



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	力学教育の方向 : 『学ぶ側からみた力学の再構成』を読んで
Author(s)	寺岡, 英男
Citation	北海道大學教育學部紀要, 63, 45-54
Issue Date	1994-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/29424
Type	departmental bulletin paper
File Information	63_P45-54.pdf



力学教育の方向

——『学ぶ側からみた力学の再構成』を読んで——

寺 岡 英 男

Directions for the Teaching of Dynamics

Hideo TERAOKA

はじめに

愛知物理サークルは、科学教育協議会のなかで最も精力的に活動しているサークルの一つと言ってよいが、その中心的なメンバーである川勝博、三井伸雄、飯田洋治の三氏が昨年『学ぶ側からみた力学の再構成』¹⁾を出版した。内容は、書の「はじめに」に触れられているように、「長年の研究交流をふまえた独立個人論文集」という体裁で、各氏執筆の3部構成からなっている。

小論では、この書を取り上げ、まず3氏の主張にみられる力学教育の共通の考えについて簡単に整理し、次に、そこで提起されているいくつかの教育内容に関わる論点について検討していきたい。さらに、最近の授業研究では知識や学習のあり方を研究する認知心理学の立場から、具体的な教科領域に関わったアプローチがなされ始めている²⁾。その際、力学などの自然科学理解に関連した研究が少なくない。そこで認知心理学の力学の学習に関わる研究と、この書にみられる3氏の主張・実践との比較検討も併せて試みることにする。

I 3氏の主張と実践にみられる特徴的なこと

3人の主張に共通にみられる特徴として、次の3点を挙げるができるように思われる。1つは、「原子論的自然観と科学の論理のすばらしさを教える」という全体を貫く教育目標に関わる主張。2つは、「認識形成の論理」による教育内容の再構成の方法。3つは、いまや愛知物理サークルを国際的にも有名にしている教材・実験の工夫である。以下それぞれについてみていきたい。

(1) 原子論的自然観と科学の論理のすばらしさを教える

遠山啓は、教育内容の領域を術、学、観の3つに区分し、個々の教科の、あるいは教科全体の内容としての緊密な一体化を図るべきことを提起した³⁾。田中一は、この遠山の提起を具体的に展開する方向として、個別科学の学的内容と世界観との関連を明らかにし、これとともに科学と科学教育のあり方を見なおしていく方法と、これとはある意味では逆に、青少年、子どもたちが、科学的な自然像、人間観、社会観をもつ端緒となり得る教育内容を具体的に求め、この教育内容に基づいて雑多な知識の総合と統一をはかる方法とを示し、自らは後者の見地にたつ実践的な試みを報告している⁴⁾。

田中の整理するこれらの2つの方法のうち、前者の見地にたつ実践の典型として挙げることのできるのが、仮説実験授業だと思われる。板倉聖宣は、「科学の歴史のなかで非常に多くの新発

見をもたらした自然観ないし哲学的展望というものがいくつかある」として、具体的な例として原子論、エネルギー保存と相互転化、進化論、それに自然の階層性を挙げている。そして、「こうした自然観を早くから有効に教育することに成功するならば、科学教育もおそらくその効率をきわめて高めることができる」と述べる⁵⁾。仮説実験授業は、このような自然観を柱とした科学教育の改革を、周知のように、授業書づくりという形態での教育内容・教材の再構成を中心にするめてきた。

3氏の力学の再構成の試みは、この仮説実験授業にみられるものと基本的には共通する考えに立ちながら、高校物理教育の創造的な改革をめざすものであると言える。この書にまとめられた力学教育の場合、力学の再構成の教育目標として、原子論的自然観と科学の論理のすばらしさを教えることが主張されている。

(2) 「認識形成の論理」による教育内容の再構成の方法について

(1)でみたような自然観の形成をはかる場合には、その形成を保証し得る科学の基本的な概念や法則の確実な習得が前提となる。これまで概念形成に成果をあげた民間の教科研究に共通するのは、高いレベルの科学を既成のものとしてではなく、学習者が改めて自分のものとして習得できるという立場から、その本質を捉え直し、教育内容を再構成している、という点である。その際の再構成の論理について、この書ではどう考えられているだろうか。たとえば飯田は次のように言う、

