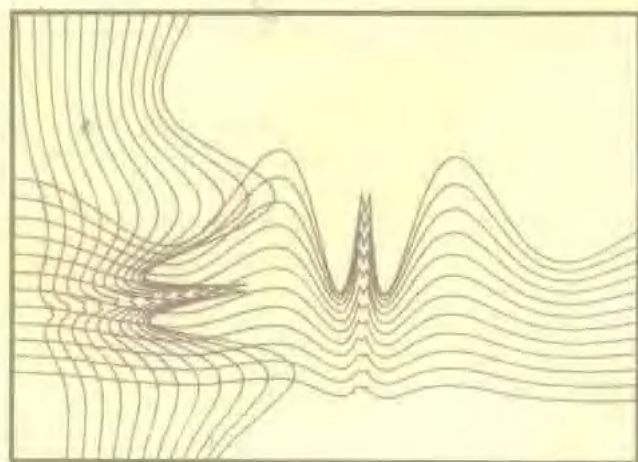


岩波講座 基礎工学 16

流体力学 I

高野 暁 著



岩波書店

1.21
41
1-1

岩波講座 基礎工学 16

流 体 力 学

I

高 野 暲

北谷-1.8

岩 波 書 店

岩波講座 基礎工学 16 流体力学 1 (全19巻/第1刷配本)

1967年11月25日 第1刷発行

東京都千代田区神田 一ツ橋2-3 株式会社岩波書店/精興社印刷・松尾社製本

はじめに

液体と気体とは容易に形を変え得るという性質をもつために、その運動のしかたもひじょうによく似ている。この液体と気体を一括して**流体 (fluid)**といい、その運動を調べるのが**流体力学 (hydrodynamics, fluid dynamics, あるいは fluid mechanics)**である。すなわち物体のまわりとか管の内部とかを“流れる”流体の運動(流れの模様や性質)を解析し、また物体に働く流体の力などのような流れと固体表面との間の相互干渉などについて究明する科学の分野である。

最近の科学技術の進歩に伴い、この流体力学の内容は著しく細分化され専門化され、その応用分野も極めて広範囲にわたり、それぞれの分野において特殊な問題に即応して特殊な考え方や解を求める方法、それらに関連して種々の実験技術が開発されてきた。流体力学はそもそも水や空気に直接に関係のある船舶工学や航空工学の必要欠くべからざる分野として発達してきたものであり、特に空気力学は数学的にも体系化され一つの学問分野を築くに至ったのであるが、その反面難解でなじめないという傾向がなきにしもあらずで、とかく敬遠されがちである。しかし最近では高速化された車両や、高層建築物あるいはつり橋などにたいする風圧、大気の運動や太陽風、星雲の運動あるいは化学反応を伴う流れ等ひじょうに広い分野にわたって流体力学的な考察が必要とされてきている。

このように専門化され多様性に富む流体力学について詳細に述べることは不可能であり、またそれは基礎工学としてはあまりに専門的でかつ難解であるので、本講義においては流体力学の多くの分野にわたる基本的原理、基礎的な考え方、さらにそれらから導かれる基礎方程式について(熱力学あるいは固体力学等に関連して)述べる。記述はできる限り複雑なあるいは高程度の数学的表現を避けて、流体力学における種々の概念や方程式の物理的意味の理解に重点をおき、流体の運動のしかた、すなわち流れの模様や性質を概念的に把握できるように、日常あるいは工学上観測される事例をあげて流体力学的諸現象を説

明する。

さて流体とその中におかれた物体との間に相対運動があると、たとえば油の中で振子を振動させると、振子と油との間に摩擦力が働いてその振動が減衰していく。摩擦によって運動を妨げようとする力が流体と物体との間に働くのである。この力を起こす流体の性質を粘性(viscosity)という。粘性の強さは物質によって異なり、空気や水の粘性は小さく、油や水あめの粘性は大きい。さらに液体ではその体積の変化は極めて小さいが、気体の場合には、たとえば空気がピストンによって圧縮されるように、容易にかつ顕著にその体積を変えることができる。このような体積変化をし、したがって密度変化をする流体の性質を圧縮性(compressibility)という。粘性と圧縮性とは流体のもつ基本的な特性で、物体のまわりの流体の運動を理解するに知っておかねばならない性質である。第1章において、流体のもつこの二つの特性について初等的な物理的考察から説明する。

