



|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 物理教育における教科内容の非伝統的組織化についての考察   |
| Author(s)        | 大野, 栄三  |
| Citation         | 教授学の探究, 20, 85-98   |
| Issue Date       | 2003-03-10  |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/13637">https://hdl.handle.net/2115/13637</a> |
| Type             | departmental bulletin paper   |
| File Information | 20_p85-98.pdf   |



# 物理教育における教科内容の非伝統的組織化についての考察

大 野 栄 三

(北海道大学大学院教育学研究科)

## 1. はじめに

学校教育の中での科学教育において、市民の科学リテラシーとして何をどこまで学んでおくかは、21世紀の科学教育カリキュラムをデザインする上で、教育関係者だけでなく市民もひろく参加して検討が行われなければならない重要な課題である。それは単に教育内容——以下では実験・観察教材も教育内容に有機的に組み込まれているものとする——の取捨選択だけを検討することではない。選択された教育内容が具体的な授業として有効に展開されなければならない、そのためには、系統性や順次性といったことを考えながら、教育内容を教科として組織化していかなければならない。

日本では不幸なことに、法的拘束力をもつと言われる学習指導要領による縛りと、教科書検定制度によるその周知徹底というシステムのおかげで、教科内容の組織化について学校現場があれこれと思い悩む必要はなくなっている。学習指導要領の改訂の度に、流行りの教育論とあわせて教科内容の何がしかの組織化が理由もなく提示される。そして、日本全国の学校において、この組織化の枠内で授業が展開されていくことになる。学習指導要領や教科書検定システムが、教師や市民の手による科学教育カリキュラムのデザインを強く制約しているという問題は大きい。しかし、学習指導要領が示す教科内容の系統を価値のないものとして切り捨てるのではなく、組織化のひとつの例として可能な限り客観的に評価しておくべきであろう。

本稿では、物理教育における教科内容の組織化について、波動の学習、光と音の学習を中心に検討する。その際に、中学校・高等学校学習指導要領（理科）の物理分野の教育内容だけでなく、明治期中学校物理教科書に見られる組織化と比較し、そこにある特質が現代においてどのような意味をもつのかを考察する<sup>1)</sup>。

## 2. 教科内容の系統とは——自然科学教育を例として

教科内容の系統について、自然科学教育の場合について述べておく。真船和夫は系統性と順次性について以下のように述べている。

「理科の内容(教材)の構成や配列は、自然科学の諸法則の間にある本質的な関連に合致するものでなければならない。これが自然科学教育の内容(教材)に関する系統性の原則である。……(中略)……子どもがさまざまな自然法則を認識していく過程は、それぞれの法則と子どもの心的な特性に支配されたある順序をふんで発展していく。これが認識の順次性である。理科の学習はこうした認識の順次性に合致したものでなければならない<sup>2)</sup>。」

系統性と順次性についてのこのような規定を受けて、系統性を決めるのは自然科学の論理で

あり、順次性を決めるのは子どもの認識をつくる心的過程や生活の論理であるという分割した捉え方をする人もいる。しかし、本稿ではそのような区別を強調しない。系統を議論するときにも子どもの認識過程や生活経験が問題とされなければならないし、順次性を考察する際にも自然科学の論理が重要な役割を果たすからである。ある程度の大きさをもつ教育内容のまとまりがどのように配列されるべきかを、教えと学びの両面において考察することが系統性の議論である。そして、系統を考える場合に対象とした教育内容のまとまりを、具体的な授業として展開するときを考えなければならないミクロな配列が順次性の問題である。

教科内容とは、教育内容を教科として組織化したものである。自然科学教育では、教科と関連する物理学や化学といった学問領域のあることがその教科を成立させる前提として要求される。教育の内部で閉じてしまった自然科学教育は教科としての意味を持たない。教科の目標に応じては、科学史、科学哲学、技術論、倫理学などさまざまな領域が含まれることもあるだろう。教科に関連する学問領域が複合的・学際的であっても構わない。

教科が関連する学問領域の成果はそのままでは教育内容とはならない。子どもたちが学習可能な教育内容となるように、そういった学問領域の法則や概念に対して適切な変換を施さなければならない<sup>3)</sup>。自然科学の成果である概念や法則、そして研究活動である実験や観察に適切な変換が施されることで、私たちは教育内容となる具体的な知識や技能を得ることができる。たとえば、沸点という概念の辞典的定義は、「液体の飽和蒸気圧が外圧に等しくなる温度で、沸騰がおこるときの温度をいう。すなわち一定圧力のもとでの飽和蒸気とその液相とが平衡に共存しているときの温度である。純粋液体では一定外圧における沸点はその液体に固有な物質定数である<sup>4)</sup>。」ということになる。しかし、このままでは教育内容ではない。中学校段階の子どもに教えようとするなら、「沸点とはそれ以上の温度では液体が液体の状態ではいられなくなる温度のことである。物質が異なると沸点も異なる。」というように、具体的に学習可能な知識へと変換されなければならない。

教科が関連する学問領域はそれ独自の構造をもって体系化されている。自然科学の成果である法則や概念によって構成される知識の集合は、経験とつながりをもつ内的整合性の高い構造の中に埋め込まれている。自然科学の学問領域——物理学、化学、生物学など——がもつ構造は、法則や概念からなる知識と実験事実の立体的な網状構造 (network, web) であると考えることができる。ここで想定している網状構造とは、単語レベルの言葉を概念と捉え、言葉と言葉の関連づけを表現しようとする通常のコンセプトマップではない<sup>5)</sup>。むしろ概念である言葉と基本的法則から構成された命題 (propositions) や実験事実を述べた文 (statements) の間の coherent, incoherent な関係を問題とするような網状構造である。つまり知識がつくる網状構造である<sup>6)</sup>。

われわれが知識の網状構造の体系を理解しようとするときには、網の目をつくっている特定の知識から出発して、適切な道筋をたどりながら網状構造の中のさまざまな知識を組織化していくことになる。そのような組織化の道筋は一意的に定まるわけではない。出発地点や途中の道筋にはいくつかの選択肢がある。物理学の中の力学を例にすれば、Lagrangian から始める解析力学と、Newton の3つの運動法則から始める力学というようにさまざまな組織化が可能である。また電磁気学では、とにかく Maxwell の電磁場方程式が成立すると最初に強調することもできれば、それは最後に回して Coulomb の法則から始めることもできる。これらの組織化はそれぞれに内的整合性をもっており、互いに矛盾するわけではない。体系があり組織化が行わ

