

熱とは

生活工学のための熱力学序論. I

What is Heat?

Introduction to Thermodynamics for Human Environmental Engineering. I

妹尾学

Manabu SENO

(東京大学名誉教授)

1. はじめに

現在、私達の生活は科学によって益するところが非常に大きい。これは人類始まって以来の技術の蓄積によるのであるが、その大部分は 18 世紀以降の近代自然科学の結実と見られる新しい意味の技術—すなわち科学と一体化した技術の恩恵である。科学技術の発展は、一方において環境や安全に係わる新たな問題をも生み出している。私達の生活をめぐる種々の問題—それはいまや極めて多岐にわたり、また様々なレベルにあり、錯綜した様相を呈するのであるが、これらの諸問題を解決するために組織化された技法を提供するのが生活工学の本来の役割であろう。そのためには、まずこれら錯綜した諸問題を整理し、それぞれの局面、レベルにおいてそれらの本質を理解することが必要であろう。この際、問題の性質に応じて自然科学、社会科学、人文科学にわたる既成の諸学術分野の成果を活用しなければならないことは勿論であり、技術を体系化する工学の立場では、まず自然科学分野からの思考が必要である。

本稿は、生活工学の確立のために、熱力学を構成する理論がどのように役立つかを検証し、熱力学の立場から生活工学の基礎を構築しようとする試みを準備しようとするものである。

2. 熱力学の生い立ち

はじめに、何故ここで熱力学を取り上げるかについて考えておく。それはなによりもまず、

熱力学が自然をあるがままに總体的に認識し把握しようとする方法を提供すると考えられるからである。

熱力学という学問の性格を知るために、熱力学が成立した経緯を簡単にたどっておこう^{1, 2)}。現在の自然科学は、1687 年にニュートン (I. Newton, 1643-1727) による“自然哲学の数学的諸原理 (プリンキピア)”に始まるといわれる。天体そして地上の物体の運動が万有引力という概念により、数式として表現されることが見出されたのである。これはまさしく我々人間の自然認識において画期的なことであった。ニュートンは、すべての物質は同じ窮極粒子によりなり、物質が多様な性質を示すのは、粒子間に働く種々な力による結合状態や組織・構造の違いによると考えていた。万有引力による天体の運動の解明、重力による地上物体の運動の解析などによって、ニュートンの評価は固まり、これらの考えは強い影響力をもつこととなった。しかし、とくに物質のさまざまな性質を解明するにあたり、このような一元的物質観と力学還元主義はやがて破綻をきたし、彼およびその追随者 (ニュートン主義者) の懸命な努力にもかかわらず、いなむしろその努力の故に、混迷の度を深めていった。

18 世紀中期以降、イギリスの科学の中心はニュートンを生んだイングランドからスコットランドに移っていく。「プリンキピア」出版の翌年 (1688) に起こる名誉革命によって、イギリス

はブルジョア社会へ突入し、政治的には安定するが極度の保守主義に陥る。スコットランドは1703年イングランドに統合され、政治的に遅れをとっていたスコットランドの産業は、イングランドとの自由競争で技術的改良に迫られた。実務と近い位置にあるスコットランドの科学者は、ニュートン主義者のように数学的検証だけが明証性の唯一の根拠とは考えず、科学のなすべきことは経験から一般的な法則を導き出すことと考えた。このスコットランド啓蒙主義はやがて熱学の祖とでもいふべきブラック (J. Black, 1728-1799) を生み出した。

ブラックは熱平衡に注目して温度と熱量の概念を明確にした。これについては3節で改めて述べる。また、熱は温度上昇ばかりでなく、場合によっては融解や蒸発をひき起こすことに注目し、状態変化の潜熱の概念を確立した。彼はまた同じグラスゴーで蒸気機関の改良に取り組むワット (J. Watt, 1736-1819) に助言を与えたといわれる。ワットの蒸気機関が産業革命の主演となったことは、周知の通りである。

やがて時代は第二の科学革命といわれるラヴォアジエ (A. L. Lavoisier, 1743-1794) による化学革命を迎える。よく知られるように、化学革命は燃焼におけるフロギストン (燃素) の役割が転倒して酸素として解明されたことによるのであるが、このとき熱は熱素 (カロリック) として把握された。物質化された熱は保存されるべきものとして、ラプラス (R. S. Laplace, 1749-1827) らによって解析的表現が与えられ、熱素説として完成された。