「私たちは“形成の論理”を重視する。これは完成した力学体系それ自身のうちにある“運動形成の論理”と共に、その体系が完成するまでにどのように科学的認識が形成されてきたのかという”認識形成の論理”を重視することでもある。」⁶⁾

この教育内容の構造を再構成する原理については、科学の構造を構成する原理（論理的または歴史的発展の順序の原理ないしはそれらの複合）とは異なる原理で構成されているのではないかと思う。そこで私たちは、「すべての子どもに理解可能な順序（＝認識過程の法則性）」とでもいえるべき構成原理をたて、この再構成の論理を実証的に明らかにしていくことを考えている⁷⁾。いずれにしても、再構成の論理は、いまの段階では抽象的に論じられるべきものではなく、具体的な展開にそくして検討していく必要があると考える。

以下では、この書のⅠ部1章「質量とは何か」を例に、質量概念の教育内容の再構成の論理を探り、その展開をみてみたい。そこでの展開は、原子論的観点を貫きながら、生徒の認識を変革する立場から、どのように質量概念の再構成を行い指導の順序構造を決めているのかが、明解な論理で展開されており、興味深い。Ⅰ部1章で述べられている大まかな指導の順序は以下のようなものである：

力学的「もの」概念—ものの量としての質量—（地上の重力＝万有引力）—重力質量—
摩擦力—慣性質量—力—運動の法則

まず、力学では「もの」をどのようにみるかが、原子論的観点から確認される。そこでは、「もの」はどのように区切っても、まとめても同じ力学法則が成立するという、力学的「もの」概念

の特徴が押さえられ、それが原子論によって根拠づけられている。

そのような「もの」を他の「もの」から区別する量が、「ものの量」すなわち質量で、学習の最初に重さ（質量）の保存性を学習する。その際「もの」の実体イメージとして、「もの」を構成する基本粒子という意味での原子が扱われる。

次に、地上における重力は万有引力であることが述べられる。これに関連させて、重力質量と重力との違いが扱われる（慣性質量の扱いは後）。重さを「質量」と「重力」に分離することで、「重力をものが持っている」という生徒の考えの克服が目指される。重力はものが持つ量ではなく、「他からものが受ける働き」となる。そして作用反作用を通して、「地球」と「地上のもの」との同格性が示され、さらには、すべての「もの」が必ず引き合うことを教えることによって、「すべてのものが質量をもつこと」が立証される。原子論的自然観としての「ものの量」がはっきりと、重力質量としての意味をもち、引力で測定できることが示されることになる。

さらに、摩擦力を減らすことで、重力や重力質量とは別に、「ものの量」としての慣性質量の存在を確認する。重力と無関係な存在の出現は、「真空、無重力」の世界を支配する法則が、地上の世界のそれとは異なるという、誤った捉え方をもたらしかねない。そこで、どのような異なった世界でも、それを力の言葉に翻訳すれば同じ運動の法則で解明できることを扱う。力学法則の同一性の認識、慣性質量を裏付ける法則としての運動の法則が扱われることになる。

こうして、世界を質量と力という言葉でとらえることは、等方・均質な空間概念の成立に結び付き、多様な世界を同じ運動法則に従う一つの世界として捉えることになる。

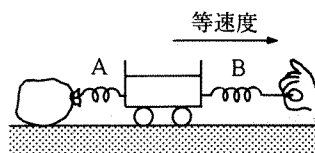
(3) 教材・実験の工夫

生徒に根強くあるアリストテレス的経験的自然観を克服して、力学的な概念と自然観を形成するために、概念形成の要となる問題や実験は、「科学的な論理と直観的・感覚的論理の争点が生き彫りになるような問題」（p. 100.）「常識の論理と対決し、科学の論理がむきだしになるような単純明解な実験」（p. 199）が選ばれる。