第2章では流体力学における連続の式、ベルヌーイの式あるいは運動量の法則等の初歩的な原理や方程式を与える。これらは流体の粘性や圧縮性の特性とともに、流体の運動のしかたを理解するに必要な事項で、また実際に種々の問題において用いられるものである。さらに本章では流体の特性と初歩的な原理とから、管内の流れとか物体のまわりの流れなど具体的な簡単な例をあげて、流体がどのような流れ方をしているか、あるいは物体にどのような力を与えるか等、流体力学上の現象や、それらの取扱い方について、やや詳細にすぎるかも知れないが、できるかぎり平易にかつ詳しく説明する。すなわち第1章および第2章の内容は、第3章以下のやや専門的な流体力学の基礎方程式とその解の初等的概説であり、したがってなじみのうすい数学的解析法を知らなくとも理解できる常識ということができる。

第3章と第4章では、流体力学の基礎方程式を運動の法則等の力学的諸原理から導く。これらは第2章で与えられた方程式の厳密化されたもので、またその導き方も一般的である。逆にいえばこれらの基礎方程式のもっとも簡単化されたものが第2章で与えられた原理や方程式である。第3章では本講座『熱力学』の内容とある程度重複するところもあるが、そこで与えられる熱力学諸法則から出発して、流体力学として必要な熱力学基礎方程式を導き、特にもっと

もよく用いられる**理想気体**(perfect gas)について説明する。第4章では質量保存の法則、ニュートンの運動の法則、エネルギー保存の法則から流体運動の基礎方程式を導く。

第5章では流体力学上もっともよく使われるベルヌーイの式を前章の基礎方程式の積分として導き、種々の場合に対する適用について説明する(第2章で与えたベルヌーイの式は第5章の厳密なベルヌーイの式の最も簡単な場合のものであることが示される)。

流体には前述のように粘性と圧縮性とがあり、この両者を取り入れて解を求めることはひじょうに困難である。そこで従来種々の仮定を取り入れて、基礎方程式を近似的に取り扱うことが試みられ、その解はそれぞれの目的に応じて、実用上無視できる誤差の範囲内で実験結果と一致した結果を与え、またその解から流体の運動が理解されてきた。第6章から第8章では、それぞれ粘性も圧縮性も無視した流体、圧縮性を無視した粘性のある流体、粘性を無視した圧縮性のある流体について、第2章に示したような簡単な流れを例にあげて、基礎方程式の解を紹介する。

第1章および第2章で説明するように、粘性は流体内の隣りあった二つの小部分にすべりあうような速度差があるために生ずる性質であるので、物体のまわりの流れにおいては、流体は物体表面に付着しており、そのため物体表面近くで上記の速度差が比較的著しい。したがってこの物体表面近くで流体の粘性の効果が顕著に現われる。このような物体表面に沿った粘性の影響の著しい層を**境界層**(boundary layer)という。境界層の厚さは物体の長さにくらべてひじょうに小さいが、物体表面に沿って下流にいくにしたがって厚くなる。細長い管内の流れでは、管壁からの境界層が十分に厚くなって、遂には管内全部が境界層のような粘性の効果を考慮しなければならない流れになる。このように細い管内の流れとか、物体のまわりの境界層内においては、流体の粘性を無視することができない。このように粘性の効果を考慮しなければならないような流体を**粘性流体**(viscous fluid)といい、その流れを**粘性流**(viscous flow)という。第7章ではこの粘性流の簡単な解の例を示す。このような粘性流の解から物体の表面摩擦や物体表面への熱伝導度などが算出される。