れるというよりも、こういった組織化の集まりによって物理学の体系がつくられているというのが実際であろう。

学問領域の変換によってつくられる教育内容も体系——さまざまな組織化の集合をもっている。しかし、教育内容の体系は学問領域の体系すべてをそのまま写し取ったものではない。変換によって教育内容となった知識の集合はそれ独自の網状構造をつくるのである。さらにその網状構造は子どもたちの経験事実や素朴で曖昧模糊とした考えとも coherent、もしくは incoherent につながっている。なぜなら、教科内容がもつ体系は学問領域の網状構造の本質を反映しながらも、それだけにとらわれるのではなく、子どもが納得・理解していくプロセスに配慮したものでなければならないからである。このような制約は、教育内容を教科として組織化する際に大きな影響を与える。教育内容が現実の授業で使われるためには、体系のどこから始めて、どのような道筋をたどるのかという組織化が検討されなければならない。このとき、子どもが理解可能な道筋で組織化されなければ意味がないのは当然である。教育実践可能な組織化の具体例が集まることで教科内容の体系が決まるのである。

いくつもの教育内容は時間軸に沿ってある順序で配列されることによって、はじめて具体的な授業プランになる。教科内容の組織化というのはそういうことである。そうやって展開される一連の授業の中で、子どもたちは学ぶに価する教育内容と知的に格闘していく。そうした一次元の時間軸上に連なった学びの中から、教科内容がもつ網状構造——これは学問領域がもつ網状構造の本質を反映した構造をもっている——を子どもたちが構成できるようにしなければならない。

教科内容の系統とは、一連の授業プランを実践可能な順序で配列し、教育内容を組織化することを意味する。子どもが納得できるという条件を考えれば、組織化に対して何らかの制限が課せられるのは当然であろう。しかし、教科内容の組織化が一意的に定まるものかどうかは未だ不明である<sup>7)</sup>。

本稿では明治期の教科書、特に中学校教育で使用された物理教科書を分析し、そこから得られる教科内容の系統について考察する。教科書を対象としているため、具体的な授業プランのレベルではなく、教科書記述レベルでの組織化の検討に限定される。そのような制約はあるが、教科書記述レベルの比較検討から、現在の理科教育に見られる組織化のあり方やそれがもつ問題を解決するための方向性を見出すことができると考える。

### 3. 教科内容の伝統的な組織化——大学、高等学校の物理教科書から

科学の学問領域を強く反映した教科の組織化を見ることができるのは、大学の基礎教育で使用される物理学の教科書であろう。『基礎……』といった書名が付けられている物理学の教科書の多くは、教育内容のまとめりとして、力学、波動、熱、電磁気学から構成されている。このような学ぶ上のまとめりは学問領域の体系化から大きくはずれるものではない。これまで多くの教科書で大まかな枠組みとして踏襲されており、教科内容の伝統的な組織化をかたちづけている。

非常に荒っぽい捉え方ではあるが、伝統的な組織化が行われている物理学教育は次のようなまとめりをもった教育内容から構成されていると言えるだろう。力学の内容は解析力学を含まない古典力学であり、特殊相対性理論を簡単に取扱う場合もある。波動の内容は、光と音の波動現象から屈折、反射、回折、干渉といった概念を学ぶ。熱は熱力学の学習であり、多くの場

合、物質をミクロスコピックに把握し、統計力学の手法を用いて物性を議論するところまでには到らない。電磁気学は Coulomb の法則からはじめて、Maxwell 方程式が最後に登場するという流れが多い。

物理学教科書の多くは力学の学習から始まる構成を採用しているが、力学教育それ自体の内部では、いくつかの学習の出発点と道筋がある。たとえば、Newton の運動の第一法則(慣性の法則)、運動の第二法則 ( $F=ma$ )、運動の第三法則(作用・反作用の法則)の三つをどのような順序で学ぶのかは教科内容の組織化を考える上での重要な課題である。そのような細部の組織化が問題とはなるが、物理学の学習を力学から始めるというのは多くの教科書に共通した特徴である。力学を学習した後、波動→熱→電磁気学、熱→波動→電磁気学、波動→電磁気学→熱といった系統で教育内容が組織化されていくが多いと思われる。これらの系統が物理学基礎教育の伝統的な組織化のあり方であると言ってよいだろう。

高等学校の物理教育でも、このような教科内容の伝統的な組織化を確認することができる。『高等学校・学習指導要領・理科編(昭和31年度改訂版)』では、力の学習から始まる物理教育の伝統的な組織化が示されている。平成元年告示の『高等学校学習指導要領』(理科)にある物理IBまでその伝統的な組織化が続いている。物理IBの教科書を見てみると、力学からはじまり、熱(エネルギーという章名)、波動、電流と電子(磁気については学ばない)という伝統的配列が踏襲されていることがわかる。

大学の基礎教育では運動方程式は微分方程式として説明されるが、物理IBでは学習指導要領の縛りがあるため微積分が使用できない。そのため、運動方程式とその解は代数式として取扱われることになる。これでは、初期条件( $t=0$ での位置と速度)と力の場が与えられたときに、その後( $t>0$ )の物体の運動が導出できるという運動法則の重要な特質が強調されておらず、力学の問題とは、たとえば代数式  $s = v_0 + \frac{1}{2}gt^2$  を解いて距離  $s$  や時間  $t$  を求めることではない。いたずらに微積分を使うばかりでは仕方ないが、教えるべき本質をつかんだ優れた教育内容への変換が運動方程式の指導についてはまだ実現していないと思う。

個々の教育内容をつくる変換には問題はあるのだが、大学の基礎教育や高等学校の物理教育に見られる伝統的組織化——つまり、力学から始める組織化が根本的に間違っているわけではない。学ぶ側の問題をひとまず脇に置かならば、物理学という学問領域の体系を強く反映した教科内容の組織化は、それはそれでひとつの自然なあり方と言える。

