

# 中高理科教育法（1）

関口 昌秀

## はじめに

これは、中学高校の理科の教員免許に必要な教科教育法の授業に関する、わたしの考えをまとめたものである。それは教免法の「理科の指導法」を扱うものであって、教育実習へ出るまでに受講しておくべき科目である。よって、ここに述べた考えはほとんど基本的な事柄であり、それほど独自性があるわけでもない。

理科教育法の授業は模擬授業を中心としている。模擬授業のために学習指導案を作成すること、その前提として当該授業単元の内容を正確に理解すること、それが授業の優先事項となる。したがって、ここにまとめたものは、授業のテキストというよりはむしろ、授業時間外に読んでもらう参考書ということになる。

＊

本稿の体裁は少し変わっている。補注が長い。本文と補注の2つの部分から構成されているといった方がよいくらいである。ある意味では、本文が基本で、補注は発展的部分といえる。

教育実習へ出るための基本的事項と言っておきながら、それを基本と発展に区分するのは矛盾しているようにみえるかもしれない。本文には教育実習に出るまでに身に付けておくべきことが、その理由を示さずに書いてある。理由は補注にまわしてある。実用的観点から結論だけを知りたい諸君は、まず本文を一読し、その後で補注に目を通すことをすすめる。

しかし、なぜそう考えるかの理由がわからなければ、ほんとうにわかったことにはならない。だが、理由や根拠というものは、悪く言えば、屁理屈であり、それを理解するのはむずかしい。したがって、君たちの貴重な時間を節約するという意味で、それは後回しでよい、というわけである。

＊ ＊

この点について別の角度から述べると、補注の内容は理科教育についての見方の相違に関連する。

理科教育をどうするか論議は、理科教育についての考え方の違い、理科教育論の立場の相違対立からなされている。そういう論議があることは、教育のあり方として、健全で

ある。「基本的な事柄」からなっているというのは、そういう対立をほとんど含んでいないという意味である。それはどういうことかということ、ここで述べる「理科教育法」は、科学観や教育観の対立から免れている、ということである。理解教育論議の根幹にあるのは、教員各個人の理科についての科学観や教育観の相違である。そういう点から見れば、ここでの準備教育としての理科教育法が扱う部分においては、前提としている科学観や教育観は、学生全員が当然と思う科学観、現代の共通観念的な科学観である。一言でいえば、常識的な科学観である。

教育現場で論じられる理科教育論議には対立する科学観が混入してくる。科学観の対立の底には社会観や教育観の対立がある。いや、そもそも、社会観や教育観を離れて理科教育論は成立しない、とわたしは考えている。対立を含んでいる理科教育論のうち、教育実習に出るまでに教えられるべき理科教育の方法や技法には、そのようなレベルで対立する科学観は含めるべきではないし、実際そういう形で理科教育法が成り立つ、とわたしは考えている。現代社会で暮らす人間には、聞けば納得できるという意味で、常識的な「素朴な」科学観がある。本文での議論は、そういう意味での科学観に基づいているとよい。

ここで「素朴」と言ったのは、あくまでも比喻としてである。ヴィゴツキーが「生活的概念」と呼んだ意味での「素朴概念」を指す意味で「素朴」と言ったのではない。学校の理科は当然のことながら現代の科学に基づく。それは現代の科学観に基づいている。それを「素朴」といったのは、義務教育を修了した人にとっては、その科学観が常識といえるような共通理解がなされる、と考えられるからである。学校で教えられた理科の内容を、たとえきちんと理解できなかった者や、あるいはその内容を忘れてしまった者にとっても、再び教えられれば、それを正しいものとして納得する。そういう常識のもつ力をもつ科学観である。それは、現代社会に流れる一つの共通の科学観とよい。そういう意味で、「共通」で「素朴」な科学観を前提としたところに成立しているのが、本文の叙述部分である。

\* \* \*

それに対して、補注部分の論述は、私個人の科学観・教育観が少し色濃く出てくる。科学観と社会観が無関係でない、科学観は社会観と関係する。このように考える私の見方それ自体が、一つの科学観である。それに対して、自然科学は社会から独立している、と考える科学の見方もある。この考えの方が、多くの教師の見方といってもよいかもしれない。この点に関して私は立場を異にする者である。そういう点で、私の科学観が少し色濃く出るのが補注部分である。

もっとも、そこに明確な境界線が引けるかということ、それほど明確に区別できない点もあると言わざるを得ない。すべての記述が私によるものなのだから、本文の部分にも私の科学観が漏れ出ている可能性はある。とはいっても、私自身の意識としては、本文の叙述は、できるかぎり現代の科学観、上に述べた意味での「常識的な」科学観、現代社会で共通に通じる科学観を前提としているつもりである。

\* \* \* \*

最後の章は例外である。そこで扱うのは、現代社会における科学・技術の問題、STS（科学・技術・社会）教育である。STS教育は、強く社会観と連動する、広い意味での理科教育である。学校の教科書でも、社会における科学や技術の意味が取り扱われている。そういう点からすると、科学観・社会観と強く連動するSTS教育を本文に含めるのも妥当といえよう。ただし、教科書の記述が科学・技術の有用性に比重を置くのに対し、本稿の論述が科学・技術の社会に対する問題性に比重を置く点に少し違いがある。

