

熱力学について —工学教育の立場からの問題提起—

On the Thermodynamics

—Bring forward an Issue for Education of Engineering —

和瀬國臣*

Kuniomi WASE*

A proposal is given on the education of thermodynamics in engineering. Author believes that the educational methods adapted in the university should be radically changed.

Education for beginners about the basic laws of thermodynamics as well as thermodynamic models should be mainly given by using colloquial explanations rather than the mathematical explanations.

Key words: Thermodynamics, Design of thermodynamics model, Education of engineering

1. 緒論

平成8年の学部改組の後、私は大学教育について再考することに取り組んできた。特に、教官と学生との関係について、また工学における基礎教育と研究について再検討を試みた。検討結果を検証するため、私は勉強会を開講することにした。この勉強会は愛媛大学の学生であれば学部、学科、学年さらに、専攻科を問わず誰でも受け入れた。3人の賛同者の協力を得て、参加者の希望に応じてどのようなことでも教授してきた。例えば、必修科目の単位を取得するための講義・演習とか、就職試験のための勉強に到るまで、種々多様な講義・演習を教授してきた。無論、この勉強会は単位権を持たない私的な教育の場であった。こうした、学生との交際をとおして大学教育について、特に理系の教育について検討結果の正しいことが実証されることとなった。

一方、大学はこれまで何度も教育を改革してきた。さらに、少子化時代を迎えて大学は社会に向けて美辞麗句をバラマイている。美辞麗句で飾り立てられた大学教育の空虚に私は呻吟し、工学教育について本質的・実質的な改革の必要性を感じていた。

こうした結果をふまえ、物理学、特に“力学”と“熱力学”を再勉強することにした。私は、工学部で行ってきている物理教育について再考してきた。特に、“力学”と“熱力学”を理論体系として再構築することを目指してきた。こうした観点から、教育の前提として学生と教官との関係について、次に、理系学部における基礎物理教育について、最後に、専門教育における物理学理論体系と研究（実験）について研究・考察

*愛媛大学大学院理工学研究科

*Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, Matsuyama, Japan

してきた。研究結果を共同研究者である環境建設工学科の岸洋介教授とともに日本物理学会において数回にわたって提起してきた。

今回退職するに際して、岸教授は“ニュートン力学について－工学者と学生のための解説－”と題して工学ジャーナルに投稿している。

本文では、大学における理科系学部の教育、特に熱力学の工学基礎教育に関して提言する。まず、工学教育の現状と問題点について、次に、工学基礎教育という観点から熱力学の問題点と熱力学の体系について、これまでの研究結果を簡単に紹介する。

2. 工学教育の現状と問題点について

愛媛大学工学部における教育の基本は、即戦力をつけさせるということのようである。即戦力が涵養された学生を社会に送り出すということは、社会的要請に呼応することのようである。こうした方向性は全国的に共通しているように見える。

即戦力を付けさせるための教育内容は、主として二つである。一つは、先端技術の紹介とその理解を目的とする教員個人の専門に関する知識の教授である。他の一つは、実験技術の修練である。学士論文および修士論文を通して即戦力の成果は計られる。この事実は客観的に観れば、即戦力の成果は教員の個人業績によって評価されるということになる。こうした所謂優秀であると評価される学生たちは卒業の担保と、さらに研究者として論文に氏名を記載されたという事実を昂揚する。優秀な学生たちの、無論、優秀な学生たちを教育・指導している教員の特性は、勤勉と従順とを併せ持って行動することである。フランス在住のある映画作家は『勤勉と従順を共有する行動は犯罪である。』と言い切っている。優秀であると認められてきた教員によって優秀であると認定された学生たち。学生たちは教員個人のための有用な作業者にすぎない。なぜなら、勤勉と従順は創造を迫害し破壊するからである。研究者はもとより、工学者であれ、セールスマンであれ、銀行員であれ創造力こそ最大の能力である。知識は有用であれ無用であれ、さらに有害であれ、それを吸収する側の意志に委ねられるべきである。教育という権力によって強要すべきではない。こうした教育の傾向は改組後加速度的に進められてきている。平成8年の工学部改組時、応用化学科のある教授は『我々は、これまで30年以上の間、何回も改組や教育改革を繰り返し行ってきた。しかし、どんな改革をしても、何度繰り返し行っても、教育する内容は、何一つ変わってないのだ。教育の内容を貴方が言うように変えることは出来ないのだ。』と強調した。権力はそれが大学という組織であれ、もっと大きな組織であれ、教育を、研究を、支配し管理したがるものなのである。教育者、研究者は支配、管理から自由であるとの自負心を持っているかどうか最低限の資質である。

教育は創造力を育むことが出来るものであることが理想であると考えている。しかし、そのようなシステムを私は知らない。次善の策として、創造力を阻害しない教育を考えている。想像力の豊かな人は、自由を求め自己を大事にする。このことは支配と強制に対峙する資質である。想像力の豊かな人はその人に適した道具を手に入れた時に、能力が輝きだし、想像を創造に具現する。工学教育を行う者が、学生に提供できる道具とは物理学の理論体系を教授することである。熱力学を組織的に教育する内容について概説する。

工学における専門基礎教育として行う熱力学の要点は、一、熱力学の理論体系を言葉で説明し、学生との議論によって理解へと導く。二、論理体系の理解を深めるに必要な事例は、聴衆と講師との相関関係によって選択されるべきである。自然現象あるいは工学現象から五感で観取できうる例題を適切に選択できるはずである。三、物理変数と数学変数の関連について説明し解説する。物理変数により表現された熱力学モデルを、数学モデルに変換する作業が必要である。四、得られた数学モデルを演算し、算出された解を、元の物理変数に変換する。この結果から、自然現象あるいは工学現象の変化の推移を考察する。以上の四点について説明する。

一、工学の基礎学問の一つは熱力学である。数学は熱力学を有効に利用するために不可欠である。熱力学の理論体系とその意味・概念を学生が理解し、教員と共有できるようになるまで語り合うことは必修である。この過程は時間が過剰にかかるという理由で避けるべきではない。熱力学の理論体系には、それを構成している法則、またそれを表現するに必要な物理変数、およびさまざまな定義、条件等が含まれる。シラバス等教育内容を拘束する力が大きすぎると肝心の教育目的は形式的になり達成されない。

熱力学の理論体系を明確に表現することは、理論物理学者の仕事であると工学者が期待していたかもしれない。一方、物理学者は工学者からの要請がないから工学者は十分満足しているのであろうと考えていたかもしれない。両者がこの問題の必要性を話し合った事例を知らない。互いにそれぞれの日常に忙しく、関心を持ったことがないようである。現状では、各学科の教員が協力して、工学部の学生に共通に講義すべき熱力学の理論体系を作ることが必要である。

