

大学教養課程における物理教育の改善

——科学的思考力の育成と評価——

石 川 光 男

1. はじめに

理科教育で「科学の方法」ということが重視されるようになってからもうかなりの年月が経っている。理科教育において知識そのものを暗記させることよりも、子供達が知識そのものを追求し、発見し、創造していく活動を重視するという考え方は今日でも多くの理科教育関係者に支持されている。このような考え方を強調して米国で開発された PSSC (Physical Science Study Committee) のカリキュラム¹⁾が、日本の理科教育に幅広くとり入れられているのは周知の事実である。

小、中学校の理科の教科書をみると、説明部分が少く、生徒自身に問題を追求させるように工夫されている。それにもかかわらず、子供達がこのような教育にうまくついていけない場合が多いように感じられるのは筆者の思いすごしであろうか。筆者は小、中学校の理科教育の実状をよく知らないので軽率な判断はさしひかえるべきであるが、身近な子供達を通して観察したところでは、子供達が科学的な考え方や実験のやり方を着実に身につける場合は少ないように思われる。小・中学校の教育がある程度の成果をあげたとしても、「科学的探究の過程」を重視する理科教育の基本方針は、高校、大学とうけつがれて更に高度の思考力の育成を目指さなければならないのは当然であろう。

しかし、高校での物理の学習がこのような方針に沿ってなされているかどうかは、はなはだ疑問である。文部省の指導要領にも明記してある如く、

原則的には科学的思考過程を重視した教育が行われることになっている。実験法に新しい技術がとり入れられ、内容の整理や項目の取捨選択に現代的な感覚がとり入れられているのは事実であるが、実際には時間的、社会的な制約の中でかなり機械的、盲目的な知識のつめこみ教育をせざるを得ないというのが、大方の実状のようである。その一つの大きな理由は大学の入学試験という制約であり、これが今日の日本の教育をゆがめる一原因となっていることは多くの識者の認めるところである。更に問題なのは、大学の入学試験が旧態依然としたもので、何をどのように評価すべきかという点に関する根本的な検討があまりなされていないということである。この点については、この小論の最後で少し触れるが、将来本格的な研究をなすべき大きな課題と思われる。

2. 大学物理教育の問題点

前節に述べたように高校までの物理教育において、「科学的探究の過程」の学習を中心とした科学的思考力の養成はきわめて不十分なものであるといわねばならない。実際高校で物理をよく理解したということは、いろいろな法則や原理、たとえば「ボイルの法則」や「フックの法則」、を表わす「数式」を暗記し、演習問題を解くときに反射的にこれらの数式を思い出して使うことができるということを意味する場合が多い。しかし、上記の法則は、厳密には理想的な条件をそなえた仮想的物質についてのみ正しいのであって、現実の物質に適用する場合は条件を制限したり、近似式として認めたりする。一方、多くの演習問題はこれらの法則を適用しやすいように、きわめて理想化された非現実的な状況を設定している。多くの場合、学生達は法則を誤解して暗記し、現実の問題に対処することと、演習問題に対処することとを混同してしまう。実例をあげるならば、筆者が文科系の学生に振り子の等時性について調査した結果²⁾では、「振り子の周期は振幅に依存しない」と絶対的に信じていた学生は約75%で、多くの学生は振り子の法則が角度の小さいときになりたつ近似式であることを知

らなかったことになる。

大学入学者の物理の理解状況がこのようなものであることを考えると、大学の物理教育がはたすべき役割の一端が明らかになる。即ち、「科学の法則や原理を正しく理解する」ということは一つの重要な目標であると思われる³⁾。特に大学の教養課程ではこの点が重要である。科学の法則や原理を正しく理解するためには、法則や原理が確立されていく過程をよく知らなければならない。それは学問としての物理学の本当の姿をよく知ることであり、「科学的探究の過程」を重視する教育と根底において密接に結びついている。この点において、文科系の学生のための物理と理科系の学生のための物理とは本質的に同じ目標を共有しているといわなければならない。

