

中高教員養成のための理科教育論序説

関口 昌秀

はじめに

ここで述べるのは、中学高校の理科の教員を養成するにあたって、わたしが大事なことと考えている事柄である。我妻栄は、大学教員の任務の1つは、「その専攻する学問分野の全部にわたって講義案ないし教科書を作ること」¹だと述べた。しかし、すぐれた教科書があれば他人の書いたものでもよいと思われるし、実際わたしも理科の教育法を担当する上で、左巻健男たちの作成した理科教育法のテキスト²を主たる参考書としてきた。だが、どんなにすぐれたテキストであれ、考え方や強調点の上で多少の相違が生じることもまた事実であり、今般我妻の言葉を思い起こし筆を執るに至った次第である。

とはいえ、一挙に教科書を作ることはできるはずもなく、1学期分の講義案さえ十分に作ることができないというのが実情である。したがって、ここに述べるのは、その授業の一部分ということになる。題名に「序説」と付けたゆえんである。また以下に述べるのはわたしの独創などではなく、板倉聖宣や左巻健男などの先学の研究をわたしなりに理解したところをわたしの論理と根拠で述べたものにすぎない。そういう意味で、これは、理科教育という課題に対するわたしのレポートである。「序説」にはそういう意味合いも込められている。

1. 育成すべき「科学的思考」とは何か

小中学校の学習指導要領には「科学的な見方や考え方を養う」ことが理科教育の目標として示され、高校の指導要領には「科学的な自然観を育成する」こととある。このように、ふつう理科教育の目的とされるのは、「科学的思考」の形成ということである。

1-1. 科学の実証性と合理性

ところで、「科学的思考」とは何か？と問うと、指導要領だけでははっきりしないところがある。いや、そもそも「科学的思考」をどのように捉えるかという点においては、見解が分かれる可能性もある。可能性があると言うのであって、科学的思考の捉え方が分かれていると言っているのではない。

ともかく、「科学的思考」というものをはっきりさせなければいけない。そうする点で役に立つのは、板倉聖宣の議論である。

板倉は、科学というものを、①実証性、②合理性、③社会性、という3つの特徴から捉える。①と②の実証性と合理性は、おそらく誰もが同意すると思われるものだが、板倉の議論で大事な点は、実証性と合理性がつねに調和するわけではないとみている点である。そして③の科学のもつ社会性という指摘は、通常忘れられがちな点であり、ここが重要である。

実証性というのはわかりやすいだろう。科学は事実に基づかなければならない、ということ

である。観測された事実や実験的な根拠に基づいて科学が成立しているということである。合理性というのもわかりやすいだろう。筋道を立てて考えるということである。論理が合っていないければ、どこかに間違いがあるということである。ただここで注意しなければならないのは、実証性と合理性がつねに調和するとは限らない、という点である。「事実を重んずるべきか、あるいは理論を重んずるべきか」という対立が生じることがある。実証主義と合理主義の対立である。事実と理論のどちらが重要かといえば、一般的には当然事実の方なのだが、ところがつねにそうなるとは限らない。

この点に関わって、板倉は次のように説明する。

「事実の表現には、しばしば知らず知らずのうちに一つの解釈が入りこみ、誤りを引き起こす。たとえば、水の中に棒を入れたとき、棒が曲がって見える。このとき、『棒が曲がってしまった』と思ったら間違いとなってしまう。こういう場合は、『棒が水の中で曲がるなんていうことがあるのだろうか』と考える理屈の方が正しかったりする。『棒を水の中に突っ込んだだけで曲がるはずはないのに、曲がって見える。これはなぜだろう。』こう考えて探究するところから科学は生まれるのだ。理論を重んずるということは、経験事実をそのまま理論化する誤りを救うことに役立つのである。」³

事実が発見されたとき、科学者は発見された事実を言葉と数式を使って表現する。そのような言葉を介して、仲間の科学者へ発見された事実が伝えられていく。当たり前のことだが、事実そのものが伝えられていくことはない。事実、検証実験のなかで再現させるものである。実験の生命線は、その再現可能性にある。そこで仲間の科学者たちは、自分の手によって同じ実験をし、同じ事実（正確に言えば、同じと類別されることになる事実）を確認する。ここで板倉が述べているのは、そこへ行く前の第1発見者がする表現行為である。表現するという行

為自体の中に「知らず知らずのうちに1つの解釈が入り込んでしまう」というのは正しいだろう。

ただし、いま板倉が挙げた例で理論が事実より優位するのは、その実験がたった1回しかできない実験ではなく、じつは多くの実験結果を実験者が総合していることによる、というのがより正しいと思われる。多少行儀が悪いが、食事の後に茶碗の中にお茶を入れ箸を突っ込んでみれば、誰でも簡単にこの実験を確かめることができる。箸を茶碗から出してみれば、箸は元のまま真っすぐで曲ってない。よく観察してみれば、箸が折れる場所は、水面との境界である。箸を動かしてみれば、境界地点が動くことによって折れる場所も動いていくことも確認できる。だから、ふつう誰でもこれら複数の観測事実から、箸が曲がるとは主張しない。箸の折れ曲がる場所が変化すると考えるのは、非合理的なことだと判断するからである。

ともかく、板倉の挙げた事例では、水中で棒は曲がらない。誰が見ても棒は水面の境界で折れ曲がって見える。そして次に、箸が曲がって見えるのは何故か、と科学的な問いが進んでいくことになる。

しかし、太陽や月が地球の周りを回っているように見えることに関しては、水の中で棒が曲がって見えるということとは、ちがう難しさがある。水中の棒については簡単に何度も実験を繰り返すことができるが、ここでは、そもそも実験ができない。私たちは地上から太陽や月の運行を観測することができるだけである。太陽や月に意図的操作を加えた実験というものはできない。そこに天動説が長く科学的真理として君臨してきた理由がある。いまでも、地球の方が自転をしているのだと、説明することは難しいことである。物理学の得意な教師なら、フーコーの振り子を持ち出して、それが地球が自転している証拠だと生徒に説明するかもしれない。しかし、フーコーの振り子の実験は簡単にできるものではない。観測時間を数時間かけな

ければいけない。そういう点で、これを根拠として地球の自転について生徒の納得を得ようとするのは無理があると考えるべきである。地動説については、これが科学的な真理となっている、と上から原理的に生徒に与える方が適切である。板倉の言葉でいえば、地動説は社会的権威によって認められている科学的真理なのだという説明の仕方である。

地球が自転しているということを科学的な事実として授業を展開し、そのあとにその証拠の1つとしてフーコーの振り子の実験を示すのがよいだろう。日本の緯度での実験結果を簡単に伝え、それを北極に持って行ったときどうなるか考えさせ、思考実験するのがよい。生徒は、地球が24時間で1周自転することを知っていれば、振り子もちょうど24時間で振れ面が1回転する、ということを考えつくはずである。これは運動の相対性の事例としてもよい。これについては、運動の相対性という力学の根本的な原理の理解が必要になるから、これを生徒に説明するのは高校生程度がふさわしい。中学生に対して無理と決めつけることはできないが、中学生に対しても運動の相対性が必ず理解させられると前提するのは楽観的すぎる。この点からも、地動説はそうになっているのだと上から教えるのが適切だということである。

1-2. 科学的真理の社会性

このように、科学において合理性が実証性より優先することがあることは、③の科学の社会性というものと関係する。

科学的真理というものは社会的に承認されたものだということである。ある1人の学者が発見しても、それが学界等で承認されなければ、科学的真理として通用しない。科学的認識が社会的認識であることを端的に示したのは、2006年にそれまで惑星とされていた冥王星が惑星でなくなったことである。これは国際天文学連合（IAU）の総会で多数決により決められた。多数決で決めるのは民主主義の政治的決定の特徴

であり、科学的真理は多数決では決められない、というのが大原則のはずだ。しかし、科学にはこのようにその専門家集団における多数決により決定されるルールというものがあるのである。この総会では、惑星の定義が決定され、冥王星は準惑星という新カテゴリーのなかに含まれることになった。

これは惑星科学の進歩発展による側面をもっているが、このように科学の真理が変更される時、それは政治的手続きと同様の手続きをとるわけである。科学の最先端では、科学者同士の意見や解釈は複数あり、学説となって分かれているのがむしろふつうのことである。もちろん、冥王星を惑星と分類することに反対する科学者もいる。しかし、科学を進展させていくには、科学的概念の定義をより正確に決めなければ、研究の前提となる共通理解が得られない。そこで、このような科学的概念の定義決定というルールについては多数決によるということになる。

しかし、この最先端の決定は、学校現場に無関係だったわけではない。中学校理科の第2分野で太陽系を扱うことになっているから、教科書の中に太陽系の惑星についての図がある。翌年の版からその図の中から冥王星が消される措置がとられた。科学的真理の変更は、このように学校教育へも直接の影響を及ぼす。

1-3. 科学のパラダイムないし研究プログラム

トーマス・クーンが『科学革命の構造』⁴で提起したパラダイムという概念は、これらのことをまとめて表現したものだということができる。ラカトシュ（Imre Lakatos）の研究プログラム（research program）⁵という概念もある。ラカトシュの概念は、クーンのパラダイム概念があいまいさをもっており、そのことが1つの要因となって起きたクーン対ガパー論争の中で提起されたものである。⁶ そういう意味では、研究プログラムはクーンのパラダイムをより精緻化した概念ということができる。しかし、残

念ながら、研究プログラムという用語は、わが国では科学哲学の研究者以外にはほとんど知られていない。だが、米国ではふつうに使われているようである。なぜ、わが国でクーンのパラダイムが普及し、ラカトシュの研究プログラムが普及しなかったか。その理由は、おそらく、中山茂の次の言葉が示唆をする。「たしかにクーンの所説は、フォーマルに整備された科学方法論から見れば、使い方の上で穴だらけであろう。ただ、現実の学問研究も決して言葉や論理の厳密な構築の上に発展するものではなく、もっとあいまいな『パラダイム』らしきものの上に発展することは、研究経験のある人にはよくわかっているはずである。」⁷ パラダイムという言葉とクーンの『科学革命の構造』の論述がそれだけのインパクトがあったということである。