#### 4. 教科内容の非伝統的組織化——光と音の学習から始まる物理教育

近年、中学校や高等学校における理科教育で伝統的な組織化と異なるものが登場している。小中学校では教育内容が削減されて高校教育に移されている。そのため高等学校での理科教育の内容は過密になっている。理科の中に選択科目が多数設置され、さらに各選択科目の中にも内容の選択がつくられ、それまでの教育内容の量が何とか全体としては維持できるように帳尻合わせをしているというのが現状である。これまでのように教科内容の伝統的な組織化を維持することが難しくなっている。

##### 4-1. 電気の学習で始まる高等学校物理教育の組織化

平成15年4月1日施行予定の『高等学校学習指導要領』(理科)の物理Iは、電気の学習からはじまっている。そのつぎに波の学習があり、力学の学習「運動とエネルギー」へと続く(表

1を参照のこと)。最初に置かれている電気の学習には「電気と生活」、「モーターと発電機」、「交流と電波」という項目がある。どれも現在の中学校の理科教育から削除された教育内容である。「電気と生活」では電気製品の消費電力を学ぶが、エネルギー概念は取扱われない中途半端な内容になっている。こういった教育内容を高等学校の物理教育の最初に置くことにしたのは、中学校で削減されたものだからとりあえず最初に済ませておくことにしたのか、それとも生徒にとって生活上身近な事柄であるからだろうか。それぐらいの理由しか思い浮かばない。

中学校で削減されたものだからとりあえず最初に持つてくるという考え方は、教科内容の組織化として決定的に間違っている。高校教育は義務教育ではないし、高校進学率が90数%に達したとはいえ、数%の子どもたちは毎年中学校を卒業して社会に出ているのである。義務教育における自然科学教育はそれ自体で一応の完成した教科として組織化されていなければならない。したがって、高等学校の自然科学教育においては、新たにそれ独自の考え方で教科内容の体系化、組織化が検討されるべきであり、中学から移行された内容だから冒頭に置くというのはおかしい。

また、生活上身近だからという論理が教科内容の組織化の原理としてそれほどの説得力を持たないことは、戦後の生活単元・問題解決学習についての論争で明らかにされたことであろう。『中学校・高等学校学習指導要領・理科編（試案）——昭和26年（1951）改訂版』にある「高等学校（物理・化学・生物・地学）の単元とその展開例」には、電気の学習から始まる教科内容の組織化が示されている。「単元Ⅰ 電流にはどんなはたらきがあるか」として「1. 摩擦によって起った電気はどんな現象を示すか」、「2. 電流の強さを加減するにはどうしたらよいか」、「3. 電流によって物質はどのように分解するか」、「4. 電流によってどのくらい熱と光が発生するか」、「5. 電流と磁石にはどんな関係があるか」という構成になっている。電気を学んだ後は光の学習になる。しかしながら、このような組織化も、次の『高等学校・学習指導要領・理科編（昭和31年度改訂版）』では、はやくも力から始まる伝統的な組織化に変更されており、長くは続かなかったことがわかる。

いずれにしても、平成15年実施予定の『高等学校学習指導要領（理科）』の物理Ⅰにある電気の学習は全体との関わりや組織化の根拠が不明確であり、教科内容の系統を考察する上で参考になるものは少ない。そこでこのような電気の学習を無視すると、物理Ⅰは波の学習からはじまっているとみなすことができる。

#### 4-2. 高等学校物理Ⅰの組織化——力学教育なき波動の学習

平成15年実施予定の『高等学校学習指導要領』（理科）の物理Ⅰにある波の学習では、具体的な物理現象として光と音、そして水面の波が取り上げられる。波の現象と関連した実験には眼や耳で直接結果を確認できるものが多くあり、子どもたちにとって取り組みやすい課題でもある。そういった意味から、波の学習を冒頭に持つてくるのは、学ぶ側に配慮した組織化であるといえる。しかし、この組織化に問題はないのだろうか。

高等学校の物理Ⅰにあるような組織化では、中学校で学習した力学教育を前提として波の学習を始めることになる。中学校の力学教育では力が作用するものが変形し、わずかな変形であればものはもとの形にもどるといふ弾性について学ぶ。また、つり下げられたおもりの重さに応じてばねの長さがのびることも学習する。しかし、復元力が作用するときの物体の振動については学習しない。ばねにつり下げたおもりを引っ張ると、おもりが上下に振動し続けるこ

とを経験として知っている程度であろう。結局、高校の物理教科書では、復元力や媒質の弾性について脚注で簡単に述べておき、力学の該当する頁を指示して対応することになるのだろう<sup>8)</sup>。

このようにして高等学校の物理教育は始まる。そこでは、とにかく波が発生しているとして、そのときの波の様子を表し方、そして波のふるまいとしての反射、屈折、回折、干渉といった現象を理解することが重要な教育内容となる。ものには弾性があるので、ある場所で発生したゆれが伝わって波が起きるといふ程度の理解から波動を学ぶことになる。媒質に発生した波の伝播が媒質の力学的性質とどのように関係するかについては、それを考えるために必要な力学の知識が不足しているために取扱われない。

波の速さは媒質のもつ復元力と密度(慣性)によって決まり、振幅や波の形に依らないといった内容や、媒質の復元力(張力)と密度によって弦の固有振動数が決まるという内容は、現在の中学校教育のみを前提とした波の学習では取扱うことができない。弦にできる波の波長は弦の境界条件で決まることは理解しやすいが、同じ材質と長さの弦でもその張り方で振動数が変化するというのは、現在でも教えるのが難しいと言われる学習事項ではある。たとえば、硬い媒質は変形したときの復元力が大きいから波(音)がすばやく伝わると推論することもできるが、変形させるのに大きな力が必要なのでなかなか波(音)は伝わらないという理屈にもそれなりの説得力がある。結局、高等学校の物理教育における波の学習だけでは、どちらが正しいかを判断できないままであり、実際に鉄棒に耳をあてて確かめて納得しておくしかない。

#### 4-3. 中学校理科の組織化——幾何光学と音の学習というまとめ

力学の学習を後にまわしにする教科内容の組織化は中学校の理科でも採用されている。平成14年度から実施されている中学校理科の学習指導要領では、「光と音」の学習からはじまり、そのあとに「力と圧力」の学習が続く(表1を参照のこと)。光の学習では、光の反射と屈折、凸レンズのはたらきが教育内容になっているが、これらはすべて幾何光学として取扱われている。幾何光学は光を光線の集合であると考え、一様な媒質では光線は直線であり、異なる媒質の境界面では反射の法則と屈折の法則にしたがって光線が方向を変え、各光線は互いに独立で干渉や回折といった波動特有の現象はおきないとする。幾何光学は光の波長が無小の極限で厳密に成立する。つまり、光の波動性には触れない光学である。