こうした考え方で、たとえばガリレイの相対性原理にもとづく実験や、「物体に加わる外力が明瞭にわかり、かつその合力が0のとき等速運動している事例」を扱った実験⁸⁾など、多くの問題や実験が工夫されている

問題15

摩擦や空気抵抗の無視できる力学台車の両側に、質量の無視できる同型のばねをつけて、他方には砂袋（床との摩擦は大きい）他方は手でもち、これをひいて台車に等速度運動させた。AのばねとBのばねののびはどちらが大きいか。
ア. A. イ. B. ウ. 同じ



実験の位置づけは、仮説実験授業の考え方に基本的にに基づき、科学的な認識の成立条件の不可欠の契機として考えられている。

授業の形態は、問題—予想—討論—実験という形態をとるが、「要は争点が明解であり生徒の考えの中に『矛盾』をひきおこすことができるかどうかである」として、仮説が正しいか否かを問い正すものとして実験が捉えられている。

Ⅱ 力学の教育内容に関わるいくつかの問題

この書では、力学教育の内容について、少なからぬ問題提起がなされている。このうち私の関心に関わって、以下3つの問題を取り上げ検討してみたい。

(1) 力の原理の位置づけ

愛知物理サークルの力学教育の特徴の1つは、「力の原理」を力学教育の基礎的な原理として位置づけている、その位置づけ方である。

この「力の原理」は、仮説実験授業の〈ばねと力〉で扱われている原理だが、愛知物理サークルでは、それを高校生でも使える原理として再構成している。たとえば川勝の論を整理してみよう⁹⁾。

歴史的に最初に発見された力の個別法則は、アルキメデスの浮力の法則であった。ステヴィンは、この論理を発展させ、「永久機関不可能の原理」から「釣合原理」を発見した。この「釣合原理」は、「ものが動き出さない→力はずりあっている」という原理である。そこで、この原理の可逆的因果性の意味を強調し、「初速度0における動力学的力の一般法則、運動の法則、慣性の法則で、力の個別法則を統一的に見る原理」と捉えている。

愛知物理サークルの「力の原理」の扱いは、動力学的力の概念の形成の前に静力学の「力の原理」をやっておくという、比較的ありうる単なる段階論ではない。「力の原理は」、「加速させる力を動き出させる力」として、「初等的に表現した」もので、「第2法則として完結する」動力学的力の概念の形成にとり、決定的な役割を担うものとして位置づけられている。

可逆的因果性という観点から再構成された「力の原理」は、第2法則の初等的表現として明確に位置づけられるが、そこに貫かれる力の論理性に基づいて、力の概念の形成が考えられている。

しかし、力の概念の形成ということでは、このような力の論理性から迫る方法に加えて、力をどのようにイメージ豊かに捉えさせるかというそれ自体別個の課題があるように思われる。私たちはそれを、力の概念や第2法則の指導を考える場合、その抽象の根拠である相互作用に注目し、衝突問題を導入に位置づけ、衝突物体の「変形」を力の「実体的イメージ」として考えるべきことを主張している¹⁰⁾。

(2) 力が運動でなく運動変化を決めるという認識

アリストテレス的な自然観を打破し、近代的な力学的自然観を形成しようとする場合、最大の壁は、端的には、慣性運動している物体の進行方向の力を書いてしまうことにあってよい。この壁をどう乗り切るか。この書では、力の論理と相対性原理という、2つの認識を武器にアプローチしていると言えるように思われる¹¹⁾。

