように、規則的な層状をなして流れている流体中に面積