

解 説

大学の教養・基礎教育としての熱力学 - 群馬大学で基礎および総合科目を担当した経験から -

滝沢俊治

(受取日: 2004年9月29日, 受理日: 2004年12月20日)

Improvements of Teaching Method of Thermodynamics in the Undergraduate Physics Lessons at Gunma University

Toshiharu Takizawa

(Received September 29, 2004; Accepted December 20, 2004)

Oral tests have been effectively introduced in the lessons of undergraduate experimental physics at Gunma University. We show questions and answers actually exchanged with students concerning the basic concepts of thermodynamics, and show student's weak point in their understanding of energy and entropy. Considering the actual ability of students, we have improved our lecture courses by introducing demonstration experiments. Those demonstrations are powerful for students to acquire right concept of thermodynamics, when suitable explanations concerning the history of thermodynamics are given at the same time. Finally, we emphasize the importance of viewpoint based on the thermodynamic concepts in future university education.

1. はじめに

私が担当してきた大学1~2年次向けの基礎物理実験では、力学から原子物理学にわたるさまざまな課題が用意されていますが、熱測定を実験テーマとしているものに、「ジュール熱による熱の仕事等量の測定」、「物体の落下による熱の仕事等量の測定」、「固体の比熱測定」があります。

私たちの物理実験指導法については、「群馬大学方式」と名づけて物理学会や「日・中大学物理実験の交流会議」等で発表してきました。¹⁻³⁾ 本稿ではまず、上記の熱に関する実験課題を例にとり、群馬大学方式の授業を紹介することによって物理教育の抱えている問題点を浮き彫りにし、続いて、講義での私の工夫を紹介しながら大学における熱力学教育の重要性とそのあり方について考えてみたいと思います。

2. 群馬大学方式の学生物理実験

2.1 従来の学生物理実験方式の問題点

多くの大学で理系の学生を対象にして行われている学生物理実験の方法は、学生になるべく多くの分野の物理的測定に触れさせて、正しい計測の方法を身につけさせることに力点が置かれているように見えます。しかし現在では、この方法では学生に対して新しい物理現象を理解したという満足感を与えることはできず、疲労感を与えるだけに終わってしまうことのほうが多いのではないのでしょうか。

多くの実験技術を取得させることを学生物理実験の主目的とすると、学生の作業は、実験手引書をあたかも家電製品のマニュアルのように利用して実験データを取り手引書にあるようなレポートを作成することに終始してしまい、その結果、学生は彼に与えられた課題の本質を理解するこ

となく終わってしまう場合が多いのです。

残念ながら、現在大学に入学してくる学生の多くは、理工系であっても、高校までの授業で物理実験をやった経験がありません。そのため物理といえば、公式を暗記して問題を解く科目だと思っている学生がほとんどです。

彼らの暗記している物理の公式がどのような時代背景の中で生まれ、どのような実験によって支えられているかというようなことは、当面の受験対策には関係がないことだったのです。その結果、受験対策としての物理の知識は、受験を離れると、彼らをとりまく自然現象を物理的に把握するためには何の役にも立ちません。

そのような学生に対して大学の低学年で行う物理実験が教育効果をあげるためには、それにふさわしい方法を編み出さなければなりません。従来の実験の授業方法は、物理学の基本的な学問方法を自覚した意欲のある学生にとっては効果的な授業形態ではあっても、現在大学に入学してくるほとんどの学生にとっては、効果的な授業形態ではないのです。

2.2 群馬大学方式

私たちは、学生実験は講義を補完する科目としてではなく、それ自体を独立した物理の科目として位置づけ、それにふさわしい指導を行っています。従来の方では、学生には1授業時間（あるいは2授業時間）毎に異なる実験課題が与えられますから、その課題の物理的内容は時間外に学習する以外にありません。教師はそれを期待するのですが、学生は教師の期待通りには自主学習をしませんし、また時間内には学生の作業があるため、その学習結果をチェックする時間的余裕もありません。

そこで、私たちは発想を変えて、「物理実験」という授業形態を最大限に生かした独自の物理教育を始めました。その方法というのは、学生実験を実験技術修得の場としてではなく、物理学の方法を体験する場として位置づけることでした。

