

総合的自然観を科学教育に

大阪市立大学理学部 菅野礼司

最近、高校・大学における理科離れ、とくに物理離れ、物理嫌いが増大し、物理教育は危機的状況を迎えている。この状況を憂慮して物理教育の制度とともに、教科内容と教育方法を改善すべきであるとの声が多く聞かれる。

日本の学校教育は理科に限らず、概して個別知識詰め込み型であるため、多くは意味が判らぬまま記憶し吞込まねば着いていけないのが現状である。事柄の本質を理解させ、それを用いて自ら疑問を持ったり考えたりする力を養うと言った教育よりも、覚え込むことや理解することが優先しているために、暗記法や記憶法が重宝がられ持てはやされる傾向がある。

あまり重要でないことを覚えさせる理科教育の疑問点の例として、電磁気におけるフレミング法則を取り上げた意見と提言があった⁽¹⁾。フレミング法則のようなものを暗記させることは理科嫌いを助長するから、電磁誘導の法則をおしえてもフレミング法則を教えるのは止めるべきだ。西欧ではフレミング法則はあまり教えていない、との趣旨であった。筆者もほぼ同意見で、フレミングの左手あるいは右手の法則は電磁気現象についての一種の記憶術、すなわち「規則」ないしは「表現」であって「法則」と呼ぶに値しないと思う。自然現象の背後にある原理、法則を教える科学教育の目的とは余り関係がない知識である。電磁誘導現象などを覚えるのに便利だと思う人は使えば良いのであって、強いて教える程のことはないだろう。

もちろん、物理法則や基本的概念を最初から充分理解させることは不可能であるが、少しでもその内容を理解させて科学的な目で自然を見ることのできる自然観を育成すべきであろう。その一つの方法は、多くの個別知識や法則を教えるよりも、基本的なものをできるだけ噛み砕いて教え、他の分野のものと相互に関連させて統一的に、あるいは総合的に自然を理解させることであろう。そこで「フレミング法則」とも関連したことで、自然観と科学教育について、筆者がかねてより主張してきたことがある⁽²⁾。

まづ、電磁誘導の法則の表現としてレンツの法則に注目しよう。それは「磁束の変化を妨げる方向に起電力が生ずる」と言うもので、定常状態を破ろうとする運動・変化に抵抗して、定常状態を維持しようとする傾向が存在することを表している。レンツの法則は「フレミング法則」と異なって、自然に対する深い洞察があり、自然観がそこに反映しているのが看られる。なぜならば、自然理解のこの立場は、電磁気のみでなく他のところにもあり、基本的自然法則を統一的に把握できるものを含んでいるからである。

例えば、力学の場合、慣性（質量）は定常状態（一定速度）を破る外力に対

する抵抗で、現状維持の性質を示す。他方、（重力）質量は重力を生じ、自らを加速して定常状態を破ろうとする性質である。このように、物質の中には定常状態維持とそれを否定しようとする傾向が存在し、両者の拮抗によって運動がきまる。さらに、熱統計力学においては、ルシャトリエ・ブラウンの法則（平衡移動の法則とも呼ばれる）がこれに当たる。それは「平衡状態を破る（外的）作用に対し、その効果を打ち消すような効果が内部に現れる」と言うものである。圧力によって氷が解けるのもその例であるが、広く化学反応などに見られる性質である。この法則は平衡状態のみならず、一般の定常状態にも拡張される。ミクロの素粒子の世界にも、素粒子反応において、相互作用が強い程保存則が多く、弱い相互作用では多くの保存則が破れるのも同じ傾向の現れと理解できるであろう。

このように自然界の基本法則として、一般に定常状態を破る性向（相互作用）と、逆にそれを維持しようとする性向（慣性）とがあり、両者の対立拮抗によって自然は変化していると看することができる。この性質によって自然界の相対的安定性と自立性が保証されているわけである。なぜならば、もしこの「慣性」がなければ無限小の作用で無限大の加速度が生じてしまうからである。

自然界の本質を個々の法則として教えることの意義は言うまでもないが、さらに一歩踏み込んで統一的に自然を理解する態度と自然観を養うことが科学教育に求められていると思う。力学における慣性を示す実験を手をかえ品をかえして演じているのをよくみかける（NHK教育テレビでも放映していた）。実験によって物質の慣性を理解させることは大切なことであるから、その努力に水を差すつもりはないが、前記のようなさらに広い立場から統一的観点を示す工夫が望まれるのではなかろうか。

もう一つの例としてエネルギー間の換算関係を表す「当量」を揚げておこう。エネルギーは諸々の形態をとりうるが、相互に転化してもその総量は一定に保たれる。言うまでもなく、これはエネルギー保存則である。エネルギー形態の相互転化において、特に、仕事あるいは力学的エネルギー W が熱エネルギー Q （内部エネルギー）に変わるとき、両者の量的関係を $W = JQ$ と表して、 J を熱の仕事当量と呼んでいる。しかし、エネルギーの相互転化は仕事と熱の間だけでなく、電氣的、化学的、質量的エネルギーなど多くの形態間で起こるから、それらの間にも「当量」が定義される。熱の場合に特別に強調されるのは、熱の本質について熱素説から運動説に変わるときの科学史上の名残である。

