

S2020305

機械土木電気融合学科における熱力学教育のスタートアップ

金川 哲也^{*1}, 金子 暁子¹, 阿部 豊²

An Approach for Thermodynamics Education at Integrated Department of Mechanical, Civil and Electrical Engineering

Tetsuya KANAGAWA ^{*1}, Akiko KANEKO¹ and Yutaka ABE²

^{*1} Dept. of Engineering Mechanics and Energy, University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba 305-8573, Japan

From the viewpoint of beginning teacher, on the basis of opinions from students, some improvement of lecture and education of thermodynamics at College of Engineering Systems, University of Tsukuba, as an integrated department of mechanical, civil, architectural, and electrical engineering, is described. Especially, the importance of concept of conservation law, the necessity of kinetic theory of gases in thermodynamics, and the significance of the set of generic equations including the Maxwell relation toward civil and architectural engineering, are discussed.

Key Words : Thermodynamics, Lecture, Education, Mechanical Engineering, Civil Engineering

1. はじめに

筑波大学理工学群（学部）工学システム学類（学科）は、従来型の機械工学科や土木工学科などといった縦割りの学科ではなく、機械・電気・情報・土木・建築などを包含する総合学科であり、いわば「理工学部工学科」といってよい。それゆえ、本学科において著者が担当している2年次通年必修科目の熱力学は、機械工学の四力学の一つとしての工業熱力学⁽¹⁾とは合致しない側面が多い。むしろ、熱力学は、力学（古典力学）および電磁気学と並ぶ必修基礎物理学に位置づけられており⁽²⁾、一方で材料力学や流体力学などの機械系の四力学は選択科目である。講義内容は、春学期（2単位）に基礎としての熱力学第一法則および第二法則を、秋学期（1単位）に熱力学の一般関係式および熱平衡・相平衡条件などの応用事項を講述している⁽²⁾。後者の難易度は低くはなく、これらを機械系学科における必修の工業熱力学の範囲に含める例も、著者の調査の限り稀であるように見受けられる。伝統的な工業熱力学を教えるわけにはゆかない一方で、学科の性質上、基礎物理学的な側面⁽³⁾ばかりを強調するわけにもゆかない。以上の意味で、学生にとってのウェイトは勿論のこと、教員の責任も大きな講義に属する。

第一著者は2014年度より、それまで第二著者と第三著者が担当してきた熱力学の講義を分担担当することとなり、1年半をかけて相当量の工夫を行ってきた。なぜならば、機械工学科の出身である第一著者には、工業熱力学の知識しか持ちあわせておらず、さらには、総合学科で学ぶ学生の思考や興味も読めない点が多かったからである。事実、本学科での熱力学教育にはさまざまな困難を感じており、試行錯誤の中にある現状である。たとえば、概ね半数の学生が土木・建築志向であることから、「自分には熱力学は必要がなさそうだ」と誤解する者も一定数居るように見受けられる。たとえば機械工学科において、「〇〇学が嫌い、苦手、興味がない」とは、よく聞く言葉であるが、「必要がない」とは、科目によらず珍しい意見なのではないだろうか。このような先入観に陥った学生に、「基礎科目だから」「いつか役立つ」「訓練」などと諭しても、能動的に学習する学生は多くはないだろう。融合学科で求められる熱力学教育とは、どのようなものか。

^{*1} 正員, 筑波大学システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

^{*2} 正員, フェロー, 筑波大学システム情報系

E-mail: kanagawa@kz.tsukuba.ac.jp

本講義以外にも、著者が教育担当する大学院学生への研究指導をとおして、本学の学生と触れあうにつれ、率直な者が多く、たとえば上記のような批判的意見も包み隠さず相当量を述べてくれることがわかった。その意味で、意見のほとんどは本音であるとみなしている。そこで、1年半を掛けて学生の声を可能な限り引き出す目的で、アンケートなどを実施し、それを基に、さまざまな講義改善の取り組みを行ってきた。本稿では、分野横断型学科における熱力学教育の位置づけと講述法を考察し、機械系で行うべき（工業）熱力学教育への示唆をも与えることを目的とする。