物体から十分に離れた領域、すなわち境界層の外では流体のもつ粘性の効果

を無視できる。このように粘性を省略して考えることのできる流体を**非粘性流体**(inviscid fluid)という。ところで管内の流れは別として、無限に広がった流体中を物体が運動する場合には、流体の粘性の影響は物体表面近くの境界層に限られ、その厚さも薄いので、境界層があっても、そのために物体のまわりの全体の流れの様子はほとんど変わらないと見ることができる。したがって物体のまわりの流れはまず境界層がないとして、すなわち流体を**非粘性流体**と仮定して、その解が求められる。この解をもとにして境界層の解が得られるのである。第6章と第8章とではこの**非粘性流体**についての解を示すのであるが、特に第6章ではさらに流体の圧縮性も無視した流体を取り扱う。液体や流速のあまり大きくない気体では、その圧縮性を無視することができ、密度は一定に保たれると仮定できる。このような流体を縮まない流体すなわち**非圧縮性流体**(incompressible fluid)といい、第6章で取り扱われる**非圧縮性非粘性流体**はもっとも簡単化された流体のモデルであり、このようにして得られた解から日常観察される物体のまわりなどの流れの様子の概略が説明される。

しかし液体でも音の伝播を議論するような場合や、大きな圧力差のある場合など、また高速の気体の流れでは、流体の圧縮性を無視することはできない。このような流体を縮む流体すなわち**圧縮性流体**(compressible fluid)という。第8章ではこの**圧縮性非粘性流体**の流れを取り扱う。ここで気体は理想気体として考えられる。極めて高温の気体や化学反応を伴う流体等の特別の場合を除いては、理想気体の仮定は広く採用されており、その仮定に基づく解は実験結果とよく一致した結果を与える。圧縮性流体の場合の解法はやや専門的になり、さらに圧縮性を考慮に入れた境界層理論も専門的かつ数学的にむずかしいので、それらはそれぞれの専門書にゆずることにして、第8章では第2章におけると同程度に、物体のまわりの圧縮性流体の流れの様子が、圧縮性のない場合に比べてどう異なるかを示す。第1章で説明するように、流体における音波の伝播速度すなわち音速が流体の圧縮性を考慮するときの重要な因子で、流れの速度がこの音速に比べて大きいか否かで、その流れの様子が全く違ってくる。流れの速度とその流体の音速との比を**マッハ数**(Mach number)といい、音速に比べて流速が小さいような流れ、すなわちマッハ数が1より小さい流れを**亜音速流**(subsonic flow)、大きいものを**超音速流**(supersonic flow)という。第8章

ではこの二つの流れの型の相違を説明し、さらに超音速流のみにて存在する衝撃波(shock wave)の発生、それを通しての流れの変化等について概説する。超音速流れの問題のさらに進展した分野に極超音速流(hypersonic flow)、さらには希薄気体(rarefied gas)の流れや、また人工衛星の再突入に際して直面する空気力学的加熱の問題等、最近の宇宙開発に関連した空気力学上の多くの問題があるが、それらはそれぞれの専門書や文献、報告書にゆずることにして、ここではそれらの問題の発生の由来や取扱い方について簡単に説明しておく。

本講義では普通の流体力学あるいは空気力学で取り扱われる問題を主として取り上げるが、最近興味を持たれている非ニュートン流体、電磁流体、プラズマ、あるいは化学反応を伴う流れ等の問題は、それぞれ流体力学の特殊な応用面であり、本講座の基礎的概念の応用としてそれぞれの専門分野に進むことができるであろう。このような特殊な問題については、それぞれの専門書にゆずることとし、ここでは必要に応じてそれらの問題の取扱いについて簡単に説明しておくにとどめる。特に化学反応を伴う流れにおいては、流体のもつ粘性の影響を無視することができない。このような分野に適用される粘性流体の流れについては、本講座『移動速度論』を参照されたい。

本講義の内容は著者が東京大学工学部航空学科において、大体第4学期から第6学期にわたる空気力学の講義のうちから、比較的一般的な事項を選択して草稿をまとめ、それに対して各方面から寄せられた注意や意見を採り入れて最終的に執筆したものである。この間に東京大学谷一郎教授はじめ、本講座の編集委員、伊沢計介、伊藤四郎、進藤益男、末武国弘、高島洋一、森康夫(以上東京工業大学)、桜井健郎、林千博、水科篤郎、森美郎(以上京都大学)、大竹伝雄(大阪大学)、高橋利衛、田島清瀬(以上早稲田大学)等の諸先生方から寄せられた貴重な御意見にたいし厚く感謝の意を表する次第である。