2.3 口頭試問の実際

例えばジュール熱による熱の仕事等量の測定の実験課題を与えられた学生は、まずこの実験の背景をなす熱と仕事の物理的内容を調べ、その学習した結果を、面接による口頭試問で答えなければなりません。面接は共同して実験を行う2人1組の学生に対して行いますが、この面接は学生にとってかなりハードルの高いものとなります。実験の教科書には必要最小限のことしか書かれていませんから、それだけを頼りにして口頭試問に望む学生にとって、教師から出される質問は意表をつくものとなります。

教師「はじめに、実験の目的を説明してください」

学生「水熱量計中に電熱を発生させ、熱の仕事等量を測定することです。」（実は、教科書に書かれている目的を書き写しただけのものを読んでいる。）

教師「それでは、熱の仕事等量とは何か説明してください。」

学生「・・・・・・」

（学生の用いた実験書には「の求め方は書いてあるが、その意味の説明はないので、実験書だけが頼りの学生にとってはここでお手上げになる場合が多い。そのような時は、実験室に備えてある物理の教科書によって調べるように指示する。その後の面接でのやり取りの一例を紹介すると、）

教師「分かりましたか？」

学生「はい。熱は仕事に換算するとどのくらいになるかということです。」

教師「そうですね。でも、熱と仕事は大変違ったもののような感じがしますね。それがどうして換算できるのですか？」

学生「・・・・・・」

教師「それでは、そのことをひとまず置くことにして、換算するためには、それぞれの量を測らなければいけませんね。まず、熱はどのようにして測るのですか？」

学生「・・・・・・」

教師「それも後で調べることにして、仕事はどのようにして測るか答えてください。」

学生「・・・・・・」

教師「仕事はどのように定義されているか思い出すと、その測り方がわかるのではないのでしょうか。先ず仕事の定義を言ってみてください。」

学生（2人で小声で話し合った後、1人の学生が）「何かと何かを掛けたものでした。確か質量と、・・・距離だったように思います。」

教師「・・・・・・」

このような口頭試問をしてみると、従来の方では学生実験を行うのが如何にむなしいことが実感できます。

上記のやり取りは作り話ではなく、実際に今年（2004年度）の前期の医学部2年次のクラスで、私と学生との間で交わされた会話です。彼らは受験勉強では「秀才」で通っていた能力の持ち主だったのではないかと思います。さらにまた、このクラスの学生には大学の1年次に必修の物理学の講義があって、彼らはその単位を取得しているのですから、講義での単位取得とは何を意味するかということも考えさせられてしまいます。

このような第1段階の口頭試問をパスした学生グループは実験許可の印をもらって測定に入り、結果を整理してレポートを作成しますが、最後に第2段階の口頭試問を受け

なければならなりません。この段階の口頭試問では結果の考察が主なやり取りになります。

医学部の場合、42～3人の1授業クラスに対して2名の教員が配置されているので（以前は50人の学生に対して3名の教員が担当していましたが、その後全学委員会で担当教員数が削減されました）、なるべく多面的なものの見方に触れさせるため、通常この第2段階の面接は、第1段階目に面接を受けた教員とは別の教員のところに行くように指導しています。

上記のクラスでは、別の学生グループに対する「物体の落下による熱の仕事等量の測定」の第2段階の面接の折、私の質問の意図がまったく伝わらないような学生の反応に唖然としてしまいました。

彼らの提出したレポートを見ると、結果が $11 \text{ (J cal}^{-1})$ と書かれているので、「どうしてこのような結果が出てきたのでしょうか？」と聞いてみると、逆に二人の学生は「どうしてそんなことを聞かれるのか分からない」といった様子なのです。そこで「熱の仕事等量として知られている値を調べてあるでしょうか？」と聞いてみると、二人とも答えられないのです。そこで、熱と仕事の関係や熱の仕事等量の意味を聞いてみると、まったく分かっていないのです。これには私も驚いてしまい、「良くこんなことで実験許可をもらったね」というと、「質問されたのは分子運動のことだけでしたから、そのことを調べました。」と答えて平然としているのです。実は、口頭試問が殺到するとき、教師はある実験グループだけに時間をかけるわけにもいけないので、学生の学習が不十分とは判っていても実験許可をだしてしまうこともあるのです。

他グループの面接が詰まっていなかったのも、あまりやる気のないこの学生グループにとっては幸か不幸か計りかねましたが、そのままにするわけにはいけないので、特別に時間をとって熱と仕事の関係についての講義をし、この測定では熱の仕事等量が大きくてきやすいわけを説明して、再度実験してみるようすすめました。

