

小島 英夫 (静岡大学) 訳

Japanese translation rights arranged with VAAP through  
Japan Soviet Copyright Center, Tokyo.

## 温度・熱・温度計 A. キコイン (物理学—数理科学博士) (1990, No. 8, pp. 10~19)

温度は、人々が物理学を学び始める前だけでなく、読み書きができるようになる前にさえ知っている、数少ない物理量の一つである。すでに幼児期の初期の段階から、熱い、暖かい、寒いというような、われわれの感覚を反映した言葉をわれわれは知っている。夏は気温が高く、冬は低いことや、健康な人間の体温は $36.6^{\circ}\text{C}$ だが、体温がそれより高いと医者と呼ばなければならない、などと耳にする。

温度の概念に慣れすぎているために、それがどんなに独特な量であり、他の長さ、質量、体積などのありふれた量と、それがどんなに違っているかを、われわれは理解しない。しかし、その差異は非常に重要である。その違いを説明しよう。

それぞれ長さが1 mの10本の棒を次々につなげていくと、長さが10 mの棒ができる。それぞれの質量が1 kgの物体を10個集めれば、全体の質量は10 kgである。同じような例は沢山ある。しかし、それぞれの温度が $20^{\circ}\text{C}$ の10個の物体を結合しても、その物体の温度は $200^{\circ}\text{C}$ にはならず、 $20^{\circ}\text{C}$ のままである。長さや、体積や、質量などが加算されるのとは違って、物体を結合したときの温度は加算されない。100 mの長さは1 mの長さを100個加えたものであるが、 $100^{\circ}\text{C}$ の温度はそれぞれ $1^{\circ}\text{C}$ の温度を100個加えたものではない。これはちょうど、15才の人が、15人の1才の子供とは違うのと似ている。つまり、温度は加算的でない量である。これは温度の最も重要な性質の一つである。

温度を測定する方法は、この特性に関連している。物体の長さを測るためには、その物体を、あ

る単位において長さが知られている他の物体と比較すればよい。物体の質量を決めるには、ある単位において質量の分かっている他の物体と比較すればよい。物体の長さや質量は、それぞれその部分の長さや質量の和に等しいからである。

しかし、温度をそういう具合に測ることはできない。温度は基準となる温度と比較することができない、とすると、一般に温度の値は測定できないのではないだろうか？

## 歴史的考察(1)

温度を測る道具—温度計—は、ガリレイによって、1592年頃をはじめて考案された(“温度計”という言葉自体は、1624年にはじめて文献に現れる)。ガリレイの考えた温度の測定法は、現在われわれが用いているものと原理的に同じである。

彼の考案した装置を、図1に示した。あまり大きくないガラス球  $a$  が、他端の開いた、細くて長いガラス管  $b$  につながっている。ガラス球を手で暖ためてから、ガラス管の他端を、水を入れた容器  $c$  の中に沈める。ガラス球が周囲の空気の温度まで下ると、管中の水面は容器内の水面より高く上る。

ガリレイの装置では、管をつけた球内の気体の体積は温度に依存している、という事実が使われていることが容易にわかる。し

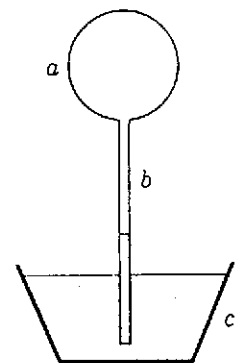


図1

たがって、気体の体積の変化から、温度の変化を知ることができる。

確かに、この装置は未だ温度計ではない。温度計は、温度の数値を計量できなければならない。それゆえ、この装置は温度計ではなく、温度スコープと呼ぶべきものである。しかし、温度スコープに、何らかの方法で、目盛をつければ、それは温度計になる。この問題の解決には、ほぼ150年が必要であった。とりあえず、われわれにとって重要なのは、すでにガリレイの装置に、温度測定の方法が含まれており、その原理は現代に至るまで変える必要がないことである：温度を直接測ることはできない。温度に依存した量が測られる。ガリレイの温度スコープでは、その量は気体の体積だった。現在使われている水銀温度計では、その量の変化から温度の変化を知る、温度に依存する量は、気体ではなく水銀の体積である。そのような量として、気体の体積と同様に用いられる量には、気体の圧力（一定体積における）、固体の棒の長さ、電気伝導体の電気抵抗、などがある。