文科系学生と理科系学生とでは要求される知識のレベルや量に差があるのは当然であるが、科学の本質に触れ、科学的思考を身につけることの重要性に差はない。このような観点から現行の教養課程の物理教育を眺めてみると本質的に大きな欠点をもっているのに気がつく。文科系の学生には物理学の考え方や物理的な世界観を教え、理科系の学生には物理の問題を充分解くことができるように訓練すべきだ、という教育理念は多くの大学でみられる最も普通の考え方である。

このような伝統的な物理教育に対して筆者は二つの問題点を指摘したい。第一の点は、文科系の学生に対しては物理的（あるいは科学的）な考え方の特徴が「説明」されるだけで終わってしまう場合が多いということである。重要なことは物理的考え方が知識として吸収されることではなくて、実際にそのような考え方がある程度「できる」ということである。考え方というものは、それが必要に応じて使えるときに始めて意味があるのであって、単に考えの型 (pattern of thinking) を暗記してみたところで何の役にも立たない。それは知識としての健康法をどんなに沢山知っていても、実行できなければ意味がないのと同じである。「教養」ということが単にアクセサリー的な知識を身につけることにおちいってしまわないようにするた

めの努力と工夫が教育者に要求される。これは物理に限らず、大学の教養課程の教育に内在する共通の課題ではなかろうか。

理科系学生の場合、専門の基礎として多くの知識と、深い理解が要求されるのは当然である。しかし、そのことは本質的な意味での科学的思考力や創造力を養成することの重要性をうすめることを意味しない。理科系学生は、文科系学生より以上に科学的思考や柔軟な思考を要求される。それにもかかわらず、理科系学生に要求されることは、多くの場合いわゆる「演習問題」がよく解けるようになることである。もし、その演習問題が、教育上の根本的な理念をもとにして練りあげられたものならば問題はないが、高校における機械的演習問題と類似のものが多い。これが第二の問題点である。このような演習問題がよく解けるということはたしかに重要な教育目標であるが、それが大学における物理教育のすべてであり、また評価すべきことのすべてであるかどうかという点に疑問が残る。物理教育者は科学的思考力のもついろいろな側面を訓練するような演習問題や、評価問題を工夫する必要があるのではなかろうか。大学院での研究者としての優秀性と、教養課程での物理の成績とはあまりよい相関を示さないということは多くの教育者が経験していることであるが、この経験的事実が問題の一端を暗示しているように思われる。

3. 科学的思考力養成の具体的課題

前節で述べた二つの問題点は、そのまま「科学的思考力を養成する」という課題に大学レベルで対応することのむずかしさを物語っている。即ち、教授すべき内容が高度になっているので、小、中学校のように単純な発見学習や仮説実験授業の手法をそのままとり入れることはできない。科学的思考や方法論を解説することはできても、課題や問題によって実習させることは一般に困難である。大学生のためのこのような課題や問題の良い見本があまりないのはこの困難性に由来するものであろう。従って教師自身が相当のエネルギーをそそがなければ課題を創作できないことになる。ま

た教師自身がそのような教育を受けた経験がないことも大きな問題である。多分教師は長い経験の中で自然に科学的思考法を自分なりに把握してきたので、大学レベルでそのようなことを組織的に教育する必要もないし、またできるはずもないと考えておられる方も多いと思う。

しかし、近年の教育工学や、教育心理学の発達を考えると、大学における物理教育を新しい教育原理によって近代化する可能性があるように思われる。筆者は過去十数年、大学の物理教育にたずさわりながらこのような新しい教育の可能性を暗中模索してきた。その結果気がついたことを以下に簡単にまとめてみることにする。