また第2章中に掲載の写真(図2.5, 2.10, 2.11)を提供された東京理化精器株式会社の好意に対して謝意を表したい。

本講義中、章あるいは節に☆印のあるものは、流体力学をやや専門的に勉強したい読者にとって必要な部分で、流体の運動の概略あるいは基礎的事項を知りたいものには必ずしも読まなくともよいところである。

目 次

はじめに

第1章 流体の特性

1.1 粘性と熱伝導性	1
1.2 非ニュートン流体 ☆	10
1.3 圧縮性と音速 ☆	13

第2章 物体のまわりの流れ

2.1 流れと流線	21
2.2 ベルヌーイの式	25
2.3 運動量の法則	37
2.4 物体のまわりの粘性流	45
2.5 境界層	54
2.6 層流と乱流	63
2.7 境界層の剥離と物体に働く抵抗	72
演習問題	80

第3章 流体の熱力学

3.1 熱力学基礎方程式	83
3.2 理想気体とその状態方程式	88
3.3 理想気体の熱力学的方程式	93
3.4 非圧縮性流体	99
演習問題	100

第4章 流体力学の基礎方程式

4.1 流体力学の基礎方程式	101
4.2 連続方程式	102
4.3 運動方程式	104
4.4 エネルギー方程式	115

演習問題	124
------	-----

流体力学 II 目次

第5章 渦，循環と運動方程式の積分

第6章 非圧縮性非粘性流

第7章 粘性流体の流れ

第8章 圧縮性流体の流れ

表紙カット製作:

渡辺茂・槌屋治紀・藤野孝爾・幸村真佐男
(IBM データセンター設置の IBM 7090 およびプ
ロッター使用)

第 1 章

流 体 の 特 性

流体は粘性(熱伝導性を含む)と圧縮性との二つの基本的な性質をもっており、流れの模様を理解するには、この二つの性質がどのように流体内で作用しているかを考えなければならない。本章ではまずこの粘性と圧縮性について簡単な事例をあげて説明する。特に粘性現象は詳細には分子運動論に基づくものであるが、ここでは流体の小部分に働く剪断応力とそれによる剪断歪、また熱伝導量と温度勾配とがそれぞれ比例関係にあるという仮定(ニュートン流体)によって粘性現象を説明し、さらに粘性係数と熱伝導係数とを定義する。またこのような比例関係が成り立たない流体(非ニュートン流体)についても簡単な紹介をする。流体は圧力の変化にしたがってその密度を変えするという性質、すなわち圧縮性があるが、この圧縮性の効果はマッハ数すなわち流速とその流体における音速との比によって示される。ここでは流体内の圧力にしたがって密度の微小変動の伝播する速度が音速であることを示し、さらに圧縮性の効果の程度がマッハ数によって表わすことができることを説明する。

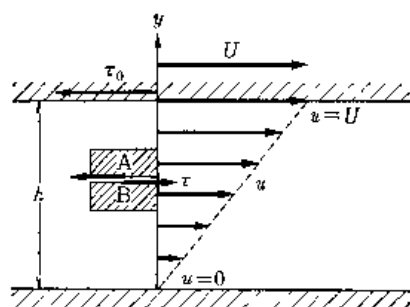
1.1 粘性と熱伝導性

まずもっとも簡単な場合について粘性の性質を説明しよう。川や溝の中の水の流れで観察されるように、岸に近いところでは流速は小さく、遠いところでは流速は大きい。特に岸の面では水はそれに付着して流れない。そこで図 1.1(a)のように 2 枚の平行な板の間に流体があって、下の板は固定し、上の板を一樣な速度 U で平行に動かす場合を考えよう。板に接している流体は板に付着しているから、流体の速度は上の板の面($y=h$)で U 、下の板の面($y=0$)で 0、その間では図のように直線的になっている(2.4 節および 7.2 節参照)。ここで上の板を動かすのにはそれだけの力を加えなければならない。いいかえると

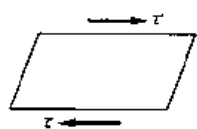
流体から板に板の運動を妨げようとする力すなわち抵抗が働いている。この力は動かす速度 U に比例し、距離 h に反比例する。したがって板の単位面積に働く抵抗を τ_0 とすると、 τ_0 は

$$\tau_0 = \mu \frac{U}{h} \quad (1.1)$$

で与えられる。ここで μ は比例定数で流体の粘性係数あるいは粘性率 (coefficient of viscosity) と呼ばれるものである。



(a) 速度分布



(b) 流体の小部分に働く剪断応力

図1.1 速度の異なる平行平板間の流れ(クエット流)