1) 力の論理からのアプローチ

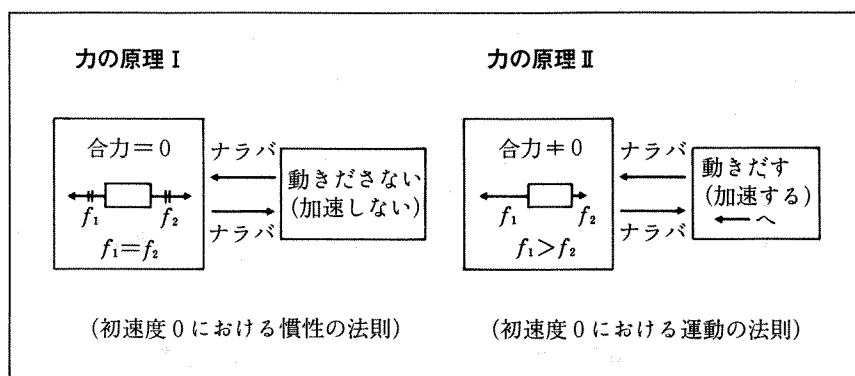
以下主に川勝の論からみてみよう¹²⁾。

Vis Impressa や Impetus 理論のように、与える「もの」からの力が及んで、「もの」のもつ力になってしまうならば、「もの」を動き出させる力が、「もの」を加速させる力にはならず、「もの」の動き続ける力になってしまう。この考えを断ち切らなければならない。

この足がかりとして「力の原理」が考えられる。力学的力は「もの」から受ける。しかし、「行こうとする力、もっている力」は、何から力を受けるか指摘できない。だから力学的力とは呼べない。

そのため、「力を受ける側の論理」への転換が求められる。そこでは、「及ぶ力」を断ち切ることが課題となる。力の添え字記号が工夫され、認識の武器とされる。そして「及ばない力」だけで考える有効性が実験で確かめられる。いろいろな物体系の加速現象が取り上げられる。その結果、「動き出させる力が、持続させる力ではなく、加速させる力につながるには、たとえ最初静止している場合であっても、力の大小関係を、動き出さないときの等号関係だけでなく、動き出すときの不等号関係でも教えておく。こうすれば、初速度0であるから、運動の記述、加速度概念、慣性運動について、あらわにまだ学習していなくても、及ばぬ力、外から直接受ける力の論理を納得させることができる。つまり力の原理Ⅰ、Ⅱを可逆的に不等号関係をふくめて使いこなせば、加速の原因としての力が、力学教育の最初から教えられる」。

このように、この力の論理からのアプローチでは、「力を受ける側の論理」への転換と、再構成された力の原理Ⅰ、Ⅱの扱いを中心に、力学的な力の概念の形成が試みられている。



2) 相対性原理からのアプローチ

以下では、飯田の主張を整理してみる¹³⁾。

乗り物の上での落下や打ち上げの実験での「力を加えていないのに前へ動き続ける」事実は、生徒の経験や感覚と矛盾を引き起こし、生徒の常識的判断の枠組みは根本的変更を迫られる。この認めざるをえない事実は、静止と等速度の力学的同等性の承認であり、ガリレイの相対性原理の承認である。この原理を取り上げることの意義は、①静止の自然観・自己中心的自然観を打ち破る、②感覚や経験だけにたよれない、理性的・法則的認識こそ信頼に値することを示す典型、③ニュートン力学のかなめの一つとなる原理、④アインシュタインの相対性原理につながるという意味で、物理法則の相対性という現代物理に直接つながるという点での現代的意義、が押さえられる。

その上で、「動き続ける力」の克服には、慣性の法則を、「単に $F = 0$ なら $v = \text{const.}$ にとどまらず、物の属性としての認識にまで深められる必要がある。これが慣性の法則を第2法則の特殊な法則として位置づけること」の意味とされる。

この「第2法則の特殊な法則としての慣性の法則」という意味づけを、飯田は次のように言う。慣性質量は外力 F が働くときに限ってその量が問題になる。 $F = 0$ の条件のもとでは、速度変化に逆らう必要がなくなり、もののもつ本来の性質が実現する。慣性とは、慣性質量の量を問題とせず質のみを問題とすると用いる言葉なのである。このように、慣性の法則は第2法則の特殊な場合としてみたとき初めて物の属性—慣性—に関する法則であると位置づけることができる、と。

慣性の法則の導入をガリレイの相対性原理で行うという方法は、仮説実験授業が〈力と運動〉の授業書に用いてから、有効な方法として普及していったが、仮説実験授業がこの方法を採用するきっかけを与えた飯田の実践の役割は大きい。