それはさておき、ここでパラダイムないし研究プログラムに注目したいのは、それが、板倉のいう科学の社会性というものにかかわるからである。なにか、科学というと、そしてまた実証性・合理性というと、科学の前提には何もない白紙の中立状態が思い浮かべられやすい。しかし、自然科学といえども、そんな白紙の状態から出発するものではない。そこには、実証性・合理性を使って活動する以前の根本的な前提（ある場合には非合理にも見えるような原理）があるのであり、その前提の上で実証性も合理性も成立しているということである。科学にも立場性というものがあるといってもよい。

たとえば、米国の教育学者ケネス・ストライク (Kenneth A. Strike) は、研究プログラムを、「教育を含む社会現象に関する問題を論じる体系的な論じ方」だと説明している。⁸ そして、マルクス主義的学校批判と自由主義的正義論を対抗する2つの研究プログラムと位置づけている。マルクス主義的学校批判の代表はボールズとギンタスの議論⁹であり、自由主義的正義論の代表はロールズの正義論である。¹⁰ 注目すべきは、自然現象の研究でなく、社会現象に研究

プログラム概念を適用している点である。そして、マルクス主義と自由主義が2つの代表的な研究プログラムだという。どちらも価値の塊であり、ふつう実証性と客観性の代表にこれらを挙げることはしない。それを研究プログラムというのだから、科学哲学から出てきたラカトシュの研究プログラム概念には社会科学に通じるものがあったということである。

ふつう社会科学というと、研究者の立場性が出る。マックス・ウェーバーのいう価値自由である。価値自由というのは、研究者が自分の価値観から自由になれるというのではない。知らず知らずのうちに自分の価値観が研究に忍び込んでしまうから、客観性を貫くために自分のもっている価値を自覚せよ、ということである。社会科学の研究者が自分の価値観から完全に自由になれるなどは考えない。社会科学というのは、基本的にそのような方法論に立っているものである。¹¹

なぜ、そうなるのかといえば、研究者個人が研究対象である社会の一部に含まれているからである。そしてまた、対象である社会の構成員一人ひとりが意志をもって行動するからである。たしかに社会現象の中にも、人間の行動が意志的行動といえないような、パニック時に生じる衝動的集団行動もある。そういうものに関しては、自然科学にならって、研究者が対象から自分を引き離して研究対象を外から客観的に眺めることができる。しかし、社会現象の本質的部分は、意志をもった人間の行動からなるのであって、研究者は自らを研究対象から引き離すことはできない。対象から距離をとり対象を客観的に見ようと努力はする。しかし、どこまでいっても、研究者が社会の一部に含まれるという本質を変えることはできない。ここに社会科学の立場性が出てくる根拠がある。

それにくらべれば、自然科学においては、研究対象は、研究者個人とははじめから別の独立なものとして存在している。そこでは対象を見る客観性はいわば「努力せず自然に」成立して

いる。そのせいで、自然科学では研究者個人の思想信条が研究活動とそれほど直接結びつかないように思われるのである。そういう見方に対して、パラダイムあるいは研究プログラムという用語は、自然科学の研究といえども、ある一定の立場というものを前提として成立するのだという主張と理解してよい。

もちろん、このことは、自然科学が社会科学と同じだということではない。自然科学で前提されるのは、研究者個人の思想信条や価値というものではなく、自然を見る見方というものである。板倉の言葉でいえば、近代の自然科学では実体論的に原子論の見方に立って自然を見る。中世までの世界観はそうでない、ということになる。次にそれを見よう。

1-4. 天動説から地動説への転換

クーンが科学革命の構造で強調したことの1つは、中世のプトレマイオスのアリストテレス的天動説の世界観は決して非合理的なものではなく、きわめて実証的で合理的なものであったということである。それが近代のコペルニクスのニュートンの地動説の世界観へ転換したことを、クーンは、ものの見方の根本にある原理の転換として捉え、それをパラダイムの転換と呼んだのだ。クーンとは独立に出された板倉の主張も、クーンのそれに似ている。ここでは主に板倉に依拠して天動説から地動説への転換を概観してみよう。¹²

プトレマイオスというのは、150年頃のヘレニズム時代に活躍した天文学者で、ギリシア時代のアリストテレスより後の時代の人物だ。かれが中世までの天動説の学説をつくった。ここでは、細かい科学史的事実は重要でない。重要なことは、天動説は実証的で合理的だということである。

しかし、プトレマイオスの時代から数えても14世紀というのは千年以上の時間が経っている。その間に彼の天動説による計算方式は、現実には合わなくなってきた。この誤差をどう説明

するか。そして、どうやって現実に合わせた理論に修正するか。その説明のために、新たな周転円を加えていって、計算方式は複雑さが増していった。周転円というのは、星（恒星）が一晩で円を描いてまわるその円周上の点を中心にして動く円、円周上に描かれる円である。プトレマイオスでは、惑星はこの周転円上を動くと考えられた。恒星と違って惑星は、その名の示すとおり、「惑（まど）う星」である。地球から観測すると、恒星の動きとは逆方向に進むときがある。これを説明するために導入されたのが周転円である。しかし、中世も末期になると、正確な計算のためには、この周転円をどんどん増やさないといけなくなった。

コペルニクス（1473 - 1543）が地動説を主張したのは、この複雑さに対してだが、それだけではない。天動説は、地球から見える星の方角だけを問題にしているだけで、地球から星までの距離については全然問題にできなかった。星の中には明るくなったり暗くなったりするものがある。これも惑星だが、その点を説明できないという欠点があった。地上での経験から素直に考えれば、明るくなるのは光る物が自分に近づくからで、暗くなるのはそれが遠ざかるときである。つまり、明るさの変化は光る物との距離の変化を示しているわけである。この明暗の変化を説明するには、地球も動いていると考えた方がよい。これが、コペルニクスが地動説を唱えた大きな理由である。彼はローマ時代のキケロやプルタルコスなどの文献を読んで、古代には「ヒケタスやピタゴラス学派のフィロオス、エクファントス、ポントスのヘラクレイデスがいろいろな仕方でも『地球は動いている』と考えていることを見出した」。¹³ おそらく、これらの先行の主張に彼は勇気づけられたことだろう。地球が動くとなれば、地球と惑星の距離は変化し、地球から見た惑星の明暗変化も説明可能となる。ただし、念のためにいえば、コペルニクスの理論が正確さの点で、当時の天動説に勝っていたわけではない。しかし、天動説の

決定的欠陥を彼がつけたことはまちがいない。

このような星までの距離や明るさの変化を問題とする考え方を、星が天球にへばりついていると考える天動説と比較して、板倉は「実体論的に考えようとする試み」とか「実体論的な見方」と言っている。¹⁴ 実体論という名称はやや不正確に思われるが、言わんとしていることはわかる。

地動説はコペルニクスだけで確立したわけではない。ティコ・ブラーエによる精度の高い天文観測とその資料に基づいたケプラーによる惑星の3法則（①惑星の軌道は太陽を1つの焦点とする楕円となる。②面積速度一定の法則（力学でいう角運動量保存則）。③すべての惑星において公転周期の2乗が楕円軌道の半長軸の3乗に比例する。）の発見。望遠鏡を手段としたガリレオによる木星の衛星の発見。そしてニュートン（1642－1727）による力学の完成。ニュートンの力学の3法則（①慣性の法則、②運動方程式、③作用反作用の法則）と、質量をもつもの同士が引き合うという万有引力の法則とから、ケプラーの3法則はすべて数学的に導かれることが示された。ここに、天上の運動と地上の運動が統一的に説明されることになった。このように、地動説が完成するまでにはコペルニクスからニュートンまで約200年の歳月を要したのである。

これは理科教育に対して何を意味するだろうか。それは、地動説を理解することは現在においても容易でないということである。すでに前節（1－1）でふれたように、地球の自転の証拠でさえ簡単に生徒に示すことはできない。ましてや地球が公転していることを証拠立てることはできない。地動説は多くの観測事実と多くの予測の正確さとの全体から成立している。それは、パラダイムとか研究プログラムといわれるものとして存立しているのである。だから、学校教育においては、これが科学的真理であると上から生徒に教えなければならない面が強いのだ。

ニュートン力学の限界についての補注

先走った学生のために言えば、たしかにニュートン力学は、ミクロの世界においては量子力学にとってかわられ、マクロの宇宙世界では相対性理論によって限界づけられている。しかし、ニュートン力学は今でも、この限界の範囲内では、つまりわたしたちの日常世界においては、真理である。ロケットを飛ばすには基本的にニュートン力学で十分である。

20世紀初頭に生じたニュートン力学に対する以上の限界づけのうち、量子力学で扱う光の波動性と粒子性の問題については、高校の物理も一部関係する。原子の単元で光電効果にふれる。それは光の粒子性を示す現象である。日常世界では、一点にのみ存在する粒子と無限に広がる波とは全く矛盾するイメージをもっている。しかし、光は波の性質を示す干渉実験などを行えば波の性質を示し、光電効果など粒子の性質を示す実験を行えば粒子の性質を示す。これは日常世界でつくられたイメージでは光の真の姿がわからない、ということを教えている。高校生にはそれだけ伝え、あとは大学に行ったときの興味としておけばよいだろう。

1－5. 科学的力学観を理解することのむずかしさ

科学の発展は、このように日常世界では経験できない真実を明らかにしてくれる。しかし、話を元に戻して、日常世界を支配しているニュートン力学の考え方を理解することが簡単ではないことについて、さらに述べてみよう。

日常世界ではつねに摩擦力が働いている。このことが、ニュートンの法則を理解する困難となっている。わたしたちが目で見えて体験するなかでは、動いているものは必ず止まる。永遠に動くものはない。摩擦力が働いているからである。例外は星の回転、恒星の日周運動である。これがアリストテレスが地上世界と天上世界を区別した理由だが、この事実は今も昔も変わらない。ニュートンの第1法則である慣性の法則