このような板に働く抵抗が現われる理由を知るには、もっと細かに現象を調べなければならない。板の間の流れは図 1.1(a) に示すように層をなしていると考えられ、いま極めて近く隣りあった層に流体の二つの小部分 A, B をとてみると、A の部分は B の部分よりも速度が大きい。これは二つの板がひじょうに近づいた場合と考えてもよい。したがって二つの部分 A, B はその境界面ですべり合っていることになり、粗い二つの固体面がすべり合っている場合と同じように、境界面に平行にすべり合うことを妨げるように力が働く。流体では境界面の単位面積あたりのこの力の値を剪断応力 (shearing stress) と呼ぶ。この応力を板の面で考えたときに板の面における単位面積あたりの抵抗となり、(1.1) で与えられるのである。このように流体内の剪断応力は流体の隣りあ

た二つの小部分に速度差があるために生ずるのである。この二つの部分が限りなく小さいとした極限を考えると、剪断応力 τ は(1.1)の代りに、 y を板の面に垂直方向の座標とすると、

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.2)$$

で与えられる。ここで u は図1.1(a)に示すように平板間の任意の場所における速度で、この場合は y の関数で

$$u = \frac{U}{h}y$$

で与えられる。(1.2)は、剪断応力すなわち流体内の隣りあった小部分A, Bの境界面に働く単位面積あたりの摩擦力が、その場所における速度勾配に比例することを意味し、その比例定数を粘性係数というのである。

以上では、流体内の隣りあった二つの小部分に速度の差があってすべりあっているような場合に、そのすべりを妨げるように一種の摩擦力が働くことを前提としてきたが、このことは初等的な分子運動論から説明される。普通の流体力学では流体を連続媒質と考えているが、もっと細かにすなわち微視的にみると、物体はすべて原子や分子から成り立っていて、その意味では連続媒質とはいえず分子の集りである。例えば 0°C 、1気圧の空気 1cm^3 の中には大体 10^{20} 個程度の分子がある。そして各分子はそれぞれすべての方向に勝手な速度で飛びまわり、互いに衝突しあっている。一つの分子の他の分子と衝突して次の衝突をするまでの距離を自由行程といい、この距離は個々の分子によって異なるが、含まれている全分子についてのその平均を平均自由行程(mean free path)という。この値は極めて小さく、たとえば 0°C 、1気圧の空気では大体、 10^{-5}cm 程度である。流体はこのような微視的構造をもっているが、実際に観測されるのは流体を構成している分子の統計的な平均量である。図1.1(a)のA, Bという極めて小さな流体の部分をとっても、ほとんど無数と考えてよいほどの分子を含んでおり、またAやBの大きさが平均自由行程にくらべて十分に大きいときには、その中で各分子はひじょうに多くの衝突を繰り返している。流体力学的にある点の速度というときには、その点のまわりに考えた流体の小部分内の分子の速度の統計的な平均値をいうのである。そして実際に観測される

のはこの平均速度であって、個々の分子の運動を問題にしない。したがってきわめて希薄な気体の場合(8.5節参照)をのぞいては、流体力学では観測され得る巨視的な平均量のみを取り扱い、その意味で流体を連続媒質と考えるのである。

さて図1.1(a)においてA, Bという二つの小部分をとり、Aの方がBの方より速度が大きいと考えてきたが、これを上述の分子運動論の立場からみると、A内に含まれている分子の平均速度はB内の分子の平均速度よりも大きく、また平均的に分子はすべて板に平行に運動しているということである。しかし個々の分子はすべての方向に運動しており、A, Bの大きさは平均自由行程にくらべて十分に大きい、A内の分子とB内の分子は衝突しあっている。ところでたとえば二つの球の衝突で、一方が静止していてそれに他の球をある速度でぶつけると、静止していた球は運動を始め、逆にぶつけた球の速度は初めにもっていた速度よりも小さくなる。いいかえると静止していた球はそれに衝突した球から運動量を与えられ、衝突した球はそれだけ運動量を失う。流体分子の衝突に際してもこのような運動量の授受が行なわれる。すなわち平均的に大きな速度をもったA内の分子は、平均的に小さな速度をもったB内の分子と衝突して、運動量をB内の分子に与え、逆にB内の分子はそれだけ運動量を与えられる。その結果、小部分Aの分子の平均速度は小さくなり、Bの平均速度は大きくなる。このように分子の衝突による運動量のやりとりすなわち運動量が輸送される結果として、二つの隣りあった小部分の間にその速度差をなくそうとする力が働いていることになり、この力が流体の粘性力で、このような力をおこす流体の性質を粘性というのである。