そもそも、複数の異質のものを一つの共通概念で括って同一視する場合、それら異質なものの相互の翻訳規則、すなわち量的関係を与える換算率が常に必要である。その換算率が「当量」である。

したがって、全てのエネルギー間の転換に一つ一つ換算率「当量」がある。たとえば、力学的エネルギーと電氣的エネルギーの間にある関係 $W = \epsilon_0 E^2 / 2$ においては、真空の誘電率 ϵ_0 が電場のエネルギー E^2 の仕事当量である⁽³⁾。また、質量のエネルギー当量はアインシュタインの式 $E = m c^2$ から、 c^2 であると言うことができる。

ここで重要なことは、これら当量 J 、 ϵ_0 、 c^2 などは客観的に定まる定数であって、いかなる条件のもとでも同一値を与えることである。すなわち、熱量 Q が電流によってえられたものであらうと、化学反応や原子力によってえられたものであらうと、さらにその熱量をどのような手段で仕事に変換しようが、（効率の差を除き変換した Q に関しては）常に一定値であると言うことである。他の当量についても同様である。その成立根拠は言うまでもなくエネルギー保存則にある。

このように換算率としての「当量」の概念を広く捉え直すならば、自然現象を統一的に見直すことができるし、それから更に飛躍して他の分野にも応用できる。例えば、経済学における商品は異なる品物を「商品」と言う共通概念で括ったものである。商品の等価交換において交換率が「当量」に当り、貨幣がその当量を計る共通の媒体であることが理解される。ただし、この場合の「当量」は市場状況によって変動し、普遍定数ではないことが物理学と違うところである。その理由は労働価値、使用価値と関係した複雑なものであるが、エネルギーとの類比で言うならば、その理由の一つは「価値」の保存則がないからである。両者の差異を比較して理解するならば一層有意義であらう。

「広義の当量」と関連してもう一つ付言したいことがある。それは環境問題などと関係して論じられる「技術の事前評価（アセスメント）」の仕方である。環境アセスメントの判断材料として、生活上の便利さ、経済効果、環境変化による被害などを含め諸々の要素を加味して、正負いずれが大きいかを決める。これも便利さ、経済効果、環境問題など異質の要素を比較するためには共通概念によって一つに括らねばならない。そして、それぞれの要素にその重要度を表すための「当量＝変換率」を決め、それを各要素に乗じたものを加えて正負の答えをだすこともできる。実際に、実質的にはこれと同じ様なことをして評価を下すわけである。しかしながら、その際留意すべきことは、利用者、被害者、公共機関などそれぞれの立場によって、判断基準である「当量」の値が異なる。しかもエネルギーのように客観的当量が現在のところ存在しない、また将来、客観的とはいかなくとも、多くの人々が妥当と認める「当量」を決めうる原理が見つかるかどうかともわからない。それにもかかわらず、無理に「当量」を決め、たとえば「公共の利益」と言う共通概念で括って、その効果の正負を決定してしまうことがある。数値で表されると信じてしまう人が多いが、このような問題に対する正当な判断をなしうるためにも、ここに述べた統一的自然

観を養う科学教育によって、総合的視点を身に付けて欲しいと思う。

上に述べた自然理解のこの観点は、物理のみならず進化や生態系にも、さらには人間社会にも通用するところがあると思う。この程度の総合的自然観は高校で教えている教科内容でも充分説明できるはずである。ここに揚げた二例は典型的なものに過ぎず、他にも調和振動の普遍性、エントロピー概念に関することなど類似の問題はあるだろう。

日本の教育の欠陥の一つは各教科を分断した縦割教育にあると常づね考えている。この縦割教育では総合的観点に立った科学的思考法も自然観を養うこともできない。そして、自然科学で学び訓練した科学的思考法を文科系教科に生かすこともできないし、社会生活に活用することもおぼつかない。記憶主体のテクニカルなものに力を注ぐのでなく、もっと本質的なところを広い視野から教えるならば、自然の仕組みに興味を持ち、今より楽しい科学教育となるのではないか。その様な科学教育は想像力を養い夢とロマンのある発想や思考法を育成するに役立つと思う。

名前は忘れたが、ある科学者が言った「偉大なる科学者であるためには、大いなる空想家でなければならない」との言葉を思い出す。「逆は必ずしも真ならず」であるが、少なくとも独創的な理論を発見するには空想力が豊かでなければならないと思う。これ程大げさでなくとも、広い視点と科学的な判断力を育てる教育が現在強く求められているはずである。

参考文献及び註

(1) 大浜一之：「とっておきの話ーフレミング法則止め」『科学技術ジャーナル』第2巻12号(1993)。

(2) 拙著『物理学の論理と方法』大月書店(1983)。

(3) 電氣的エネルギーと仕事との関係はいろいろな形式で表される。例えば、

$$W = q^2 / 2C \quad (q : \text{電氣量、} C : \text{電氣容量})、\text{あるいは} \quad W = RI^2$$

(I : 電流、R : 抵抗) などがある。これらの関係式において、 $1/2C$ は q^2 の仕事当量、 R は I^2 の仕事当量と言うこともできる。しかし、 C や R は物質に依存する変化量であるから、普遍的「当量」概念にはふさわしくないので普遍定数 ϵ_0 を採用した。電場からクーロンの法則によって力を、オームの法則によって電流などを導けるので、これで充分である。