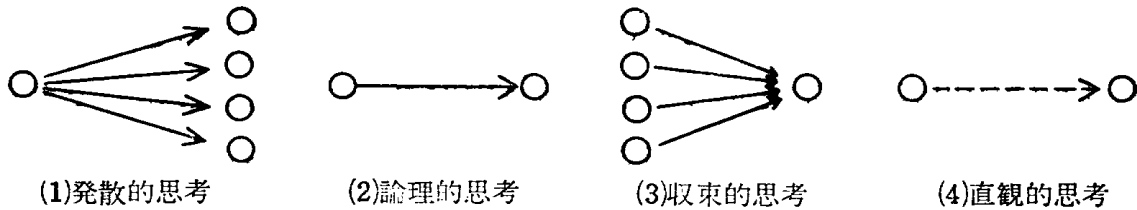
新しい物理教育がそなえるべき特徴を「教育の方法」、「学習の素材」、「演習問題」、「評価の方法」の4つの側面から検討してみる。まず教育の方法であるが、筆者が提案したいのは講義の中でも、実験の中でも学生が能動的に考えるチャンスをできるだけ多くつくることである。教えられることをそのまま流れ作業のように順序よく理解していくことは能率はよいが、決して思考の訓練にはならない。講義では、終始学生が受動的立場に立たされることが多いが、これはあまり望ましくない。学生にはできるだけ自分自身の思索をさせる必要がある。そのためには講義の要所要所で質問をなげかけると良い。この質問に対して、たとえ5分でも10分でも思索をして自分自身の考えをノートにまとめさせることが重要である。この質問と応答の授業方式は、講義中の受動的な態度を一変させる。とにかく、自分の能力いっぱい自分の頭で複雑な状況を整理し、分析し、考えをまとめ、それを各自が、自分の言葉で表現しなければならない状況を強制的につくってやるのである。応答を宿題として義務づけると学生が応答するまでの時間は十分に長くとることができる。その結果は、できれば講義時間中に何人かの学生に発表させて、教師や学生が意見を出し合って思考の過程や結果の表現法に対して不十分な点を整理する。他の学生にもこれらの意見を参考にして自分の思考過程の欠点やくせを反省させるように指導する。これが筆者の主張する「課題—応答—批判—反省」というパターン

の授業方式である。筆者はこの方法を一般教育の物理学の講義に採用し、多くの学生から支持をうけた経験をもっている²⁾。ただ、この方式の難点の一つは一つの課題に対してかなりの時間を必要とするので多くの内容を取り入れることはできないということである。

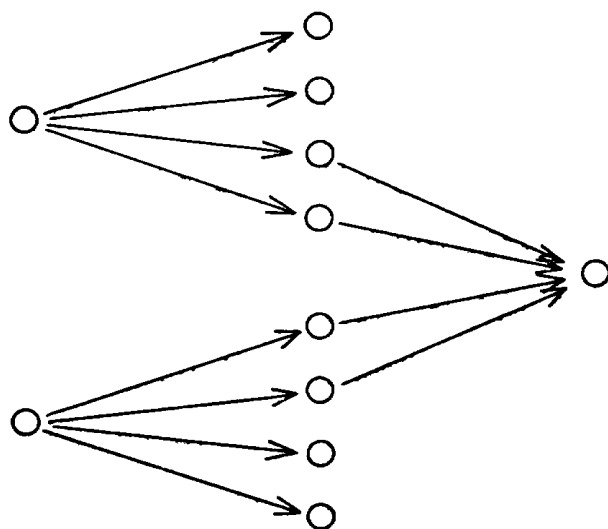
次に「学習の素材」であるが、これは上記の質問、又は課題としてどのようなものが適当かという問題である。これは大きくわけて二つの種類に分けられる。一つは標準的な「科学的探究の過程」や「科学的思考」の特徴をいくつかの要素に分解して⁴⁾、それぞれの要素について思考の練習をすることである。たとえば、「事実を正確に認識する」と「事実を解釈する」ととは全く別の要素であるが、学生はしばしばこれらを混同する。この両者を夫々独立の課題として、訓練してみるのが、その一例といえる。この課題は教科書にでていたような重要な法則や原理に関するものでもよいし、それらとは直接には関係のない身近な題材でもよい。これはスポーツにたとえば、テニスのフォアやバックの打ち方、サーブの仕方などを別々に練習するのに似ている。課題の第二のタイプのものは、スポーツでいえばゲームに相当するようなもので、自分の持っている思考方法や、知識を総動員して一定の課題に挑戦し、何かをみつけ出したり、何かをみつけたす方法を工夫したりすることである。この種の課題の特徴は、答えが一義的に定まっていなくて、考え方や、まとめ方、緻密性、独創性などの観点から応答の評価がなされる。これはブルームの拡散的思考に相当するものであり⁵⁾、いわゆる総合能力の養成をめざすものである。例えば、筆者は一般物理学を終了した学生にガラス棒の一端から他端へできるだけ効率よく光を透過させる方法をいろいろ工夫させるような問題を出してみたことがある。これはここでいう総合能力を評価する問題の一例であるが、一般的に言って学生はこの種の問題が非常に苦手で殆ど何もかけないものが多かった。それ故にこそ筆者はこの種の能力を養成する教育の必要性を強調するのである。