を、日常経験から理解することは不可能といっ
てよい。

慣性というのは、質量がもっている性質で、
それまでの運動を続けようとする性質のことで
ある。質量を有する物体に力が働かなければ、
物体の速度は変わらない。つまり、物体に作用
する合力がゼロならば、その物体は等速直線運
動を続けるか、静止したままとなる。これが慣
性の法則の意味することである。しかし、日常
世界には永遠に等速直線運動をしている物体
は、存在しない。日常世界ではつねに摩擦力が
働いているから、それに抗する力を外部から加
えつづけなければ、物体が動きつづけることは
できない。永遠に運動しているように見えるの
は、アリストテレスの時代と同様に星の回転運
動の方である。したがって、慣性の法則の結果
を科学的真理と理解することはきわめて困難で
ある。だから、アリストテレスほどの偉大な学
者でさえ、それを把握することはできなかった
のだ。それをどうやって生徒に理解させるか。
そのように考えれば、慣性の法則を理解させる
ことの困難さが想像つくだろう。

中学時代わたしはおそらく慣性の法則につ
いて理解していなかった。45年以上前の遠い記
憶の中で、思い出すことが一つある。地区研究
発表会へ連れて行ってもらったときに、授業の
担当でなかった教頭先生が作用反作用の法則に
ついて話した。ロケットは作用反作用の法則で
飛ぶんだぞと言っていたが、わたしには何のこ
とかさっぱりわからなかった。いま思えば、か
れは正しかったことがわかる。中学卒業後ど
のように私が作用反作用の法則を理解したかとい
えば、おそらくニュートンの法則から演繹的に
理解したのだと思う。慣性の法則も作用反作用
の法則も根本的に成立する第一原理として、い
わば公理的なものとして理論の出発とし、これ
が正しいのだと上から与えられて、それを信じ
、それを使ってさまざまな例題を計算してい
く中で体験的にその法則の真実性を納得してき
たのだと思う。日常経験からニュートンの法則

を理解したわけではない。むしろ逆に、ニュー
トンの法則を日常世界に適用し、そこに矛盾が
発生しないこと、むしろ予想が的中することを
経験し、それを信じてきたわけである。

高校の「物理基礎」の教科書には、「慣性の
法則」に関するガリレオの思考実験を説明した
箇所がある。¹⁵ 下図のようなものである。

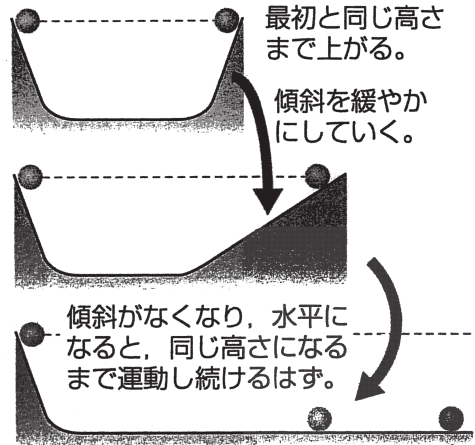


図1 ガリレオの思考実験
『物理基礎』東京書籍、2013年、40頁)

滑らかな斜面と小球を用意し、小球を左側の
斜面におけば小球は滑り出し、反対側の斜面に
上っていく。きわめて滑らかな斜面と小球を用
意すれば、小球が右側の斜面を左側の出発点と
同じ高さの所まで上っていくことが観測できる
はずである。次に右側の斜面の角度を緩やかに
した場合どうなるか考える。このようにしても
小球は出発点と同じ高さの所まで上っていく。
斜面を緩やかにした結果、小球が水平方向にこ
ろがる距離は長くなる。そして次々と斜面を緩
やかにしていってみることを頭の中で考える。
実際に実験するのではなく、頭の中で考えるの
が思考実験だ。今の場合、斜面を緩やかにすれ
ばするほど、現実の中では摩擦力の効果が大き
くきいてくる。だから現実に実験することは無
理だ。実際にしてみると摩擦力の影響の結果、
小球が上る高さが低くなるのが観測されてし

まう。これでは意味がない。だから、頭の中で想像するのだ。摩擦がないとすれば、小球は同じ高さまで上るはずである。それを前提として、右側の斜面をもし水平まで緩やかにするならば、小球は同じ高さになろうとして、どこまでも右に運動しつづけるだろうと、論理的に結論されることになる。このようにして、慣性の法則が成立することが想像される。

ここで大事なことは、慣性の法則が成立すると最初に教えておき、そのあとで、この思考実験をすることである。何もない前提の上で思考実験をやってはいけない。そうしたら、またアリストテレス的解釈に戻ってしまう可能性がある。実験とはある前提の上で、その確認のためにやるものである。ある理論的前提から出てくる論理的な予想に関して実験するのであって、何もない白紙のところで実験することはない。科学的実験とはつねにそういうものである。この思考実験は、摩擦力が働かないという理想状態を前提した場合に、慣性の法則が成立することを確認するために行うものである。

慣性の法則に関する物理が得意な学生への補注

運動方程式 $F = ma$ において $F = 0$ とすれば、 $a = 0$ が出るから、物体に力が働かなければ物体は速度一定の等速直線運動をするか静止し続けることがわかる。つまり、運動方程式から慣性の法則が導かれるわけである。すると、取り立てて慣性の法則を立てる意味はない。問題を解くには、運動方程式と作用反作用の法則で十分なわけである。

では、慣性の法則に意味はないのか。「第1法則は慣性系という力学の記述にとって本質的な座標系の存在を主張したものであり、次の第2法則に含まれるものではなく、より基本的な原理と解釈すべきものである。」¹⁶これが最も説得的な答えである。運動方程式が成立する慣性座標系が存在するという主張である。随分哲学的な話だと思うだろう。

慣性座標系の存在の有無などという迂遠な話に興味がなく、ただ問題を解き運動を予想する

という実用目的のためだけには、慣性の法則は不要である。それは運動方程式から出てくる結論でしかない。高校生にどう教えるべきか。慣性の法則についての上記の哲学的な位置づけがあることを知った上で、実用性の上から、力学は第2法則と第3法則だけで成立すると伝えるのもよいし、あるいは慣性の法則がある意味を熱っぽく話すのでもよいだろう。そこに、教師の物理学観がでてくる。しかし、どちらもそれは現代の科学観に属しているといってよい。科学観といっても、この程度の幅があるということである。

1-6. 理科教育における科学史的事実の位置づけ

じつは、このガリレオの思考実験は事実と異なる点がある。ガリレオが認めたのは、直線運動における慣性の法則ではなく、円運動としての慣性運動である。

「彼〔ガリレオ〕の意味での慣性運動は円運動であって、後にニュートンがはっきりさせ、われわれが学校で習ったような直線運動ではない。」(朝永振一郎)¹⁷

「円運動としての慣性運動」は、理科教育で教える必要がない。それは科学史上の概念である。これはアリストテレス的力学観の残り滓である。天動説では星の円運動が速さ一定の永遠運動であった。ガリレオが上下いずれにも傾いていない面としたのは、地球の地平面に平行な同心球面で、ここでガリレオが主張したのは、アリストテレス派の永遠に続く円運動だったのである。ガリレオにはそのような古い考え方も残っていた。近代的力学観の成立を科学史では「科学革命」というが、それは、さきにも述べたように、コペルニクスからニュートンまで200年もかかったわけであり、コペルニクスやガリレオにはまだ古さがある。事実をいえば、ニュートンにだって古さがある。科学史的事実にはそのような新しさと古さがつねについてまわるのがふつうである。

科学の歴史的事実の新しさと古さを正確にたどることは科学史の使命であるが、科学教育は科学史と同じものではない。理科で教えるべきことは、科学的真理であり、現代の科学観である。いま話題にしている近代の力学観でいえば、それはニュートンの3法則である。学校で教えるべきことは、細かい科学史的事実ではない。だから、ニュートンの第1法則としての慣性の法則を教えるにあたって、教科書のような、科学史的事実とは少し合わない記述の仕方もありえてよい。いや、もっと積極的にいえば、慣性の法則という理論の性質を理解させる道具（題材）として、デフォルメはすべきことでさえある。

そのときのデフォルメの模範とすべきは、朝永振一郎の『量子力学Ⅰ』だろう。これは、ニュートン力学とマクスウェルの電磁気学からなる古典物理学が量子力学へと至る論理的必然性について詳しく叙述した点で有名な教科書だが、その序文で朝永は次のように述べている。

「本書は一応歴史的な形をとって記述されたが、けっして科学史の書物ではない。したがって歴史的には多くの時代錯誤と歪曲とが含まれている。著者は勝手に、上の目的〔＝量子力学がで上がる道で、いろいろな型の学者がいろいろな思考方法を用いて、自然から提出された謎を解く道を豊富に示しているという事実を知り、そこに示されている自然の謎を解くいろいろな思考方法にヒントを得て、新しい理論を作り上げるといふ理論物理学者の仕事に役立てること〕に最も適合するように素材の組み換えを行ない、多くの天才たちの考え方の秘密や問題の立て方を明らかに示そうと努めた。」¹⁸

理科教育の目的は、現代の科学的真理を伝えることであるから、現代科学の論理構成にしたがって組み立てられるべきである。したがって、科学史上の事実も、理論の論理展開の1コマとして位置づけられるべきであろう。朝永の教科書は、日常世界から遠くかけ離れたミクロの原子の世界を支配する量子力学の現象を理解する

努力の跡を示そうとしたものだから、「歴史的な形をとって記述された」が、量子力学の教科書はふつうそういう形をとらない。量子力学のもつ論理構成によるのがふつうである。ただし、そこをどのように考えるかには、結構広い幅があり、多様な教科書が作られている。

中学校の教科書となれば、理論物理学者の仕事のためという目的はないから、当然科学の真理に向かって構成される。できるだけはやく、そこに到達しようとする。そこでは、理論の形成史は二義的である。理論形成史の1コマに意味があるとすれば、さきにあげたガリレオの慣性の法則の思考実験のように歴史的事実を多少デフォルメして、科学理論の理解困難な点の説明として役立てることである。