2. はじめの一步

2・1 保存法則と熱力学第一法則

「熱力学ははじめの一手が思い浮かばない」。これが、第一著者が初年度に最も多く聞いた声である。たしかに思い浮かべてみると、質点や剛体の力学では、あれこれ考えずとも、まずは、運動方程式（Newtonの運動の第二法則）を立てればよい。運動方程式が解けないこと、あるいは系の複雑さゆえに適切に立てられないことはあっても、はじめの一手が思い浮かばないことは稀であろう。公式・解法暗記に走る者は勿論のこと、たとえ理解していても整理されていなければ、この種の苦手意識を抱くのは自然なことと考えられる。熱力学の「道具」が理解できていない、見いだせていないのは、学生だけの責任ではなく、そもそも、熱力学では、道具が何かがわかりづらいのである。

さて、熱力学第一法則こそが「道具」に他ならないといえるが、これに気づくことは容易とは考えない。事実、成書でもそのような述べ方はあまり見受けられない。理論ばかりあるいは演習問題ばかりという例が多く、さらには、熱力学第一法則、熱力学第二法則といった章立てゆえに、まるで、第一法則と第二法則が類義法則であるかのような印象を抱かせ、それに留まらず、「熱力学第二法則という章では、熱力学第一法則を用いないのか」という先入観をも招くといえよう。

上述の声を受けて、本年度は「力学の運動方程式（運動量保存則）の熱力学バージョンが熱力学第一法則（内部エネルギー保存則）であり、第一法則さえ立てれば何とかなる。立てねば、エネルギーの不自然な生成や消滅を許す」などと、保存法則の観点を強調しながら、道具を述べた。一見遠い位置にありそうな力学との類似性を意識したのである。Legendre変換をとおして導かれる諸式もその物理的意味は第一法則（保存則）に他ならないことや、可逆エントロピー変化を与える公式など、状態方程式を除いたほぼ全ての公式が第一法則を起点におくことをも、実際に示した。ついでながら、「第0法則は前提、第2法則は理想論」と例え、道具たる第一法則と切り離れた。結果、「熱力学は公式が多い先入観だったが、第一法則と少しの知識があれば、全公式は数行で導けることに気づけた」なる感想を得た。

2・2 諸量の現れ方の特異性

熱力学の特徴のひとつに、諸量のほぼ全て（圧力や温度などの状態変数、比熱、仕事と熱など）が、序盤で一挙に登場する点が挙げられる。これは、他の力学との顕著な差異あるいは特異性ともいえ、学ぶ側が混乱することは当たり前である。しかしながら、エントロピー、自由エネルギー、化学ポテンシャルなどの発展的な状態変数であっても、少なくともその数理的取り扱い、圧力・体積・温度といった基礎的な状態変数の組み合わせという観点にたてば、一切の困難はない。したがって、基礎的な状態変数をおさえておくことが重要極まりない。しかしながら、このような観点から述べている類書も見受けられず、むしろ、整理できていない状態で多数の計算問題を解かせる書物が多いので（とくに工業熱力学寄りの場合は）、学生にとっては、「記号が、次から次へと、たくさん出て来る科目」という印象を拭いきれず、暗記するのが手っ取り早いという対処法を導くようである。

実際、第一著者も初年度にこの点に失敗したため、これを回避する意味で、序盤（熱力学第一法則の関連事項）の講述時には、いわゆる計算問題の一切を避けて、公式の導出を中心とした諸概念の定着、諸量の整理のみに焦点を絞った。その後、徐々に計算問題を織り交ぜてゆくことで、遥かに習熟度が向上したし、理論と演算のバランスも取れたように考えている。「知識の暗記ではなく、概念の理解だけに努めた結果、計算問題は特段の対策などなくとも自然と解けるようになっていた」といった感想が返っただけでなく、平均点も相当に向上した。