音の学習では、物質が振動することでまわりの空気——水や鉄といった他の媒質でも同様に——をふるわせ、それが周囲に伝わっていくのが音であると説明される。振動する音叉を水につけて水面が波立つところを見せたりする。物体が振動するときの振れ幅が大きいときには大きな音が発生すること、物体がすばやく振動するときには音が高くなることを確認し、振幅と振動数の概念を学ぶようにはなっている。しかし、波長という概念は登場せず音が波動であることはごく簡単にしか取り上げられない。また、音の波はその振動方向と波の進行方向とが一致する縦波であることは学ばない。

音の学習の最後に、コンピュータを利用した計測結果として音の波形がグラフで提示されている教科書もある<sup>9)</sup>。その波形グラフの縦軸が振幅であることは子ども達に理解しやすいことであつたとしても、グラフの横軸によって波形の意味が異なることを把握するのは難しいであろう。横軸が時間の場合は、グラフの波形は媒質の特定の点が振動している様子をあらわしており、横軸が位置の場合は波のスナップショットになっていることを子ども達が自覚して区別

表1 学習指導要領（理科）と明治期中学校用物理教科書における物理学分野の教育内容編成

| 平成 15 年 4 月 1 日施行予定<br>『高等学校学習指導要領』<br>(理科) 物理 I  | 平成 14 年 4 月 1 日施行<br>『中学校学習指導要領』(理科)<br>第 1 分野  | 平成 5 年 4 月 1 日施行<br>『中学校学習指導要領』(理科)<br>第 1 分野  | 明治 36 年<br>『中學物理學教科書』<br>早川金之助  |
|---|---|--|---|
| <p>◎ 電気<br/>電気製品の消費電力<br/>モーターと発電機<br/>交流と電波</p> <p>◎ 波<br/>波長、振動数、伝播速度<br/>音の媒質<br/>ドップラー効果の原理<br/>音の干渉と共鳴<br/>光の反射と屈折<br/>光の回折と干渉</p> <p>◎ 運動とエネルギー</p> <p>○ 物体の運動<br/>空気抵抗、摩擦のある運動<br/>水圧や浮力<br/>力の合成・分解<br/>力のつりあい<br/>摩擦力、弾性力<br/>質量と重さの違い<br/>放物運動<br/>直線運動<br/>変位、速度、加速度<br/>力の合成・分解、つりあい<br/>運動の 3 法則<br/>直線運動、放物運動</p> <p>○ エネルギー<br/>仕事と仕事率<br/>運動エネルギー<br/>と位置エネルギー<br/>重力や弾性力<br/>による位置エネルギー<br/>物質の状態と温度の関係<br/>絶対温度、熱量<br/>電気エネルギー<br/>電力と電力量<br/>ジュール熱<br/>エネルギーの変換と保存</p> | <p>◎ 光と音<br/>光の反射、屈折<br/>凸レンズの働き<br/>音はものの振動<br/>音の高さや大きさと<br/>発音体の振動の仕方</p> <p>◎ 力と圧力<br/>力と物体の変形<br/>2 力のつり合うときの条件<br/>圧力 (力の大きさと面積)<br/>大気圧と関連付けて</p> <p>◎ 物質</p> <p>○ 物質のすがた<br/>密度、電気の通りやすさ、<br/>加熱したときの変化<br/>物質の状態変化<br/>物質の融点、沸点<br/>沸点の違いで物質を分離<br/>状態変化による体積変化<br/>気体の発生と性質<br/>気体の種類とその特性<br/>気体の捕集法など</p> <p>○ 水溶液<br/>物質が水に溶ける様子<br/>再結晶<br/>酸、アルカリ<br/>中和による塩の生成</p> <p>◎ 電流とその利用<br/>静電気<br/>帯電した物体間の力<br/>静電気と電流の関係<br/>回路の電流と電圧<br/>電気抵抗<br/>電流による磁界<br/>電磁誘導<br/>電流による熱や光の発生</p> <p>◎ 化学変化と原子、分子<br/>物質の分解と生成<br/>物質と原子や分子<br/>原子記号</p> <p>○ 化学変化と物質の質量<br/>2 種類の物質の化合<br/>化学変化と原子・分子モデル<br/>化学式、化学反応式<br/>化学変化と質量保存。</p> <p>◎ 運動の規則性<br/>運動の速さと向き<br/>力が働く運動 (速さの変化)<br/>等速直線運動</p> <p>○ エネルギー<br/>運動エネルギー<br/>位置エネルギー<br/>電気、熱や光<br/>エネルギーの相互変換</p> | <p>◎ 物質</p> <p>○ 水溶液<br/>溶質による違い<br/>物質が水に溶ける様子<br/>再結晶<br/>溶解度</p> <p>○ 物質の状態変化<br/>体積変化と重さの変化<br/>物質の融点、沸点<br/>沸点の違いで物質を分離</p> <p>○ 気体の発生と性質<br/>気体の種類による特性<br/>気体の発生方法や捕集法</p> <p>◎ 光と音<br/>光の反射や屈折<br/>凸レンズの働き<br/>音が空気中などを伝わる<br/>音の大きさや高さ<br/>発音体の振動の仕方</p> <p>◎ 熱と温度<br/>水の温度変化と加えた熱量<br/>及び水の重さとの関係<br/>温度変化と物質の種類</p> <p>◎ 力</p> <p>ばねに加える力と伸び<br/>の関係<br/>物体の質量と重さの違い<br/>力の大きさと重力 (基準)<br/>力の表しかた<br/>帯電した物体間に働く力 圧<br/>力 (力の大きさと面積)<br/>水圧<br/>空気の重さと大気圧</p> <p>◎ 化学変化と原子、分子</p> <p>○ 化学変化<br/>燃焼<br/>酸素と結びつく化学変化<br/>酸素以外の物質同士の化合<br/>加熱や電流による物質の分解<br/>化学変化と質量保存<br/>反応物質の質量の間の関係</p> <p>○ 原子と分子<br/>物質と原子や分子<br/>原子の記号<br/>化合物の組成と化学式<br/>化学反応と化学反応式<br/>原子や分子のモデル</p> <p>◎ 電流<br/>回路の電流と電圧<br/>電気抵抗<br/>電流の働きと電子の流れ<br/>発熱量は電流と電圧の関係<br/>磁石や電流による磁界<br/>電磁誘導</p> | <p>◎ 光<br/>光の直進性<br/>光度、照度<br/>光の速さ<br/>反射、屈折<br/>凹面鏡、凸面鏡<br/>凹レンズ、凸レンズ<br/>写真機、望遠鏡<br/>光の分散、スペクトル</p> <p>◎ 熱<br/>温度と温度計<br/>熱量、熱容量、比熱<br/>物質の膨張<br/>融解、凝固<br/>溶解<br/>気化と液化<br/>熱の伝導、輻射、対流</p> <p>◎ 力と物性<br/>力、重力<br/>密度と比重<br/>力の合成と分解<br/>力のつりあい</p> <p>○ 固体の性質<br/>剛体の静力学<br/>機械 (てこ、天秤、滑車)<br/>摩擦力<br/>固体の弾性、歪と力</p> <p>○ 液体の性質<br/>液体の圧力<br/>液体の表面<br/>浮力<br/>比重</p> <p>○ 気体の性質<br/>気体の圧力<br/>気圧計<br/>天気予報<br/>気体の圧力と体積の関係<br/>気体の<br/>温度・圧力・体積の関係<br/>気体の密度と浮力<br/>ポンプ<br/>附録○ 三態変化と圧力</p> <p>○ 分子間力<br/>表面張力<br/>拡散、浸透</p> <p>○ 運動<br/>速度とその合成<br/>落体の運動<br/>放物運動<br/>加速度運動</p> <p>○ 運動と力の関係<br/>力、力の単位<br/>質量<br/>振り子</p> |