酸・塩基の定義に関する化学科の学生への補注

高校の教科書には、酸・塩基の定義に関して、1) アレーニウス(1884年)の説と、2) ブレンステッドとローリー(1923年)の説が出ている。¹⁹ アレーニウスは、水溶液中で水素イオン(陽子) H^+ を出すものを酸、水溶液中で水酸化物イオン OH^- を出すものを塩基と定義した。ブレンステッドとローリーは、酸とは H^+ を相手に与えるような分子またはイオン、塩基とは逆に相手から H^+ を受け取るような分子またはイオンと定義した。これによって水溶液中以外でも酸・塩基の定義が可能となった。化学科の学生は大学で3) ルイス(1923年)の説も習う。ルイスでは、電子対を与えて相手と化学結合を形成するのが塩基で、電子対を受け取る相手が酸と定義される。2) で定義された陽子(H^+)授受系はすべてルイスの酸・塩基に含まれる。またルイス理論では、 H^+ を含まない系や配位結合をつくる系も酸・塩基として定義されることになる。酸・塩基の適用範囲は、1) → 3) と広がっている。

これらの事実も科学史的事実のひとつであるが、これは歴史というより、理論の適用範囲の拡大と解釈すべきものである。

1-7. 科学の最先端と高校理科

理科教育において育成すべき科学的思考とは何かと問うて、ずいぶん遠くまで来てしまった印象をもたれるかもしれない。科学は実証性・合理性・社会性からなり、教育においては科学の社会性という点がとくに重要である。パラダイム概念や研究プログラム概念を持ち出したのも科学の社会性にかかわってのことである。天動説から地動説への転換とその上に成立している現代の科学的力学観が現在でも日常世界にくらすわたしたちふつうの人間にはそう簡単には理解できないことをいい、理科の授業のなかで科学的事実を利用する場合は科学の論理構成にしたがって位置づけられるべきと述べてきたのも、ある意味の科学の社会性である。

科学が社会的に認知されたものとして成立していることは、次のように言いかえてもよい。科学理論は、理想化され単純化された1つのモデルの上に作られた構築物である。そのモデルから論理的に導かれる予想が現実をうまく説明できることによって、その理論の正しさが証明される。ただ、科学の社会性というときの社会は、物理学会や化学会などの専門学会を念頭においていることを忘れてほしい。

ところで、これら学会で発表されるような最先端の研究まで行けば、その構築物には穴もあり、理論内に矛盾のある可能性もある。穴もあり、理論も未完な部分があるから研究する価値があるのである。

中学・高校の程度の内容では矛盾のない構成となっていると一応考えてよい。もっとも高校まで行けば、たとえば進化論をめぐるドーキンス対グルドの論争²⁰も守備範囲に入る。指導要領に入っているという意味ではない。高校の授業では最先端の科学に近づくという意味である。教師は授業の1コマとして、生徒の興味関心を引きつけるために、そういうことを紹介することもある。対立する学説があるということは、そこが現在の研究対象となっているからである。わからない点があるから、対立する考え

方も生まれる。学説の対立がある場面では、教師はその両方の論理構成を紹介しなければならないだろう。もっとも、どこまで紹介するかは生徒との関係や時と場合による。ただし、教師は、その学説の対立についてもきちんと理解しておかなければならないことは言うまでもない。

ここまで来ると、高校理科の免許制度の問題にも触れる。今述べたことをすべての高校理科教師に期待することは、無理である。だから多くの高校現場では、物理、化学、生物、地学の科目中心にそれぞれの専門の教員を採用して、配置するというのが、ふつうの実態である。そのような運用は現実の必要に迫られたものでもあり、高校の理科教育において科学研究の最先端にふれる可能性を確保するという意味では、むしろその方が適正なことである。

1-8. 中学理科と科学の社会性

一般的基礎的な概念は、1回実験しただけで理解できるようなものではないので、むしろ科学教育の初期に教えるべきだ、という趣旨のことを板倉聖宣は述べている。²¹ 科学は理論的構築物であり、多くの実験の結果によって支えられたものである。科学理論は、科学史でパラダイムとか研究プログラムといわれるようなものであり、それはある一定の見方考え方を前提として成立している。板倉のいう「一般的基礎的な概念」というのもそれである。原子論的見方はこの一般的基礎的な概念の中心である。

現行の指導要領では、中学校で「原子・分子」を扱うことになっている。大日本図書の中学校理科の教科書『理科の世界1年』では「物質の状態変化」を扱うなかで、袋に入れた液体のエタノールを温めて気化させ、袋が膨らむ現象について「粒子モデル」に基づいて考えさせる場面がある。²² ここで粒子モデルというのが原子論的見方のことになる。この教科書では原子・分子は2年で扱い、その前に粒子モデルを登場させている。この点はよい。

しかし、気になることは、粒子モデルで考えるといいながら、その前提が曖昧のままに考えさせている点である。粒子の運動が激しくなるという図とともに、粒子の数が増えたり、粒子が大きくなったりする図を与えている。「液体が気体になると、粒子の数や大きさはどうなるか」(100頁)という問いは、止めるべきである。粒子説という考え方は、数が増えるとか大きさが変化するかを考える考え方を否定したところに成立したものである。粒子モデルという以上は、生徒が考える推論の出発点でそういう考え方を否定しておかないと、生徒に考えさせる意味がない。教科書の記述では、粒子数や大きさが一定であることが何となく理解されることを想定した書き方になっている。しかし、それは生徒に明確に伝えておかなければならない事柄である。

物質が粒子からできているかどうかは、実験することはできない。少なくとも中学生のレベルでは無理である。(原子については後の**補注2**を参照。)粒子モデルは板倉のいう意味での「一般的で基礎的な概念」であり、現代の科学観の土台の1つである。そのような見方に立つのが現代科学のパラダイムである。(正しくいえば、現代物理学にも原子論的見方に立たない理論はある。熱力学である。これについては後の**補注1**参照。)したがって、原子論的見方は、中学生に対しては上からきちんと与えて教えるべきである。粒子モデルの粒子とは、重さも大きさも変化しないもので、ましてその個数が増減することなどない、個数・重量・大きさを不変量とするものだというをきちんと確立する必要がある。そうしなければ、「粒子モデル」に立って温度上昇で袋が膨らむことについて合理的な推論を働かせたことにならない。

粒子数の増減を認め、粒子の大きさの変化を認める前提に立つならば、粒子数が増えたりあるいは粒子が膨らんだりすれば袋が膨らむことは、その論理的帰結として許されることになる。その前提の上では、合理的である。ここで

生徒に考えさせたいのは、個数不変・体積不変の粒子説に基づいて、袋の体積膨張について考えることである。推論の出発点として、個数も体積も変化することを認めてしまつては、これらの結論のうちどれが正しいのかは決着しない。決着しないことを考えさせても意味がないではないか。

さらに考えてみると、粒子モデルの前提の上でも、「粒子の運動が激しくなることによって、袋が膨らむ」という発想をすべての中学生に期待するのは無理があると言ふべきであろう。なぜなら、これは気体分子運動論の考え方が、分子運動論では、熱の本質あるいは熱の実体というものを気体分子の運動エネルギーとすることから出発するからである。それは実験から結論されることではなく、分子運動論という理論の出発点である。「熱エネルギー＝気体分子の運動エネルギー」とするのが分子運動論の議論の出発点である。教科書はこれを導きたいと考えている。しかし、それはそもそも理論の出発点なのであって、推論の結果として出てくるようなものではない。これはマクスウェルやボルツマンなど分子運動論の研究者の着想である。したがって、これをすべての中学生に求めようとするには大きな無理があると言ふべきである。

教科書の執筆者は自分がすでに分子運動論を知っているから、「温度が上がって気体が膨らんだのは粒子の運動が激しくなったからだ」という結論を出せるのである。ここで生徒に伝えるべきことは、粒子モデルで考えるということは、こういう着想をするということを伝えることだけである。そして、生徒がこの着想もあながち誤りではないかな、と思ってくればそれでよい、とすべきである。

補注1. 分子運動論についての補注

原子論的立場に立たない理論は、熱力学である。古典物理学を構成するニュートン力学とマクスウェルの電磁気学は、時間対称的である。時間 t を $-t$ に置き換えても、ニュートンの運

動方程式やマクスウェルの方程式は成立する。ビデオに撮ってそれを逆回した運動や現象が成り立つ。これに対して、熱は高い温度のところから低い温度の方へしか流れない。熱の流れは一方向的である。熱力学の方程式で時間 t を $-t$ に置き換えたものは成立しない。不可逆現象といわれるものである。そして、この不可逆現象を対象とした熱力学は、原子・分子などの存在を前提としない理論である。

原子・分子などの粒子の存在から熱現象を説明する立場の理論を現在では「統計力学」という。これは分子運動論の発展した形である。熱力学と統計力学の関係については、いまだに理論的にはっきりしないところがあるが、田崎晴明の議論が説得的である。

田崎は、「統計力学が熱力学を基礎づけるのではない。熱力学との整合性こそが、統計力学を基礎づけるのである。」²³という「これまでの熱力学の常識を覆す」大野克嗣の言葉に衝撃を受け、それから熱力学を本格的に勉強し直した。そして、これまでの熱力学教科書にあった曖昧さや誤魔化しをなくし、マクロな経験的事実だけから論理的に見通しのよい熱力学の教科書を執筆した。その中で彼は、統計力学と熱力学の現状について次のように言っている。

「熱力学の対象となるのは、単に平衡状態の性質だけではなく、平衡状態の間の任意の操作による移り変わり（中略）である。操作の前後が平衡でありさえすれば、途中でいかに荒々しい非平衡の時間変化がおきても、熱力学は厳密に適用できる。しかし、現在完成している統計物理学〔統計力学のこと〕では、このような荒々しい時間変化を含む問題については手も足も出ない。つまり、統計物理学から『導出』されるのは、熱力学のごく限られた一側面だけなのである。ミクロな理論に立脚して熱力学を導くという計画は、決して完全なものではあり得ない。」²⁴