この実験では、長さ1メートルほどの筒の底に厚さが数センチメートルになるように金属チップをいれ、この筒を数十回ひっくり返した後、金属チップの温度上昇を測って熱の仕事等量を求めます。金属チップの温度上昇は、筒の底から差し込んだ熱電対式のデジタル温度計（分解能 0.1 ）で測定するのですが、センサーの先端を差し込みすぎると、感温部が金属チップに当たらず空気中に出てしまいますから、ほとんど温度が上がらず、正しい測定ができません。また、金属チップに発生した熱は筒の壁に逃げますから、これも熱の仕事等量の測定値を大きい値にします。

残念ならがこのグループは再度実験を行うことなく、私の説明したことをそのまま考察に付け加えるだけでこの実

験テーマを終了させてしまいました。再実験するかどうかの判断は学生に任せためですが、後味の悪い結果に終わりました。教師の価値観と異なる価値観をもった学生から「やる気」を引き出すのは難しいものです。

2.4 生き生きした面接授業を行なうための条件

こうした物理実験の授業形態は1970年代に群馬大学教養部の物理教室で始め、現在では担当教員の多くは入れ替わりましたが、教養部廃止後の現在まで続いています。この形態の授業が成功するための条件として次のことがあげられます。

最低でも受講生20人に対して1人の教員が配置されることが望ましい。40～50人のクラスに対しては3人の教員が配置されることが望ましい。手間ひまを惜しまず学生と質疑応答する担当教員の意気込み。実験担当教員の間の日常的な経験の交流。実験室と実験装置を管理する有能な職員

の存在。これらのことを保証する大学の責任体制の確立。群馬大学方式の物理実験に対する学生の受け止め方については、はじめに書いたように、すでにいろいろなところで紹介してきました。この方式の物理実験の授業については、「充実した時間だった。」「自主的に学習に取り組んだ。」「自分で考えるということの大切さを知った。」などとして、受講生の肯定的評価を得ています。

残念なことに、群馬大学では教養部の廃止に伴ってこれらの条件はかなり弱められてしまいました。現在は、個々の担当教員の努力によって、辛うじてこの方式の授業が続けられていますが、大学の独立法人化の下で非常勤教員の総数の削減も検討されるなど、大変困難な状況にあります。

しかし、最近の受講生の資質と従来の一般物理の学生実験の方式の間であって矛盾を感じている物理実験の担当教員は多いのではないのでしょうか。そうした方々に、学生実験を思い切ってこの方式に切り替えるよう検討してほしいと思います。また理工系の専門学部の諸学科は、基礎物理実験をそれらの学科で必要となる技術習得の場とは位置づけず、物理実験担当者の新たな試みを支援すべきではないかと考えます。

3. 物理学の講義から - 熱力学の授業での工夫⁴⁾

3.1 教卓実験を取り入れた授業

私の物理学の講義では、上記のような口頭試問でのやり取りの経験を生かし、学生の要求に応えるような授業を進めるよう心がけてきました。学生が嫌ったり苦手としたりしている「物理」は、暗記本位の「受験物理」です。しかし、物理学は人間の好奇心にその源を発している学問ですから面白くないはずはありません。要は、分けの分からない「公式」なるものを学生の頭越しに押し付けないことで

す。そのことは、熱力学の講義ではとりわけ重要です。

「熱」に関する物理学の授業を進めるに当たって、教師が最初から「熱と仕事の同等性」を前提にして話を進めたとすると、そこからは何の感動も生まれません。これから「熱」について学ぼうとする学生が最も知りたいのは、そもそも熱とは何かという謎なのです。謎解きの面白さは正解を知らないで推理する過程そのものの中にありますから、科学者が「熱とは何か」という謎に迫った歴史をたどらなければ熱力学の面白さを十分には味わえないのではないのでしょうか。

ここで「歴史をたどる」というのは、科学者たちの思考とその結果行われた実験のあとをたどってみるということであり、科学史の史実を正確に教えるということではありません。したがって、授業ではいろいろ工夫してみることが必要になります。私の場合には、科学者たちの思考のあとを再現するようなデモンストレーションや教卓実験を取り入れることによって、学生の好奇心を引き出すことを試みてきました。