一方、熱運動論は近代化学の父と呼ばれるボイル (R. Boyle, 1627-1691) の時代から命脈を保っていた。ボイルは記念碑的な著作 “The skeptical chymist (懐疑的化学者)” (1661) で、アリストテレス以来の四元素説、バラケルススの三元素説を徹底的に批判し、自然を自動機械のようにみる機械論の立場に立っていた。彼の物質観では、自然の最小単位があり、すべての物体はそ

れらの結合状態にあり、物体の原質はそれら構成粒子の形状と状況によると考えられた。そして熱は構成粒子の無秩序な運動によると想定された。しかし彼の熱運動論は以後の熱学の展開にほとんど影響を与えることなく、ニュートンの時代を経て、熱物質論の時代を迎えたのである。

熱素説が支配するなか、ランフォード (Graf Rumford, 1753-1814) は、バイエルン兵器工場で大砲の砲身の中ぐり工程で多量の熱が発生することに目を留め、水中での中ぐりを行い、熱がいつまでも発生し続けることを確め、1798年 “摩擦により励起される熱の源についての実験的研究” として発表した。ここで彼は熱量保存則は否定されたと考え、熱運動論を提唱した。しかし、これによって熱素説は崩れることなく、熱物質論が打破されるためにはより確固とした論理が必要だったのである。

そして時代はカルノー (S. Carnot, 1796-1832) を迎え、彼は熱機関の動作原理について理論的解析を行い、結果を “火の動力に関する考察”

(1824) としてまとめた。ここで彼は熱素説の立場に立っているが、後にその誤りに気付いたようである。次いで、マイヤー (J. R. Mayer, 1814-1878) とジュール (J. P. Joule, 1818-1889) が現われる。彼らはそれぞれ独立に熱と仕事の同等性を論じ、力学的エネルギーを一般化する形で普遍的なエネルギー概念を構築し、確たる論理としてエネルギー保存の原理を確立したのである。これによってはじめて熱素説は完全に打破され、熱力学第一法則の成立をみるに至った。

次いで、クラウジウスとトムソン (ケルヴィン卿) の活躍が始まる。クラウジウス (R. J. E. Clausius, 1822-1888) はカルノーの業績を検討するなかで、変化の際の当量値の存在に気づき、またトムソン (W. Thomson, Lord Kelvin, 1824-1907) は、カルノーの原理のなかに絶対温度の概念が隠されていることに気づき、これらを究明することによって、エネルギーの1種として

の熱が仕事とどのような点で異なるかを明確にする形で、熱力学第二法則に到達した。1850年から51年のことである。1865年になってクラウジウスは、変化の等量値のもつ意義が非常に大きいことから、これにエントロピーと言う名前を与え、第二法則はエントロピーの原理として定式化されることになった。このようにして、現在私達がもっている自然科学の規範の一つとしての熱力学が誕生したのである。

ここで熱力学の特徴をまとめておこう。以上の誕生の歴史からも分かるように、熱力学は巨視的 (macroscopic) な立場に立つ現象論的理論である。これは自然現象を直截簡明に表現するものであり、一切の抽象的モデル的思考を必要としない。この点で微視的 (microscopic) な立場に立つ原子・分子論とは明確に異なる。また同じ現象論としての一般力学とはその包含する領域の広さで異なる。古典力学は結果として可逆な力学的現象を論じてきた。もし不可逆な現象をも論じようとするならば、熱力学に接近せざるを得ない。また、電磁気学は電磁現象を、熱力学は熱現象を扱う、ともに広い適用範囲をもつが、熱現象はとりわけ日常的な自然現象に深く関わっている。

微視的な立場に立ち、熱力学による巨視的な結果を説明するものとして、統計力学が発展した。統計熱力学は熱力学のレベルをより深化させるものであり、その威力は大きい。しかし対象は広範多岐かつ極めて複雑な事象にわたるので、しばしば簡略化したモデルによる考察を強いられ、まだ完成の域にあるとはいえない。熱力学自体も平衡状態の熱力学として完全な理論体系をもつが、非平衡状態への拡張は現在なお続いている。その意味で熱力学は決して古典熱力学の範囲で終わるものではない³⁾。