## 第1章 科学を教えること

### 理科の授業内容を理解しておくこと

理科の教師が教えるのは、理科である。

こういったのでは、余りに無内容に聞こえるかもしれないが、言葉としてはこのように表現するのが、最も理解しやすいだろう。中学校や高等学校の理科教員のための免許資格としての理科教育法で、まず語るべきは、教科としての理科で教えるべきことは学習指導要領に定められているので、その解説からはじめるべきではないか、という声も聞こえてくる。しかし、その他の教科についてはともかく、理科に限っていえば、「理科教師が教えるのは理科である。」と言うのが、君たちには最もわかりやすいだろう。

学習指導要領は、だいたい10年経つと改正される。しかし、君たちの教師人生は長ければ40年以上もある。その間を通じて、基本とすべきは、「理科教師が教えるのは理科である。」の方だろう。指導要領の変更に対応するためには、その基本を押さえておく必要がある。教科によっては、指導要領の変更部分が基本の多くを占めるものもあるが、理科に限っていえば、基本に及ぶことは余りないと思ってよいだろう。

第一に必要なことは、君らが教える授業内容をきちんと理解しておくことである。アクティブ・ラーニングとか仮説実験授業とかの教育方法をわたしも支持する。しかし、理科の教え方を論じる前に、自分が授業する理科の内容を正確に理解しておくこと、それが順序として先である。教える内容の理解がなければ、授業ははじまらない。

自分の教える内容を正確に理解すること、ところが、これが理科では難しい。

たとえば、同じ理系教科の数学と比べてみても、理科の方がはるかに難しい、といってもよいだろう。高校卒業までに教わった数学の内容を理解していれば、数学教師が必要とする教科内容はほぼ尽きる、といってもよい。もちろん、これが極端な言い方になっていることはわかっている。大学レベルの微分積分の理解が必要ないというつもりはないが、高校レベルの数学については、数学の教師をめざす学生諸君は高校時代にすでに身につけているだろう。

ところが、理科ではそうはいかない。君たちが高校卒業までに現実に教わる理科の内容は、高校レベルの理科の教科内容の半分にも満たない。物理基礎、物理、化学基礎、化学、生物基礎、生物、地学基礎、地学、これらすべてを高校時代に学習する生徒は、まず存在しない。

ここにある違いは、理科は数学とちがって、総合的な教科だからだと考えるとわかりやすい。

## 理科という教科の土台

ちょっと難しい話をすると、教科というものは、学問を土台として作られる。数学教科の土台は数学という学問だが、教科としての理科の土台は自然科学の全体である。学問としては、物理学、化学、生物学などである。理科が総合的な教科だというのは、物理学、化学、生物学など複数の学問を土台としているからである。

いま、地学について触れなかったが、現在では地学がひとつの学問としては考えられないからであるが、これについては、後の科目構成論の章のところで、またふれるつもりである。

ともかく、理科の内容を理解することは、本質的に難しいのである。実際のところ高校の理科では、物理、化学、生物、地学などの専門性がある。生物の教師が物理を教えるということはまずない。高校で、それは無理である。現在の学習指導要領では「物理基礎」などの4つの「基礎」科目がつくられ、その内の3つが必修とされるのがふつうである。(もう1つ、別の形の必修の組み方もある。)そういうときには、「基礎」については、自分の専門外も教えることになる。もし自分の専門外の「地学基礎」を教えるということが生じた場合には、大学時代の「地学概論」のノートなどを引っ張り出して勉強し直して、その準備をするしかないだろう。理科教師になるために大学時代に勉強してほしいのは、まず何よりも自分の専門の物理、化学、生物などである。

ただし、今述べたことは高校の理科教師を念頭においたことであって、中学の理科教師を目指す諸君の場合は、中学レベルの理科の全分野の知識が必要である。専門以外の勉強はむずかしいが、良い参考書がある。講談社ブルーバックスの『発展コラム式 中学理科の教科書』<sup>1</sup>である。古い指導要領の中学理科の単元構成であるが、単元ごとに教える内容の背景となるハイレベルな内容について短くまとめられている。物理・化学・生物・地学すべての内容を高校レベルで理解することは、現実には無理だから、中学校の教師になりたい諸君はこの本などを参考書として、自分の教える中学校理科の単元について理解を深めていってほしい。

高校の理科教師をめざすか、中学校の理科教師を目指すかで、理科教師として理解しておくべき理科の内容は異なる。実用的にいうと、そうなる。中学か高校で迷っている諸君には、ちょっと可哀想なことだが、免許は共に「理科」だが、実情が多少ちがう、ということである。

## 教科書をなぞるな

「理科教師が教えるのは理科である。」ということは、「教科書を教えるのではない。」ということでもある。

たとえば、中学1年の理科に「光合成」の単元がある。<sup>2</sup>この授業をするには、「光合成」

1 滝川洋二編『発展コラム式 中学理科の教科書 第一分野(物理・化学)』講談社ブルーバックス、2008年。石渡正志・滝川洋二編『発展コラム式 中学理科の教科書 第二分野(生物・地球・宇宙)』講談社ブルーバックス、2008年。