二、例題の選定は聴衆の側の特性によって決めるべきである。例えば、聴衆が高校生である場合、一般社会人である場合あるいは工学技術者としての専門家である場合で当然講師は用意する例題を変えなければならない。あるいは聴衆からの要求に応じて例題を議論することが必要である。学部教育では、取り上げる事例は、学科により、学年により適切に選択されるべきである。この段階で、教員の能力と視野の広さが要求される。知識を広く吸収している教員は多数いる。重要なことは例題として取り上げた自然現象あるいは工学現象を熱力学の理論体系に基づいて言葉で十分に説明し解説することが必要である。こうした言葉の交換による演習は理論体系を本質的に理解する上で極めて重要な作業である。この作業は、教育現場では著しく欠落していたと言わざるを得ない。

事例として取り上げた工学現象、自然現象を解析し解説するために、種々の物理法則の中から利用可能な法則や理論等を選定する。熱力学の理論体系と、例えば、各種保存則、化学反応式等を連立させることが可能になる。適当な仮定あるいは条件を付与して熱力学モデルが構成される。

熱力学モデルは、自然現象あるいは工学現象の観方によって種々のモデルを構想することが可能である。現象を観察してさまざまな仮定あるいは制限条件を設定することによって幾通りものモデルを思考し構想できる。さらに誤差の取り方によっても幾種類ものモデルを構想することが可能である。

一と二の作業によって、熱力学の理論体系の全体像が把握できるはずである。すなわち、熱力学の理論体系の全体像が如何なるものであるのか？理論体系を理解すればどのようなことに利用できるのか？等々を本質的、感覚的に理解できるようになる。

三、言葉で理解し、得心が得られた後はじめて数学的処理が必要となる。自然現象あるいは工学現象は一体どの程度変わるのかということを確認する作業に取りかかることになる。数学的作業が出来れば熱力学モデルを定量的にシミュレートすることができる。この段階で、重要なことは物理変数と数学変数の違いと類似性について、解説することが必要である。物理変数が数学変数と同一であれば、変換作業は問題なく行える。しかし、物理変数が常に数学変数と同一の性質を有しているとは限らないのである。物理変数が数学変数と共通の性質を持つ範囲では物理変数を数学変数に変換して、数学的演算をすることが可能になる。一般には、熱力学モデルに何らかの条件、仮定を付与して、熱力学モデルを数学モデルと同一の性質に変換する。

四、数学モデルを演算して得られた数値を、物理変数に変換する。こうすることにより、熱力学モデルの変化量を定量的あるいは数量的に得ることが出来る。定量化された物理量を考察して、自然現象あるいは工学現象の変化を具体的に把握、理解することが出来るようになる。

多くの参考書、教科書等は一、二、三、四が混然としている。その結果、理論の説明に窮すると、例題に入り、演算にウンザリすると理論に戻る、といった展開をしているようにさえ思われる。工学部共通の基礎教育としての熱力学では、主として一と二に重点を置き、三と四は応用分野であればよい。

“熱力学”の場合は、専門分野ごとに取り扱う対象が異なっている。専門分野ごとに“〇〇熱力学”と称して、取り扱う物理学や化学の法則も異なり、使われる熱力学関数も特色を持っている。どの分野の熱力学であろうと、熱力学の理論体系は同一でなければならない。“〇〇熱力学”が専門分野における応用熱力学と

しての価値は認める。しかし、応用熱力学を初学者に講義教育してきた経緯を考慮すれば、こうした教育プログラムは既に破綻していることに気づくべきである。こうした背景の故、教育現場では不安と混乱を避けるため、他の専門分野との交際を避け、既存の・伝統的スタイルを継承しているようである。

教員の多くは、教育を語るとき総論としては、基礎が大事であると、教育は学生のために行うべきであるといわれる。“熱力学”が各学科に共通した工学の基礎科目であるとするれば、分野ごとの実情、特性を超えて“熱力学の理論体系”の意味、概念を共通に理解させることは避けるべきでない。教員個々の各論を削減しても、このことは必要である。

3. 熱力学について

(3-1) 状態と熱力学との関係について

熱力学は物質の状態変化に伴うエネルギーの移動に関する論理である。エネルギーの移動とは物質に流入してくるエネルギーと物質から流出していくエネルギーの両方を表現している。しかし、物質の状態を表現する物理変数や物質の状態を定義する法則は熱力学とは無関係に存在している。熱力学の理論体系を論ずるまえに、物質の状態を表現する物理変数や法則について明確にしておくことが必要である。

(3-2) 状態と系について

物質の状態について検討する。物質の状態を定義するために必要な要因は何か？ 物理的に定義するためには、物理変数で表現することが必要である。物理変数のうち物質に内在、言い換えれば物質に所属する物理変数が物質の状態を特定しうるのである。物理変数の内、物質の質量を表すモル数と物質の温度と圧力と体積、この4つの物理変数が物質の状態を定義するために必要である。このことと状態方程式＝(モル数、温度、圧力、体積の4つの物理変数で構成された方程式)とは同等である。現在、状態方程式が普遍的に利用できるのは理想気体の状態方程式に限られている。4つの物理変数は物質の状態を表現することが出来る状態変数である。これら4つの状態変数の特徴は測定可能であるということである。これら4つの状態変数のもう一つの特徴は、連続性と可逆性を併せ持っているということである。この特徴により、気体の状態方程式を数学方程式に変換し微分・積分等の数学処理を行うことが出来るのである。ただし、状態方程式は物理学上の単位を持つ変数間の関係式であるから、数学的作業を施す際には物理変数を数学変数に変換することが必要である。

4つの物理変数が決まれば物質が存在する空間領域は限定されるであろう。(物理変数が決まるということの意味については、(3-3)で説明する。)物質が固体の場合は、専門家でなくとも物質が占める領域の存在を感覚的に理解できるであろう。液体状態あるいは気体状態である場合にも、物質が存在する空間領域を限定する必要がある。物質が存在する空間領域を物質系あるいは簡単に系という。系とは物質の存在領域を指定する物理的概念である。現実的に操作する場合には系を容器と考えればよい。容器の特性は以下に列記するさまざまな性質を有する。1. 物質に、温度変化を誘引する熱を透過する料理器具のような性質を有する容器。2. 物質に、体積変化を誘引する圧力変化に対応するゴム風船あるいはピストンのような体積が膨張・収縮する容器。また、3. 物質の質量の変化に対応するコップとか蓋付きの鍋のような容器。さらに、4. これらの物理変数の変化、物質の移動、温度の変化、圧力の変化、体積の変化を自由にした、あらゆる制限のない容器。あるいは5. これら4つの物理変数の変化を断ち切った容器。系とはこうした種々の物理的性質を持つ思考上の容器であり、また現実の作業を遂行する場合の存在する容器である。したがって系とは実在と思考上の容器を総称した物理的概念である。