3. 分子運動論の是非と内容の精査

初回講義で再強調していることに、「熱力学とは、原子や分子（いわば平社員）を気にせずに、いわば社長の立場で、巨視的に（遠目に）系を眺める」が挙げられる。その次回あたりに、圧力や内部エネルギーの導入と関連して気体分子運動論を講述することが普通であろうし、著者らも従来はそうしていたが、第一著者が2年目となる本年度は、思い切って分子運動論を割愛した。理由は以下のとおりである：

- (1) 分子など気にせず巨視的に眺めると述べた直後に細部を眺めると言えば、学生は当然混乱するではないか。
- (2) そもそも、分子運動論は、熱力学を学び終えた後に、統計力学の守備範囲として学ぶべきものといえる。

実際、著者が「内部エネルギーの正体は、本講義では迫ることは不可能である」と、科目の位置付けを明言したこともあってか、これに対する異論や疑問の声は聞こえず、むしろ、「熱力学がとる立場がわかりやすかった」なる声が聞こえるようになった。分子運動論に限らず、「公式 A は証明も含め詳述するが、公式 B は証明せずに用いる」と位置付けを明確にすれば、学生からはさほど異論はない。100%教えられないのならば、思い切って割愛することも手ではなかろうか。なお、三宅⁹⁾にならい、通年講義である本講義の最終回に分子運動論を取り入れて、「実はこれまで触れなかった原子や分子に迫ると・・・」と述べることを計画している。

これ以外にも、著者らは学内において度重なる FD を経て、他科目との重複を調査し、講義内容の飽和や講義時間数などをも勘案して、徐々に内容を削減している。分子運動論以外にも、たとえば、工業仕事、混合気体、開いた系、サイクル論などを削除したが、それは、これら熱力学の応用事項を扱う講義「熱工学」が別に用意されているからでもある。内容の削減は、決して「ゆとり」を目指しているのではなく、重要度の高い単元を深く掘り下げつつ、その基礎力を全員に確実に定着させるという、指針の明確化によるものである。

なお、本節は、熱・統計力学における気体分子運動論の重要性を否定するものではないことを強調しておく。

4. 受講生とのコミュニケーション

自ら知識を獲得する場である大学の講義において、これを重視するかは賛否があろう。しかしながら、著者はこれを最重視している。学部初年次学生にとって、必ずしも身近な存在とはいええない教員との距離を縮めることで、意欲や理解度は確実に向上するからである。具体的には、つぎの2点に集約される：

4・1 講義中のアンケート

受講生が講義・教員を評価する、いわゆる「授業評価アンケート」は、講義の最終回に実施することがふつうである。学生の立場に立てば、最終回にいくら不満や建設的意見を述べたとしても、自身へのメリットはなく、フィードバックされるのは、次年度以降の受講生である。この意味で、学生の真の意見を引き出し、講義改善を「速やかに」行うためには、講義進行中にアンケートを取る以外に道はない。

そこで、2014年度の春学期の講義を踏まえて、秋学期の初回にアンケートを実施した。質問内容と回答結果は、紙数の都合上割愛するが、どれだけ書いても加点は一律なのだが、相当量の回答量が特徴であった。そのため、この取り組みは継続中である（詳細は次報で述べる）。序論でも述べたように、本学科は、機械・電気・土木・建築などの総合学科であり、その性質上、学生の思考は極めて多様であり、熱力学に興味を持たない学生が居ることもごく自然なことであるので、そもそもの興味から調査することは重要極まりない。

4・2 答案用紙と対面でのコミュニケーション

アンケート以外にも、著者は、毎回の演習などの答案をとおして、コミュニケーションを図っている。感想と質問を書かせて、良い質問には、回答者匿名で学生クラウドを利用して公表し、学生同士で疑問点が共有できるようにした。実際、同じ疑問点を複数名が抱えているケースは多い。これによって、学生が抱える疑問点、教員が講述不十分であった箇所を把握できるだけでなく、学生からの建設的な意見を「速やかに」講義改善に取り入れることができた。小テストを行う際には、どんなに小さな問題でも講評を配布し、得点によらず、全学生への個別アドバイスを行っている。これらの取り組みの導入前後の平均点などから判断するに、取り組みは好評のようであり、学生の意欲および学力向上につながっているものと推測する。