ところで図1.1(a)の流体内の小部分Aのみについて考えると、Aの下の方では上述のようにBから速度を減らそうとする粘性力が働き、上の面ではAより速度の大きい上の部分から速度を増そうとする粘性力が働く。その結果、図1.1(b)のように流体の小部分はその上下の面に剪断応力 τ が互いに逆の方向に働き、本来ならば長方形であったものが平行四辺形に変形する。これが剪断歪(shearing strain)で、4.3節で詳細に示すが、(1.2)の du/dy は一種の剪断歪である。(1.2)で表わされているように、流体の小部分に働く剪断応力とそれによって現われる剪断歪とは比例している。この比例関係はニュートンに

よって設定された関係で、固体力学におけるフックの法則に相当し、普通の流体の粘性に関する基本的な仮定の一つで、多くの場合この仮定は正しいことが実験的に証明されている。このような比例関係が成立するような流体をニュートン流体(Newtonian fluid)という。

流体の中を物体が運動したり、流れの中に物体がおかれた場合、物体のまわりの流れに速度勾配が生じ、したがって粘性による摩擦力が物体表面に作用し、そのために物体にいわゆる抵抗が働くのである。またこのような摩擦力が物体表面に生ずるのは、物体の存在によって流体の小部分に上に述べたような剪断歪を生じさせるために、流体のもっている運動量が消費されたためである(2.3節参照)。

次に流体の熱伝導性も粘性と全く同じようにして説明される。図1.2のように2枚の平板の間に静止した流体があって、上の板が高い温度 T_2 に、下の板が低い温度 T_1 に保たれているとする。ここで平板間の直接の輻射や、流体の対流を無視しても、温度の高い上の板から温度の低い下の板に向かって熱が流体を通して流れる。この熱の移動量は板の温度差に比例し、板の距離 h に逆比例する。したがって板の単位面積あたりに単位時間に流れる熱量すなわち熱伝導量を $\dot{q}$ とすると、 $\dot{q}$ は

$$\dot{q} = \kappa \frac{T_2 - T_1}{h} \quad (1.3)$$

で与えられる。ここで κ は比例定数で流体の熱伝導係数(coefficient of heat conductivity)あるいは熱伝導率(thermal conductivity)と呼ばれる。粘性の場合と同様に、温度の異なる隣りあった流体内の小部分 A, B をとると、温度の高い方から低い方へとその境界面を通して熱が流れる。そして A, B が限りなく小さいとした極限をとると、粘性の場合の(1.2)に相当して、単位面積あたりにそれに垂直に単位時間に流れる熱量 $\dot{q}$ は、(1.3)の代りに