従来のものにあつた曖昧さや誤魔化しと思えるものをなくそうとした彼の『熱力学』教科書

が、理論の論理構成の点で従来のものとは異なっていることは、直接あたって確かめてほしい。田崎は、元々は統計力学の研究者である。『熱力学』執筆後に『統計力学』の教科書²⁵も書いている。そこでは次のように言っている。

「多くの統計力学の教科書には、統計力学の導入について不必要に混迷した無駄の多い記述がある。（中略）本書では、マクロな系の平衡状態の普遍性についての経験事実を出発点に、できる限り簡潔かつ直接的に平衡統計力学の形式を導き出す。理論面で重要な役割を果たすのは、『マクロな系では確率的記述を用いても確定的な予言ができることがある』という確率論の知見、そして、マクロな量子系の状態数の普遍的なふるまいである。（中略）本書で示したものが、物理的にみても数学的にみても最良であつて、（中略）教科書の形でまとまって解説されるのは、これは初めてだが、ここで示す論法が『標準』になるべきだと信じている。」²⁶

私にとって衝撃的だったのは、「導入についての不必要にして混迷した無駄」とされたのが、エルゴード仮説やリウヴィルの定理だったことである。田崎はエルゴード仮説が成立しないことを具体的に示している。エルゴード仮説を誤って考えた物理学者が多かつたとして、朝永振一郎の名前だけを直接挙げている。²⁷これは、朝永ほどの学者でも間違えていたという、朝永に対する尊敬の念をこめて挙げているのだが、朝永の『量子力学Ⅰ』の「付録」におけるリウヴィルの定理とエルゴード仮説を使つての「ボルツマンの原理」（平衡状態の等重率の原理）についての解説に感動した経験のある私にとっては衝撃であつた。

補注2. 原子の実在性を確認することは難しい

上の補注1で述べたように、熱現象を理論化するには、原子・分子の存在を前提する必要はない。ボルツマンが分子運動論の研究をすすめていたとき、まだその実在について実験的確認は得られていなかった。

原子・分子の存在は、たった一つの実験に

よって示されたのではない。ブラウン運動についての実験結果を知って、原子論に批判的だったオストヴァルトも原子論を認めるようになったことから、ブラウン運動の実験が原子・分子の存在の最終的な証拠を与えたと言われることもあるが、それは正しくない。「気体の諸性質、ブラウン運動、黒体放射のスペクトルをはじめとした様々な方法でアボガドロ定数が評価され、それらがすべて 6×10^{23} /molに近い結果を示していたこと、(中略)これほどに広範な(そして、互いに独立に見える)実験結果がほぼ等しいアボガドロ定数の値を示唆するという整合性」(田崎晴明)²⁸が、原子・分子の存在を信じさせたのである。

江沢洋『だれが原子をみたか』²⁹は、ブラウン運動を中心として、中高校生向けに書いた本である。その最後で、ブラウン運動についてのペランの実験を紹介している。ブラウン運動は、1828年に植物学者のロバート・ブラウンが報告して知られるようになった。ある植物の花粉を水に浮かべておく。しばらくすると、花粉は水を吸って破裂し、そこから微粒子がたくさん出てきた。その細長い数 μm ほどの微粒子を顕微鏡で観察してみると、不規則で乱雑な動きをすることが確認された。1908年からの実験でペランが使ったのは、花粉から取った微粒子ではなく、形も大きさも均等な乳濁液からつくった微粒子だが、その動きを一定の時間間隔で追った。時間間隔をどんなに短くしていても、運動の軌跡がジグザグなままだった。ふつうの物体の運動ならば、測定時間の間隔を小さくしていけば軌跡は滑らかになっていく。しかし、そうはならない。そうならない理由として考えられるのが、微粒子に衝突する分子の衝撃力である。水分子が微粒子にぶつかってその衝撃力でジグザグと動いていると考えるのである。つまり、微粒子のジグザグした動きが水分子の存在を示すということである。

念のためにいえば、ペランが行った実験はもっと精緻なものである。なにしろこれでノー

ベル賞を取ったのだから。微粒子の速度と時間の関係から分子運動論の正しさを確認し、微粒子の大きさと速度の関係から流体力学の式の成立も確認して、1905年のアインシュタインのブラウン運動の論文の正しさを確認したのである。詳しくは江沢の本を参照してほしい。

たしかにペランによるブラウン運動の実験は、原子・分子の存在を示す強い証拠ではある。しかし、それだけで原子論が示されたとするのは、結論を知っている現在のわれわれの立場からする議論である。先に述べたように、田崎のように考えるのが、科学的にもまた理論的にも妥当である。くだいようだが、科学はたった一つの実験によって確立されているのではない。現代科学の本質の一部を構成する原子説も、たった一つの実験によって確証されているのではないのである。

教師は生徒に対して、ブラウン運動の実験を、多くの証拠類の1つとして示すべきである。

2. 実験の位置づけ

2-1. 実験は仮説の検証である

研究の先端で行われる実験は、仮説の検証のためのものであり、実験結果はやってみなければわからない。これに対して、学校で行う実験はすべて、どのような結果が得られるかわかっている。多くの生徒にとって、学校で行う実験ははじめてのものかもしれない。そういう意味では、生徒にとって実験結果は未知のものである。しかし、教科書を作り、それを生徒に与えて授業を行うのであるから、基本的には生徒に実験結果はわかっていると考えるべきである。予習禁止とでもしないかぎり、全生徒にとって未知という状況をつくり出すことはできない。さらに、学校外の状況を考えれば、なおさらそうである。塾で習っている生徒は多い。それ以外でも、両親や本、あるいは小学校の先生から教えられたということもありうる。ともかく、

中学や高校を念頭に置けば、この実験をすればこういう結果が出るということがわかったものとして、学校実験は行うしかない。

このように書くと、これまで板倉を引用してきたことに反するように思われるかもしれない。板倉の強調した仮説実験授業は、科学教育の初期つまり小学校にふさわしく、中学校以降ではどの程度可能かむずかしいだろう。そしてまた何より、仮説実験授業の指導書ではなく、教科書を前提として授業をする以上、実験をする前提となる仮説について、教師がきちんと説明するのが、学校実験における指導のあり方ということになる。

科学はいくつかの大前提(仮説)の上でつくられたものである、と理解する点では、板倉も私と同じだろう。科学というものをそういうものと理解する以上、学校実験では、前提となっている仮説について、教師がきちんと説明して実験を行うことが重要である。

そう考えると、教科書における実験の取り扱い方に気になる点がある。すでに前節の1-8で「粒子モデル」で考えることについてふれたが、他の箇所でもそれと似たような叙述が目につく。教師は、科学の仮説について、生徒に導き出すように仕向けてはならない。科学の仮説を導くことは、科学の本性から考えて無理がある。仮説を前提にして実験はなされたのであって、実験から仮説が出てくるのではない。したがって、教師は実験が前提にしていた仮説について説明し、実験結果からその仮説が正しいことが確認されるという方向に説明していくべきである。

どういう仮説がありえるかについて生徒に考えさせようとするのは、すでに述べたように、誤りである。さきにふれた「粒子モデル」で説明してみよう。

「粒子モデル」では、粒子の運動がはげしくなれば袋が膨らむ、ということだった。しかし、どのようにして、どういう理由でそんなことが言えるのか?と疑問に思う生徒もいるだろう。

袋の外にある空気の粒子(酸素や窒素)だって運動しているはずである。袋の外側も内側も同じ温度になる。だとすれば、内側と外側から同じように激しくぶつかって、なぜ袋の方が膨らむのか?その理由については、もっとくわしい理論による説明が必要であり、ただ「粒子モデル」を考えただけではわからない。これに理論的説明を与えたのが分子運動論である。それは分子運動論の前提から導かれる結論であって、中学生が導けるようなものではない。

だから、すでに述べたように、粒子の運動が激しくなると袋が膨らむと考えるという着想は、将来勉強すれば間違っていないことがわかる、という形で、生徒の興味関心を方向づける程度のものでしておくべきである。まちがっても、粒子の運動がはげしくなるから袋が膨らむという結論を導けない子どもを、科学的思考力が足りないものと考えてはいけない。

袋が膨らむというのはマクロな現象であり、粒子モデルはミクロなレベルである。1-8の**補注1**で述べたように、マクロな現象は熱力学の対象であり、熱力学を基礎づけるのに、ミクロな量は必要ない。熱力学は、マクロな量だけを使って表現される。ミクロな粒子からマクロ現象を説明しようとするのが分子運動論であり、その発展形としての統計力学である。しかし、熱力学は統計力学がなければ成立しないものではない。熱力学の基礎づけに統計力学は必要ない。むしろ逆に、統計力学の基礎づけに熱力学が必要とされるのである。その点から考えても、袋の膨張というマクロ現象を粒子モデルというミクロ現象から簡単に理解できると考えるのは誤りである。

教科書は「粒子モデルで考えてみよう」といつているのであって、粒子モデルを導けとはいっていない。しかし、粒子モデルで考えるとはどういうことなのか。それは、大きさ一定、個数も不変、重量も一定、そういうものを想定するのが粒子モデルである。そのはじめの約束=仮説を明確にしないで、「液体が気体になると、

粒子の数や大きさはどうなるか³⁰という問いを投げかけるのは、教科書の方が論理的に混乱しているとさえ言える。

「粒子モデル」というのは、いわゆる原子論の考え方を指している。教師は、「粒子モデルで考えてみよう」という前に、それについて明確に示しておく必要がある。それに関連して、中学1年生には、次の図2のようにして、「水素の重さ」を確認しておくべきだろう。

この図は板倉³¹にあるものだが、ビンの中に水素が入ったときと、空（真空）のときで、重さがどうなるか、それを確認しておくといよい。実際に実験をしてはかえる必要はない。水素にも重さがあること。そしてついでに、ここで水素が分子（粒子）であると教えてしまうのがよい。ここで粒子モデルの概念について教えてしまうのである。粒子は大きさ一定、重さも一定、増えたり消えたりしない。つまり粒子の個数も一定である。大きさについては、非常に小さいとしておけばよい。生徒に問われたら、水素原子の実際の大きさを答えてもよい。そういうものとして、粒子モデルを教える。