#### 温度なしには知ることのできない自然の法則

すでに、最初の不完全な温度計、あるいは温度スコープでさえ、自然の最も重要な性質の一つである、熱平衡の法則を見出すことを可能とした。この法則は、多くの人々にとって、あまりにも自明なものと思われたので、誰もその発見を自分のものと主張せず、その発見の証拠を示そうとする人もいなかった。法則の内容は、次のように述べられる：任意の孤立した物体の群（系）は、時間がたつと一つの状態に近づく。その状態では系のすべての物体の温度は等しい。そのような状態を熱平衡状態と呼ぶ。

明らかに、熱平衡の法則は、温度計が発明された後でしか発見されなかった。逆に、温度計による温度の測定自体は、熱平衡の法則に基礎をおいている。というのは、温度計も一定の温度をもった物体である。そして、温度計はまさしく、自分自身の温度を測るのである。しかし、もしわれわれが温度計をつかって、何か他の物体の温度を測ろうとするときには、その物体を温度計と熱平衡にして、物体の温度と温度計の温度が等しくなる

ようにする必要がある。温度計をつかって物体の温度を測るためには、いつでもある時間待たなければならない——物体と温度計の間に熱平衡が成り立つのを待たなければならない——のは、このためである。

#### 歴史的考察(2)

このようにして、温度スコープが16世紀の末に現れた。温度計は、ほぼ18世紀の中葉に生れた。ところで、温度計は何を測ったのだろうか？ この問いにたいする正しい答は、またもや温度計が生れてから100年後に与えられた。

温度は、物体の熱的状态を特徴づける量である。冷たい、および熱い物体について、それらの物体は異なる温度にある、とわれわれは言う。それゆえ、温度とは何か、という問いは、次の問いに帰する：冷たい物体と熱い物体では、何が違うのか？

この問題にたいする最初の答は、ガリレイ自身によって与えられた。熱い物体の近くに冷たい物体があると、熱い物体は冷え、冷たい物体は温められる、という事実から、ガリレイは次のような、当然の結論を下した：熱い物体から冷たい物体に何か移動する（同じ事実をつかって、冷たい物体から熱い物体に何か移動する、と考えることもできる！）。ガリレイは、この“何か”が特殊な熱的物質であると考えた。そして17～18世紀の多くの科学者は、同様の見解に従い、その物質を熱素と呼んだ。

熱素を認める理論に従えば、熱い物体は、冷たいときよりも多くの熱素を含んでいる点で冷たい物体と違っている。熱平衡に達する、ということは、この考え方によれば、熱素が高温の物体から低温の物体に移動することによって生ずる。すなわち、すべての物体は2種類の物質——それ自体の物質（水、銅、鉄、ガラスなど）と熱素——から成り立っている。どの物体も、物体固有の物質と熱の物質（熱素）の混合物である。“温度”（ТЕМПЕРАТУРА, temperature, ラテン語の“混ぜる”を意味する temperament を語源とする一訳注）という言葉は、まさに混合物を意味する。ほぼ150年の間、温度を測ることは、物体の中の熱素の濃度を測ることだ、と考えられてい

た。そのため、温度の単位は“度”(ГРАДУС, degree)と呼ばれる。まったく同じ単位が、例えば水溶液中の溶質の濃度を測るのに用いられることに注意して欲しい。