2 これは2020年まで使われていた教科書でのことである。以下、取り上げるすべての教科書は、そうになっている。2017(平成29)年の中学校学習指導要領改定以前である。高校の教科書は2018(平成30)年の高等学校学習指導要領改定以前である。

現象のポイントを理解していなければならない。単に、教科書をなぞっていても、授業にはならない。「光合成」現象のポイントを生徒に理解させることが「理科を教える」ということである。

さきに、「理科の内容をきちんと理解しておくことが必要だが、理科の内容を理解することは難しい」と述べたが、「光合成」現象のポイントを理解するためには、教科書を読むだけでは不十分である。

一般的にいえば、中学校の内容を教えるためには、高校レベルの理解が必要である。そういう一段階高いレベルの内容理解がないと、自分が授業する内容のポイントがどこにあるのかをきちんと理解することは無理だろう。先に挙げた『発展コラム式 中学理科の教科書 第二分野』などは、中学校で教える「光合成」現象のポイントを把握するのに便利である。

高校理科の教師には「大学時代に自分の専門の物理、化学、生物などを勉強してほしい」と言ったが、いま述べた一般論にしたがえば、高校の物理、化学、生物などを教えるには、大学レベルの内容理解が必要だということになる。

### 科学的概念を教える

「理科を教える」ということは、「科学的概念」を教えることである。

一般に、教育学の議論として、学校教育の任務は、子どもが日常の生活経験のなかで身に付ける体系性を欠いた素朴な概念を、体系的な知識体系である科学的概念へと転換することである、と言われる。

このような素朴概念を、旧ソビエトの心理学者ヴィゴツキーは「生活的概念」と呼んだが、ヴィゴツキーの用語を使って表現すれば、学校教育の目指すことは、「子どもの生活的概念を科学的概念へと転換する」ことである。これは、中学高校における理科教育の目的といってもよいだろう。

素朴概念は、誤った概念を含むことが多い。子どもの生活的概念の中には、しばしば誤りが含まれる、ということである。中学までの十数年の生活経験の中でつくられてきた「生活的概念」を「科学的概念」に転換するのだから、この「転換」は簡単でない。

教師が言うから、テストで正解を取るために、という程度に理解する。これが多くの中学生の姿だと、わたしは思っている。なぜなら、ほんとに科学的概念を身に付けるということは、そんなに簡単なことではないからである。教師の権威、あるいは学校教育の権威によって、生徒がそう信じる。あるいは、テストの解答にそう答える。

しかし、社会生活上は、それでよいのではないか。先に「常識的」科学観といったのは、そういう意味を含めてもある。これに関しては、ここではあまり議論しないでおく。

これは、中学校レベルで、どの程度の「科学的概念」を求めると、という形で考えるべきことでもある。中学校レベルと高校レベルは違う。高校レベルと大学レベルも違う。その違いは教科書に反映しているはずである。中学校レベルで「光合成」現象を科学的に理解するというのは、あくまでも教科書に載せてある水準で、「光合成」のポイントを理解することになる。ただし、そのためにも、教師はそれより一段階上のレベルの理解を必要とする。

「生徒が信じてくれればよい」という言い方には、疑問を感じる諸君も多いかもしれな

い。「生徒が信じてくれればよい」というのは、教師にそれなりの権威がある、ということである。生徒が信じるに足るだけの権威が教師の側にあるから、生徒が信じるのである。教師の権威という表現に抵抗を感じる諸君には、科学の権威と言った方がよいかもしれない。科学は信じるに足るだけの権威があるから、人々はそれを信じるのである。

ここで使っている「権威」という言葉は、ふつう宗教を念頭において使われるものだが、今述べたように、理科の内容を生徒が「信じる」という文脈においては、権威という概念が適正な使い方であると思う。したがって、科学の権威と言っても、教師の権威と言っても、同じことになるのだが、教師の権威が生じるためには、君たちは生徒より高いレベル、教える教科書よりも高いレベルの理科の知識を有していなければならないのである。この点に注意してほしい。

## 補注1. 生活的概念から科学的概念へ

### 日常生活の「範例による方法」

科学的概念の理解の難しさは、理科教育の根本にある、とわたしは考えている。

科学的概念の形成の前に、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うことについて考えてみよう。これは、渡辺慧が「範例による方法」と述べたやり方を考えるのがよい。

たとえば、母親が子どもに「犬」とは何かを教えるとき、たいてい次のようにする。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。すると、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おそらく言い当てる。

大人でもたいていの概念は、このように実例ないし「範例」を通して学ぶ。これがわたしたち人間の認知である。この「範例による方法」というのは、説得力がある。

この認知の仕組みを少し詳しく見ると、次のようになっている。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。子どもは、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。大人が花を見て、「この花はユリである。」というのも、分類である。分類は個々のものを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。

実例を通してものを知るとき、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。だから、認知とは、個物を一般者（類、クラス）に入れ込むことと言えるわけである。<sup>3</sup>

このように、わたしたちは日常生活では範例による方法を実行している。実例の場合、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ってよい。とくに、科学的概念は、実例そのものが一般者となるというもので