熱力学は自然現象を直視するものであり、必要に応じ理想化の条件を課することがあったとしても、その対象は本質的に無限定である。解明の深さがときに十分でないということがあつ

ても、現実のすべてを総体的に把握するために已むを得ない制約ともいえる。このような意味で、熱力学の手法をもって生命現象から生活現象、さらに社会現象までも扱うことができる。生活工学のフレームづくりに熱力学を取り上げる理由はここにある。

3. 温度と熱

さて本論に入ろう。熱力学は熱に関する現象を論じるものであるから、まず熱とは何かについて考えておこう。岩波理化学辞典によると、“熱とは温度が異なる2つの物体が接触するとき、温度の高い物体から低い物体へ移動するエネルギー”と定義されている。さらに、熱の概念はエネルギーの移動の過程について定義されるものであり、物体の状態そのものについて定まる概念ではないと述べられている⁴⁾。この熱の正しい定義が初級の化学教科書でどのように与えられているかについて、少し古いがアメリカでの調査の報告がある⁵⁾。調査された43件のうち、正しいものが6件、不正確なものが19件、明確でないものが9件、定義が与えられていないものが9件となっている。最近はこの数字はかなり改善されているようである。

熱がどのように誤解されるかの説明に入る前に、上に述べた正しい熱の定義に関連するいくつかの問題について考えておこう。第一に、温度とは何かという問題である。熱と温度は互いに密接に関連している。上の定義にも見られるように、熱の概念は温度を通して得られたものであり、まず温度の概念を確定しておく必要がある。温度はもともと我々の温冷の感覚の度合いを表す量である。人間はほぼ一定の体温(36-37℃)をもつので、他の物体に接したとき体温を基準として温かいあるいは冷たいの感覚がある。この感覚の度合いを測るためにいろいろな寒暖計—温度計—がつくられた。はじめて空気の膨張を利用した気体温度計をつくったのはガリレイ(1592)だといわれる。人間は温冷の感覚をも

つが、感覚は客観性をもたない。たとえば温度計で同じ示度を与える鉄の塊と木片があったとき、これにふれて木片より鉄塊の方が冷たいと感ずることがある。これは温度と熱量の区別がなされていないからである。この矛盾を区別して熱量の概念を確立したのがブラックである。

ブラックはその出発点を熱平衡の吟味に求める。温度の異なる2つの物体を接触させ、十分長い時間おくと2つの物体の温度はやがて等しくなり、いったん等しくなるとそれ以降変化は起こらない。これが熱平衡であるが、正しくは温度平衡というべきであろう。この事実のなかに、現在熱力学第0法則とよばれる事柄が潜んでいる。熱力学第0法則は次のように述べられる。“物体Aと熱平衡にある物体Bがさらに物体Cと接触しても熱平衡にあれば、物体Aと物体Cを接触させても熱平衡にある。”熱平衡を特徴づける尺度は温度であり、物体Bを温度計とし、これで物体AとCの温度を別々に測ってこれらが等しければ、AとCが熱平衡にあることが、第0法則から保証される。

この一見当然と思われる手続きが、実は自然科学を構築する上で非常に重要な意味をもっている。もともと我々の温冷の感覚の度合いを表す、いわば主観的な尺度であった温度が、この手続きによって客観性を持つようになるからである。温度計Bによって我々の主観に依らない温度という概念が客観的に定義されたということもできる。自然科学は、いわば我々が感覚的に経験する事実を客観的に把握する論理の上に構築されているということもできよう。

温度が定義されると、これを用いて熱量の概念が明確になる。私達の素朴な経験は、物体を加熱すると温度が上がることを教えてくれる。ブラックはこの温度上昇の程度が物体の熱を受入れる能力を表すと考え、その能力を比熱(熱容量)で表した。ある物体の熱容量Cは

$$C = \frac{q}{\Delta\theta}$$

で与えられる。ここで q は物体の温度 θ を $\Delta\theta$ だけ上げるために必要な熱量である。実はこの説明は性急であろう。まだ熱量が定義されていないからである。しかし、ブラックは物体の種類によって、たとえば水と水銀とで、同じ程度加熱したときに温度上昇の程度が違うことを知っていた。これは熱容量Cが物体の種類によって異なることを意味している。そこでたとえば水を基準の物質として、水の温度を 1°C だけ上げるために必要な熱の量を単位として任意の熱量を測ることができることを示したのである。