3.2 温度と熱の測定

熱の研究の歴史は温度を測ることから始まりました。したがって、熱の学習の出発点もそこに置くのが最も自然のように思います。上部を膨らませたガラス管を水槽に立てたガリレオ式温度計を見せることによって学生の好奇心を刺激したあとで、この空気の膨張を利用した温度計が液体温度計に取って代わられた歴史の話をします。次に、現在理科の実験等で用いられている棒状のアルコール温度計を教室に回して、等間隔にはなっていない温度目盛りの付け方に注意を向けさせた後、棒状の水銀温度計を回してその目盛りはほぼ等間隔に目盛られていることを見せてから、気体の熱膨張の話に入るようにしています。

熱に関しては、学生に協力してもらって、授業中に次のような教卓実験を試みたことがあります。魔法瓶、ピーカー、お湯と水、鉄の塊、小型の上皿電子天秤、デジタル式の熱電対温度計などを教室に持ち込んで教卓実験を行いました。天秤でこの鉄ブロックの重さを測定した後、魔法瓶中で高温に保たれているお湯の中に入れておきます。もう一つの魔法瓶の中には室温の水を入れ、その量を精密に測っておきます。お湯と水の温度をデジタル温度計で測ったあと高温の鉄ブロックを水の入った魔法瓶に移し、その上昇した水温を測定して、計算で予測した値と比較してみました。

3.3 熱の発生

熱学の歴史に於ける最大のドラマは「熱と仕事の等価性」の発見、すなわち、エネルギー保存則の確立でした。学生

に対して「熱とは何か」という問いに対する生き生きした解答を与えるためにも、やはりいくつかのデモンストレーションが有効です。

私の授業では、黒板に吊るした振子の振動が減衰するのを見せて、実際の系では力学的エネルギーが保存されないことを示したあとで、圧縮発火のデモンストレーションを行うことにしています。このデモンストレーションをご存知の方は多いと思いますが、肉厚のガラス管内の空気を、その管に差し込んだ気密性のピストンによって急速に圧縮して発熱させ、管内に入れてある紙片を燃やすというものです。圧縮するだけで紙が燃えるのをみた学生は驚きの声を上げます。圧縮するという一見熱とは関係ない行為から、物が燃えるという熱的な現象が引き出されたのですから、驚いて当たり前です。しかしここで、仕事が熱を生み出すのは特殊な現象ではないことへの理解を深めさせるため、マッチを擦って火をつけてみせ、この発火のきっかけも同じであることに気付かせます。

力学的仕事によって熱が発生する過程は、巨視的な運動が微視的運動に転化する過程です。次に、この過程を直感的には把握するのに役立つ手軽なデモンストレーションを紹介します。用意するのはプラスチック製の透明なフィルムケースとそこに詰める米粒、それにティッシュ・ペーパー少々だけです。

一つのフィルムケースには米粒を隙間なく詰め、もう一つには少々隙間を空けて米粒を入れます。これらのフィルムケースに蓋をしてから、ゆるい斜面か机の上でこの二つの筒の回転状態を比べて見ます。どちらが良く転がるか、またその理由はなぜかについて、転がしてみる前に聞いてみるのも、クラスの雰囲気盛り上げるのに効果的です。試してみると転がり具合には学生が予想した以上に大変大きな差が出るので、この演示のデモンストレーション効果は満点です。次に、隙間があって転がり具合の悪いフィルムケースの隙間にティッシュ・ペーパーをかるく詰めてから再び転がしてみると、今度は、米粒をいっぱい詰めたフィルムケースと同じくらいに良く転がるようになります。そこで、なぜこのような劇的な変化が起こるのかについて学生に考えさせながら授業を進めます。このようなデモンストレーション実験によって、フィルムケースの回転エネルギーが米粒のばらばらな運動のエネルギーになりさらに米粒同士の摩擦によって熱に転化する過程について、学生の理解を深めさせることができます。

なおフィルムケースには液体を入れても漏れないのでいろいろな液体を詰めて転がり具合を試してみることもできます。したがってこの実験は、力学的エネルギーの散逸の指標として液体の粘性をとらえるためのデモンストレーションとしても有効です。