温度にたいするこのような見解は、非常に長い間、18世紀の終りまで続いた。そして、熱素の含有量という表現も用いられた。

しかし、熱の“物質”理論と同時に、もう一つの理論も存在した。その創唱者であり、かつ擁護者の一人は、ロシアの有名な科学者 M. V. ロモノソフである。その理論は、物体を熱することは運動によっても可能である、という事実に基礎を置いていた。ロモノソフは、次のように書いている：“よく知られていることだが、熱は運動によっても生ずる：両手をこすり合せると暖たまる、摩擦により木は炎をあげて燃えだす、火打ち鎌を石に打ちつけると火花が出る。鉄を急速に強く打ち鍛えると灼熱する。”これらのことから、彼は次のように結論した：熱は物質ではなく、すべての物体をつくっている小さな粒子(当時“知覚することのできない粒子”とよばれた)の運動である。

200年以上の長期にわたって、この二つの理論の間の論争が続いた。長い間、熱の物質理論が優勢であったが、最後に熱の運動理論が勝利をおさめた。

既に18世紀のうちに、温度は物体中の熱(熱素)の濃度である、という考えを見直すように多くの物理学者をうながす、幾つかの実験が行われた。

1760年に、英国の物理学者であり医師でもあった J. ブラックは、次の事実を明らかにした：種々の物質の、種々の質量をもつ物体に、同じ量の熱を与えたとき生ずる温度の変化は異なる。しかし、もし温度が本当に物体の中の熱の濃度を表すものならば、同じ量の熱を得たとき、同じ質量をもつどんな物質も、同じ温度の“変化”を生ずる筈である。この実験でブラックは、現在われわれが知っているように、物質が違えば熱容量(比熱)が違ふことを明かにした。ところが、熱素説では、そんなことはあり得ないのである。

1764年に J. ブラックはまた、次のことを示した：氷が融けるとき、かなりの量の熱を吸収するが、そのとき温度は変わらない。ブラックはこの熱を融解の潜熱と呼んだ。まったく同じように、水

が凝結するとき熱が放出されるが、そのときも温度の変化は起らない。明らかに、温度が物体中の熱の濃度であるならば、温度の上昇なしに熱を吸収することはあり得ず、温度の低下なしに熱を放出することはあり得ない。

温度が表す量は、実際は何なのか？ その意味は、長い間分からなかった。

その意味が明らかになったのは、物質の構成要素の運動理論が生れてからだった。ここでわれわれは、まるで違った二つの事柄——一つは運動理論の結論であり、もう一つは温度の測定法である——を比較することにより、温度の意味を考察することにしよう。

### 分子的混沌とその法則性について

物質の構成要素の運動理論は、すべての物質が小さな粒子——分子からなり、その分子は絶えず不規則な運動をしている、と考える。分子間には複雑な引力と斥力がはたらいている。しかし、ふつうの圧力における気体では、その力は小さい。それゆえ、気体における分子間の相互作用力は、一般に、無視することができる。相互作用力を無視したとき、気体は理想気体と呼ばれる。

理想気体は莫大な数の分子の集団であり、その分子は数百 m/s の速さで、あらゆる方向に不規則な運動をしていて、相互に、また容器の壁との間に衝突をくり返している。しかし、この想像することも困難な混沌(カオス)の中に(気体 gas という言葉自体が古代ギリシャ語のカオス(大気)から生れたのであるが)、厳密な確固たる法則が成り立っている。

理想気体の場合には、分子間に作用する力を考慮しなくてよいので、その法則を理論的に導くことができる。とくに、力学の法則をつかて、気体の圧力、すなわち容器の壁の単位面積に気体を与える力を“計算”することができる。この力は運動している分子が壁と衝突する結果として生ずる。

計算によれば、体積  $V$  の容器に  $N$  個の分子が入っているとき、気体が容器の壁に与える圧力は、次式で与えられる：

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E} \quad (1)$$

$\bar{E} = m\bar{v}^2/2$  は、1個の気体分子が平均として持つランダムな(不規則な)運動の運動エネルギーである。公式(1)は次のことを示している：気体の圧力は、単位体積に含まれる分子のランダムな運動の、平均運動エネルギーの2/3に等しい( $N/V$  は単位体積中の分子数に等しいから)。

● 実在の気体にたいしては、圧力を計算することはかなり難しいが、一定の条件の下では、公式(1)は十分に正確であると考えてよい。この式は、 $N/V$  および  $\bar{E}$  が小さいほど正確である。實際上、この式は、圧力が1気圧(atm)かそれ以下のとき、すべての気体に適用できる。