ブラックはさらに熱は物体の温度を上昇させるだけでなく、氷を融解させるなど物体の状態を変化させることに注目した。このとき氷の温度は一定(0°C)であり、ただ氷の融解だけが起こることから、これを潜熱と呼んだ。そしてこの潜熱を利用することにより熱量をより精確に測れることを知った。これは以後氷熱量計として広く用いられる。このようにして、熱量は客観的に測定できる量として概念化され、その内容が議論されるようになった。熱がエネルギーであるとの認識は熱力学第一法則の成立につながるのであるが、これについては次回にゆずり、ここでは熱についてももう少し理解を深めておこう。

4. 迂路としての熱素説

先にふれた熱に関する不適切な表現として次のようなものがある。一つは“物体が熱をもつ”という類の表現で、たとえば、“高温の物体は低温の物体に比べより多くの熱をもつ”という言い方はよく聞かれる。前項でも述べたように、物体間の温度差が熱としてエネルギー移動をひき起こすが、温度はその物体がもつ熱の量を表すわけではない。このような言い方には、歴史的にかなり長い間信じられていた熱物質論としての熱素説(caloric theory)の残渣が感じられる。私達が熱をどのようにみてきたかをたどることは、私達の自然の認識の仕方を知る上で興味深

い。

火を始源物質の一つとしてみることは、科学の発祥の地といわれる古代ギリシャのターレス以後の自然哲学者の思考にみられる。たとえばエンペドクレスは、火、気、水、土の四元素理論を唱え、ヘラクレイトスは運動と変化の原理として火を考えた。またアリストテレスは、温、冷、乾、湿を自然の原質とし、温乾、乾冷、冷湿、湿温をそれぞれ体現するものとして火、地、水、気の四元素を考えた。古代ギリシャはまたレウキッポスやデモクリストスを生んだ機械論的原子論の故郷であり、物体の本質を究極的粒子としての原子の形状と運動に求めた。

さて、既に述べたように近代自然科学の父といわれるニュートンは、重力の概念の発見により世界の力学原理を確立したのであるが、その自然哲学のプログラムは“さまざまな運動の現象から自然界のいろいろな力を研究すること”という、プリンピキア第1版の序文にある言明に尽くされている⁶⁾。そして、地上の物体間に働く、距離の2乗に反比例し質量に比例する重力の外に、物体を構成する粒子間に働く、“重力よりずっと強いが遠い距離では消滅する凝集力”や、“物質の弾性を生み出す斥力”を見出したのである。

この“斥力”の思想はボイルの法則の解釈に根ざしている。“気体(空気)の体積は圧力に反比例する”というボイルの法則は、1662年ボイルにより報告されたが、その解釈をめぐるフックとニュートンの間に対立があった。フック(R. Hooke, 1635-1703)はもともと熱運動論の立場であり、熱は物体の部分部分の活発な攪乱のためであり、空気の弾性(圧力)も構成粒子の振動運動の結果と考えていた。この考えは現在の考え方に近いのであるが、ニュートンは全く違う考え方をした。彼は気体粒子がほとんど自由な空間を自在に飛びまわっているというような像ではなく、空間に充満している粒子像を想定していたのである。そして、空気の粒子が互

いに他の粒子と反発し合い、その斥力が粒子間距離に反比例するならば、圧力は体積に反比例することを容易に導けることを示した。“距離の関数として数学的に表現される遠隔力”という概念は、まさしくニュートンのものである。ニュートンの高まる権威とともに、この考えはそれ以後長く人々を支配するようになった。