3.4 熱から仕事を取り出す

論理的にいうならば、一定量の力学的エネルギーが消失するとき一定量の熱が発生することを確認するだけではエネルギー保存則を承認するわけにはいきません。逆に同量の熱の消失によって始めと同じだけの力学的エネルギーが生じることを確認することによってはじめてエネルギー保存則が確立します。しかし、授業中に「熱から仕事を取り出すにはどうすればよいでしょうか?」と聞いても、なかなかすぐには反応が返ってきません。そこで私は教室に回り灯籠のデモンストレーションを持ち込むことにしています。回り灯籠とはいっても、棒の先に針をつけその上に螺旋状に切り抜いた紙の中心部を載せただけのものですが、これをアルコールランプの炎の上にかざすと、この紙螺旋がとぐろを巻いた「蛇」のような形になってぐるぐると回りだします。

熱は温度を上げるものとしてのみとらえ、「熱が仕事をする」という表現にはぴんとこない学生も、この紙螺旋の運動を見ることによって、そのことを実感できるのです。なお、このデモンストレーションをした後で、上昇気流や炎の物理的な特性を説明すると効果的です。

最近売りだされている理科教材の中にスターリングエンジンの模型があります。ガラス製の二本の注射器を利用したのですが、なかなかよくできていてピストンの動きが見事なので、紙螺旋のデモンストレーションの後にこの模型を動作させて学生に見せています。

3.4 エネルギー保存則とエントロピー増大則

上述のような「熱機関」の実物を見せた後で、蒸気機関の熱効率の改良の歴史の話からカルノーサイクルの説明に入ると、カルノーサイクルという抽象的な熱機関の効率の研究が現実味を帯びたものになります。

カルノーは熱が保存する量であるとしてカルノーサイクルの議論を行いました。現在の教科書に書かれている通り、保存する量は熱ではなくエネルギーです。カルノーサイクルが一巡するとき、サイクルに取り込まれた熱と放出された熱の差がサイクルの行う仕事になります。この仕事と熱の差との比が、仕事によって熱が発生する時のそれらの比と等しくなることによって、エネルギー保存則はゆるぎないものとなります。

最近、熱機関のデモンストレーションの最後に「水のみ鳥」を動かしてみせ、その仕組みを解説しています。この運動を可逆サイクルとしたときの熱効率を計算させて、その効率の悪さを示したあと、実用的な熱機関の効率を示し、熱機関の効率を上げるのが如何に大変なことであるかを実感させることにしています。

クラウジウスにならって、カルノーサイクルからエント

ロピーの概念の導入とその増大則を導き出す過程を、学生の理解を確かめながら授業でやるのは大変なことです。ここでは、すべての可逆機関の熱効率がカルノーサイクルの熱効率に等しいことと非可逆機関の熱効率は可逆機関のそれよりも小さいことを説明した後でエントロピーを導入しますが、教室では厳密に式の変形を追うことは避けています。その代わりに、0 の氷が解けて水となりさらに100の水蒸気になるまでのエントロピー変化を計算させるなどして、エントロピーが計算可能な状態量であることを実感させるようにしています。

エントロピー変化が着目する系の可逆・非可逆変化の指標になることを示すためにも、例題を利用するようにしています。例えば、温度の異なる二つの金属ブロックを接触させることによって生じる熱の流れは典型的な非可逆変化ですが、このときのエントロピー変化を計算させて、増大していることを確かめさせるようにしています。

ここで一言補足しておきますと、講義で新しい抽象的な概念を導入するときは、学生の理解を十分に確かめてから先に進まないと、その概念を用いて展開する説明がまったく空回りしてしまうことになります。私は、「系」という概念を使ってエントロピー増大の法則を説明したとき、そのような空回りをしてしまいました。チョークで大きな丸を黒板に書いて、「空間にこのような閉局面を考えて、この内側を考察の対象とする『系』とします。大げさに言えば、これによって世界(宇宙)を系内と系外(外界)に分けて議論することにします。」と説明した後、閉鎖系でのエントロピー増大の議論をしたのですが、あとで聞いてみると、説明がよく分からない学生が大勢いました。そもそもこの議論の出発点にある『系』という概念を理解できていなかったのです。

3.5 分子論について

熱力学の現象論としてのエントロピー増大の法則は難解な理論です。上に述べたような例によって非可逆変化のさいにはエントロピーが増大することを示した後は、すぐに自由エネルギーのような熱力学関数の話に移るのではなく、エントロピー増大の分子論的な説明をする方がよいと思います。熱研究の初期の段階から「熱は物質の内部運動である」とする考えがあったことから見ても、熱力学の学習の比較的初期の段階から分子論の見方になじませるのは自然なことです。