3 渡辺慧『認識とパタン』岩波新書、1979年、29頁。

ないことが多い。

### 直観から「仮説をつくって推理する」論理能力へ

生活的概念から科学的概念への転換にかかわって、仮説実験授業の板倉聖宣が「直観的な想像」と「論理的な想像」を対置していることが注目に値する。

板倉も渡辺と同じ「イヌ」の話題を取り上げる。子どもが「イヌ」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」というような会話をする。これについて、板倉は次のように言う。

この「イヌ」の概念は、「直観から出発し、直観内でうまく処理できる概念である」。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。」<sup>4</sup>

科学的概念では、「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。直観の幅がひろがる」。そして、「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」、と。

このように、板倉は、直観と論理を対置させた。この議論の運びから、板倉の「論理的な想像のよろこび」をどう名づけるか考えてみると、ピアジェが「形式的操作期」に出現するとした「仮説によって推理する能力」<sup>5</sup>というものがそれに当ると考えてよい、と私は思う。

ピアジェ自身の議論では、具体的操作期と形式的操作期で論理操作に質的違いがあるとし、「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形式的操作期、中学生の頃だということになっている。その点は、板倉の議論と少しずれるところもある。しかし、「直観的な概念」と「論理的な概念」と大括りにみれば、両者は同じ議論の上にあるとみてよいだろう。

つまり、ピアジェの発達論を中心に考えると、板倉のいう「直観的な想像」を「論理的な想像」へと転換させるには、ピアジェのいう形式的操作期を待つ必要がある、ということである。形式的操作期というのはほぼ中学校時代に相当するから、科学的概念の形成を本格的にはじめるのは中学校からがよい、ということになる。

4 板倉聖宣「仮説実験授業とは何か」、『科学と方法』季節社、1969年、260頁以降。

5 Piaget, *Logic and Psychology*, 1953. 邦訳『論理学と心理学』（評論社、1966年）。原書（英語版）は英国でのピアジェの講演ということもあり、論述が単刀直入で、ピアジェの意図を理解しやすい。ただし、ピアジェの説明は心理学的でなく難解だという、アン・パーソンズ（Anne Parsons）の指摘も存在する。パーソンズは、Inhelder & Piaget, *The Growth of Logical Thinking from Childhood to Adolescence* (1958) の英訳者である。それは次のように指摘する。「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現れるだけで、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。それゆえ、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。」(idem. Translator's Introduction, p. viii)

## 実験の解釈を求めるときの注意

「実例」ということにかかわって、実験について一言する。

実験とは実例である。しかし、実験そのものが科学的概念になるわけではない。たとえば、中学校理科のある教科書に、「粒子モデル」の話が出ている。<sup>6</sup> 液体のエタノールが入った密閉の袋にお湯をかけると、その袋が膨らむ、という簡単な実験をする。温度が上がると、エタノールが液体から気体になって膨張するという現象である。これを、「粒子モデル」で説明してみよう、というのである。

ここで教科書が求めているのは、この実験事実＝現象についての解釈である。解釈が多数ある中で、「粒子モデル」という現代科学の原子論的見方によって、考えてみよというのである。

「粒子モデル」による説明は、たしかに、現代科学における科学的概念である。しかし、それを中学生に求めることは、教育水準を無視した教育内容となっているのではないか。

教科書は、多くの中学生は、温度の上昇とともに、粒子の運動が激しくなることを知っている、と仮定しているようである。この仮定については疑問を感じるが、今はそれについては異を唱えずに、議論をすすめていこう。

粒子の運動が激しくなれば、粒子同士が衝突する割合も増えるだろう。すると、どうなるのか。粒子の速さが大きくなるから膨張するといえるか。粒子同士の衝突も増えることを考慮すると、そう単純ではない。この辺りが難題になる。これは極めて高いレベルである。理想気体を仮定する高校レベルをはるかに超えているといつてよい。

教科書は、その点について考えていない。

## 「粒子モデル」について

この「粒子モデル」について生徒から質問されたらどうするか。分子や原子が存在することは、科学的な事実である。そして、後の単元で、中学校でも、それについて教えることになっている。

たとえば、次のように答えてはどうだろうか。

「温度が上昇すると粒子の運動が激しくなる。」(ちょっと発展的なレベルで答えると、「温度が上昇することは、粒子の運動が激しくなることと同じことなのだ」と言う。運動エネルギーについて教えられた中学生になら、もっと突っ込んで、「温度が上昇することは、粒子の運動エネルギーが大きくなることなのだ」と答えてもよい。)そして、「粒子の運動が激しくなるというのは、粒子の速さが大きくなることだから、粒子が袋の壁に与える力が大きくなって、袋が膨らむのだ」と。

速さが大きくなると、粒子が壁に与える力が大きくなる、というのは、高校力学でやる「運動量の変化は力積に等しい」ということだから、そこの説明は、中学生にしない方がよいだろう。

生徒から質問を受けたら、教師は答えるしかない。しかし、生徒が理解できるレベルで、せいぜい発展的レベルで答える、というのが、一般的である。そうしないと、科学的概念を形成していくことに対して逆効果となってしまう。そこを考慮することが重要である。

6 『新版 理科の世界1』大日本図書、2015年検定済、101頁。

(「粒子モデル」については、「第4章 粒子モデルのむずかしさ」において改めて取り上げて論じたいと思う。)