(3-3) 状態の定義と状態の変化について

物質の状態を定義する4つの物理変数と物質の存在領域である系について(3-2)で説明した。物質の状態は物質の存在によって、温度、圧力および体積が決定する訳ではない。物質の状態は如何にして決まるのか？ 物質の状態は物質が存在する系と系に接する別の系(外部または外界)すなわち他者との間の相互作用によって決まるのである。このことは力学において物体が運動するには力の作用、二体間の相互作用が必要であるということと同じである。物質の状態が変化するためには物質系と外界の間に何らかの作用が生じることが必要である。こうした相互作用によって物質の状態は、その質量、温度、圧力、および体積を変化させるのである。系と外界に温度差があれば、系と外界との間を熱が移動し、温度が等しくなるように状態は変化する。系と外界の間に圧力差があれば、圧力が等しくなるまで系はその体積を変化するという力学的仕事をし、ピストンはシリンダー内の体積を増減して外部と機械的仕事を交換する。また、物質も系と外界との間で、その存在状態が等しくなるまで移動する。コップの中の水は空気が乾燥しているときほど早く減少することはご存じであろう。系がある状態{質量 $n(1)$ 、温度 $T(1)$ 、圧力 $P(1)$ 、体積 $V(1)$ }から別の状態{質量 $n(2)$ 、温度 $T(2)$ 、圧力 $P(2)$ 、体積 $V(2)$ }まで変化した場合、状態変数の変化量は

$$\begin{aligned}\Delta n &= n(2) - n(1) \\ \Delta T &= T(2) - T(1) \\ \Delta P &= P(2) - P(1) \\ \Delta V &= V(2) - V(1)\end{aligned}$$

と表現される。

物質系と外界との間に働く作用力としては、温度、圧力(これは力学における力に相当する。)と物質系と外界との間で物質を移動させるための作用力である熱力学ポテンシャルがある。

一定量の物質を容器に封じ込め容器を密封しても、容器の性質(系の特性)と外界の状態により温度、圧力、体積は変化する。

密封された物質は、状態変化の前後、あるいは変化の途中で物質を構成している成分の全質量は保存される。すなわち、状態変化とは無関係に“質量保存法則”は常に成立しているということを確認しておくことは重要である。これは物質に関して密封された容器であり、この系を一般に、物質に関して“閉じた系”という。

開放容器内の物質は外界との間の交流は自由であるから、いずれ、物質、温度、圧力、体積とも外界と釣り合った状態に達する。このような系を“開放系”という。

これとは反対に系と外界との間で4つの物理変数の相互作用を断ち切った容器に、一定量の物質を閉じこめた場合には、容器の内部と外界の間に物質も温度も圧力も交換がないから、容器内部の体積も変化しない。この容器の場合、物質を閉じこめた瞬間から外界との相互作用は遮断されるが、容器内部は物質を閉じこめた瞬間の攪拌・混乱状態から次第に静止された状態に落ち着くであろう。しかし、この状態は推測するほかないが、熱力学では平衡状態に到達することを主張している。このような系を“孤立系”という。

開放系と孤立系の間には、さまざまな系を設定出来る。ここでは、簡単のために物質が外界との交流を遮断された“閉じた系”について検討する。この場合、温度、圧力および体積を任意の値に特定した機能を付与した容器(系)を設定できる。

等温容器、これは容器内で起こる状態変化を圧力と体積の変化に転化し、常に容器内の温度を一定に保持できるようにした容器(系)である。等圧容器、これは容器内の状態変化を温度と体積変化に転化し常に圧力を一定に保持出来るようにした容器(系)である。等容容器、これは容器内の状態変化を温度と圧力変化に転化し常に容積を一定に保持できるようにした容器(系)である。こうしたさまざまな実用的容器あるいは仮想的系を想定できる。

4. 平衡状態と状態変化の過程について

(4-1) 平衡状態について

“熱力学”という場合、何故か“平衡状態”を扱う学問であると解釈されている。一般に“〇〇熱力学”といった場合、内容は“平衡熱力学”である。平衡熱力学でない場合は“非平衡熱力学”と明記している。

平衡状態は熱力学平衡状態または単に熱平衡ともいう。平衡状態は安定状態と準安定状態とに区別されている。ここでは、物質を構成している多数の粒子の運動を検討することをしない。多数の粒子の運動によって誘引され顕在化する物質の性質を既知の物理変数（状態変数）でもって検討することにする。物質系の性質を表現する因子は、物質系を構成している成分のモル数と温度、圧力、体積である。物質に内在する物質の各成分のモル数と温度、圧力、体積と物質が置かれた環境とによって物質系の状態は表現されるのである。物質系が平衡状態にあらうが無かろうが物質系はこれらの物理変数で表される諸性質を固有しているのである。すなわち、物質系が外界との相互作用により状態を変化している途中であっても、その状態を表現する温度、圧力、体積を保有しているのである。変化の途中の過程では物質系のこれらの変数は系内に一様に分布しているとは言えない。したがって、変化の途中にある物質系を一組の温度、圧力、体積で表現することは出来ない。

如何なる状態にある場合に物質系が平衡状態であると定義するのかということを確認しておくことにする。平衡状態と云った場合に力学平衡（力学的つりあい）、熱平衡（熱的つりあい＝温度の相等性）また、物質に対しても化学平衡とか相平衡等いろいろな平衡状態が定義されている。熱力学平衡ではこれらの平衡状態を全て取り扱うことになる。

平衡状態にある物質系の例を、幾つか列記することにする。一、化学反応の平衡の場合は、生成物と反応物とが互いに逆方向に進行して、生成物と反応物とが等量であって、見かけ上化学反応の進行が静止したような状態。二、二相が共存している平衡の場合、たとえば気液共存平衡の場合は、液体から気化する分子数と気体から凝縮する分子数とが同数で見かけ上液体と気体の量に変化がなく、両相が静止しているような状態。このような可逆的・静止状態にある物質系内では、状態変数はどのように分布しているのだろうか。温度と圧力は、系内一様に分布していて、場所によって変動することはない。物質と体積は状態変数であるが温度と圧力のように、均一に分布しているとか、いないとか言えない。この場合には、密度で判定すれば、密度は系内一様に分布している。気液共存の場合のように、異相が共存して平衡している場合には各相の密度は一様に分布している。物質系が平衡状態にあれば、状態変数は系内に一様に分布しているから、一組の状態変数（質量、温度、圧力、体積または質量、温度、圧力、密度）で系の状態を一意的に表現できる。ただし、異相が共存して平衡状態にある場合には、温度と圧力は系内に一様に分布しているが、密度は各相に固有の値を持って相内に一様に分布していることになる。したがって、平衡状態とは（一）可逆変化の相等性と、（二）状態変数（示強変数：後述）の分布の均一性により確定される状態である。