ちなみに、原子・分子・粒子という3つの言葉が登場したが、どの言葉を使うか。科学史的にまた思想史的にもこの「粒子モデル」のことを原子論と呼ぶが、それは化学という原子よりは広い概念である。同じ言葉が別の意味で使用

されるのは好ましくないだろうから、ここでは教科書（1社の教科書でしかないが）を尊重して「粒子」という言葉を「教育上の概念」として使うことにしておこう。³²「粒子」概念は1年後には、化学的な「原子・分子」概念にとって代わられるから、それまでの運命であるが、正確さを尊重すれば、それがよいだろう。

「粒子」というのは、原子と分子の共通の性質である。2年になったとき、化学反応を習えば、生徒はすぐに分子が原子に分かれることに疑問をもつかもされない。そのときには、反応の条件について、教えることになるだろう。それは中学校レベルではなく、高校レベルだが、生徒の質問に答えるとは、つねにそういうものである。ある一定の条件下にあるときに、粒子は安定的に存在する。これが現実である。原子のレベルになれば、その安定性は増す。高エネルギー条件の下では、原子も変化する。そういうように話をもっていくことができる。どこまで、この話をすすめるかは、生徒との関係次第である。

2-2. 実験の本質は自ら手足を動かすことにはない

「実験の本質は対象に対して具体的な予想をもって問いかけることであって、自ら手足を動かすことではない。」³³

下の図のような鉄のいれものがあり、中は真空になっている。いま、このいれものに水素を入れて重さをはかると、中が真空のときよりも、

- イ. 軽くなる。
- ロ. 重くなる。
- ハ. 重さは変わらない。
- ニ. 中に入れる水素の重さによって重くも軽くもなる。

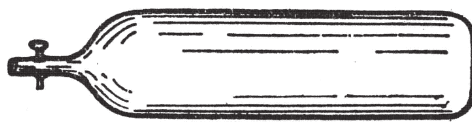


図2 水素の重さをはかる

(板倉聖宣『科学と方法』季節社、1969年、174頁)

これは仮説実験授業における実験に関する板倉の発言であるが、この言葉は一般の実験についても当てはまるだろう。ここでいう「予想」には、仮説実験授業でいう「仮説」だけでなく、私がこれまで述べてきたようなふつうの意味での仮説も含まれると理解してよい。学校実験は基本的に仮説の検証である。

この言葉のポイントは、後半の「自ら手足を動かす」生徒実験だけが実験ではないという点である。教科書には多くの実験の例が出ているが、そのすべてを実際に行うことは、限られた時間の中では無理であろう。ある場合には教師実験とし、またある場合には教科書の実験の写真をみる（あるいはできればインターネットなどで動画を入手してそれを映し出す）などして、生徒実験までは行わない。それは十分に合理的なことである。

顕微鏡の操作などのように、生徒の最小限の実験技能を養う実験もあるから、それは生徒実験としなければいけない。しかし、それ以外については、1年間のスケジュール（教育計画）を考えて、どこを生徒実験とし、どこを教師実験とし、どこを教科書だけとするかは、教師が判断すべきことである。これは、権利としては、教師のもつ「教育計画権」³⁴であるが、教員の力量形成の観点より見るならば、（自己研修を含めた）研修の対象である。したがって、教師は自分の権利の上にあぐらをかくことは許されず、自己の判断が正しいものとなるように努力しなければならない。

教師実験としては、授業冒頭に生徒の興味を引くために行う実験もある。たとえば、スチールウールの燃焼実験などはそうしたものとして使える。

鉄も燃えるという驚きを生徒に与えることができ、その割には簡単にできる実験である。ここにも仮説は前提されている。酸素が燃焼を助けるということである。中2の教科書³⁵では、燃焼は酸素との結合と教えるから、燃焼とは酸素と結びつくことである、というのが仮説であ

る。ただ、酸素があっても燃焼反応は起こらないから、ここでも温度という反応条件に気づかせてもよい。

3. 生活的概念から科学的概念へ

教育心理学では、日常経験を通じて自ずと形成される概念を素朴概念あるいは生活的概念という。旧ソビエトの心理学者ヴィゴツキーによれば、子どもの個人的な経験のなかで体系的な欠いたままに発達するものが生活的概念である。それに対して、学校教育において生徒に伝えるのは体系的な知識体系である。³⁶

この観点から見ると、科学的概念の理解の難しさは、理科教育がかかえる根本的な課題としてあることもわかる。理科教育で扱う科学的概念こそ体系的知識の代表だからである。

ところで、日常生活のなかで生活的概念がどのように形成されるかといえば、それは渡辺慧が「範例による方法」と述べたやり方によると言ってよい。母親が子どもに「犬」とは何かを教えるとき、おそらく次のようにする。実際に動物を見せて、「これは犬ですよ。」「これは猿ですよ。」「これも犬ですよ。」と2、3回繰り返せばよい。その次に1つの動物を見せれば、子どもはそれが犬かどうかを言い当てるだろう。

大人でもたいていの概念は、このように実例のない「範例」を通して学ぶ。

この犬が「犬」だというときの「犬」は、概念である。より正確な言い方をすれば、「類」とか「クラス」といわれるものである。分類するときの1つの集まりに付けた名称が、犬という概念である。このように認識とは、個物を一般者（類、クラス）に入れ込むことである。花を見て、「この花はユリである。」とか、「この木は樫の木である。」とか分類する。これは個々のものを1つの箱に入れることと考えてよい。この花、あの花と、いろんな花があるが、この花をユリという種類の箱に入れる。実例を通して知るとき、人はこのような分類をしている。

この犬、あの犬という個物を、「犬」という種類（一般者）に入れ込んでいるのである。³⁷

わたしたちはこのように日常生活では範例による方法を実行している。事例の場合、重要なのは、犬が個物であると同時に全体の一員として一般者をも代表していることである。では、実物（範例）を示せない概念については、どうするか。学校教育での課題はここにあるといてよい。とくに、科学的概念は、事例そのものが一般者となるというものではない。

たしかに、実験とは事例である。しかし、実験そのものが科学的概念になるわけではない。さきに挙げた「粒子モデル」のことを思い浮かべてみれば、それがわかるだろう。実験で示されたのは、温度を上げると、液体のエタノールが入った袋が膨らむ、という事実である。この事実をどのように解釈するかというと、そこには多数のやり方がある。「粒子モデル」というのは、現代科学が依っている原子論的見方のことであり、それはすでに述べたようにいくつかの現象（複数の異なる事実）にもとづいて成立するものである。それは決して1つの事実に基づいて形成されたものではない。

ところで、「犬」の概念についての板倉の次の発言は、渡辺の「範例による方法」に関連させて考えると面白い。ただし、話の文脈は微妙に異なっている。

板倉は、「ポチとかペスとかラッシーではない『イヌ』の概念」を取り上げて、子どもがその概念を「はじめて見たイヌにも使って、『ねえ、あれもイヌだね』『イヌがきたよ』『あれはネコだね。イヌではないね』というような会話を展開する例を挙げる。そして、この概念について、それは「直観から出発し、直観内でうまく処理できる概念である。」と指摘する。それは、「イヌとネコとの違いを定義的に明らかにしえなくともたいがいは区別がつく。しかし、科学上の概念となると違う。重さの概念、花の概念などは直観的常識をうらぎってまでも一貫して真実を予言する力をもっている。」³⁸

板倉の指摘を使えば、わたしたちが日常生活で行っている「範例による方法」は「直観的概念」であって、それは科学的概念とは異なる。科学的概念はいわば論理的概念なのである。

板倉の議論は、次のように展開する。「たんなる直観的な想像のよろこびをこえた、論理的な想像のよろこびがはじまる。直観の中がひろがるといてよい。これまでよりはるかに大胆に予想し、未知のことを知ろうとするようになる。」ここでの板倉の主張は、「よろこび」が子どもの学習を推進するということである。認知の仕方そのものを中心的にしているわけではない。しかし、ここでは、そういう観点から板倉の言った「直観的概念」と区別される論理的概念や「直観的な想像のよろこびをこえた、論理的な想像のよろこび」について考えてみたい。

この論理的概念や「論理的な想像のよろこび」をどう名づけるか。おそらく、ピアジェが「仮説によって推理する能力」の出現をみた「形式的操作期」³⁹というものはそれに当る。その完成をピアジェは15才頃とみた。ピアジェの認知発達理解は、そもそも「操作」という彼独自の概念理解を根底においてなされているが、「形式的操作期」の前段階とされる「具体的操作期」においても、その特徴づけは、実は「論理的なもの」といてよい。⁴⁰

くわしく見ていくと、具体的操作期と形式的操作期を分ける論理操作に質的違いがあるのかという疑問も湧いてくるが、⁴¹ともかく心理的な事実として、「仮説をつくり推理する能力」の出現がすべての生徒にみられるのが中学生の頃だというのが、ピアジェたちが行った実験結果である。

板倉は、科学上の基礎的概念として、「重さ（質量）の概念、力の概念、慣性の概念、振動の概念、物質の概念、化学変化の概念、進化の概念等」⁴²を挙げている。これらの概念は基本的に中学校で教えるべきだろう。ただし、どういう形で教えるかということ、中学生にどこまでの理解を期待するかという問題はある。ピア

ジェの意見によれば、あまり早く教えようとしても理解できない可能性もある。その点は注意しなければならない。

また、細かく言えば、さきに述べたように、「慣性の概念」は理解するのが困難なものであるから、中学生にとってどこまで理解可能かという問題はある。これらの概念すべてについていえることだが、必ずこうすればすべての中学生が納得できるというような教え方があるとは思えない。慣性についてなら、さきにあげた「ガリレオの思考実験」をもちだして説得する努力は必要である。しかし、そこでも述べたように、それは「慣性という性質がある」ことを前提として、その上で行う思考実験である。思考実験から慣性の存在が導けることをすべての生徒に期待してはいけない。そういう点から見て、科学上の基本的な概念はすべて、生徒にとっては「上から」あるいは「外から」「正しい真理として」与えられるものである。その「正しさ」を前提として、それをより納得する形にもっていくようにする他ない。