ところで、一体この式は温度とどんな関係があるのだろうか？ 公式(1)の中には、温度はでてこない！

その関係を理解するためには、われわれが未だ考察していない、温度の測定方法に目を向けなければならない。

### 温度の目盛

実用に供された最初の温度計は、フィレンツェの学者グループによって考案されたものだった。それ以来、温度計は他の国においても作られ、用いられるようになった。その温度計には種々の液体、主としてアルコールと水銀(ときに油)が用いられた。

液体温度計は、細いガラスの管からできており、下端は小さな球か円筒で閉じている。球(円筒)と管の下部には、液体(アルコール、水銀、油)が入っている。

図2にフィレンツェの温度計の例を示した。(実際、それは道具であると同時に装飾品であった。一般に、昔は道具が“文化的な見地”でつくられていた)。

温度計の目盛はどうかというと、その設定には非常に多くの違う方法が使われていた。温度計の各考案者と製作者は、温度計の目盛のつけ方をも考案しなければならなかった。18世紀の末までに、約20種の異なる温度目盛が使われ、その中の3種が(それでも未だ多すぎる)今日まで引続き用いられている。

最後に、ドイツのガラス器製造工で物理学愛好者のファーレンハイト G. D. Fahrenheit とスウ

エーデンの天文学者セルシウス A. Celsius の考案した、温度目盛のつけ方の原理が、一般に用いられるようになった。その原理は、定点と呼ばれる二つの温度、すなわち、互いに異なる、恒常性をもつ二つの熱的状态の温度を用いることである。そのような定点として、大気圧の下での氷の融解温度と水の沸騰温度がある(一定の圧力の下での、任意の固体の融解温度と任意の液体の沸騰温度も定点であるが、水と氷は最も使いやすい)。

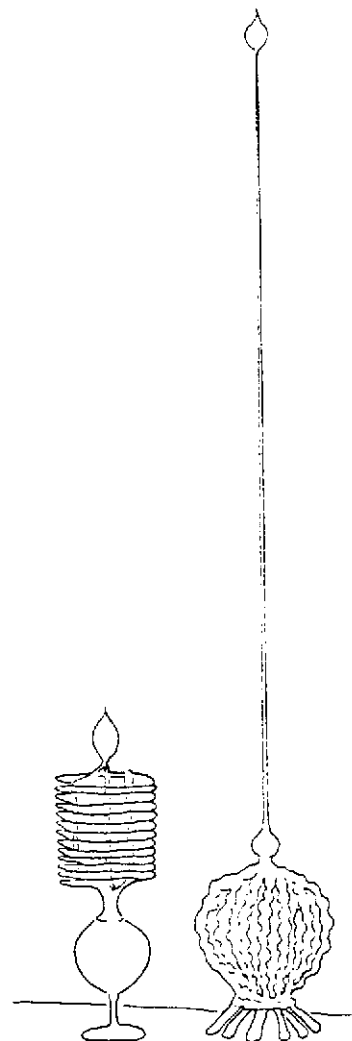


図2

1742年にセルシウスは、このような目盛のつけ方、すなわち温度計の目盛り法を考案した。

温度計を、それがどんなものでもよいが、融けつつある氷と接触させ、熱平衡に達した後に、温度計の液体面の位置(それが液体温度計であるとして)に、何らかの数値を記入する。次に、融解しつつある氷を沸騰している水と取りかえ、温度計の新しい液体面の位置に、最初の数値と100だけ違った数値を記入する。そして、液体面の位置の差を100の等しい部分一度一分けに。今から考えると、セルシウスが最初、沸騰してる水の温度での温度計の液面の位置に数字0を記し、融けつつある氷の温度での液面の位置に数字100を記入したのは、奇妙なことだった。しかし、8年たった1750年に目盛はひっくり返され、その形で現在も用いられている(図3)。