前述の気体の状態方程式は、一組の状態変数、モル数、温度、圧力、体積で気体の状態を記述していることから、この気体系は平衡状態にあると理解すべきである。一方、物質系が平衡状態になれば、状態変数は系内に任意に分布しているから、状態変数の組は場所によって異なる値を持つ。したがって、系の状態を一組の状態変数で表現することは出来ない。

平衡状態を確認するために、状態変数を用いて説明してきた。ただし、平衡状態を確認する状態変数として、温度と圧力を用いたが、物質の質量と体積は用いなかった。質量と体積から誘導した変数、密度を用いることは出来る。質量と体積の関係は、仮に物質系が平衡状態にあつて物質が系内に均一に分布していたとしても、物質をサンプリングする体積の大小によって質量は変化するから、分布の均一性を評価できないのである。

温度、圧力、質量、体積および密度は何れも状態変数である。温度と圧力と密度は物質系の性質あるいは他者との間の相互作用力を顕わす変数であることから“示強変数”という。一方、質量と体積は物質系の容

量とか大きさを顕わす変数であることから“示量変数”という。

平衡状態を説明する際に、「時間的に状態変数が変化しない状態を平衡状態という」という説明が多いようである。時間は測定上の必要性から採用された変数である。状態変数が物質系内を一様に分布しているか、いないかどうかを確認するため手段として、実験上時間の経過と変数の変動を測定することは、現実的かつ有効な手法である。“熱力学”と“力学”の違いの一つは、時間は力学変数のひとつであるが、熱力学は時間を変数として採用していないことである。したがって、実験上の必要性は認めるとした上で、熱力学的平衡の概念を解説するために時間を用いることは適当な方法ではない。

物質系と外界との間に働く作用力を管理・制御して物質系を平衡状態に保持するための方法について検討する。物質を単一成分であるとすれば、物質系の変数は温度、圧力、体積とモル数の4つである。いま、物質系を密封容器に閉じこめておくとすれば、物質のモル数は変化の前後を通して変化しないから一定の値を維持する（定数として扱える）ので系内の独立した状態変数は温度と圧力と体積の3つになる。さらに、容器の性質に前述の等温容器、等圧容器あるいは等容容器という性質を加えれば、容器内の独立変数は2つに減少することになる。したがって、2つの状態変数の内1つを管理・制御すれば残りの状態変数も決まってしまう。すなわち平衡状態に達することになる。あるいは、変化の過程を可逆変化のごとくに制御、管理することも可能である。

(4-2) 状態変化の過程について

ある状態にある物質系が外界との間での相互作用により別の状態に変化する。この際に生じる状態変化と変化の過程について考えてみる。

物質が密封された容器内に閉じこめられた系について検討する。閉じた系では、系と外界との間に物質の相互作用すなわち物質の移動は起こらない。ある状態にある物質系は、系を移動する熱量と仕事量によって状態を変化させ、やがて終状態に至る。この場合、状態変化にともなって変化する状態変数は温度、圧力および体積の3つである。一、物質系が状態を変化する過程で3つの変数に何ら条件を付与しなければ、変化の過程は任意であって特定できない。二、3つの変数のどれか1つに制限を付ける。この変化の過程は(3-3)で述べた容器(系)の特性と関連する。等温過程：物質系と外界との間の相互作用によって、物質系が始状態から終状態に至るまで等温で変化する過程では系内の変化は圧力と体積に制限される。等温変化の過程を実現するためには前述の等温容器が必要である。次に、等圧過程：物質系が始状態から終状態に至る間等圧で変化する過程では系内の変化は温度と体積に制限される。等圧変化の過程を実現するためには前述の等圧容器が必要である。そして、等容過程：物質系が始状態から終状態に至る間等容で変化する過程では系内の変化は温度と圧力に制限される。等容変化の過程を実現するためには前述の等容容器が必要である。等温過程、等圧過程、等容過程では変化する状態変数は2つであるから、いずれか1つの変数を制御・管理することによって変化の過程を制御・管理することが出来るのである。

物質系の状態が変化する過程として、重要なものは可逆過程である。可逆過程では可逆的に変化する変数と関数とに対して、数学的処理をすることができる。可逆過程とは始状態から終状態に至る間、物質系に無限小の力が作用し続ける過程であると考えればよい。この間物質系は無限小の状態変化をし続けることになる。無限小の変化の連続とは、無限に多数の平衡状態が連続して繋がっているという思考過程である。この場合、物質系は変化の過程を逆行することが出来る。数学的には、温度、圧力、体積で作る変数空間内の変化の軌道に関して全微分可能であるということである。

可逆過程は思考上の理想的過程である。現実にかかる過程は全て不可逆過程である。準静的過程とは実現可能な可逆過程と考えればよい。

5. 熱力学体系について

物質系の存在状態については上述してきた。以後、物質系のことを単に系ということにする。系の状態は外界との間の作用力の交換によって変化するというのも既に述べてきた。ここで外界について明らかにしておきたい。外界とは系が置かれた環境のことであり、系と接触している別の系のことでもある。温度と圧力は系と外界の間で作用力として働くことをすでに指摘してきた。また、密度も作用力としての能力を持つことは予測できるであろう。たとえば、等温、等圧下で適当な隔壁で仕切った容器の一方には密度の小さい食塩水を入れ、他方にはより密度の大きい食塩水を入れた場合、互いに混ざりあっていずれ両方の食塩水の濃度は同じになるということは想像、予測できるであろう。

作用力が、ある状態にある系を外界との作用の交換によって別の状態に変化させることを述べてきた。しかしながら、系の状態を変化させ続ける要因はなにか？また、系の状態を保持・持続させている要因は何か？それはエネルギーである。作用力の効果を温度、圧力、体積ごとにそれぞれの変化量で表すことは出来る。しかし、圧力の作用によって温度も体積も変化するし、温度の作用によって圧力も体積も変化する。したがって、作用力を受けた系の状態変化の効果と作用力との組み合わせにより、系と外界とを移動するエネルギーを分類することにする。力学的エネルギーである仕事量 W と熱エネルギーである熱量 Q および質量的エネルギーである質量的作用量 Z に分類される。