対象として自然を考えると、その本質を实体(物質、粒子)に求めるか、現象(運動、力)に求めるか、相対する2つの立場がある。熱の本質を問題にすると、熱物質論と熱運動論の2つの立場である。ニュートン自身は本来熱運動論の立場に近かったのであるが、“隣り合う粒子間に働く斥力”という考えは、もともとあった粒子概念に新たな息吹を吹き込むこととなった。しかもニュートンが想定した空気の粒子は極めて緩慢な運動しか示さず、むしろ静的な粒子像である。熱物質はこのほとんど静的な粒子間に働く斥力を実体化したものであった。

18世紀のはじめ、オランダライデン大学のブールハーヴェ(H. Boerhaave, 1668-1738)は、物質としての火(materia ignis)の概念を提唱した。その頃、同じ究極粒子を考え、種々な物質の性質をこれら粒子間に働く力の違いによって説明しようとする、ニュートン以来の一元的物質観は様々な隘路にさしかかっていた。ブールハーヴェはニュートンにならって、物質の特性の担い手であり、不変の微細な究極粒子として原子を想定するが、同時に極めて微細な火の粒子を考えた。火の粒子は自己運動によって空間のすみずみまで広がろうとする特性をもち、物質世界の運動と変化の淵源である。これは以後の熱物質の標準モデルとしての役割を担うこととなった。

熱量の概念を確立したブラックは、厳に実証主義的立場を守り、熱の本性についての議論は時期尚早と考えていた。しかし、熱容量や潜熱の考えは、熱を物質的実在とみなす熱量保存則に依拠するようにもみえる。

ラヴォアジエは化学に革命をもたらしたのであるが、それは燃焼におけるシュタール (G. E. Stahl, 1660-1734) のフロギストン (燃素) を追放したことにあることはよく知られている。ラヴォアジエの燃焼理論は、1777年の2編の論文“火の物質と揮発性流体の結合および空気状弾性流体の形成”および“燃焼一般についての論考”でほぼ完成された。これによって燃焼は燃素の流出ではなく、酸素との結合であると正しく解釈されたのであるが、実はここで酸素ガスから遊離された熱素 (カロリック, Caloric) が重要な役割を演じていた。熱素は、物体の粒子間にあまねく浸透し、それらを互いに分離させる極めて微細な流体であると認識されている。1789年に出版され、近代化学の原点とよばれる“Traite elementaire de Chimie (化学要論)”には、33種の単体が大きく4つのグループに分けられ載せられており、“物体の元素と考えられる単体”のグループに、光、熱素、酸素、窒素、水素の6元素が並べられている。

熱素説はラプラスの助けを借りて完成へと導かれる。ラプラスは当時最も高名かつ有能な数理物理学者で、大著“Mécanique céleste (天体力学)” (1799-1825) でニュートンの重力理論の成功を決定的なものとした。その頃でも熱の本質について決定的な解明がなされないままに、化学者が熱素説に傾いていたのに対し、物理学者は熱運動論に組し、熱は物質粒子の知覚し得ない運動の結果と考える人が多かった。これは物質の多様性を強調する化学者と、物質の普遍性を重視する物理学者の間の基本的性格の違いを反映するものかもしれない。

ラプラスももともと熱運動論に近い立場をとっていた。しかし、物質粒子間に働く力への興味から熱素について論じるようになり、熱物質論への傾斜を深めた。1783年、ラヴォアジエとの共著“熱についての論考”において熱の本質のいかに問わず、自由熱 (顕熱) と結合熱 (潜熱) の和として熱は保存されると考えた。これ

を承けて、ラプラスとポアソンは熱素説を解析的熱量学として数理物理学のレベルまで高め、その理論は“天体力学”第5巻に全面的に展開された。ここに熱素説は、その本性を十分に明らかにしないままにほぼ完成の域に達したのである。

既に述べたように、現在も用いられている熱に関する慣用的な言い方が、熱素説の影響を強く受けていることが明らかであろう。熱は仕事とともにエネルギーの移動しつつある時の形態であり、物体の内部でいつまでも熱として存在するわけではない。したがって、“物質が熱をもつ”という表現は一般には不適切であり、熱を (内部) エネルギーに言い変えなければならない。熱として移ったエネルギーをもとの形でそのまま熱とよぶのは、慣用的な意味しかもたない。