セルシウスより前の1724年に、ファーレンハイトもまた、融解しつつある氷と沸騰している水の

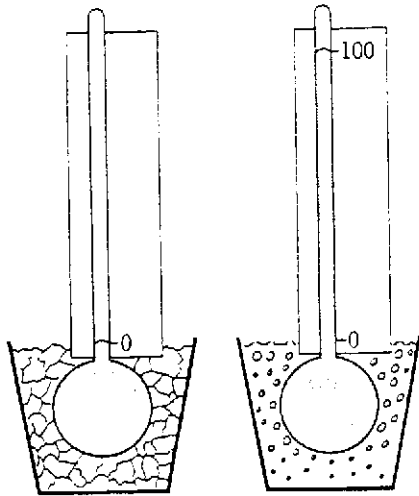


図3

温度を定点として用い、温度計をつくった。その場合、融けつつある水の温度には数字32が、沸騰している水の温度には数字212が記入され、その二つの温度の差は、100ではなく、180の部分一度一に分けられた。フランスの学者レオミュール F. de Réaumur は、セルシウスと同様に、融けつつある氷の温度に数値0を記し、しかし水の沸点を80度とする温度目盛を考案した(図5)。

このように、温度の目盛をつくることには、かなりの任意性があった。定点の間の温度差を何度に分けるか、は勝手に決められた。定点自体の温度の値も、勝手に決められた。合理的な根拠なしに、融けつつある氷の温度は0である、すなわち、融けつつある氷はどんな温度も持たない、と考えられた。

ここでわれわれにとって重要なのは、氷の融点と水の沸点の間の温度を等しい部分に(100, 80,あるいは180に)分割することにより、予め次のことを仮定していることである: 温度計を充たしている液体の体積は、“厳密に線形に”温度に依存する。融けつつある氷の温度での液体の体積を  $V_0$ 、沸騰するまでの水の任意の温度でのその体積を  $V$ 、それぞれの温度を  $t_0$  と  $t$  とすれば、温度間隔を等しい部分に分けることは、次の関係が成り立つことを意味する:

$$\frac{V - V_0}{t - t_0} = c$$

ここで  $c$  は定数である。もし、 $t_0 = 0$  ととると、

$$V = V_0 + ct$$

本当に、体積が温度に線形に依存することが、

証明できるのだろうか? 明らかに、それは証明できない。実験的に証明するには、温度計を使わねばならない。しかし、温度計をつくるためには、あらかじめ体積が温度に線形に依存することを仮定しなければならない。それゆえ、経験は何も新しいことを与えない。

古い小話がある。ある港で、毎日正午きっかりに大砲で号砲を撃っていた。船舶の船長たちは、港を出るときその号砲に自分の船の時計を合わせ、それをつかって経度を決めていた。1人の船長が、どのようにして、ちょうど正午に大砲が発射されるのかを知りたいと思った。砲兵は、土地の時計屋の持っている“非常に正確な時計”で時刻を決めるのだと説明した。ところが、時計屋は船長に言った。彼は自分の“非常に正確な時計”を港の号砲の音で較正するのだと。明らかに、このような状況では、時計の正確さについても、正午きっかりに号砲が鳴るのかどうかも、決めることはできない。

温度を測定する技術にとって重大なのは、次のことである: 違う液体をつかった温度計は、また液体の体積ではなく何か他の性質をつかって温度を決める温度計も、同じ温度を測ったときに同じ示度を与えない。さらに、違う温度領域での示度の差は、同じ温度差に対応しない。それゆえ、何らかの標準温度計があって、すべての温度計がそれによって目盛を決められなければ、問題は解決しないことになる。そうすれば、すべての温度計の示度は、確実に一致するだろう。この問題を解決するには、どうしたらよいのだろうか?