力の作用を受けた系が系の状態を変化させるためには、また系が系の状態を持続させるためにはエネルギーを必要とするのである。系はある状態を持続するのに必要なエネルギーを持っている。系と外界とは力を用いることによって両者の間にエネルギーを交換する。熱力学は系の存在状態とエネルギーとの関係について記述した物理学であるといえる。系と外界との間を移動するエネルギーは作用力の種類によって分類されている。温度を作用力とするエネルギーを熱量または熱エネルギー、圧力を作用力とするエネルギーを仕事量または力学エネルギーという。物質の移動に作用する力を熱力学では、単一物質の場合には熱力学ポテンシャルといい、溶体の場合には化学ポテンシャルという。熱力学ポテンシャルや化学ポテンシャルを作用力とするエネルギーを質量的作用量という。ここでは熱量と仕事量と質量的作用量の3つのエネルギーを紹介しておく。

なお、溶体とは複合成分が溶融した状態の物質である。空気は酸素と窒素その他の成分が解け合った気溶体であり、気体ともいう。水溶液は水に多数の成分が解け合った液溶体であり、液体ともいう。また、合金は種々の成分が解け合った固溶体であり、固体ともいう。熱力学ポテンシャルは系を構成している物質がただ1種類の成分からできている場合の作用力であるから、物質系全体に作用する。化学ポテンシャルは系を構成している物質が複数の成分から構成されている場合の成分に固有の作用力である。化学ポテンシャルは成分A、成分B、成分C、・・・に対してそれぞれ化学ポテンシャルA、化学ポテンシャルB、化学ポテンシャルC、・・・が存在する。

系と外界とに相互に働く作用力、すなわち作用力の交換とは系は外界からの作用力を受け、その効果として系内の状態が変化する。同時に外界は系からの作用力を受け、その効果として外界内部の状態が変化する。例えば、外界の圧力により系は、圧力の効果としてその体積を変化する。同時に系の圧力により外界は、その効果として外界もその体積を変化させることになる。この時、系と外界との間の圧力差による効果として、両系の体積が変化するのであるから、一方が体積を膨張すれば、他方は体積を収縮することになる。外界の圧力と系の体積変化量の積の絶対値は系の圧力と外界の体積変化量の積の絶対値と等しい。そして、これらの積の絶対値は系と外界を移動する仕事量 W に等しい。作用力として温度、熱力学ポテンシャルおよび化学ポテンシャルに関しても同様の関係を表現できる。この関係がいわゆるエネルギー保存の法則である。エネルギー保存の法則については(5-2)熱力学第1法則の項で説明する。

熱力学は4つの法則と新たに内部エネルギーとエントロピーさらに熱力学ポテンシャルと化学ポテンシャルという状態変数を追加して、熱力学体系を構成している。熱力学の法則に数学的作業を行うことにより、

新たな状態変数を誘導することが出来るばかりでなく、さまざまな関数関係式を誘導することが出来る。こうして得られた変数や関係式はさまざまな専門分野で有効に活用されている。

“力学”と“熱力学”の共通点と相違点について、簡単に記述しておく。まず、共通点を示す。力学の場合、2体間の運動は2体間に働く相互の作用力によって生じる。また、2体間にはポテンシャル・エネルギーが存在し、それぞれの物体は運動エネルギーを持っている。この運動エネルギーとポテンシャル・エネルギーの和は保存される。いわゆる力学的エネルギー保存法則である。熱力学の場合、系の状態変化は系と外界との間に働く相互の作用力によって生じる。系と外界の間を熱量、仕事量および質量的作用量なるエネルギーが移動するが、系と外界のエネルギーの総量は保存される。すなわち、エネルギー保存法則である。そして、系内を移動したエネルギーの総量は内部エネルギーの変化量に相等する。一方、相違点を次に示す。力学の場合、温度を変数として採用していない。熱力学の場合、時間を変数として採用していない。熱力学の場合、第2法則には不等式が含まれているという特徴がある。不等号を含む物理学理論というのは極めて特異である。

系と外界との間の相互作用力により、系が作用力による効果を全て系内に蓄積すれば、そのような場合は、熱力学で解析すべきである。一方、作用力による効果が全て系の移動に費やされ、系内に何らの変化を残さない場合は、力学で解析すべきである。これら両者の効果が共存する場合、作用力の全量を解析するためには熱力学と力学を連立させる必要がある。作用力の効果を、系内の変化量と系の位置の変化量とに分けて、どちらかを解析するだけでよければ、熱力学か力学かどちらかを選択すればよい。

熱力学の特徴は2つある。まず、系は系内にエネルギーを保有しており、そのエネルギー量に相当する状態が顕在されている。系は外界との相互作用により状態を変化させる。状態変化の大きさは、相互作用により系と外界との間を移動するエネルギー量によって決まる。このエネルギーの移動量は系内の内部エネルギーの変化量に相当する。実際には多くの場合、系内のエネルギーの変化量（測定量）からエネルギーの移動量を掌握することになる。次に、外界との間で熱エネルギーの交換を受けた系の状態はその状態の変動が収束する方向に自発的に進行する。熱力学第2法則に含まれる不等号は、系の状態変化の先行きを予測することが出来るという特徴を有している。すなわち、このことは状態変化の不可逆性を示すものでもある。一方、不等号に由来する曖昧さは、普遍性を持つと解釈することも出来る。

以下に、熱力学の4つの法則と新たに導入された状態変数等について説明する。

（5-1）熱力学第0法則

この法則は温度を定義した法則である。この法則は熱平衡という物理概念を提示しているともいえる。

物質系Aと物質系Bとが熱平衡にあり、物質系Bと物質系Cとが熱平衡にあれば、物質系Aと物質系Cとは必ず熱平衡にある。すなわち、熱平衡にある2つの物質系の温度は等しいという経験則がある。この経験法則を温度の存在定理として熱力学第0法則という。ただし、熱平衡とは熱の交換が可能ないように連結または接触された2つの物質系AとBの間に熱の移動がおこらず、系内に物質の相変化が現れない場合に、物質系Aと物質系Bは熱平衡（熱的つりあい）にあるという。

（5-2）熱力学第1法則

この法則は2つの内容を含んでいる。

一つは、エネルギー保存の法則である。これは、系と外界のエネルギーの総量は保存されるというものである。すなわち、系と外界とを熱量 Q が移動した場合、系を移動した熱量 Q と外界を移動した熱量 Q の絶対値は等しく、その符号は互いに逆である。系と外界とを仕事量 W が移動した場合、系を移動した仕事量 W と外界を移動した仕事量 W の絶対値は等しく、その符号は互いに逆であり、系と外界とを質量的作用量 Z が移動した場合、系を移動した質量的作用量 Z と外界を移動した質量的作用量 Z の絶対値は等しく、その符号は

互いに逆であるというものである。仕事量 W 、熱量 Q および質量的作用量 Z は、いずれも系と外界との間に働く作用力にもなって、系と外界との間を移動するエネルギーであり、作用力の種類によって W 、 Q 、 Z と分類しているにすぎない。したがって、 W 、 Q 、 Z が系や外界の状態を表現しているわけではなく、系や外界のエネルギー状態を表しているわけでもない。系と外界のエネルギーの状態と W 、 Q 、 Z との関係を以下に示し、そのことからエネルギー保存の法則を明確に表すことが出来るであろう。