ここでまず、私は、物質が原子・分子から構成されていることを説明することにしています。大学で専門教科のみを担当している教師は、「理系学部の学生は原子的自然観をもって入学しているのだからそのような説明は時間の浪費ではないか」と思われるかもしれませんが、しかし、受験の

理科学科科目は現実の自然から切り離されてしまっているの
で、「化学で学んだ原子はあくまでも化学の原子であって、
物理では通用しない。」などと、教師の常識では考えられな
いようなことを考えている学生がいるのです。

原子的自然観に立つことができれば、巨視的な物体が持
っている力学的なエネルギーが消失するときそのエネルギ
ーは物質を構成する原子・分子の運動エネルギーとして保
存されるという考えは学生にとって大変分かりやすいもの
となります。分子運動は目には見えないけれども、人間は
その激しさを温度という量によって把握しているのだとい
うことを知ることで、新しい知の世界が開かれるの
ではないかと思えます。

このような自然の見方になじまないと、実際に実験の面
接であったことですが、「原子と原子が衝突することによ
って熱が発生する」などといって、平然としていることにな
ってしまいます。

さて、エントロピー増大の分子論ですが、私はまず、気
体分子の拡散を状態の出現確率で説明することにしていま
す。これは学生にとって具体的にイメージしやすく、確率
計算の演習をかねて授業をすすめることができます。この
ときも、拡散が非可逆的な現象であることを実感してもら
うために、次のようなデモンストレーションをします。100
mlほどの透明な容器に大豆と黒豆を分離して入れ、上部は
十分なスペースをとって蓋をします。この容器を数回ひっ
くり返すと、大豆と黒豆が混ざってしまい、当たり前のこ
とですがその後いくら振っても元の状態には戻りません。
当たり前のことでも、実際に見ることでエントロピー増大
の法則が身近なものになります。ついでに、水を入れたコ
ップにインクを1滴おとしてその拡散の様子を調べると、
色素が膜状に広がる大変面白い現象も観察できます。

4. 総合教育としての熱力学

4.1 日本の大学の一般（教養）教育⁵⁾

第2次世界大戦後の1949年、日本の大学は新制大学とし
て再出発することになりました。戦前の大学は、国家に奉
仕する指導者の育成を目的にしていたのに対して、新制大
学は戦後の民主主義社会を担う良識ある市民の育成を目的
とし、その教育目的を達成するため、大学教育の中に専門
教育と並ぶ柱として一般教育を導入しました。大学基準協
会の一般教育委員会は1951年に出した最終報告書の中で、
一般教育は、「民主社会の担い手となるべき市民の
育成を目指す教育である。大学が育成する専門職業人の
視野を広げ、独創性の基礎を作るという意味でも画期的意
義をもつ。一般教育のコース編成は多様であるべきであ
り、その採用は大学の独自性に基づいておこなわれるべき
である。」としてその目指す方向を示しながらも、「一般教

育の実施に当たっては財政・管理・運営面および教官・学
生の意識面に多くの障害が横たわっている。」とその発展を
危惧していました。

その後多くの大学では一般教育を実施する部局として教
養部を設置しましたが、専門教育重視の風潮下にあって教
養部教員の純増は望めず、一般教育では多人数を対象にし
た概論的教育が慢性化せざるをえませんでした。全国の教
養部に所属していた教員は教養教育の改善のために努力し、
全国教養部長会議などの組織を通して一般教育の環境整備
に関する多くの提言を文部省に対して行っていたにもかか
わらず、それらの要求はほとんど認められませんでした。
貧困な一般教育の内実に対しては大学内外からの批判が高
まりましたが、主な議論は一般教育実施のための条件整備
問題には向けられず、「一般教育実施の義務を定めた大学設
置基準は時代に合わなくなった。大学設置基準を大綱化せ
よ。」という方向に流されていきました。その結果、1991
年には大学基準が全面的に改定され、大学教育における一
般教育実施の義務規定は取り払われてしまいました。

それから間もなくして社会を震撼させたオウム真理教の
事件が起きましたが、この事件を引き起こした多くの青
年は大学で高度の専門教育を受けたいいわゆるエリート達で
した。この事件の後、文部省が大学教育における教養教育
の必要性をあらためて議論しているという新聞記事を、私
は苦々しい思いで読んだ記憶があります。