| 平成 15 年 4 月 1 月施行予定<br>『高等学校学習指導要領』<br>(理科) 物理 I | 平成 14 年 4 月 1 日施行<br>『中学校学習指導要領』(理科)<br>第 1 分野  | 平成 5 年 4 月 1 日施行<br>『中学校学習指導要領』(理科)<br>第 1 分野  | 明治 36 年<br>『中學物理學教科書』<br>早川金之助   |
|--|---|--|--|
|  | <p>エネルギーの保存</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 物質と化学反応の利用<br/>酸化・還元と酸素の関係<br/>化学変化<br/>とエネルギーの出入り</li> <li>◎ 科学技術と人間<br/>エネルギー資源<br/>水力、火力、原子力<br/>エネルギーの有効利用<br/>科学技術の進歩<br/>環境との調和</li> </ul> | <p>直流と交流の違い<br/>真空放電</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 化学変化とイオン<br/>電気分解とイオン<br/>化学電池<br/>酸・アルカリ・塩<br/>水素イオン<br/>水酸化物イオン<br/>中和反応</li> <li>◎ 運動とエネルギー<br/>力の働き<br/>2 力のつりあい<br/>力の合成と分解</li> <li>○ 物体の運動<br/>運動の速さと向き<br/>等速直線運動<br/>落下運動</li> <li>○ 仕事とエネルギー<br/>仕事や仕事率<br/>エネルギーと仕事</li> <li>◎ 科学技術の進歩と人間生活<br/>素材やエネルギーの利用<br/>情報手段としてのコンピュータ</li> </ul> | <p>求心力<br/>3 つ以上の力のつりあい</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 作用・反作用<br/>作用・反作用<br/>万有引力</li> <li>◎ エネルギー<br/>仕事<br/>力学的エネルギー<br/>エネルギーの相互変換<br/>熱の仕事当量<br/>熱の本性<br/>エネルギー保存<br/>蒸気機関</li> <li>◎ 波動<br/>縦波と横波<br/>波長と波の速さ<br/>波の反射と屈折</li> <li>○ 音<br/>音波の速さ<br/>音の反射、干渉、エネルギー<br/>音の強弱と調子(音階)<br/>弦、音叉、気柱の振動<br/>共鳴</li> <li>○ 光の波動説</li> <li>◎ 磁気<br/>磁石<br/>磁場、磁力線<br/>分子磁石の説(マイクロ)<br/>地磁気</li> <li>◎ 電気<br/>○ 静電気<br/>帯電した物体間の力<br/>蓄電器<br/>放電</li> <li>○ 電流<br/>電流と電位<br/>電池<br/>電流と電気抵抗<br/>抵抗の温度変化<br/>抵抗の直列、並列接続<br/>複数個の電池のつなぎ方<br/>熱電対<br/>電流による磁界<br/>電流による発熱<br/>電流と化学変化：電気分解<br/>電磁誘導<br/>交流<br/>電流のエネルギー</li> <li>○ 放電, X線, 電磁波</li> </ul> |

中学校および高等学校の学習指導要領(理科)での物理学関係の教育内容の配列として、平成 15 年度から実施予定の高等学校・物理 I と平成 5 年度実施と 14 年度実施の中学校理科第 1 分野をあげている。表中の学習事項の名称は必ずしも学習指導要領と同じ表現にはなっていない。たとえば、高等学校・物理 I では、最初にある「電気製品の消費電力」が学習指導要領では「電気と生活」となっている。高等学校・物理 I にあげられている教育内容は、中学校理科のものにくらべて、大きなまとまりとなっている。中学校理科の表の中で網かけになっている項目は、主として化学分野の教育内容として学ぶことになるとみなしている。明治期の中学校用物理学教科書としてあげているのは、早川金之助『中學物理學教科書』(金港堂書籍, 1903)である。

しているかどうかは怪しい。

平成5年4月から施行された学習指導要領でも、力学が後回しになる組織化になっている(表1を参照のこと)。「水溶液」や「物質の状態変化」といった物質の性質についての化学的、物理学的内容を学習した後、「光と音」の学習が始まる。「力」の学習はさらに後に配置されており、「熱と温度」を学んでからになる。