5. 熱運動論へ

熱にまつわる混乱はこれだけではない。もう一つの大きな混乱は、分子論的に考えたときの熱の本性に関わる問題である。前節に述べたように、熱の本性に関して古くから熱運動論と熱物質論が競い合ってきた。熱力学が誕生する前夜には、熱物質論を代表する熱素説がほぼ完成された姿を誇っていた。しかし、やがて熱素説がもつ矛盾が明らかになり、これが熱運動論に破れる形で熱力学が成立したのである。

歴史をさかのぼると、17世紀、中世のとばりを破って素朴な機械論的自然観が芽生えた。ここでは熱を特有の粒子 (熱または火の原子) の運動とみるのが支配的であった。これは熱の物質論と運動論の未分化の段階である。この時代を代表するのがボイルである。ボイルは熱運動論に近い立場をとっていた。彼が見出した気体の圧力と体積の関係 (ボイルの法則) の解釈をめぐり、熱運動論に基づくフックの考えを斥け、ニュートンは粒子間に働く斥力を考え、これがやがて熱素説につながる経緯は既に述べた通り

である。

ラヴォアジエの化学元素(単体)の概念の提起に続き、ドルトン(J. Dalton, 1766-1844)は化合物をつくる単体の間の重量関係に着目し、固有の重さ(原子量)をもつ原子の概念を提唱した。その考えは主著“A new system of chemical philosophy (化学の新大系)”(1808)としてまとめられ、ギリシャ以来の空想的、思弁的原子論は、明快な具体性をもつ近代的原子論へと装いを新たにすることになった。ドルトンは、まわりに熱素の原子をまとう、それぞれ固有の重さをもつ単体原子の像を描いていた。これによって物質を構成する究極粒子としての原子の存在は、かなり現実性を帯びることになったが、そのイメージは現在とかなり異なるものであった。ラプラスは“天体力学”において、“気体の各原子はその原子がもつ熱素と周囲の諸原子がもつ熱素との間の斥力の作用により宙吊りの状態にある”と述べているが、これがニュートンからドルトンに至る静的気体原子の描像であった。

熱素説が支配するなかで、ランフォードは有名な“大砲の中ぐりによる熱の発生”実験(1798)から、“中ぐりで生成される熱の源はほとんど無尽蔵にあり、無限な熱の実体が物質であるはずはなく、運動と考えるのが自然である”と報告したことは既に述べた。この報告はしばしば熱と仕事の等価性を主張したものであり、熱力学第一法則を先取りするものと評価されている。しかし、彼の実験結果は“摩擦(仕事)による温度上昇”を観測したものであり、これを“温度上昇は熱による”という固定観念から、“摩擦によって熱が発生する”と考え、仕事と熱は等価であるとするのには大きな飛躍がある。彼は熱が物質でなければ運動であろうと、二者択一的に考えたに過ぎないのであり、熱が分子運動であるとの考えに慣れた現代の人からみて、いかにも卓見と考えるのは、歴史に対する誤った見方であろう。

熱運動論へ正しい道をきり開いたのは、イギ

リスのヘラパス(J. Herapath)である。1821年の論文で、彼はニュートンの描いた気体像を離れて、気体は互いに完全に自由に運動する粒子よりなり、熱はこれら粒子の内的な運動であると考へた。これは現代の気体分子運動論に連なるものであるが、当時あまりにも思弁的過ぎるとして受け入れられることはなかった。

ヘラパスの考えが実証されたのは、1850年代に行われ、後にジュール・トムソン効果と呼ばれるようになった実験によってである。これは気体の断熱膨張過程における温度変化の測定であり、理想気体では温度変化はないが、たとえば空気では常温常圧で温度降下が起こる。これは空気の体積膨張に僅かではあるが仕事を必要とすることを示すものであり、ニュートン以来の斥力の働く気体粒子像に反することである。ジュールはこれ以前から、熱は粒子の活力ないし活力を生み出す引力または斥力の状態であると考え、ヘラパスの説を再評価し、気体の熱はもっぱら粒子の活力によると考えていた。これを実証したのがジュール・トムソン効果の実験であった。