さて、直接質問に来ない学生の方が、むしろ答案用紙上で相当量の分量で回答するという、興味深い傾向があった。つまりは、対面よりも、答案用紙やインターネット越しのコミュニケーションを好む傾向を見出せた。熱力学の場合、多数の数式変形を抱えるような疑問点が多いがゆえに、教員としては、対面・対話を望むところだが、学生の学び方がデジタル化しつつある現在、どんどん変化してゆく学生にあわせることも重要と考える。

5. 理想気体の是非と総合学科における熱力学教育

理想気体の概念・仮定の重要性は論を待たない。機械系の工業熱力学⁽¹⁾においても、理想気体は基礎的かつ欠かせない例示であり、また、気体の状態方程式を使わない試験出題は困難を極める。液体や固体の状態方程式を学部初年次生に講述することは無茶である。

しかしながら、本学科のように受講生の半数が建築・土木志向である総合学科においても、それでよいのか。「熱力学＝気体？＝建築に不要？」と刷り込ませてはならないのである。たとえばエンジンやタービンなどといった魅力的な工学応用例を強調しすぎると、機械志向以外の学生の興味を削ぐという、工業熱力学ではありえない矛盾が生ずる。言うまでもなく、基礎物理学としての熱力学に偏重することも、工学部の性質上好ましくない。実際、著者の講義では、物理学系の熱力学で主流とされるモル数は扱わない。あくまでも、構造物設計やエネルギー問題解決の基盤となる巨視的熱力学の学力涵養を目指すからである。

土木・建築系における熱力学の素人である第一著者にとっては、試行錯誤を重ねる以外に道はない現状ではあるが、力を注いでいる点の一つは、Maxwell の関係式を含む熱力学の一般関係式である。ここでは、既習の理想気体という仮定を排除し、固体・液体をも包含する数式群の整備という観点を強調している。Maxwell の関係式は、わかりにくいエントロピーを消去し、わかりやすい圧力・温度に置き換えてくれるための道具と述べている。様々な一般関係式において、簡単な一例として、理想気体への帰結を体感させている。

トップダウン型で、まず、最も一般的な数式群を導出しておく。あとは、必要に迫られた際に、自身（機械・土木・電気など）が着目する系（固体・液体・気体）の状態方程式を代入すればよい。このような考え方そして学び方こそが、総合学科における熱力学教育のあるべき姿ではないかと考えている。一般関係式は、抽象的かつ難解な単元であり、初学者は偏微分のパズルと勘違いしかねないが、学生の満足度も習熟度も高いものであった。中でも、土木・建築志向の学生の興味を引けた点が特徴であった。

6. おわりに

熱力学のような基礎科目では、講義法も評価法も固定されている。すなわち、板書やスライドでの講義の後に、試験やレポートでの成績評価を行う方式である。受講生も多く、研究指導や実験・実習科目に比較して、思い切った教育改革は困難ではないだろうか。

ここで述べた講義改善の結果、遅刻・私語・居眠りは自ずと目につかなくなり、試験の得点も大幅に向上したが、本稿の講義改善は、単なるスタートアップにすぎない。第一著者が学生であった10年前と比較しても、学生の雰囲気は相当に変わっているように感じる。学生が変わる限り、それを正確かつ迅速に察知すべきである。学生の学力のみならず性格などをも把握して、教員が学生1人1人を理解することは勿論であるが、何より、学生が教員に近づきやすい雰囲気づくりこそが、講義設計・改善の基本方針と考える。

本稿は、著者が担当する、筑波大学理工学群工学システム学類開講科目「熱力学 I」「熱力学 II」の講義内容⁽²⁾に基づくものであり、本稿の礎となる声を述べた同科目の受講生に謝意を表する。

文 献

- (1) たとえば、JSME 機械工学シリーズ熱力学 (日本機械学会編)。
- (2) <https://kdb.tsukuba.ac.jp/syllabi/2015/FG40171/jpn/0/> および <https://kdb.tsukuba.ac.jp/syllabi/2015/FG40181/jpn/0/>
- (3) 三宅哲, 熱力学 (裳華房)。