いずれの中学校学習指導要領・理科においても、力学の前に光と音の学習が配置されている。このような教科内容の組織化では、小学校教育で学んだことと生活経験だけでもとづいて光と音の学習を始めることになる。そのため、光と音の学習は力学の知識をそれほど要求する内容であっては困るので、幾何光学や発音体の振動の様子と音の聞こえ方の関係といったことが取扱われることになる。その程度の内容であれば、力学教育の前に配置してよいのかもしれない。しかし、発音体と媒質の振動について学ぶ音の学習を、光の波動性が問題とならない幾何光学の学習のすぐ後に行う必要があるのだろうか。力学教育の前に配置されることで、音の学習は貧しくなっていないだろうか。

## 5. 明治期中学校物理教科書にみる教科内容の組織化

### 5-1. 力学教育からはじめない組織化

日本における公教育制度下での科学教育は明治時代に本格的に開始された。明治19年(1886)に諸学校例が出されて中学校教育が軌道に乗ると、中学校用の物理教科書が多数編まれた。その多くは、力学の学習から始まる伝統的な教科内容の組織化を採用している。しかし、実際に物理教育が実施されてみると、そのような伝統的組織化には従わない物理教科書も登場した。

明治36年(1903)発行の早川金之助著『中學物理學教科書』(金港堂書籍)では、冒頭の「緒言」の中にこの教科書で採用された系統性について、次のように述べられている<sup>10)</sup>。

「本書は中學校程度の物理學教科書として著述したるものなり。本書説述の順序は、現今行はれつつある多數教科書の順序に關せず、専ら其の教授し易からんと思考せるものを選びたり。最初に力学を論ずるを普通の仕方とすと雖も、力学は其の説く所多く抽象的なる故、實驗に訴へて學生の興味を喚起すること、極めて難く、初學者の最も了解し難しとするは、一般教授者の均しく認むる所なり。大抵最初に之を課せられたる學生は、唯書上の字句を暗記するに止り、其の觀念を得ずして終ること少からざるが如し。故に本書は、毫も力学的思想を要せずして、容易に實驗の興味を喚起すべき光学より始め、熱學之に次ぎ、稍訓練せられたる頭腦を以て、静力学に入り、固・液・氣三體の性質を終りて、始めて運動を學び、力と運動との關係を知りて、「エネルギー」に移り、波動と音響とを経て電氣磁氣學に終る。而して熱學中の壓力に關する部分は、始めに之を説かずして、氣體の壓力を論ずると同時に、之を授くることとなしたり。又静力学に於ては、力の大きさは専ら重力に據りて示し、其の絶対値に就きては、力と運動との關係を論ずる章に於て概論することとなしたり。」

この緒言には、力学の学習を後回しにした理由が正直に述べられている。結局、力学教育は教える側にとっても、学ぶ側にとってもやっかいな内容であり、公式を暗記するだけに終わってしまうので後回しにしたいということなのである。これは現在でも多くの教師が抱いている感想であろう。

この教科書は光の学習からはじまっており、その内容は幾何光学に限られている。光の直進性や反射、屈折などの幾何光学、光による化学変化や発熱などの光の効果が説明されているだけである。光が波であることの説明は音の学習の後に置かれている（表1を参照のこと）。

音の学習は幾何光学の学習から切り離され、力学教育の後に移され、波動として音を学習する内容になっている。縦波と横波、波の反射と屈折といった波動の概念を学んでから、波としての音の性質の学習に入る。そこでは弾性体に生じる振動や、弾性体を伝播する波動について力学の概念を使った説明がなされている。

「一四九 振動 物体が一点の左右に反復往返するときは、其の運動を振動と稱す、例へば振子の球の運動の如し。

一般に弾性體中の一部分が、其の位置より動かさるときは、彈力の為めに再び舊位に引戻され、其の舊位に至るや、己に或る速度を有する為めに、其の點を超過して、更に反對の方に跳進、斯くの如くして、其の部分は舊位の左右に振動すべし、例へば黃銅の針金にて造れる螺旋形の兩端を固定して、之を弾性體とし、其の中の一部分を示す為めに、中央に重き球を附し、之を一方に引きて放つときは、球の上下に振動するを見ん。

弾性體の振動は、振子の振動と其の状を一にし、振動の中央に在る時、運動最も速く、兩端に近づく程遅く、而して兩端に至って静止して方向を轉換す、舊位より振動の兩極端に至る距離は、相等しくして之を振幅といひ、兩端の間を一度往返する時間を週期といふ。週期が振幅の大小に關せざるは亦振子の時の如し、若し各部分間に摩擦力の如き抵抗力なくば、永久同一の振幅にて振動すべきも、實際は種々の抵抗力の為に、振幅漸次に小となり、遂に静止するに至る。

一五〇 波動 弾性體の一部分が、其の位置を變ずるときは、周囲の部分より受くる分子引力の為めに、舊位に引き戻されるものなるが、是と同時に其の及す反作用の為めに、周囲の部分も亦舊位より移動せしめらる、此の移動は、更に一層外方の部分に影響を及して、其をも亦移動せしむ、斯くの如くして運動は最初移動せられし部分を中心として、漸次四方に傳達し、而して其の運動の模様は、遠方に至る程、少しづつ後るものなり、此くの如く振動の傳播するを波動といふ。」

この教科書では、物質が分子の集合であること、熱が物質を構成する分子の運動と関係すること、分子間力が存在すること等については、すでに波動の学習までの章節で説明されている。そのため、「一五〇 波動」では、物体内を伝播する波動が物体を構成する分子の間の引力によるというミクロな記述が登場している。力学教育の前に波動を教える『高等学校学習指導要領』（理科）の物理Ⅰに見られる組織化では、ここにあるような力学の概念を使用した説明やミクロな記述を波動（音）の学習で展開するのは難しいであろう。

## 5-2. エーテル理論と物理教育の組織化

音の発生源である物体が振動しているところを肉眼で確認することは難しいことではない。さまざまな工夫によって、音が波であることを類推するのも比較的容易である。しかし、光の場合は波の様子を直接確認できないし、その発生源である物体が振動しているわけでもない。そのため、光が波であることを理解するのは難しい。電磁波についての理解が進んだ現代におい

ても、光が電場と磁場の変化する波であることは「抽象的な故、実験に訴へて学生の興味を喚起すること、極めて難しく、初學者の最も了解し難し」という学習内容である。波であれば干渉や回折という現象が観測されることを学び、光でそういった現象が起きることを確認し、その結果から光が波であると結論することになる。