## 第2章 科学の特徴

### 発見型科学と仮説検証型科学

君たちは理科教師として「理科を教えるのだ」と言ってきたが、「理科の特徴」とはどんなものか。ここで、少し考えておこう。

「理科」を英語にすれば‘science’だから、「理科」とは「科学」のことだ。「科学」という言葉は、「学問」という広い意味でも使われることがある。「学問」という意味での「科学」は、ふつう自然科学、社会科学、人文科学に3区分される。その場合、「理科」とはこの内の「自然科学」を指す。以下では、「科学」という言葉で「自然科学」を指すことにする。

君たちが大学において物理学や化学を習っても、その中で、その学問の特徴を改まって説明されるということはふつうない。物理学や化学の大学レベルの教科書を見ても、そのような議論をしている本は見かけない。ところが、面白いことに、生物学の教科書には、「科学の特徴は何か」という議論がある。キャンベルの生物学の教科書『エッセンシャル・キャンベル生物学』には、次のように書かれている。

「科学とは、情報を集めて説明し個別の疑問に答えるという研究プロセスに根ざして、自然界を理解する手法である。自然界を理解するこの根本的な研究法には、自然を記録することを主体とした発見型科学と、自然を説明することを主体とした仮説検証型科学がある。多くの科学者はこれら2つの研究を組み合わせ実践している。」<sup>7</sup>

「発見型科学」とは観察や測定でデータを集めることである。観察には、「新種の発見」なども含まれることになる。これら多くの観察から疑問が提示され、その説明が求められることになる。その説明をすることが「仮説検証型科学」のプロセスとなる。疑問に対する説明として「仮説」をつくる。すぐれた仮説は、実験によって検証できる「予測」を含んでいる。だから、実験すれば仮説が正しいか間違っているかがわかる。

### 科学のプロセス

上で述べたことをまとめると、科学のプロセスは次のように進む。

「観察」→「疑問」→「仮説」→「予測」→「実験」

上のようなプロセスによって、「実験」をして検証された「仮説」は、「理論」となる。正確に言えば、「理論」の一部となる。「理論」というのは、「仮説」の説明より遥かに適用範囲の広い、包括的な説明である。そこから多くの仮説が生み出されるような普遍性・一般性をもった説明である。

このように、キャンベルの教科書は、科学の特徴を説明している。

念のために言うと、この特徴づけは、生物学だけに当てはまるのではなく、物理学や化学を含めたすべての自然科学に当てはまる。そういう一般的な特徴づけである。上の段落

7 『エッセンシャル・キャンベル生物学 原書6版』丸善出版、2016年、4頁。

の最後で出てきた「理論」、つまり「仮説」の説明より遥かに適用範囲の広い包括的な「説明」としての「理論」の代表例として、キャンベルの教科書は、物理学の分野にはいる「ニュートンの力学」を挙げている。

これは一般的に認められていることで、自然科学の典型的モデルは、ニュートン力学である。このことは君たちに知っておいてもらいたい。

## 補注2. 科学の社会性

### 科学者の共同体が科学的真理を決定する

大きなキャンベルの教科書では、科学の現実のプロセスについて、『エッセンシャル・キャンベル生物学』よりもさらに丁寧に説明しており、そこでは「社会の影響」にもふれている。<sup>8</sup>

上に述べた、「観察」→「疑問」→「仮説」→「予測」→「実験」へと向かう「発見型科学」と「仮説検証型科学」は、科学研究のプロセスの中核である。現実には、そこに「科学者の共同体」や「社会」との関係もからんでくる。

「どの仮説が検証されるべきか。」

「検証結果はどのように解釈されるべきか。」

「発見にどのような価値があるか。」

これらに対して大きな影響を与えるのは、「科学者の共同体」である。さまざまな専門学会を思い浮かべればよい。科学的真理を決めるのも「科学者の共同体」だと言ってよい。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。

2006年に、それまで惑星だった冥王星がそうでなくなった。これは国際天文学連合 (IAU) の総会において多数決により決定された。この総会で、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。

### IAUによる真理変更

これは惑星科学の進歩であるが、このように科学において真理が変更されることがある。その場合、真理を決定する手続きは、政治的な多数決と同様、多数決である。異なるのは、政治的多数決が市民全員による多数決であるのに対し、科学的真理は「科学者の共同体」に属する者だけの多数決だという点にある。その分野の専門家たちの多数決である。

ふつう科学の最先端では、科学者同士の意見は分かれ、解釈は複数ある。最先端の状況とは、学説が幾つかに分かれている状態だといってもよい。学説がまとまったときには、真理が確定し、その領域は最先端ではなくなっているわけである。

今日でも、冥王星を準惑星と分類することに反対する科学者もいる。しかし、準惑星というカテゴリーをつくるのが研究を進めるための科学的概念として決められたということである。

<sup>8</sup> 『キャンベル生物学 原書11版』丸善出版、2018年、19-20頁。この教科書では、科学のプロセスが、単純な直線的なものではなく、循環をなしていることにふれている。

この最先端における決定は、学校現場という、科学の末端ともいえる場所に直接的な影響を与えた。わが国の中学校理科では太陽系を扱うが、翌年発売された教科書からは、太陽系の図の中にそれまであった冥王星が消されることになった。