いま、系が圧力 P 、温度 T 、熱力学ポテンシャル (G) の状態にあり、外界が圧力 P 、温度 T 、熱力学ポテンシャル (G) の状態にある場合、 P 、 T 、(G) は相互に作用し合い、系と外界はそれらの効果により状態を変化させることになる。

$$\begin{aligned} | P (\text{外界}) \times \Delta V (\text{系}) | &= | (\text{系のエネルギー変化量}) \\ &= | P (\text{系}) \times \Delta V (\text{外界}) | = | (\text{外界のエネルギー変化量}) \end{aligned}$$

であることは、すでに上述した。そして、この絶対値が系と外界を移動した仕事量 W に等しいのである。

$$\begin{aligned} | P (\text{外界}) \times \Delta V (\text{系}) | &= | (\text{系のエネルギー変化量}) \\ &= | P (\text{系}) \times \Delta V (\text{外界}) | = | (\text{外界のエネルギー変化量}) = | W | \end{aligned}$$

である。これは力学における仕事と同じ意味である。同様に、作用力として温度 T および熱力学ポテンシャル (G) に関しても、

$$\begin{aligned} | T (\text{外界}) \times \Delta S (\text{系}) | &= | (\text{系のエネルギー変化量}) \\ &= | T (\text{系}) \times \Delta S (\text{外界}) | = | (\text{外界のエネルギー変化量}) = | Q | \end{aligned}$$

および

$$\begin{aligned} | (G) (\text{外界}) \times \Delta n (\text{系}) | &= | (\text{系のエネルギー変化量}) \\ &= | (G) (\text{系}) \times \Delta n (\text{外界}) | = | (\text{外界のエネルギー変化量}) = | Z | \end{aligned}$$

が成り立つ。ただし、 ΔS はエントロピーの変化量であって、このことについては(5-3)熱力学第2法則で説明する。系および外界内部の状態の変化量 ΔV 、 ΔS 、 Δn は、系と外界のどちらかは増大し、他は減少するのである。このことから、系と外界との間をエネルギー W 、 Q 、 Z が移動した場合、系と外界内部の状態変化にもなって、増大あるいは減少したエネルギーの総量は保存されることが明らかにされる。

二つは、系と外界との間をエネルギーが移動した場合、このとき、系を移動するエネルギー(仕事量、熱量および質量的作用量)の総量は、系の内部エネルギーの変化量に等しいというものである。

系が状態(1)から状態(2)まで変化する間に、外界との相互作用により系を移動する仕事量を W 、熱量を Q 、質量的作用量を Z とする。系の状態量として、新しく内部エネルギー U を定める。 $U(\text{系}, \text{状態}1)$ は系が状態(1)のときに保有しているエネルギー量である。 $U(\text{系}, \text{状態}2)$ は系が状態(2)のときに保有しているエネルギー量である。このことは、系が状態とともに、あるいは状態により定まったエネルギーを保有していることを意味している。

$\Delta U(\text{系})$ は系の内部エネルギーの変化量である。系が外界との相互作用により、状態(1)から状態(2)まで変化する場合、系の内部エネルギーの変化量 $\Delta U(\text{系})$ は

$$\Delta U(\text{系}) = U(\text{系}, \text{状態}2) - U(\text{系}, \text{状態}1)$$

なる関係で表される。この内部エネルギーの変化量 $\Delta U(\text{系})$ は系を移動するエネルギー W と Q と Z とにより生じるのであるから、内部エネルギー変化量 $\Delta U(\text{系})$ と系を移動したエネルギーとの関係は

$$\Delta U(\text{系}) = U(\text{系}, \text{状態}2) - U(\text{系}, \text{状態}1) = W + Q + Z$$

と定義される。

W 、 Q および Z の効果により、系が状態変化をする際、一般に W 、 Q 、 Z は可逆過程を辿らない。しかし、上式の関係は内部エネルギー変化量が系を移動するエネルギーの総和 $W + Q + Z$ に等しいことを示している。

系の内部エネルギーの変化量 $\Delta U(\text{系})$ は、系を移動するエネルギー Q 、 W 、 Z の線形結合により定義されるのだから、これら Q 、 W 、 Z 以外のエネルギーが系を移動した場合、例えば、電気的エネルギーとか磁気的エネルギー等々が系を移動した場合にはこれらのエネルギーを線形的に加算してゆけばよいのである。

(5-3) 熱力学第2法則

この法則は系の状態変化が不可逆であることを主張する。また、この法則は系の状態変化の向きを示唆する法則であるともいえる。エントロピー増大の法則である。

エントロピーの定義

系の状態量としてエントロピー S (系) を定め、エントロピーの変化量 ΔS (系) を定義する。温度 T の状態にある系が、温度 T のままで熱量 Q を可逆的に移動すれば、系は状態 (1)、温度 T (系)、 S (系、状態1) から状態 (2)、温度 T (系)、 S (系、状態2) に変化する。このとき系のエントロピー変化量 ΔS (系) は

$$\Delta S (\text{系}) = S (\text{系、状態2}) - S (\text{系、状態1})$$

の関係で表される。系のエントロピー変化量 ΔS (系) は、系の最初の状態のエントロピー S (系、状態1) と終状態のエントロピー S (系、状態2) とによって定まることを示している。

また、温度 T の系のエントロピー変化量 ΔS (系) は温度 T の系を移動する熱量 Q によって起こるから、温度 T の系のエントロピー変化量 ΔS (系) と熱量 Q との関係は

$$\Delta S (\text{系}) = Q \div T (\text{系})$$

なる式で表される。系のエントロピー変化量 ΔS (系) と系を移動する熱量 Q との関係が上式で定義できるためには、大きな制約が要求される。温度 T の系に熱量 Q が“可逆的”に移動する場合に限って上記の関係式が定義できるのである。それゆえ、系を熱量 Q が“可逆的”に移動する場合、系のエントロピー変化量 ΔS (系) は

$$\Delta S (\text{系}) = S (\text{系、状態2}) - S (\text{系、状態1}) = Q \div T (\text{系})$$

と定義される。

エントロピー増大の法則

温度 T (1) の状態にある系 (1) と有限の温度差がある温度 T (2) の状態にある系 (2) を透熱壁で接触させれば、系 (1) と系 (2) の間を熱量 Q が移動することになる。この熱量 Q の移動は両系の温度差が有限であるから不可逆である。この場合、両系のエントロピー変化量の和は必ず増大する。これがエントロピー増大の法則である。