1856年以降、この考えはクレーニッヒ(A. Krönig)、クラウジウスによって展開され、気体分子運動論として定式化された。気体分子運動論によれば、気体分子は活発に無秩序な運動をしており、この分子運動に基づくエネルギーをもつ。分子の無秩序な運動は熱運動とよばれ、そのエネルギーは熱エネルギーとよばれる。これは熱を気体分子の運動によると考へた気体分子運動論の立場である⁷⁾。

このようにして、熱の本質は少なくとも理想化された気体では、構成粒子の熱運動によると結論され、これは現在私達の常識にもなっている。さらにここで理想気体の状態方程式を援用すれば、熱エネルギーは絶対温度 T に比例し、とくに分子1個の平均運動エネルギーは $(3/2)kT$ となる(k はボルツマン定数)。したがって、温度は気体分子の熱運動の激しさを表わす尺度と

して理解できる。この結果を用いれば、先に誤りを含む文として挙げた文章を、“高温の物体は低温の物体に比べより激しく熱運動する分子をもつ”と言い変えることができる。

これらの表現で熱とエネルギーの混用がみられ、両者の概念が必ずしも明確に区別されていない。熱運動論は気体分子運動論によってはじめて確実な基礎を得たのであるが、このとき、熱という現象論的・巨視的概念がそのまま分子論的・微視的理論にもち込まれたことに、混乱の大きな原因があると思われる。現在、巨視的現象の分子論的解明はかなり進んだとは言え、なお乗り越えなければならないハードルが残っている。

やや先廻りしたが、以上論じてきた熱の本性に関する究明はエネルギー概念の確立を導き、これによってエネルギー保存に関する熱力学第一法則が確立されたのである。この経緯については次回にゆずろう。

6. おわりに

最後にここでの議論をまとめておこう。熱は私達にとって非常になじみ深いものである。生活工学においても、衣・住は私達の周辺環境を整えるもので、そこでは温度・湿度が主要な要因となる。また食は直接のエネルギー源であり、生命を維持し活動の源となる。これらはすべて熱現象と関連する。

一方、なじみ深い現象ほどそれを体系的に解明しようとするとき、多くの困難に遭遇することがよくある。熱現象の解明もその一つの例である。本稿で論じたように、熱は“温度差によって移動するエネルギー”であるが、実際にエネルギーが熱として移動する機構として、熱伝導、対流伝熱、放射伝熱が区別されている。これらの機構が同時に起こることも多いので、伝熱自体、現象論的にみてもかなり複雑な現象である。

熱現象を分子論的に解明しようとするとき、

さらに多くの問題にぶつかる。前節で論じたように、気体分子運動論の立場から熱は分子の無秩序な運動に由来すると解釈されたのであるが、この結論は多くの前提条件の下ではじめて導かれるものであり、まだ解決されていない多くの難問を抱えている。ただし本稿の立場では、熱をエネルギー一般と一応区別して論じることが必要である。しかし用語として熱とエネルギーは極めてしばしば混同され用いられている。

今後の課題となるのであるが、実は熱はエネルギーとしても特徴的な性質をもつのである。熱力学第一法則は、熱と仕事エネルギーの変化形態であり、それらの和がエネルギーとして保存されることを主張するのであるが、仕事をするエネルギーとして、力学（機械）的エネルギーや電気的エネルギーに対して熱（エネルギー）は明確な特性をもつ。この特性を解明する努力によってエントロピーの概念が確立され、これによってはじめて熱の本質が巨視的にも明らかになり、さらに微視的な解明も進められたのである。熱に対する私達の追究はさらに続けられなければならない。

参考文献

- 1) 高林武彦, “熱学史”, 海鳴社 (1999)
- 2) 山本義隆, “熱学思想の史的展開”, 現代数学社 (1987)
- 3) イリヤ・プリゴジン, ディリプ・コンデプディ (妹尾学, 岩元和敏訳), “現代熱力学—熱機関から散逸構造へ—”, 朝倉書店 (2001)
- 4) 長倉三郎ら編, “理化学辞典” 第5版, 岩波書店 (1998), p.1014
- 5) T.B. Tripp, J. Chem. Education, **53**, 782 (1976)
- 6) ニュートン, “自然哲学の数学的諸原理”, 世界の名著 26, 中央公論社 (1971), p.56
- 7) 朝永振一郎, “物理学とは何だろうか下”, 岩波新書 (1979), p.24