### 個人的に経験した真理変更

冥王星が惑星でなくなった事例は、科学者共同体における真理変更のあり方を示す典型である。しかし、つねに多数決を取って真理変更がなされるわけではない。むしろ、ふつうには、時間が経過する中で多数派が形成されていくという形をとる。

私自身が経験した「真理変更」と呼べるものをあげよう。この事例は「統計力学の基礎づけ」というものに関するもので、物理の学生以外には内容理解がむずかしい、と感じると思う。そういう諸君はここを飛ばして、次の項目を先に読んでくれたほうがよい。

真理変更の内容を一言でいえば、エルゴード仮説に基づいて統計力学を基礎づけようとするのが「今日では、的外れの議論」となり、「エルゴード仮説は統計力学にとって不要のテーマ」となった、という田崎清明の主張である。<sup>9</sup>

昔、朝永振一郎の『量子力学』にある付録「ボルツマンの原理」<sup>10</sup>での議論を読んで、統計力学に確率の式が出てくる理由を理解できたと思った私にとっては、エルゴード仮説を使ってその式を導出することが「的外れの議論だ」と30数年後否定されたことは、朝永を読んだときと同じくらいの驚きであった。

古典力学では相空間での体積が保存する、というリウヴィルの定理が成立する。相空間というのは、すべての粒子の位置と運動量を座標にとったものである。粒子がN個あれば6N個の実数の組で全系の状態を指定する。エルゴード仮説というのは、観測される状態の物理量の時間平均が相空間での平均に等しくなることを主張するものである。時間平均を求めるときに、時間を無限大にして極限をとる。これが問題になる。物理的な測定は有限時間内に行われなければならないからである。

相空間の代表点が状態全体をくまなく訪れるのにかかる時間（相空間におけるトラジェクトリが等エネルギー面をくまなく巡っていくのにかかる時間）を実際に考えてみると、それはとてつもなく長くなってしまふ。一辺が10cmの立方体の中に1個の気体を入れた場合を考えてみると、次のようになる。

「たとえば、立方体を一辺が $10^7\text{m}$ の小立方体に分割し、粒子がこれら $10^{18}$ 個の小立方体すべてを訪れるとする。粒子は最低でも、 $10^{18} \times 10^7\text{m} = 10^{25}\text{m}$ の距離を移動する必要がある。仮に $1000\text{m/s}$ の速さで進んだとしても、この距離を移動するのに要する時間は $10^8\text{s}$ 、つまり3年くらいになる。2個の粒子の配置を考えたとしても、 $10^{18}$ 年のオーダーの時間がかかる。宇宙の年齢は、たったの137億年だ。アボガドロ定数 $6 \times 10^{23}$ のオーダーの個数の粒子の配置を考えると、気が遠くなる。」(田崎, 99頁)

このように、たった1個の粒子で考えてみても、すべての状態をとるには数年のオーダーとなる。アボガドロ数ほどの粒子を問題にする現実の測定は不可能である。

<sup>9</sup> 田崎清明『統計力学I』培風館, 2008年, pp.96-100, 「エルゴード仮説をめぐって」。

<sup>10</sup> 朝永振一郎『量子力学I〔第2版〕』みすず書房, 1969年, pp.245-260, 「付録I Boltzmannの原理」。

そこで、田崎は、エルゴード仮説を前提としない、別の形で平衡統計力学を基礎づける。それは説得的である。今後、それが多数派となって、「統計力学の基礎づけ」に関する「真理変更」が実現する、と私は田崎の本を読んで感じた。

## 社会の影響

科学の研究は、科学者の共同体だけでなく、それより広い一般の社会そのものとも関係してくる。

科学の研究には、お金がかかる。現代では研究資金に公的資金が補助されるのがふつうである。とくに巨大なプロジェクト研究は、公的資金がなければ研究がすすめられない。そこで、「どんな研究のプロジェクトに資金をつけるか。」ということが問題となってくる。

現実に資金配分を決定するプロセスはいろいろあるが、具体的なその多様さにもかかわらず、究極のところ資金配分を決めるのは、大きく見れば、社会の要請とみるのがよいだろう。ここでいう「社会の要請」というのは、たしかに漠然としているが、具体的な個々の利害をならしてみれば、そのように表現するのが適切である。

たとえば、ガンの治療をすすめることや気候変動の実態を解明することなどに対しては、社会の大きな要請があるといってよいだろう。そういう大きな社会的要請に応える研究に対して、多くの資金が提供される。そうするのが社会的に妥当な研究資金配分の原則というものになる。

このように、科学の研究も社会の中で行われるから、その影響を受ける。また、これとは逆に、科学の成果である技術が社会にプラス・マイナスさまざまな影響を与える面もある。これをテーマとする研究はSTS（科学・技術・社会）といわれる。これを教育で取り上げるものをSTS教育というが、最後の第8章においてそれを扱うので、科学と社会の関係については、そこでもう少しふれることにしようと思う。

## 第3章 自然の階層性と科学的概念

### スケールに基づく自然の階層

現代の自然観では、大きさをスケールにとって、自然をいくつかの階層に分け、自然を理解している。階層区分の仕方は相対的なものであり、1つというわけではない。無生物(=物質)については、たとえば、次のような階層区分になる。

(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)