このような不可逆過程を取り扱う場合には、思想上少しばかりの工夫をする必要がある。2つの系の間には有限な温度差があり、熱の移動は不可逆である。当然、系を移動する熱量も外界を移動する熱量も不可逆である。とすれば系のエントロピーを定義することは出来なくなる。そこで、不可逆的に移動してきた熱量を、系は可逆的に制御しつつ受け入れると仮定するのである。そうすれば、系のエントロピーを定義することができるのである。

温度 T (1)、エントロピー S (1) の状態にある系 (1) と接触している温度 T (2)、エントロピー S (2) の状態にある系 (2) (外界) の間には温度の作用によって熱量 Q が両方の系の間を不可逆的に移動する。ただし、この場合、系 (1) は熱量 Q を可逆的に移動する。また、同時に系 (2) も熱量 Q を可逆的に移動すると仮定するのである。そうすれば、2つの系をそれぞれ可逆的に移動した熱量 Q によって、系 (1) が系 (1、始状態) から系 (1、終状態) へ、また系 (2) が系 (2、始状態) から系 (2、終状態) へ可逆的に変化することになる。こう仮定すれば、系 (1) および系 (2) のエントロピーの変化量を定義することが出来る。

系 (1) のエントロピーの変化量 ΔS (1) は

$$\Delta S (1) = S (1、終状態) - S (1、始状態) = Q \div T (1)$$

であり、系 (2) のエントロピーの変化量 ΔS (2) は

$$\Delta S (2) = S (2、終状態) - S (2、始状態) = Q \div T (2)$$

である。したがって、全系のエントロピー変化の総和は

$$\begin{aligned}\Delta S (\text{全}) &= \Delta S (1) + \Delta S (2) \\ &= \{Q \div T (1)\} - \{Q \div T (2)\} \\ &> 0\end{aligned}$$

となる。マイナス符号は移動した熱量 Q は2つの系のうち必ずどちらか一つの系は熱量 Q を失うからである。このように不可逆過程では全系のエントロピー変化量は必ず増大する。なお、可逆過程では全系のエントロピー変化量はゼロになる。

系が実際に状態を変化する場合、可逆過程は起こり得ない。可逆変化というのは思考上の理想的過程である。

(5-4) 熱力学第3法則

エントロピーの基準値を規定した法則である。物質系のエントロピーの値は絶対温度 $T=0$ でエントロピー $S=0$ になると仮定した。しかし、このことは、絶対零度の状態に到達することは不可能であることを意味する。

以上、4つの熱力学の法則を列記したが、熱力学が平衡を前提条件にした上で成立しているとは考えられない。即ち、熱力学の法則が平衡条件を要請しているわけではない。強いて云えば、熱力学第0法則から、熱平衡という物理的概念は温度の相等性を意味するということが理解されるだけである。ところが“熱力学”と“平衡熱力学”とは等価であると解釈されている。その根拠は次のような理由が考えられる。(一) 物質系に温度、圧力、密度がバラツいて分布している場合、一組の状態変数で物質系を表現することが出来ないし、実験上測定した状態変数の組は場所によってバラバラな値を取るようになる。物質系に存在する微少部分毎に採取される状態変数の組を取り扱うとなると、極めて煩雑になる。しかも、状態を特定しがたいであろう。

(二) 平衡状態にある物質系は状態を一組の状態変数で特定できる。そして、熱力学関数も容易に算出できる。平衡状態が思考上の理想的な状態であろうとも、実在する物質系に対して安定状態は測定可能である。また、研究または思考目的が許容する誤差の範囲を考慮すれば、準安定状態でさえ、熱力学上の変数および関数を平衡状態にある物質系と同等に処理することが出来る。

こうした理由から、現実には熱力学が平衡状態を取り扱っていることの、価値は計り知れない。ただし、このことは熱力学の法則に内在する条件ではない。

(5-5) カルノー・サイクル

カルノー・サイクルと熱力学第1法則すなわちエネルギー保存法則とを連立させることにより、熱力学第2法則が導かれた。エントロピーなる状態変数を定義し、エントロピー増大の法則が誘導された。この結果から熱機関の効率、さらに絶対温度が得られた。ここでは、カルノー・サイクルから誘導された熱力学上極めて重要な結果について列記することと定めることにする。

(5-5-1) 熱力学第2法則、この法則はカルノー・サイクルから誘導された。すなわち、可逆的に系を移動する熱量 Q と系の温度 T (系) とから系のエントロピーの変化量 ΔS (系) を定義した。さらに、カルノーの可逆サイクルではエントロピーは保存されるが、現実のサイクルではエントロピーは増大することを主張した。

(5-5-2) 熱機関の効率、エントロピー増大の法則と同等の関係であるが、効率が1を超えることは無いということが明らかにされた。可逆サイクル、これは理想的機関として思考上あり得るが、実際上は実現不可能である。可逆サイクルの場合に効率は1となる。

(5-5-3) ケルビン温度=絶対温度の定義、これは上述の効率が1になる条件から導かれた結論である。この温度の特徴は物質の相対的關係に基づく温度 (熱力学第0法則) と異なり、物質の性質に無関係に温度を定義しているということである。この絶対温度の普及により、熱力学第0法則が忘れ去られようとしているのかもしれない。しかし、絶対温度という物理的に明確な定義を採用し、熱力学第0法則を廃止することにしたという決定を知らない。

(5-6) 孤立系

孤立系では、外界から孤立された瞬間から、(一)系内のエネルギーに関してエネルギー保存の法則が保証される。(二)系内の物質に関して質量保存の法則が保証される。(三)系内の微小部分間の相互作用により各微小部分間のエントロピー変化量の総和は増大し、いずれ極大値に達する。このとき孤立系内は熱力学平衡状態に到達していることが保証される。(四)また、熱力学第3法則に基づいて求めたエントロピーの値から、平衡状態の到達度を判定することもできる。

孤立系は、熱力学を理解するための思考実験に用いる系として、最も相応しい系である。例えば、自然現象あるいは工学現象を熱力学モデル化する場合、系と外界とに分けると、一般に、外界の状態量を定量化することは出来ない。相互作用を及ぼし合う2つの系を孤立系に閉じ込めてモデル化すれば熱力学条件は全て満足される。熱力学の体系を理解させるためには孤立系の活用を推奨する。

現実的問題として外界の定量化を避けて、自由エネルギー関数が一般に広くに活用されていることは承知している。上述の熱力学ポテンシャルと化学ポテンシャルは自由エネルギーから誘導される関数である。熱力学ポテンシャルと化学ポテンシャルは示強変数であるが、自由エネルギーは示量変数である。ただし、自由エネルギー関数等々の活用については、熱力学の応用分野にゆだねることとする。