第三の問題は「演習問題としてどのような特徴を持つものが望ましい

か」ということである。ここでは通常の演習問題と、筆者の主張する科学的思考力育成のための演習問題とはどのような点で差異があるのか、ということを考えてみたい。この点に関しては、野村健二氏の思考過程の分類図解⁶⁾が大変参考になる。野村氏の図解によると思考過程は次の4種に分類することができる。多くの物理や数学の演習問題は多分(2)の型の思考を



要求する。即ち、問題の中には一定の条件が規定されていて、その条件と一定の論理（数学的論理や、物理法則）に従うことによって一義的に結果（答）が規定されてしまうようなものである。それに対して、(1)は問題（前提や条件）が与えられても答は一義的には定まらない種類のものである。例えば一つの実験事実が得られても、その解釈は通常一義的には定まらない。解釈のあらゆる可能性を考えるのは(1)の発散的思考に相当する。その種々の解釈を検討し、更に他の種類の実験事実を考慮して一つの解釈にまとめあげていく。これが(3)の収束的思考に相当する。物理学においては通常発散的思考と収束的思考がかみ合いながら自然の探究が進展する。これ



(5)総合的思考

を図示すれば左のようになる。

この様な思考の流れは物理学にとっては本質的に重要である。これを仮に総合的思考と呼ぶことにしよう。ところが科学の教科書や講義、又は学校の物理実験では一つの実験事実が単純に一つの法則や理論を証明したかのように説明することが多い。これでは

結果として同じことを教えても、物理学の生きた思考過程を伝えることにはならない。筆者の主張する科学的思考を育成する演習問題というのは、特に、(1), (3), (5)のような思考過程を訓練する特質をそなえたものを指すのである。

「科学的思考」という言葉の意味するところを以上のように解釈してみると、「物理学の評価」として何が要求されるかがかなりはっきりしてくる。「科学的思考能力」ということが教育内容の一つの重要な要素であるならば、それは適当な方法で評価されねばならない。しかし、上述のように、従来の伝統的な演習問題はこの目的にはあまり適していない。従って、「演習問題」の項で述べられたような特質を持つ評価問題の研究、開発が大きな課題となる。ブルームの評価理論でいう、分析、総合の評価がこれに相当すると思われるが、大学レベルの問題例は少く、詳細に検討しなければならない点もかなりあるように思われるので、ここではたちいった議論はさしひかえることにする。筆者はこの種の評価問題を現在開発中であり、更に実際にテストを行った結果をコンピュータで分析する準備を行っている。