高校までの学校教育で、これらすべての階層が出てくるわけではない。学校教育が対象とするのは「銀河系」から「陽子・電子」までである。「銀河系」は中学校では用語として登場するだけで、その構造を扱うのは高校の地学においてである。「クォーク」は原子核の構造を扱わないと出てこない。それは大学レベルの物理学の特殊な領域に属する。理科教員としては、それが原子核をつくることにかかわること程度を知っていればよい。理科教員全員がよく知っておくべきことは、「太陽系」から「分子・原子」の階層レベルということになるだろう。

重要なことは、階層ごとにモデルと「理論」がつくられることである。階層間の「理論」

はそれよりむずかしいものとなる。たとえば、原子と電子の関係は、原子の構造ということになり、それを正確に理解するには量子力学が必要である。それが君たち全員に必要なわけではない。

### 無生物を対象とする物理・化学・地学

物理・化学・地学が無生物(物質)を対象とするが、それぞれが対象とする階層は異なる。地学は「銀河系」から「地球」までを対象とする。中学校で考えれば、その内、とくに「太陽系」と「地球」を対象としている。

物理学は、物質についての基礎理論である。それゆえ、物理学はすべての階層を対象とするが、階層ごとにモデルをつくるので、「理論」は階層ごとにつくられていると考えるのがよい。そのうち、高校までの物理で扱うのは、「人間」レベル、私たちが身近に目にする現象のレベルである。

例外は、地球を回る人工衛星の運動と、光電効果やコンプトン効果やボーアの水素原子模型など「原子」の世界である。ともに高校物理で扱う。前者を一般的に扱うには大学レベルの力学が必要となるが、高校で扱うのは、円運動となる場合である。一般の軌道については、力学的エネルギー保存の法則で処理できる問題に限り、楕円軌道そのものは扱わない。光電効果やコンプトン効果は、ド・ブロイの関係式を認めるだけで、高校の力学(エネルギー保存側と運動量保存側)で処理できる。<sup>11</sup> ボーアの水素原子模型も、円運動として話をすすめる。

「コリオリの力」が高校地学の気象で登場するが、そこでは結果だけを教える。どうしてそうなるかの理論的説明はしない。「コリオリの力」を理論的にきちんと説明するのは、大学レベルの力学である。「コリオリの力」は、高校物理に出てくる「遠心力」と同様に、地球という回転座標系から観測したときに生じる「見かけの力」である。<sup>12</sup>

化学は、主に「分子・原子」レベルを扱う。化学反応は、君らも知っての通り、原子と原子の結合の変化である。しかし、化学が扱うのは化学反応だけではない。物理的変化も扱う。中学校理科の最初の単元「身の回りの物質」に出てくる「物質の状態変化」がそれである。理論としては、「熱力学」の理論となる。物理的変化であるから、これは物理でも扱う。「熱力学」というのは物理学における名称である。

ハイレベルなことをいうと、熱力学の理論は、原子の存在を仮定しない現象論で、すべてのマクロな階層レベルに適用可能である。大学では化学科でも「物理化学」の一部として勉強する。<sup>13</sup>

11 ちなみに、コンプトン効果の計算は、高校の力学では近似式となるが、特殊相対性理論を使う方が簡単できれいである。

12 正確に言えば、静止座標系における運動方程式を、回転座標系へと座標変換したとき、回転座標系での運動方程式の中に出てくる項を、「遠心力」とか「コリオリの力」とか解釈するのである。運動方程式というベクトル式を座標変換するという数学的な変形が、大学レベルなのである。

13 『アトキンス物理化学』(東京化学同人、第8版、2009年)で「平衡熱力学」と呼んでいる部分である。

## 生物学の階層性

生物についても階層に分けて考えるが、それは先に見た無生物の階層区分とは異なる。生物学独自の階層区分も相対的であり、絶対的なものがあるわけではない。一般的には、たとえば、次のようになる。

(大) 生態系 — 種・個体 — 細胞 — 高分子 (小)

「種・個体」のレベルは、人間とか犬とかユリとかである。無生物についての階層でいえば、「人間」レベルに相当する。

「個体」と「細胞」の間に「器官・組織」のレベルを立てることもある。個体としての人間の構造と機能は、器官が構造化されたものとして考えると、よく理解できる。器官ごとに独自の機能を有しているからである。

動物でも植物でも、それぞれ数十兆という「細胞」からできている。「細胞」は、主に各種タンパク質などの「高分子」からできている。細胞の中にあるDNAも「高分子」である。細胞もよく見ると、そこに構造がある。生命とは、自己再生するものことだが、この自己再生の単位が細胞である。

単細胞生物が生命の最小単位である。境界というものにはすべて曖昧さがつきまとうが、非生命体と生命体としての細胞との境界にも曖昧さがある。そしてこれは難しい議論になるが、ともかく生命の出発点に「細胞」があると考えるのがよい。

大きなスケールの「生態系」とは、様々な種の個体群が織りなす関係の全体、関係の関連性全体を指している。そこには、気候など、生物を取りまく環境も含まれる。環境の変化や、個体群の中の一部の種の個体数の増減などが、他の個体群と環境に逆作用を及ぼす。そのようなダイナミックな動きを生態系では見ていく。