(5-7) 熱力学モデル

専門分野ごとの熱力学で取り扱う物質系はそれぞれ固有の特徴を有する。物質系に特有の法則例えば、質量保存則、化学反応式、状態方程式、等々が存在し、これらと熱力学の法則とを連立させると複雑になり、解析は困難になると考えられてきた。しかし、コンピューターが自由に使える現在では、多変数の連立方程式を解くことの煩雑さは、得られる結果の豊穡さに比べれば問題にならない。

熱力学モデルは、対象としている物質系を観る視点によってさまざまなモデルができる。演習問題であろうと、研究対象であろうと、一般には目的は明確である。熱力学モデルの構想は、目的とする現象や変化に限らず、系内の状況、系内で起こりうる状態と状態変化とともにたどる過程等々を想像することから始める。物質系を物理的、化学的に考察したモデルを熱力学関数と物理変数と各種の関数関係式等々から熱力学モデルに組み立てる。熱力学モデルが物理的あるいは化学的のどのような挙動あるいは変化をするか考察する。熱力学モデルが連続的・可逆的に稼働する場合には、このモデルを数学化し、演算することが可能である。一般には、熱力学モデルの連続性と可逆性が両立することは、希である。物理変数とその関数の連続性は認めたととしても、状態が変化すればそれは必ず不可逆な現象である。このような場合には、思想上の工夫とか物理的、化学的仮定あるいはモデルの稼働範囲に制限を付与する等の処置をとることが必要である。

例えば、状態(1)から状態(2)へ変化した場合、変化の前後の状態(1)と状態(2)がどちらも安定状態あるいは準安定状態であると見なされれば、物質系の熱力学変数の変化量は状態(1)が持つ熱力学変数の値と状態(2)が持つ熱力学変数の値との差

$$\Delta U(\text{系}) = U(2) - U(1)$$

$$\Delta S(\text{系}) = S(2) - S(1)$$

であり、簡単に求まる。ところが、状態(1)にある物質系が温度、圧力、体積等の変数を変化させる過程をたどって到達する別の状態(2)を求めようという場合は、温度、圧力、体積等の変数が可逆的に変化しているとみなせる思想上の工夫が必要である。この工夫は単なる想像と期待ではなく、物質系に対し実現性のある物理的、化学的な制御方法を工夫することが重要である。こうした工夫により系は状態を連続的、可逆的に変化することが出来る。

完成された熱力学モデルは数学化することが出来る。シミュレーションを行えば熱力学モデルの任意の状態あるいは状態変化に伴うあらゆる状態に関する全ての物理量を得ることが出来る。計算結果から得られる物理量の内、最も実測しやすく、また最も高い精度で測定できる物理変数を実測するだけで熱力学モデルの

正当性が立証できる。このように、理論と理論を検証するための最小限の実験との組み合わせは、今後の工学における教育・研究が目指すべき一つの目標とすべきであると考えている。

(5-8) 熱力学体系と工学教育

現在、行われている熱力学の講義内容は多くの場合、専門分野に特有の工学現象を取り上げている。化学反応であるとか、燃焼工学であるとか、相変化であるとか、専門分野ごとに例題や演習問題が異なり、それらを解くために必要な熱力学関数や専門分野に特有の法則等々が利用されている。こういう熱力学は高度に専門化されているものである。専門教育としての熱力学を再検討することは重要である。その前に、専門分野で熱力学を担当している教員が専門を越えて互いに熱力学体系について理解を深めるために意見を交換することが望まれる。専門教育としての従来の熱力学講義をする前に、工学部の全学生に共通の内容に集約された熱力学体系を主として言葉で、数学に頼らないで講義することを提案する。

工学の基礎教育として熱力学体系を主として言葉で解説し、熱力学の物理学的意味と概念を理解させる講義の必要性を強調したい。その理由の幾つかを列記する。

(一) 熱力学は、多くの人達によって作り上げられてきた理論である。力学はニュートンという一人の天才によって構成された論理体系である。このことは、熱力学の体系に曖昧さを内包させているとともに、熱力学の応用範囲を多方面に拡大している要因であるとも考えられる。また、熱力学の法則に不等号を含むために、感覚的不確かさが存在しているように思われる。こうした理由からであろうと考えられることとして、熱力学を解説している言語表現には少し、あるいは微妙に違いがある。こうした理由からか、熱力学を物理学体系として工学部学生共通に講義する教育プログラムは出来ていない。このことは初学者にとって大きな壁となっている。その結果、熱力学は難解な物理学理論であるという拒絶感が定着することになっている。

(二) 熱力学はその活用能力の豊富さ故、種々の分野での応用が進歩・発展している。そのため、専門分野ごとに行われる個々の熱力学は別の理論体系であると思われるような疑問が生じている。分野の異なる熱力学の専門家が交流することは希である。専門分野の異なる教官が協力して、工学部学生に必修の基礎教育課目として、熱力学体系の講義を作り上げることを期待する。

(三) 工学部に入学してくる学生の中には、高等学校で物理を履修していない学生も少なからずいる。また、微分・積分を処理できない学生は相当いる。その上、微分方程式は入学後に履修する。熱力学演習の解法に使われる数学は主として微分方程式を解くことである。物理学の意味・概念を言葉だけで解説することには困難さと限界があることは承知している。一方、例題、演習問題を解くことによって、主として数学解を求めることによって物理学の意味、概念が自ずと理解できるようになるという従来の教育方針は既に破綻していると観なければならぬ。

(四) こうした熱力学の特徴と従来の教育手法および学生が置かれている現在の環境を教員は熟考すべきである。専門分野ごとの熱力学の難解さについて、教員は難解さの原因を調べる必要がある。

(五) 熱力学体系の理解のための、一つの提案を次にのべる。上述の熱力学体系を理解するための演習問題として、五感で関知できるような例題がよい。この際、数学を極力用いないようにする。言葉で表現することが重要である。生活上知り得る自然現象や工学現象を例に取り、これらの現象を熱力学体系に投影できるように現象を解析し、再び構築する。構想されるモデルは現象に対する視点によって、幾種類も構想される。講義に興味を覚える学生が増えるにしたがって多数のモデルが提案されるであろう。思考的モデルを物理変数や熱力学関数等を用いて熱力学モデルに組み立てる。こういう熱力学を基礎教育として工学部の全学生に講義することが望ましい。

6 結言

熱力学の体系について、簡単に記述した。

熱力学は工学部に共通の基礎学問の一つである。専門分野ごとに行われている応用熱力学を修得する前に、工学部の全学生が熱力学に関して共通の内容を持つ講義を受講すべきである。

熱力学の初学者に対する共通基礎教育として、(一) 言葉による熱力学体系の解説と、(二) 言葉による熱力学モデルの構想とを組み合わせた講義を提案した。