現在、標準温度計としては、定容気体温度計が用いられている。この温度計と新しい温度目盛について、次に説明しよう。

### 気体温度計と温度の絶対目盛

気体温度計では、温度によって変化し、それによって温度を決める量として、閉じた容器内の、すなわち一定体積(定容)における気体の圧力が用いられる。経験によれば、熱せられた気体の圧力は冷たい気体の圧力より大きい。気体温度計は、“理想気体”(圧力の小さい任意の気体)を入れた容器Aと、圧力の変化を測るためにそれにつないだ圧力計Mとからできている(図4)。

もし、容器を融けつつある水に入れ、次に沸騰している水に入れて、熱平衡に達したときのそれぞれの温度における圧力の値を測ると、水の沸点における圧力は氷点における圧力の1.3661倍であることがわかる筈である。すなわち、沸騰する水の場合の

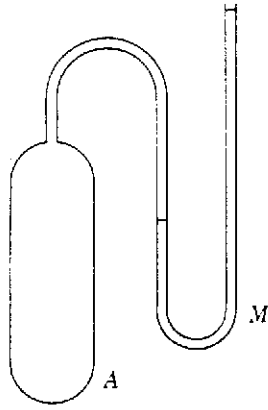


図4

と  $T_1$  で表し、融けつつある水の場合の対応する量を  $p_0$  と  $T_0$  で表すと、次の式が成り立つ：

$$\frac{p_1}{p_0} = 1.3661 \quad (2)$$

200年間使われてきたセルシウスの100分度目盛との関係を維持するために、従来通り次のように仮定する：

$$T_1 - T_0 = 100 \quad (3)$$

水の沸点と氷点における圧力の差を、100の等しい部分一度一に分割する。というのは、次のことを意味する：われわれはここで、体積が一定のとき温度は気体の圧力に線形に依存する、ということが無前提に仮定している；それゆえ、気体の温度はその圧力に比例する、と考えることができる。もちろん、上に述べた小話と同じ理由で、その正しさを確かめることはできない。小話では、時計の進みの正しさは大砲の号砲で証明され、号砲の正確さはその時計で証明される、という誤った論理が使われていた。温度の測定は、単純に、気体の圧力とその温度はたがいに比例する、と考えられることに基づいている。

融けつつある水の温度に0の値を仮定することは、もはや必要でない。その値は簡単に計算できる。実際、もし気体の温度が圧力に比例するとすれば、沸騰する水と融けている氷との温度における圧力の比は、それらの温度の比に等しい：

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{T_1}{T_0} \quad (4)$$

ところで、この式の左辺の比は1.3661に等しい(式(2))。したがって、右辺もこの値に等しい。

$$\frac{T_1}{T_0} = 1.3661 \quad \therefore T_1 = 1.3661 T_0$$

$T_1$  にたいするこの値を式(3)に代入すると、

$$1.3661 T_0 - T_0 = 100$$

これから直ちに融けつつある水の温度の値が得られる：

$$T_0 = \frac{100}{0.3661} = 273.15$$

これは、新しい目盛がセルシウス目盛とは違うことを示している：水の融ける温度は、この目盛では0ではなく273.15度である。そして温度の零点は、氷の融ける温度より273.15度(簡略には273度)下にある。この温度は絶対零度と呼ばれる。この温度は、もしそこに到達でき、もしその温度で気体が未だ気体のままであるならば、そこで理想気体の圧力が0になる温度である。それゆえ、気体の圧力は0よりも小さくはなれず、またこの目盛での温度は負に(0より小さく)はなれない。

ここで説明した温度目盛は(それを実際に決める手続きは、実用上重要でないので省くが)、温度の絶対目盛、またはケルビン目盛と呼ばれる。そしてこの目盛で測った温度を絶対温度と呼ぶ。この温度を文字  $T$  と書き、ケルビン(記号  $K$ ) で表す。それゆえ、氷の融ける温度は  $273.15 K$  であり、水の沸騰する温度は  $373.15 K$  である、など…(図5)

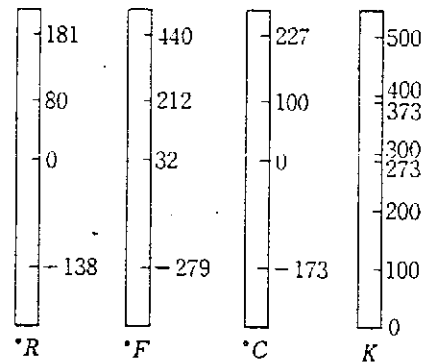


図5 いろいろな温度目盛：レオミュール(\*R)、ファーレンハイト(\*F)、セルシウス(\*C)およびケルビン(K)