以上大学の物理教育、とくに教養課程における教育の改善についての私見をのべたのであるが、以上のようなことを実施するためにはとても講義時間が足りないという意見がでると思われる。特に理科系の学生の講義では伝えるべき教授内容が多いので特にこの点が問題になる。従って理科系の学生に対しては、講義の中でごく部分的にしか触れることしかできないであろう。しかし、物理学実験の中では以上の考えを大幅にとりいれることができる。筆者の大学ではかなり以前から、自分で計画し、自分で実験から何かをひきだすようなタイプの実験を一般物理学にとり入れている。従来、伝統的に行われている「すでに習った法則を確認したり応用したりする実験」の代りに、上記のようなタイプの実験をとりにいれることは、比較的簡単にできる一つの改善である。

もう一つの具体的な改善の方策は一般教育の利用である。多くの大学で

は理科系学生の基礎科目としての物理学は、そのまま理科系学生の一般教育科目として認められ、文科系学生に対してはすでに述べたような「教養」としての解説的物理学が一般教育科目として用意されている。この文科系学生のための物理学を単なる解説から、思考の訓練を重視した物理学として強化すれば、理科系学生にとっても十分に役に立つ物理学となり得るので、理科系の学生にも一般教育科目として、基礎物理学と併用して受講させることができる。そこでは知識を多くつめこむ必要がないので十分に時間をかけた訓練ができる。しかも、課題の出し方によってはそれぞれの学生の知識や理解の程度に応じた思考の応答が可能であるから、文科系学生も自分なりに思考の訓練ができる。筆者の大学の一般教育としての物理学は基本的にこのようなものが多く、理科系学生も基礎科目としての物理学の他にこのようなコースも選択できるようになっている。これまでに述べた筆者の主張の多くは、このようなコースの指導経験の中から生まれてきたものである。

4. 科学的思考と創造的思考

前節に述べたような意味での科学的思考の養成が具体化されれば、大学の物理教育は大きく改善されるであろう。しかし、更に一步進んで考えなければならないことは、このような教育が新しい理論を生み出す創造的思考の原動力として本当に役立つかどうかという点である。いままで述べたことは、いわば標準的な科学的探究の過程を中心にした議論である。全く新しい論理の発見は、既成概念や常識やそれまでの理論にとらわれないような非合理的、超論理的発想の中から生まれることが多い。これは科学ばかりでなく他の種々の分野についても言えることである。いままでの議論では、このような創造的な思考には直接に触れていない。これは前に述べた思考の図で云えば(4)の直観的思考に属する。図の中の点線は非論理的過程を意味する。従ってこのような思考を組織的に訓練する科学的方法を見出すことは困難であろう。しかし、多くの人々の経験をもとにして考える

とき、このような発想の発現しやすい条件がどのようなものであるかについて興味ある結果をひき出すことができる”。

この小論は創造的思考について議論することが主要な目的ではないので、科学的思考と関連のある点を二、三述べるのみにとどめることにする。第一に、創造的思考は「思索」と密接な関連を持つと考えられることである⁹⁾。「思索」というのは解答の方法もはっきりせず、解答の予想もはっきりつけ難いような課題に対して、じっくりと時間をかけてとりくむことである。このような思索の訓練は先に述べた(1), (3), (5)の型の科学的思考の訓練と類似した性格を持っていることに気がつく。現代の学生はこのような思索がひどく不得意である。これは現代の教育がもつ一つの共通の課題であるように思われる。第二には知識のつめこみや、きまったパターンのくりかえしの思考をしすぎると、創造的思考力がきわめて弱くなるということである。現代の学生が思索に弱いのも受験とつめこみ教育に大きな責任があるように思われる。第三は、全く新しい着想というものはしばしば思いがけないことがヒントになって得られるということである。そしてその思いがけない着想は、当面している課題と全然かけはなれた分野から得られることも決して珍しくはない。このような意味において、科学における創造的思考と、宗教、芸術等は論理を超えたところで密接につながっているように思われる。これは筆者が大学における一般教育を重視する一因ともなっている。