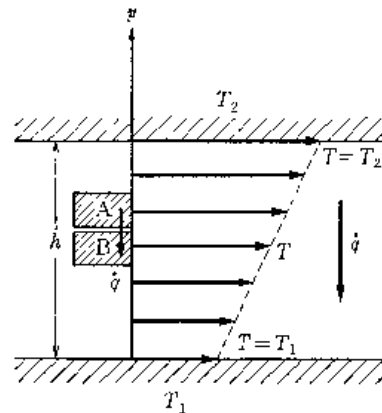


図1.2 温度の異なる平行平板間の温度分布と流れる熱

$$\dot{q} = -\kappa \frac{dT}{dy} \quad (1.4)$$

と書かれる。ここで熱伝導の方向は温度勾配 dT/dy と反対方向であることに注意しなければならない。

流体内の熱伝導の現象もやはり分子運動論の立場から説明される。前述のようにどんな物体であっても、それは多くの分子から成り立っており、それぞれの分子はすべての方向に種々の速度で飛びまわっている。したがって個々の分子はそれぞれの運動エネルギーを持っていて、物体の温度はこの運動エネルギーの平均値としてエネルギー等分配則に従って定義される(3.2節参照)。物体の温度が高いということは、分子の運動エネルギーの平均値が大きいことで、それだけ分子運動が活発であることを意味する。ここで温度に関係のある分子の運動エネルギーは分子の集りである物体全体の運動エネルギーとは無関係であることに注意しなければならない。たとえば固体が他との摩擦なしに運動している場合、他から力を加えれば加速されてその運動エネルギーは増加する。しかし物体の温度は変わらない、すなわち分子の平均運動エネルギーは変わらない。摩擦によって熱が発生し、その熱が固体内に伝わるような場合を除けば、固体全体の運動エネルギーと固体内の分子運動のエネルギーとは無関係である。しかし固体の外から観測すれば、固体の分子は固体全体としての速度とそれに相対的な温度に関係のある分子運動の速度との合成速度をもっていることになる。そして後者だけが物体の温度に関係するので、そのような分子の運動を熱運動(thermal motion)といい、分子運動論における統計的取扱いの対象となるのである(3.2節参照)。

流体においても流れているといわないとにかかわらず、流体の温度は流体を構成している原子や分子の熱運動のエネルギーに関連して定義される。たとえば図1.2においてAの部分の温度がBの部分の温度より高いというのは、A内の分子の運動が活発で平均的に運動エネルギーが大きいことを意味し、そしてA内の分子とB内の分子とが衝突することによって、運動量のやりとりが行なわれたと同様に運動エネルギーの交換がなされる。すなわちA内の分子はB内の分子の運動を活発にし(熱運動の速度を大きくする)、逆にB内の分子はA内の分子の運動を活発でなくする。その結果AとBとの温度の差は減少

していく。この場合の分子の熱運動のエネルギーの移動量が熱の移動する量である。図1.2のように上下の板の温度がそれぞれ一定に保たれている場合には、局所的にはAとBとの温度差あるいはAとBとの境界面における温度勾配があり、AからBへ、したがって温度の高い上の板から下の板に向かって熱が伝わっていく。(1.3)はこの場合の熱の移動量を与え、また(1.4)は流体内の一つの面でそれに垂直な方向に温度勾配がある場合に生ずる熱の移動量を与える。一般に流体内に直六面体の小部分をとれば、その各面を通して上述のような熱伝導があり、この小部分の中へあるいは中から熱の移動があるのであるが、この場合の熱伝導量は4.4節において示す。

以上のように流体の中の二つの隣り合った小部分に速度差があつてすべり合っている場合や、また温度差がある場合、その両部分の中に含まれている原子や分子の衝突によって両部分の間に運動量や運動エネルギーのやりとりが行なわれて、この両部分の境界面に剪断応力すなわち粘性力が生じたり、境界面を通して熱伝導がおきたりする。このように流体のもつ粘性や熱伝導性は分子や原子による運動量や運動エネルギーの輸送によって現われるので、粘性や熱伝導を一括して**輸送現象**(transport phenomena)あるいは**拡散現象**(diffusion)という。粘性現象は運動量拡散であり、熱伝導はエネルギー拡散である。また二つの質量の異なる成分から成っているような混合流体である場合、その成分の濃度が一樣でないと、それを一樣にするような分子の移動がおこる。このような現象は前述の温度が一樣でないときに生ずる熱伝導現象に類似しており、これを**質量の拡散**(mass diffusion)あるいは単に**拡散**といい、混合気体の場合に特に考えなければならない現象である。この質量の拡散は完全に混合しうるいくつかの物質から成っている流体においてのみおきる。たとえば水と油というような互いに混合しないような流体においては質量の拡散はおきないが、この場合でも油の微粒子が水に完全に混合しているようなときや、また水の微粒子が空気に混合している場合などではこの拡散現象はおきる。

上に述べたように、熱伝導や粘性などの輸送現象(広い意味で粘性現象ともいう)は、流体が運動しているとき、隣りあった二つの小部分の間にすべりあうような速度差があつたり、また温度差がある場合に現われるので、このような速度差や温度差がひじょうに小さいような流体運動では、流体の粘性を無視