しかし、セルシウス目盛も実用上は用いられている。この目盛で測られた温度は文字  $t$  と書き、セ氏度(記号  $^{\circ}C$ ) で表す。つまり、この目盛では氷の融ける温度は  $0^{\circ}C$  であり、水の沸騰する温度は  $100^{\circ}C$  である、など…

明らかに、

$$t^{\circ}C = (T - 273.15)K$$

物理学では、ほとんどいつでもケルビン目盛が使われる。

温度の真の意味が何かは、今や容易に説明できる。

温度とは何か？

こういう訳で、現在使われている温度の測定法によれば、質量  $M$  をもつ気体の圧力  $p$ 、すなわち体積  $V$  の容器内の分子数  $N$  の気体の圧力  $p$  は、その絶対温度  $T$  に比例する。これは、任意の温度に適用した式(4)から知られるが、その式は次の形に書き直せる：

$$\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0} \quad (5)$$

関係式(5)は次のことを示す：体積が一定のとき、気体の圧力とその絶対温度との比は一定の値を持つ。他方で、われわれが前に見たように(式(1))、気体の圧力は次の式で決められる：

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}$$

この値を式(5)の  $p$  に代入すると、次の式が得られる：

$$T = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \frac{T_0}{p_0} \bar{E} \quad (6)$$

式(6)は、一定の体積をもつ容器に入れた気体に対してなり立つ。それゆえ、気体の分子数  $N$  は一定である：式(5)で見たように、 $T_0/p_0$  も一定である。したがって、式(6)の  $\bar{E}$  の係数は、考えている気体の種類によらず（理想気体と考えられれば）定数であり、それゆえ次の形に書ける：

$$T = \frac{2}{3} A \bar{E} \quad (7)$$

ここで、 $A = (N/V)(T_0/p_0)$  は定数である。この式は次のことを意味する：気体の絶対温度は、その中の1個の分子のランダムな運動の平均運動エネルギーに等しい。ただ、ジュール(J)ではなく、ケルビン(K)で表されている。係数  $(2/3)A$  は変換係数であり、 $1K$  が  $1J$ /分子の何倍かを表している。これは、同じ長さが、メートル(m)でもインチ(in.)でも表すことができるのと似ている。ただ必要なのは  $1m = 40in.$  というだけである。係数  $40$  は変換係数であり、1メートルが1インチの何倍かを表している。

ふつう、式(7)は次の形に書かれる：

最新刊

## 結び目理論入門

鈴木晋一著

A5・予価2000円

数理解論や数学の様々な分野と関わりを持つ結び目理論の入門書。目に見える図形的な話題に焦点を絞り、結び目達の魅力的な姿と、理論の面白きの両方を伝えることに成功している。