生物学では、このような階層ごとに理論がつくられている。キャンベルの教科書の表現を使えば、階層ごとに、多くの「仮説」を生み出せる包括的な説明(=理論)がつくられるのである。

## 階層ごとのモデルと理論

無生物についての理論での階層モデルについて、少し補足がある。さきほど述べたように、物理学が物質についての基礎理論となる。基礎理論というのは、すべての階層に対して、その理論が適用できる、という意味である。それなのに、なぜ階層ごとに理論をつくるのか。その点に少しふれておきたい。

すべての階層に対して古典力学(ニュートン力学)が正しいとは言えないのだが、「人間」レベルから「太陽系」レベルまでを考えると、古典力学と電磁気学と熱力学が、基礎理論となるといってよい。<sup>14</sup> さきの階層のすべてに適用できる。適用できるというのは、その理論による予測値が測定誤差の範囲に収まる、ということである。

これら3つの理論のいくつかの基礎方程式を、高校で学ぶ。代表的なのは、ニュートンの運動方程式である。

<sup>14</sup> 「分子・原子」レベルのスケールを扱うには、古典力学でなく量子力学(と特殊相対性理論)が必要である。「銀河系」レベルを扱うには一般相対性理論が必要とされる。「太陽系」における運動でも、水星の運動の扱いにみられるように、厳密な扱いには一般相対性理論が必要となる。

物理学が基礎理論だといったが、熱力学は化学の「物理化学」の中にも入っている。高校化学でやる「ボイル＝シャルルの法則」は熱力学の基礎方程式である。高校物理の方ではこれを「熱の状態方程式」という。

基礎方程式は、「階層を超えて」適用できる性格のものごとである。

すると、階層ごとに理論がつくられるということと矛盾したことを言っているように見えるかもしれない。

実は、3個以上の物体の運動については「3体問題」と言って、ニュートンの運動方程式を解くことができなくなるのである。<sup>15</sup> 君たちが連立方程式の解を求めるような形では、解くことができないのである。そういうことから、粒子が多数になった場合は、階層ごとに簡単なモデルをつくって解いていくのである。そういう意味で「階層ごとの理論」となるわけである。

## 中高の理科と階層モデル

結果として、どうなるかということ、中学の理科では、数式が出る場合は簡単な式となるが、その式が出てくる理由については、中学高校レベルを超えた理論によらないとわからない。そういう場合がほとんどである。

高校の物理になると、運動方程式をはじめとして、結論の式が出る理由も少しわかるようになる。化学、生物にも少し計算は出る。地学で扱う公式は、結論だけが与えられるとあってよい。

中学校の物理の範囲では、「人間」レベルしか扱わない、とあってよい。その中での区別は、現象の区別となる。運動を扱う力学、電気と磁気の現象、中1にある「波」の現象（光と音波）となる。

このうち「波」は、理論的考え方から言うと、数学的処理の話となる。「波」は振動が伝わる現象だから、空気の振動が伝われば「音」となり、電磁場の振動が伝われば「光」となる。地学の範囲にある「地震」も、大地（の一部）の振動が地球を伝わる現象である。振動するものは異なるが、これらすべてが「波」として処理できる。振動を伝える媒質も異なってよい。空気中、水中、あるいは真空中、ガラスの中、大地の中と、いろいろある。

音や地震の波は力学的な力を考え、光は電場と磁場を考えるが、それらで導出された式が、数学で「波動方程式」といわれる形の式になる。波動方程式そのものは、大学の物理のレベルになる。

レンズについては、「幾何光学」という数学的に簡単な形になる式を使う手法もある。

<sup>15</sup> 「3体問題」というのは、3つの質点間に万有引力が作用している場合である。たとえば、太陽と地球と月の3つを考えて、地球の運動を求める場合である。これには、ふつうイメージするような意味での「解」はない。方程式を解析的に解くことはできないのである。地球が太陽を1つの焦点とする楕円軌道を描くというのは、太陽と地球の2体問題を解いた時の解であって、月を考えに入れると解は一般に求められない。現実には、月以外の木星や火星などの影響についても、摂動論などを使って漸近的に近似的解を数値的に求めていく。発想としては、2体問題として求めた楕円軌道の数値解を第1次の近似解とし、次に月による万有引力の影響を加えた方程式で数値を求める。その解を第2近似とし、次に木星による万有引力を加味して第3次解を求め、次に、小惑星群、土星、火星、等々と計算していく。摂動論は、量子力学でも出てくる。現代では、こちらの方が物理の学生にはなじみがあるだろう。レベルとしては高い。

これは、式の形が簡単になるというだけでなく、力学の原理をどのように考えるか、という理論的立場とも関連する難しい話にもつながる。<sup>16</sup>

---

**16** 量子力学の中にファインマンの「経路積分」という考え方が出てくる。これが「幾何光学」のある種の発展である。実はこれらは、物理学の基本を「最小作用の原理」とみる理論的立場に立つものである。力学はふつうニュートンの3法則を基礎方程式とする。それに対して、「最小作用の原理」から運動方程式を導出する立場がある。たとえば、ランダウ・リフシッツの『力学』（東京図書、増訂第3版、1974年）。これは、古典力学の一つの理論的表現で、ふつう「解析力学」といわれる。