早川金之助著『中學物理學教科書』では、音の学習が終わった後に設けられた節「光の波動説」で、光の波動性についての説明がある。当時の物理学の状況を考えれば、教科が関連する学問領域の体系を反映した教科内容の組織化であるといえる。

物理学にとって、19世紀は電磁氣的現象も力学的フレームワークで理解しようと努力されていた時代である。重力や電磁氣力などの遠隔力を理解するために空間に充滿した特殊な性質をもつ連続媒質エーテル——現代物理学ではその存在が否定されている——が議論されていた。

「光の波動説」の節では、物理学では過去に光の粒子説が唱えられていたが、その説と矛盾する実験事実のために「此の説は廃棄せられたり」と述べられ、「現今の學説に據れば、光は一種の波動なること左に述ぶるが如し」として、エーテルという特殊な物質の弾性振動が光であると説明されている。

「稀薄にして頗る弾性に富む一種の物質、宇宙間に瀰満し、天體間の洪漠たる空間も吾人の作り得る謂はゆる真空も、物體の分子間も、到る處此の物質の填充せざるなし、併ながら非常に稀薄なる為めに、萬有引力の作用殆ど顯れず、従つて其の重さを感じずる事なく、又其の中を非常の速さにて運行する遊星の運動にも、殆ど全く抵抗することなし、此の物質を「エーテル」と名く。物體の分子が、一種の振動をなすときは、其の振動分子を圍繞する「エーテル」中に傳りて、茲に弾性的の横波を起す、而して分子の振動遅き間は、生ずる波の長さ大にして、吾人の眼には、何等の感覺を……」

音が空気という媒質を伝わる弾性振動であるのと同じように、光は空間を満たす媒質エーテルの弾性振動であるとして説明されている。光をエーテルの振動と考えることができるのであれば、音の学習の後に光の波動性を配置することは見当違いな組織化ではない。当時の学問領域の体系を反映した教科内容の組織化であるとも言えるだろう。

しかしながら、現在ではこのような教科内容の組織化は採用できない。1887年に Michelson-Morly の実験が行われ、20世紀になって特殊相対性理論の登場とその数学的定式化や実験的検証が続き、エーテルの存在は完全に否定されたからである。早川の物理教科書が発行されたのは20世紀になったばかりの明治36年(1903)であり、エーテル理論にもまだそれなりの数の信奉者がいたのであろう。当時発行された他の物理教科書にも、光をエーテル媒質の振動と考える同様の記述が見られる。現在の高みから批判しても意味はない。

19世紀にはエーテル理論だけでなく、電磁場の理論も登場した。物理学者 J. C. Maxwell が1864年に論文“A dynamical theory of the electromagnetic field”を出した。この論文では抽象的な電磁場の理論が展開されており、エーテルを使ったモデルは捨てられている。早川金之助の教科書では、「光の波動説」の最後に小サイズの活字で電磁場の理論について注記されている。

「尚他に、光は「エーテル」中の弾性波に非ずして、電氣的の一種の波なりと主張する一新学説ありて、現時廣く學者の信據する所となれり、其概略は、載せて卷末の章にあり。」

教科書巻末の章「電磁波」では、簡単に電磁波や物理学者 Maxwell のことが述べられており、当時の最先端の議論として紹介されている。19世紀から20世紀にかけて、相対性理論や量子論が登場して物理学が大きく変革されようとしていた状況を映したダイナミックな教科書記述であると思う。現在、高等学校の物理教育の内容のほとんどが古典物理学ではないのかという批判がある。物理教育における教科内容の組織化に、現代物理学の体系やその組織化を反映した工夫が求められている。

## 6. ま と め

教科内容の組織化にはいくつかのやり方がある。少なくとも現時点ではそう思われる。本稿では、現在の学習指導要領や物理学教科書を対象にして教科内容の組織化の問題を考察し、明治期の物理教科書にある事例を参考にしながら、物理教育の非伝統的な組織化を検討した。

力学の学習から始まるかどうかという基準を設けることで、物理教育の組織化のあり方を大きく2つに分類することができる。力学の学習から始まる教科内容の組織化は物理教育の伝統である。知識の論理的な整合性だけを考えれば、この伝統的な組織化に大きな問題があるわけではない。しかし、力学は教師にとって教えるに、子どもにとって学ぶに、という感想が根深くあるように思われる。物理学の成果が適切な教育内容へと変換できているかどうか、授業で子どもたちが納得できるような順次性になっているかどうか、といった観点から再検討していかねばならない課題は多い。

平成15年度施行予定の高等学校理科・物理Iでは、実質的には波の学習から始まる教科内容の組織化が行われている。そこでは波動について詳しく学ぶことになるのだが、高等学校での力学教育が後回しになっているため、媒質の力学的性質と波の関係については触れられていない。むしろ、波が発生しているときにどのような現象がおきるのか、つまり反射、屈折、干渉等々の波動において観測される現象を理解していくことが中心の教科内容である。

平成5年度および平成14年度施行の『中学校学習指導要領』（理科）を見ると、物理学分野の組織化は光と音の学習が力学教育に先行している。光や音の関係する現象は眼や耳で確認できるし、実験も直感的に理解しやすい。その意味では、光と音の学習から始まる組織化にもそれなりの意味はある。しかしながら、現在の教育内容のままであるなら、光と音をひとつにまとめておかねばならない積極的な理由もない。

光と音の学習がひとつにまとめられているのは、横波と縦波のちがいはあっても、どちらも波動現象だからという理由からなのだろう。しかし、実際の教育内容は、光の波動性に触れない幾何光学や発音体の振動と音の聞こえ方の関係の学習であり、光や音の波動性に深く踏み込んだものではない。確かに、光と音は波動というひとつのフレームワークにまとめることのできる物理的現象なのだが、現在の教育内容を学習するだけであれば、波動というフレームワークにこだわる必要はない。

中学校の音の学習では、物体が振動することで音が発生し、物体の振れ幅の大小によって音の強弱が決まり、物体の振動の速さによって音の高低が決まることを学ぶ。しかし、これらの教育内容の他に、物体が振動するためには力が作用していなければならない、物体の振れ幅や振

動の速さは物体に作用する力によることも取扱うべきである。なぜなら、物体に作用する力と音の関係まで認識しておけば、将来、音がエネルギーのひとつの姿であることを学ぶための布石になるからである。