4. 自然の階層性

現代の自然観は、自然の階層性を認めることから成り立っている。自然の階層性とは次のようなことである。⁴³

(大) 宇宙 — 銀河系 — 太陽系 — 地球 — 人間 — 分子・原子 — 陽子・電子 — クォーク (小)

これは、空間的大きさで自然界の物質を並べたものである。最後のクォークを除いて、高校までに習う。中学校で考えれば、冒頭の銀河系と最後の方の陽子とクォークを除いて、他はすべて習うことになっている。自然界をこのような大きさのスケールで区別することを中学校の終了までに教えておきたい。

このうち中学の物理が扱うのは、ほとんど人間レベルのスケールである。高校の物理では、地球レベルから原子レベルのスケールまで扱う

が、基本はやはり人間レベルのスケールである。高校物理で伝えるべきは、有効数字と測定の精度の関係である。有効数字1桁という精度の悪さを想像するが、じつは必ずしもそうではない。ある理論の予測値が現実に適合しているかどうか、最初に決めるときは、その数字の桁数がまず問題となる。理論の適合度にとっては、スケールが合うことがまず大事なのである。

また、スケールが大きく違うものがある場合、たとえば2つの電子に作用し合う万有引力と静電気力(クーロン力)を比べた場合、電気的な反発力の大きさが万有引力の大きさの10の42乗倍 10^{42} にもなる。桁違いだ。この事実から、電子に作用する力については、電子相互の万有引力は無視してよく、電気的な力(および磁気的な力)だけを考えれば計算が合うことがわかる。このことを伝えることも大事である。化学が扱うスケールは、中学でも高校でも、分子・原子レベルである。

生物学が扱うのは、さきの表示でいえば、人間レベルから分子レベルになる。生物学は、無生物の物質ではなく、生命ある存在を扱うから、階層の分け方も異なる。

(大) 生態系 — 種・個体 — 細胞 — 高分子 (小)

基本的に、このような4つのレベルのスケールで生物現象をとらえる。

地学の領域は、雑多な学問領域からなる。大きく整理すれば、現代では宇宙科学と地球科学として整理される。したがって、さきの表示でいえば、宇宙科学が宇宙レベルから太陽系レベルまでのスケールを扱い、地球科学が地球レベルのスケールを扱うことになる。

以上は、空間的スケールについて述べたものだが、これに時間的スケールが加わる。どの程度の時間の長さを考えるか、それが対象によって異なる。対象によって空間的スケールだけでなく、時間的スケールも決まってくる。しかし、これ以上細かくやっていくことは、その対象に

ついて学ぶことになってしまう。それゆえ、時間的スケールの階層性もあると言っておく程度でよいと思う。とくに中学校の終了段階を念頭におけばそうである。

5. STS教育・環境教育

理科教育そのものではないが、理科教育と関係するものとして、STS教育がある。岡本正志は、科学教育を「科学の内容理解」と特徴づけし、それと区別して、STS教育を「科学の性格理解」と特徴づけた。⁴⁴ 科学教育は科学の内容を理解することが目的である。科学的現象と諸現象の間に成立する法則を教えることが科学教育の目標である。それに対してSTS教育では、科学の方法や特徴、そしてその社会的役割などを理解することがその目標となる。

結論的に言えば、理科教育は、岡本のいう科学教育を主とし、一部にSTS教育関連を含んでいるといつてよい。現行の中学校学習指導要領の理科第1分野の「科学技術と人間」や第2分野の「自然と人間」では、科学の社会的役割を扱っている。そういう意味で、理科教育はSTS教育の一部を含んでいる。

ところで、STSとは、Science, Technology, and Societyの略である。中島秀人によれば、「STSとは、科学技術の社会的側面についての人文・社会科学的研究・教育である。」⁴⁵ 中島の定義にしたがえば、STSとは、科学哲学や科学史、科学社会学が行っていること、端的にいえば、科学論ということになる。このように定義されたSTSから考えてみると、STS教育は従来の科学教育とその内容を大きく異にしていることがわかるだろう。中島は、STSは「人文・社会科学的研究」だとさえ言っている。そういう意味では、STSは自然科学の対極にあるということになる。それを理科教育の中で行うのは、当然限界があると考えられる。徹底的にSTSを追求しようとするれば、理科教員の手には余るものとなる。また、理科教育は科学的自然観を教え

ることを主たる内容とすべきだから、STS教育の要素をどこまで教えるかということも問題となる。

第1の点に関して言えば、ザイマン (John Ziman) は、「STS運動の科学哲学の強い理念」として、「社会問題を考えることのできる科学者と科学政策立案者を養成する」⁴⁶ことをあげている。STS運動は、ただ単に科学技術の社会的側面を研究するだけでなく、社会問題を考えて、それに解決策を打ち出していくような科学者と科学政策立案者の養成という実践的課題を強く意識するものでもあるということである。ここにおける教育の対象者は、科学知識の一定の理解を前提とする、と考えられる。これはザイマンの念頭にあるのが大学教育であることとも関連するだろうが、中等教育レベルの教科書を見てもそのことがうかがわれる。イギリスを中心として作られたSTS教育運動の教科書 (SISCON-in-Schools) を見てみると、そのレベルの高度なことがよくわかる。それは日本の大学の一般教養レベルと考えられる。またその教科書一冊一冊の量も決して少なくない。その一部を訳した『科学・技術・社会 (STS) を考える—シスコン・イン・スクール』⁴⁷は「単元」として扱っているが、むしろ日本では大学の1学期間 (90分授業15回分) で行う授業で2冊程度扱うのが適当な量と考えられるものである。⁴⁸ 「社会問題を考えることのできる科学者と科学政策立案者の養成」というSTSの理念からすれば、これは当然の姿というべきであろう。

しかし、これを、そのままの形で日本の理科教育の中に取り込むことはできない。したがって、どこまで、あるいはどういう形でSTSの内容を取り込むかということが、第2の問題となる。この点で考えるべきは、環境教育だろう。「ESD [持続発展 (開発) 教育]」が次期学習指導要領の最大の課題だと言われている。⁴⁹ その点よりみれば、現行指導要領の「科学技術と人間」と「自然と人間」の内容は、「科学技術が

社会に役立っている」という側面だけの理解に偏している。科学技術に関する社会批判の視点を明確に確立し、その上で環境問題を乗り越えていく科学技術の問題について考えさせる必要がある。今のような「科学技術が社会に役立っている」という側面だけの理解では、社会的リアリティーがないことは明らかである。福島原発事故後の中学生や高校生がそのような内容に満足するはずもない。したがって、そこに科学の信頼も生まれるはずもない。そういう点を反省し、科学の歴史と科学の限界と可能性を考えさせるような形にもっていく必要がある。

6. おわりに

以上、生徒に「上から」あるいは「外から」教えるべきことを強調してきたので、私の主張が、アクティブ・ラーニングに逆行するように受け取られたかもしれない。この点について一言すると、アクティブ・ラーニングに反対するわけではないが、ただわたしが問題としたいのは、何もない白紙のところから始めるなどということである。すでに何度も強調しているように、科学は多くの前提の上に構築されたものであり、その前提に反するような仮説を許容して、形だけのアクティブ・ラーニングをやっても、科学的思考力は形成されないということである。

なぜ、科学がそういう前提に立つのかということ、じつはレベルの高いことであり、すべての中学生・高校生に理解させるのは無理である。いや、理科系の大学生でさえ、その前提の成立を知らないのが実状といってよいだろう。科学の活動はその前提の上で動いており、理学部の学生がしているのはその活動である。大学の教科書もその前提の上で書かれている。その前提を問うことはしないのがふつうの教科書の記述である。教科書は現代の科学体系を合理的に伝達する目的で作成されるから、基礎づけそのものを含めないのがふつうである。

さきの補注に挙げた田崎晴明の「熱力学」教科書のようなものは例外である。それは、熱力学の理論的基礎づけへの問いを田崎が鋭く意識していたから作り上げることができたのである。

前提を問うということに関しては、次のようなこともある。高校の物理で万有引力を教えるが、それに関して、「なぜ万有引力が働くか。」と問うのは、物理学ではしないことである。物理学では万有引力という力が存在することを事実として認めることから出発する。万有引力がなぜ存在するのかという問いは発さない。それが物理学の前提である。これは往々にして高校生が発する問いでもあるが、そういう高校生には物理学がわからなくなる。ここに、物理学の難しさがある。(おそらく、他分野の科学も同じような難しさをもっているだろう。) そのように問うのは、哲学的問いではあっても、物理学の問いとならないのである。村上陽一郎によれば、「万有引力の『原因』は何なのか、という問い」は、結局のところロックがしたように、「その答えを神に帰する」ものになってしまった。⁵⁰ つまり、「なぜ万有引力が働くか。」と万有引力の原因を問うと、物理学ではなく、神学になってしまうのである。

どこでその線が引かれるかは、おそらく難しいことだろう。しかし、長い伝統の中でこのように決まった線もある。このような前提があることについても、物理の教師はきっちりと生徒に教えなければいけない。そのような前提を明確にした上で、生徒たちの討論も行われなければ意味がないのである。

【注】

- 1 我妻栄『近代法における債権の優越的地位』有斐閣、2003年オンデマンド版(初版1953年)、1頁。
- 2 左巻健男編『授業づくりのための理科教育法』東京書籍、2004年。