## 数値解析演習

山本哲郎・北川高嗣共著

A5・定価1957円

好評テキスト「数値解析入門」の姉妹篇。現象の可視化、数値解のグラフ化等を考慮し、多数の図表を収載した。計算例も数多く紹介。

主要目次 線形方程式 非線形方程式 常微分方程式 偏微分方程式 プログラミングの基礎

## 演習 大学院入試問題

[数学編] I・II

姫野俊一著 I一定価2472円・II一定価2163円

理・工学系の修士課程志望者を対象に、東大をはじめとする全国数十の大学院の過去20年にも及ぶ基礎数学の入試問題・類題を分類し、要項、詳解を加えた。

新時代のコンピュータ総合誌

隔月刊

## Computer Today

11月号/発売中/定価930円

### 最新ネットワーク コミュニケーション

——パソコンLAN構築の実際——

月刊誌

## 数理科学

11月号/発売中/定価980円

## 場の理論とトポロジー

定価は税込みです。

## サイエンス社

東京都千代田区神田須田町2-4 安部徳ビル

☎03(3256)1093 振替 東京7-2387

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT \quad (8)$$

ここで、

$$k = \frac{1}{A} = \frac{V}{N} \frac{p_0}{T_0} \quad (9)$$

この係数  $k$  はボルツマン定数と呼ばれる。

式(9)によれば、ボルツマン定数  $k$  の値が実験によって求められる。そのためには、体積  $V$  の分かっている容器に質量  $M$  の分かっている気体を満たす必要がある（気体の質量は秤で量れる）。それから、容器を融けつつある氷（その温度は  $T_0 = 273.15\text{K}$  である）に浸し、圧力  $p_0$  を圧力計で測る。気体の質量  $M$  が分かれば、その分子数  $N$  は容易に計算できる：気体のモル質量が  $\mu$  であると、気体のモル数は  $M/\mu$  である；他方、1モルの気体中には  $N_A$  個の分子がある（ $N_A$ ：アヴォガドロ数）から、質量  $M$  の気体中の分子数  $N$  は、 $N = (M/\mu)N_A$  に等しい。このようにして、気体の質量  $M$ 、そのモル質量  $\mu$ 、容器の体積  $V$  および温度  $T_0$  における気体の圧力  $p_0$  を知れば、ボルツマン定数  $k$  の値を決めることができる。

このような（およびその他多くの）測定が何度もくり返された。すべての測定がボルツマン定数として、次の値を与えた：

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$k$  の値はこのように小さい。これは次のことを意味する：われわれが温度と呼ぶ量を決定する、1個の分子のランダムな運動の平均運動エネルギーは、とてつもなく小さいものである。1Kの温度における分子の平均運動エネルギー  $\bar{E}$  は、次の値をもつ：

$$\bar{E} = \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot 1.38 \times 10^{-23} \approx 2 \times 10^{-23} \text{ J/分子}$$

これがケルビンと分子あたりのジュールの関係である。

最後に残っているのは、歴史上長い間、違う意味を持つと思われてきた二つの概念——温度と熱——の間に、どのような関係があるのかを明らかにすることである。

熱が、一つの物体から他の物体に（熱伝導で）“伝えられる”熱的なランダムな運動のエネルギーであることは、よく知られている。それゆえ、熱は物体の状態を特徴づける量ではない、ことは明らかである。熱は、それが物体に含まれてい

る、とは言えない。ところが、温度は物体の状態を特徴づける。なぜならば、温度は物体を構成する分子の平均運動エネルギーを決定するからである。熱と温度の間には、本質的な関係は何もない。ただ、次のように言うことができる：“もし2個の物体が異なる温度をもつならば、接触させたとき熱を他方に与える方の物体がより高い温度にある。”物体の温度は、その物体が他の物体に熱を与えるか、他の物体から熱を受けとるかを定める量である。温度のこのような定義は、かつてマクスウェル J. C. Maxwell によって与えられた。

### 温度と呼ばれる量は必要か？

温度は、概念としても物理量としても、その真の意味が理解されるより前に、科学に導入された。しかし現在、その意味がはっきりした段階では、この古めかしい量を保存しておく価値があるのだろうか？ 温度について、ケルビンについて、セ氏温度について語る場合に、それを粒子の運動エネルギー——実際にそうなのだから——で置きかえ、ジュールで測ることにした方が良いのではないだろうか？

しかし、容易に分かるように、温度やその単位一度一を捨ててしまうことは正しくない。

まず第一に、無理にそうしたとすると、例えば医者は、病気の患者の体温が  $38^\circ\text{C}$  だと言う代わりに、患者の分子の平均運動エネルギーが  $6.64 \times 10^{-21} \text{ J}$  だと言わなければならないになってしまう。

第二に、度をジュールで置きかえることは、誤解を生ずるだろう。例えば、一般に  $100 \text{ J}$  のエネルギーは、それをつかって  $100 \text{ J}$  の仕事を得ることが可能であることを意味する。しかし、物体の温度が  $100 \text{ J/分子}$ （温度としては空想的な値であるが）に等しいということは、それから  $100 \text{ J}$  の仕事を得られるなどということとは、全然違う意味なのである。

(こじま ひでお)