力学からはじまらない非伝統的な組織化を採用している明治期の中学校用物理教科書として、早川金之助著『中學物理學教科書』を紹介した。ここでは幾何光学の学習からはじまり、物質の状態、熱などを学び、力学教育が終わった後で、波動（音）の学習に入る。力学教育を前提とした波動の学習なので、波の発生と伝播に媒質の弾性的性質がどのように関係するのかを教育内容として取扱うことが可能である。

早川金之助の教科書では、エーテルという媒質の振動が光であるという学説にもとづいて光の波動性が説明されている。当時出版されていた他の教科書にも同様の説明があり、当時の物理学の状況を反映していると思われる。光の波動性は、波動（音）の学習の後で学ぶことになっている。音の波動性とのアナロジーを使って、光の波動性をエーテルの振動として説明するのは間違っている。しかし、幾何光学の学習と音の波動性の学習を切り離して教科内容を組織化するという考え方、たとえば「幾何光学→物質の状態変化、温度と熱→力学→波動（音）→電磁気学（静電気、電流と電圧、電場、磁場、電磁誘導）→電磁波（光）」という組織化は現代においても検討の価値はある。このような教科内容の組織化を中学校で展開することを考えてみよう。

幾何光学の学習はどうしても現象論の学習——ここでいう「現象論」とは哲学用語ではなく、物理学で使う phenomenological theory の意味である——になってしまうのだが、眼で見て確認できる光学現象を使いながら実験を進めることができるため、物理学への入門としてうまく位置づけられれば、幾何光学のみであっても価値ある教科内容をつくることができるだろう。

幾何光学の学習に続く物質の状態変化や温度と熱の学習では、原子・分子レベルの説明が含まれるべきである。しかし、そのために中学校での力学教育を前提とする必要がどの程度あるだろうか。光のふるまいや物質の変化という感覚で把握しやすい現象を活用した教育を行い、その後で力学教育にはいることは十分に可能であると思われる。力学教育の後に位置付けられた音の学習では、発音体が媒質に引き起こす力学的な作用や、媒質の力学的性質とそこに発生する波動との関係などを知的に正直に教育内容とすることができる。力学の学習で学んだ知識を、その後の学習にできるだけ活用できる機会を設けるように配慮したい。

以上はあくまでも中学校教育における荒っぽい組織化のフレームワークである。幾何光学を最初に教える理由は、教えやすく学びやすいという配慮だけである。幾何光学から始まる教科内容の組織化の妥当性については、さらにさまざまな角度から検討していく必要がある。また、学びやすいということだけの理由で幾何光学の学習を最初に持つてくるのであれば、それを後半に回し、具体的な物質の状態変化の学習から始めて原子・分子と物質を学んでいくという組織化もあり得る。いずれにしても、このような非伝統的な組織化の適否は、フレームワークの検討とともに、具体的な授業プランによって細部を詰めていく中で明らかにされなければならない。

#### 註および文献

- 1) カリキュラムや教育内容の組織化を考える場合、政治権力、経済界、産業界といったさまざまな領域からくる圧力を無視することはできない。しかし、本稿では現代と明治期における教科内容の組織化を比較するた

めに、教科とそれに関する学問領域の範囲内に対象を限定して考察を行う。

- 2) 『真船和夫著作集1 自然科学と理科教育』(あずみの書房, 1986) 190-192頁。初出は真船和夫『理科教授論』(明治図書, 1962)。
- 3) 現代科学の構造, 教育内容の構造, 授業の過程と教科の構造, 子どもの認識過程の間の基本構造については, 高村泰雄編著『物理教授法の研究』(北海道大学図書刊行会, 1987) 第1章。特に, 6-8頁の「教授過程の基本構造」と図0・1を参照のこと。
- 4) 本文にある記述は, 『岩波 理化学辞典 第5版』(岩波書店, 1998)にある「沸点」の項目から引用した。
- 5) コンセプトマップについては, たとえば, White, R. and Gunstone, R. (1992). Probing Understanding.: Falmer Press. (中山迅, 稲垣成哲監訳『子どもの学びを探る』(東洋館出版社, 1995) 第2章「概念地図法」)。
- 6) Thagard, P. (1992). Conceptual Revolutions. Princeton, NJ.: Princeton University Press
- 7) 真船和夫は教科内容の系統性と順次性について次のように述べている。  
「現在の段階では, 論理的にいろいろな組み合わせ順序を考え, 実際の授業の中で, どの組み合わせ順序がそれぞれの概念の認識にとって有効であるかをためしていくほかはないだろう。  
どんな条件の場合でも, あるきまった組み合わせ順序がいつでも, 子どもの正しい認識にとって有効であることがわかれば, 学習の正しい順序は一つであると考えていいだろうし, そうでなければ多様であると考えべきだろう。」(参考文献(1) 194頁より)
- 8) 高等学校理科用文部科学省検定済教科書『物理I』の平成15年度新教育課程用見本にそのような対応をとっているものがあつた。中学校理科教育の中の動力学では, 等速運動と不等速運動のちがいを, 不等速運動の中でも一定の力が作用する等加速度運動のときに速度が時間に比例することなどを確認する。加速度という言葉子どもたちは経験から知っているが, 科学的にしっかりと定義はしない。また運動方程式についても学ばない。
- 9) たとえば, 中学校理科検定済教科書『新しい科学 1分野上』(東京書籍, 2002) 18頁。
- 10) 早川金之助『中學物理學教科書』(金港堂書籍, 1903)。教科内容の非伝統的な組織化を採用している物理教科書としては, 後藤牧太, 根岸福彌『中等物理學』(大日本圖書, 1902)がある。その緒言には, 「緒言余等曩に物理學教科書を編纂せしが, 更に教授事項を増補し, 初學者の理解し難き力學及エネルギー論を, 最後に授くるの順序を執り」とある。この教科書では, 物性, 音, 熱, 光, 磁気, 電気, 力学及びエネルギーとなっている。本論文で参考とした明治期の教科書については, 東書文庫図書室所蔵のものを利用した。

本研究は平成13~14年度文部科学省科学研究費基盤研究(C)「教科書に見る科学教育の基盤・基本——日本公教育成立・形成期に限定して」(研究代表者: 須田勝彦)の研究成果の一部である。