4.2 群馬大学教養部での教養教育改善

はじめに紹介した物理実験指導の群馬大学方式は一般教
育の改善を目指して編み出した教育方法です。上に述べた
ような困難さはありましたが、一般教育の新しい試みは教
養部を持つ全国の大学で取り組まれていました。群馬大学
教養部では、全国的にみても早くから「自由講義」という
名称の初年度ゼミを開設して大学内外から高い評価を得て
いました。総合科目の設置の面では他大学よりも遅れてい
ましたが、1980年代の後半には、教養部を総合的な性格の
学部にしようという構想の中で総合科目を教養教育の柱に
しようと考えが主流になり、従来の概論的な一般教育科目
の多くを学際型の総合科目に切り替えていくことになりま
した。

4.3 総合科目としての「混沌と秩序」

そのような流れの中で私は、総合科目として「混沌と秩
序」というテーマを提唱しました。秩序から無秩序に向け
て、逆に無秩序からの秩序形成という流れは、人間や社会
をも含むあらゆる場所で起こっている宇宙の普遍的な存在
様式です。最近の非可逆過程の熱力学の発展によって、こ
のような相互移行の問題への科学的アプローチが可能にな

りつつあるので、そのような背景の下に混沌と秩序の相互移行の諸問題を取り上げるならば、総合科目としてふさわしい講義となり得るのではないかと考えたからです。私が担当した「混沌と秩序」の講義案内（教養教育履修手引き）は以下の通りでした。

〔目標〕：大は天体から小は原子に至るまで、自然界には各階層に特有な実に様々な構造が存在する。そして、それらの構造は普遍ではなく、遅かれ早かれ消滅する一方、常に新たな構造が発生する。さまざまな階層に特有な規則構造の特性を認識するとともに、混沌とした無秩序な状態から自然に秩序構造が発生するときの法則を探ることを目標とする。〔内容〕： エネルギーとエントロピー 自然界の秩序と乱れ 混沌からの秩序形成 複雑系の科学

この半期15回の講義は、1994年に始め私が群馬大学を退職した2000年までの7年間続けましたが、受講生は全学部にわたっており、総受講生数は777人でした。アンケートによって学生の要望を取り入れながら、基本的には以下のような流れに従って授業を行いました。

- (1) 「混沌と秩序」という観点から、私たちをとりまく世界をどう捉えるか。
 - (2) 宇宙の階層的存在様式。
 - (3) 全階層を貫く二大法則、エネルギー保存則とエントロピー増大則。
 - (4) 各階層の存在様式。 高次の階層の法則は低次の階層の法則を土台にするが、それに解消できない固有の法則をもつ。
 - (5) 各階層の構造は不変ではなく、常に生成し、消滅する。この生成消滅の過程は熱力学の二大法則の下で起こっている。エネルギーの流れは混沌に向かう過程であると同時に、部分的な秩序を作り出す過程でもある。
 - (6) 生命（細胞、個体、生態系、人間社会）のユニークな存在様式、自己組織化を行う系。非線形科学（カオスの理論）の展開。
- この講義では、エネルギー保存則を正しく理解することとエントロピーの概念を直感的に正しく把握することを基礎にして混沌から秩序構造ができてくる過程を、神秘主義を廃して捉えることを課題にし、毎年2～3回は、生物学の教員の協力を得て、植物生態学の視点からの地球環境の話もしてもらいました。

4.2 学生の感想から

この講義では教卓実験を活用したほか、学生によるデモンストレーション器具の作成や研究発表も行って、学生が参加する授業を心がけましたが、結果は次のような感想に見られるように好評であったと自負しています。

「私がこの講義を受けて得た一番大きなものは、『物事を多角的にみる』ということです。私は保健学科に在籍しているため、物事を必ず自分の専門に引きつけてみていました。しかし、この講義を受け、物事の見方は一つではないということを教わりました。『混沌と秩序』を物理的にみることは、私にとってとても新鮮なことでした。」