- 3 板倉聖宣「科学的な考え方とは何か」、板倉聖宣『科学と方法』季節社、1969年、40頁。
(原文は「ですます」調で書かれているが、引用では論文調に変更した。)
- 4 トーマス・クーン『科学革命の構造』みすず書房、1971年。
- 5 ラカトシュ「反証と科学的研究プログラムの方法論」、ラカトシュ／マスグレーヴ編『批判と知識の成長』木鐸社、1990年、131－278頁。
- 6 ラカトシュ／マスグレーヴ編『批判と知識の成長』(前掲)は、クーン対ポパー論争に関するシンポジウムから出来上がったものである。同書にはクーン「発見の論理か研究の心理学か」(9－39頁)および「私の批判者たちに関する考察」(323－387頁)が所収されている。
- 7 中山茂「訳者あとがき」、『科学革命の構造』(前掲)、271－272頁。
- 8 Kenneth A. Strike, *Liberal Justice and the Marxist Critique of Education — A Study of Conflicting Research Programs*, Routledge, 1989, p.5.
- 9 Bowles & Gintis, *Schooling in Capitalist America*, 1976. 邦訳『アメリカ資本主義と学校教育 I, II』岩波書店、1986－87年。
- 10 Rawls, *A Theory of Justice*, 1972. 邦訳『正義論』紀伊國屋書店、1979年。
- 11 ウェーバーの社会科学方法論については、『社会科学と社会政策にかかわる認識の「客観性」』および『職業としての学問』(ともに岩波文庫)を参照するのがよい。ただし、難解である。ここで述べたのは、やや(だいぶ?)乱暴なまとめである。
- 12 板倉聖宣「天動説と地動説の歴史的発展の論理構造の分析」、『科学と方法』(前掲)、81－133頁。
- 13 同上、110頁。
- 14 同上、111頁や114頁など。
- 15 『物理基礎』(2東書物基301)東京書籍、2013年、40頁。
- 16 須藤靖『解析力学・量子論』東京大学出版会、2008年、8頁。
- 17 朝永振一郎『物理学とは何だろうか 上』岩波新書、1979年、69頁。
- 18 朝永振一郎「序文」、『量子力学 I』みすず書房、第2版1969年、i頁。
- 19 『化学基礎』(2東書化基301)東京書籍、2013年、139－140頁。
- 20 たとえば、キム・ステルニー『ドーキンス vs. グールド』ちくま学芸文庫、2004年、参照。
- 21 板倉聖宣「仮説実験授業とは何か」、『科学と方法』(前掲)、232頁や258－259頁の記述参照。「科学教育の初期には、科学上の概念・法則を教える前に自ら解決しうる問題を発見し、作ることを要求することは、教育的にいつてきわめて困難であり、多くの場合、不可能である。しかし、一連の問題で概念・法則を学んだのちは、それをもとにして解決しうる問題を見出すことが可能になるし、教育的に意義あるものということが出来る。」(232頁)「仮説実験授業という基礎的な概念とか法則とかいうものは〔中略〕、一回実験しただけではとても理解できるものではないような概念・法則である。科学上でもっとも基礎的一般的概念というものはそういうものである。」(258頁)ここに書いてあることの論理的帰結として、本文に書いたことが出てくる。
- 22 『理科の世界 1年』(4大日本理科722)大日本図書、2013年、99－101頁。
- 23 田崎清明『熱力学—現代的な視点から—』培風館、2000年、295頁(あとがき)。
- 24 田崎清明『熱力学』(同上)、14頁。
- 25 田崎清明『統計力学 I, II』培風館、2008年
- 26 田崎清明『統計力学 I』(同上)、ii－iii頁(はじめに)。
- 27 田崎清明『統計力学 I』(同上)、4－1－6「エルゴード仮説をめぐって」、96－100頁、

- 参照。朝永の名前を出して批判しているのは、98頁。そこでは、朝永の『物理学とは何だろうか 下』(岩波新書)の記述が批判されている。
- 28 田崎晴明『統計力学 I』(同上), 10頁。
- 29 江沢洋『だれが原子をみたか』岩波現代文庫, 2013年(初版, 岩波科学の本, 1976年)。
- 30『理科の世界 1年』(前掲), 100頁。
- 31 板倉聖宣「理科教育におけるアリストテレス・スコラの力学観と原子論的・ガリレイ的力学観」, 『科学と方法』(前掲), 174頁。
- 32 板倉は「専門的な術語制定と教育上の術語制定」の必要を説いていた(『科学と方法』, 192頁)。ここで、「教育上の概念」としたのは、それを意識してのことである。
- 33 板倉聖宣「仮説実験授業とは何か」, 『科学と方法』(前掲), 249頁。
- 34 ここで「教師の教育計画権」と言ったのは、城丸章夫の次のような考え方に示唆されたものである。城丸によれば、「教育課程は、いつ、何を教え、あるいは指導するかという計画」であるから、「学校がおこなう教育計画が、教育課程ということのほんらいの意味」である。この教育課程は「3つの層ないし段階」に区分する必要がある。「第1は、文部省や都道府県教育委員会がおこなっている教育課程統制の問題」であり、それは「国や地方自治体がおこなっている教育政策として教育課程をみるということ」である。「第2は、学校の教師集団がおこなう計画としてみる」ことである。「そして第3は、個々の教師の教育活動計画としてみる」ことである。(『やさしい教育学 上』あゆみ出版, 1978年, 175頁参照。)
- 35『理科の世界 2年』(4大日本理科822)大日本図書, 2013年, 36頁以降。
- 36 馬場久志「学習理論」, 古屋喜美代・関口昌秀・荻野佳代子編『児童生徒理解のための教育心理学』ナカニシヤ出版, 2013年, 75-76頁。
- 37 渡辺慧『認識とパタン』岩波新書, 1979年, 29頁。
- 38 板倉聖宣「仮説実験授業とは何か」, 『科学と方法』(前掲), 260頁。
- 39 関口昌秀「認知発達」, 『児童生徒理解のための教育心理学』(前掲), 25頁。最も直接に依拠したのはピアジェの *Logic and Psychology* (1953), 邦訳『論理学と心理学』(評論社, 1966年)である。原書は英国でのピアジェの講演であり、内容的にも最も直接にして簡明である。
- 40 関口昌秀「認知発達」(同上), 29-30頁の叙述参照。
- 41 Inhelder, B. & Piaget, J., *The Growth of Logical Thinking from Childhood to Adolescence* (1958)において、ピアジェは、1つの数学的な構造である「束」の概念を使って形式的操作を特徴づけている。わたしは、具体的操作の「論理的なもの」を「論理的クラスを異にする集合を同時に考えられること」(前掲拙稿「認知発達」30頁)と解釈した。この解釈によれば、具体的操作と形式的操作の構造的な違いを、「異なる論理的クラスの諸集合の弁別可能性」と「束」概念とに見ることになる。英訳者アン・パーソンズ (Anne Parsons) がいうように、ピアジェの議論は、「心理学と論理学の2領域の方法と概念についての理解を前提としており」、しかもこれら2領域の概念がそれぞれ独自のままの形で現れるだけで終わっていて両者を融合した新しい形の心理学概念を創出するところまでいっていない。そのため「読者にとってはピアジェの言うところを理解するのがきわめて困難なものとなっている。」(*Growth of Logical Thinking*, p.viii)しかし、ピアジェのこの論理主義についてはもう少し付き合ってみてもよいのではないだろうか。とりわけ、同書がわが国では全くと言ってよいほど紹介されていないことを考えてみると、なおさらその思いを強くする。

42 板倉聖宣・上廻昭編著『仮説実験授業入門』明治図書, 1993年, 19頁。

43 左巻健男編著『授業づくりのための理科教育法』(前掲), 第4章「そもそも理科教育の目的・目標は?」(77-107頁), 参照。

44 岡本正志「STS教育とは」, 『授業づくりのための理科教育法』(前掲), 184頁。

45 中島秀人「『科学見直し』の見直し——新しい科学技術論としてのSTS」, 小林傳司・中山伸樹・中島秀人編『科学とは何だろうか』木鐸社, 1991年, 268頁。

46 John Ziman, *Teaching and Learning about Science and Society*, 1980. ザイマン『科学と社会を結ぶ教育とは』産業図書, 1988年, 182頁。

47 小川正賢監修『科学・技術・社会(STS)を考える—シスコン・イン・スクール』東洋館出版社, 1993年。この訳書は, Joan Solomon編集(1983年, Basil Blackwell)の8冊のうち次の4冊を訳したものである。

- *Ways of Living*,
- *How Can We Be Sure ?*,
- *The Atomic Bomb*,
- *Health, Food and Population*,

残りの4冊は

- *Technology, Invention and Industry*,
- *Evolution and the Human Population*,
- *Energy: The Power to Work*,
- *Space, Cosmology and Fiction*,

である。SISCON (Science in a Social Context) シリーズは上記Solomon編集の1983年版の他に, 1977年版 (Butterworths) のものもある。

- Ernest Braun & David Collingridge, *Technology and Survival*,
- Kenneth Green & Clive Morphet, *Research and technology as Economic Activities*,
- Leonard Isaacs, *Darwin to Double Helix: The Biological Theme in Science Fiction*,

- Diana H. Manning, *Society and Food: The Third World*,

- Clive Morphet, *Galileo and Copernican Astronomy: A Scientific World View Defined*,

- Keith Pavitt & Michael Worboys, *Science, Technology and the Modern Industrial State*.

SISCONシリーズのタイトル(裏表紙裏記載)から見て, おそらくこの6冊が77年版シリーズの全てである。この77年版は60~80ページある。それに対して, 83年版は4冊が40ページ以下であり, 最も長いものでも56ページである。(ただし, 1冊 *How Can We Be Sure?* については未確認。訳文の量から見れば原書の分量は40ページ程度であろう。)そして83年版は写真と図も多く挿入されている。

48 1学期分の授業で2冊というのは, Solomon編集の1983年版で言うのである。77年版は, その分量から考えて, おそらく大学用のテキストとして作成されたものである。これは, 当然ながら, 1冊で1学期分用の授業テキストである。なお, 関口昌秀「理科教育とSTS教育」, 神奈川大学経営学部『国際経営論集32号』2006年, 77-98頁参照。

49 安彦忠彦『「コンピテンシー・ベース」を超える授業づくり』図書文化, 2014年, 7頁参照。

50 村上陽一郎『近代革命と聖俗革命』新曜社, 1976年, 31-33頁。