5. おわりに

最後に大学入学試験の改善について一言したい。この小論で述べてきたように、教えられた知識をその通りに暗記し理解する能力と、新しい課題を総合的に分析し、未知の何かをみいだす能力とはかなり異質のものである。そして今日の評価理論にもとずいて問題を作成すれば、後者のような能力もある程度は評価できるのである。同じようなことは科学以外の学科についても言えることで、このような評価問題を開発して入学試験にとり

入れるようにすれば、従来のような知識偏重の高校生の学習に大きな影響を与えることは明らかである。高校における受験勉強の弊害をさけるために採用されている I C U の独特の入学試験もこのような点から再検討すれば、かなり理想に近い入試問題として他の大学の参考になるようなものをつくれるものと思われる。

大学教育について筆者が日頃考えてきたことをまとめてみたのであるが、問題があまりに大きくて、盲人が巨象をなでているようなもどかしさを感じる。このような大きな問題は、将来多くの大学関係者の協力によって始めて改善や進歩が実現されるであろう。

文 献

1. 「P S S C 物理」, 山内, 平田, 富山訳, 岩波出版
2. 「科学的思考力の養成」, 石川光男, 文部省科研費報告書
3. 「新制大学の特色と現在の問題点」, 相馬純吉, 北海道大学
4. 「学習評価ハンドブック(下)」ブルーム, 渋谷, 藤田, 梶田訳, 第一法規
5. 「教育評価法ハンドブック」ブルーム, 渋谷, 藤田, 梶田訳, 第一法規
6. 「科学的思考」(現代思考心理学講座 4), 滝沢歩久編, 明治図書
7. 「創造性の研究」, 恩田彰, 恒星社厚生閣
8. 「創造の原点」, 加藤与五郎著, 共立出版

Some Improvements of Introductory Physics courses at Universities

—Training and Evaluation of Scientific Thinking—

Mitsuo Ishikawa

Students in high schools in Japan are well trained in memorizing written statements and laws, and applying them to problems in physics. On the contrary, they feel much difficulties in finding facts from observations and experiments, or making inductive intuition from experimental results or from a given model. In other words students are not much acquainted with scientific thinking.

Therefore, it is important to give them good opportunities for the training of scientific reasoning in the earlier years at colleges and universities. This kind of training is important not only for science major students but also for non-science major students. However, present teaching in colleges and universities is sometimes far from it. For example, "the explanation" of scientific thinking is made for non-science major students, but "the explanation" is accepted by students just as knowledges and it doesn't change their way of thinking. In other words, students study the general outline of scientific thinking, but they can't use the knowledges in practical problems.

The author suggests some practical ways of the improvement of physics teaching in order to afford a more effective training of scientific thinking. The suggestions are presented here based on the author's experience in teaching general education courses and general physics courses.

The lectures in colleges are sometimes one-way teaching where students need not struggle to find something but they just accept

knowledges through the prepared way of thinking. Frequent quizzes or assignments are useful to stimulate students' active thinking to find unknown facts or laws in the assignments. Students' responses to the assignments should be analyzed by the instructor and some appropriate suggestions will be given to improve their ways of thinking. The author once tried this type of lectures in general education courses and got very active reactions from students. This is an example of improved way of teaching to be replaced for an one-way lecture.

The assignments in this case does not mean ordinary problems to apply known laws or principles but special problems related to the study of the process of scientific reasoning. The ordinary problems in physics are usually closed type questions ; all the necessary conditions are given in the question and the answer is uniquely determined by those conditions. On the contrary, different types of questions are necessary for the training of scientific thinking. Students sometimes have to find out all the possible interpretations from one fact, or clarify all the necessary conditions to get a unique conclusion. These types of questions are related to deductive or inductive reasoning. There are few college-level problems which belong to this kind of open-ended questions. The author thinks it important to develop this kind of problems for college students.

The amount of memorized knowledges and the ability to apply them to solve the ordinary closed type problems have been the main categories to be evaluated in college physics courses. The evaluation of the ability of scientific reasoning will have to be introduced in future to judge the over-all ability of students' learning. The improved evaluation method can be applicable to any of the courses in social science, humanities and languages.