「高校時代の物理では演習問題を解くことが主でした。ですから授業で習った内容がどんなに面白くても、また、仮に物理に興味を持ったにしても、納得するだけでは何の役にも立ちませんでした。公式を覚え、それを応用して問題を解くことができれば無意味でした。だから私は物理が好きではありませんでした。しかし今回の講義を受けて、物理に対する『恐怖心』がなくなり、物理に対してのイメージが変わったような気がします。先生はエネルギーとエントロピーについて、複雑な式を羅列することなく、お話してくださいました。時々理解に苦しむ難解な授業もありましたが、それでも私が一度も欠席することなく講義を聴いてこれたのは、講義内容が面白かったからではないかと思います。授業中の実験も面白かったです。インクの拡散、圧縮された空気によるティッシュペーパーの発火、ペローソフ・ジャボチンスキー反応など、今までに見たこともないものもあり驚きました。」

「僕らが教えられた通りに学んできた物理や化学を、不確定要素を含んだ着眼点で改めて見つめ直すことで、学問意義や重要性を認識することができました。」

「この講義で新たな発見があった。いつも何気なく考えていることに、はっとさせられた。一見一つ一つが別々の分野であっても、『混沌と秩序』の考えではそんな区別はなかった。複雑系科学というグローバルな学問がこれからの主流になっていくのではないだろうか。『普段』というものこそ、これから考えていく必要のあるものではないだろうかと思ったりもする。この講義によって、一つのものに縛られる狭小な視野でなく、広くものを見、考える視野が必要なのだった。」

5. おわりに

熱力学の入門の講義で、教師が授業の最初から体系的にその論理を展開したとすると、たいていの学生は拒否反応しか示さないと思います。なぜなら、学生にはそのような見事な体系を受け入れる心の準備ができていないからです。そのような状態にある学生に対してまず行わなければならないことは、熱力学という壮大な理論体系がどのようにして生まれてきたかという歴史認識を与えることです。もちろんそれは、忠実に史実に沿って教えなければならないと

ということではありません。「なぜ」と問い、その問いの答えを求めて論争し、様々な試行錯誤を試みた、科学者たちの熱い心を追体験させることではないかと思います。そのとき教卓実験や歴史的エピソードを取り入れることは、それが適切な形で行われれば予想以上の効果をあげます。

熱力学は、単に自然科学と工業技術の基礎をなす学問としてだけでなく、これからの社会のあり方を考える上でも不可欠の学問です。いわゆる文科系の学生に熱力学の考えに馴染んでもらうためにも、その授業を魅力あるものにしたいものです。

文 献

- 1) 林 静男, 滝沢俊治, 高野 庸, 矢吹貞人, 飯島政之, 「自然科学教育の一般教育的意義 - 物理実験の場合」, 群馬大学教養部紀要 10, 119 (1976).
- 2) 滝沢俊治, 矢吹貞人, 玉置豊美, 高橋 晃, 平井光博, 高野 庸, 大和政彦, 「自主的態度の確立をめざす群馬大学方式」, 大学の物理教育 95[2], 14 (1995).
- 3) T. Takizawa, S. Yabuki, Y. Takano, T. Tamaki, M. Hirai, A. Takahashi, M. Okuzawa, H. Sugawara, K. Takano, and A. Akabane, Improvement of teaching method in the undergraduate experimental physics lesson at Gunma University, International conference on university physics experimental education, Aug.31-Sept.3, Nanjing, China (1997).
- 4) 滝沢俊治, 身近で生きた物理学, 新日本出版社 (2004).
- 5) 滝沢俊治, 中田吉郎, 野村 哲, 「教養としての自然科学教育 - 群馬大学における教育実践から」, 群馬大学教養部紀要 27, 87 (1993).

要 旨

口頭試問を取り入れて学生の理解度を確かめながら実験をすすめさせる物理実験指導法は、たくさんの実験技術を身につけさせることを目的に行われている従来の学生実験にくらべ、物理学の基本的なものの見方や方法を与える点で遥かに優れている。熱と仕事の関係をテーマにした実験課題について、この方法による指導がどのように進められているかを具体的に示した。つづいて、入門物理の熱力学に関する講義で行っている教卓実験のいくつかを紹介し、それを歴史的説明と併用して行うとき、学生の興味を引き起こす点で大きな効果を持つことを示した。また、大学の総合教育において熱力学は重要な役割を担うべきであることを提言した。

滝沢俊治 Toshiharu Takizawa
群馬大学名誉教授, Professor Emeritus,
Gunma Univ., TEL.&FAX. 027-266-
1280, e-mail: toshitaki@jcom.home.ne.jp
研究テーマ: 生体物質の熱測定, 物理教育
趣味: 絵画鑑賞, 野菜栽培