ただし、ものの属性としての慣性の認識は、第2法則との関係でいえばその「特殊」な場合に出てくることになるが、「特殊」というよりは、力と運動変化の因果性という関係における、一側面（物体の慣性）がさらに抽象された、という橋本の表現の方が相互連関の構造がみえるのではないかと思われる¹⁴⁾。

(3) 連続的な力の作用を衝撃力の総和とみる見方の位置づけ

アリストテレス的自然観から力学的自然観に替わるときに、「一定の力をいったんバラバラに分解し、微小な衝撃力の総和ととらえ直す考えが、生徒のなかにも生まれる」と、川勝が述べていることも注目される。なぜこの考えが生まれるのか、そのメカニズムを川勝は次のように分析している。

「摩擦力や空気の抵抗力下の日常の運動体験を、自分の出す力を中心に法則化してしまうと、一定の力は一定の速度となる。ところが瞬間だけ受ける衝撃力は、日常的に『もの』を加速させる。そこで力の働きを日常経験と結び付け『一定の力もこの衝撃力の集積だから』と考えると『力は速度をつくる』という気がしてくる。」¹⁵⁾

この連続的な力の作用を、瞬間瞬間の微小な撃力の繰り返しと捉える考えは、以前私が行った実験授業のなかでもみられた¹⁶⁾。川勝も言うように、力を微小な衝撃力の集積とみる考え方は、原子論の力の見方であり、力学史の中でもベークマンやデカルトなどの思考の中に見ることができる。そればかりか、相互作用の観点から重力の作用を重力子（グラビトン）を仮定して説明しようとする現代物理学にもつながる意味をもっている¹⁷⁾。この考え方を、力学的自然観へ切り替わる認識の重要な環として、指導のなかでもより積極的な位置づけを検討してみる必要があると思われる。その場合、力の概念の指導過程における、力の相互作用の観点にたった衝突問題の位置づけが検討されなければならない。

Ⅲ 認知心理学等からの言及に関わって

1 日常経験的な知識の克服の問題

これまで見てきたように、この書では、力学的自然観の形成が目指されている。その場合妨げ

になるのは日常経験的な、力学でいえばアリストテレス的自然観で、それをいかに克服するかが重要な課題である。

ところで認知心理学は、学校での学習の妨げになる、日常の認識を支える知識がどのように形成され、知識の構造にどのように反映されるか、そしてそのような知識の構造を改編しつつ新たな概念形成を行うにはどのような学習活動が必要か、等について研究を行ってきている。その際に挙げられるものでは、力学の例が少なくない。その意味でも、この書について述べてきたことに関わる認知心理学からの論及を検討してみたい。ここでは、岩波講座『教育の方法6 科学と技術の教育』所収の村山功・宮下孝広「科学における問題解決と理解」¹⁸⁾を取り上げてみる。

そこでは、まず日常経験的な知識が形成されるメカニズムとそれを克服しようとする際の困難さの根拠が次のように示される。

「我々の日常の認識を支えている知識は、特定の活動の中でその活動目的の達成のために形成されたものであり、それらは目標達成に向けて構造化されたものとなっている。そのような結果として我々の知識は実践的・実感的な意味のある知識となっており、スムーズな活動を支えている」(p. 47)

科学教育のなかで、科学的概念とは異なるという意味での「素朴概念」も、そのような日常活動の中から形成され、日常の認識を支える知識の一つとされる。そして、「素朴概念が力学の学習を妨げるのは、単にその内容が科学と矛盾するということだけではなく、文脈を背負った知識構造の中に埋め込まれているためにそれだけを置き換えることができない」(p. 49)という。

ところで、専門家の問題解決と較べてみたとき、初学者は、力学現象に対する素朴概念を持っており、学習の過程で力学の理論と素朴概念との対立をきちんと解決しておかないと、再び素朴概念に戻ってしまう。なぜならば、「一般的な理論と現象とを結び付ける知識の欠如」がある一方で、「素朴概念の方は現象と結び付ける知識が豊富なので、現象は素朴概念によって解釈されてしまう」(pp. 54-55)と述べる。

ではどうすればよいだろうか。既有の知識体系を改編しつつ新たな知識をそれに組み込んでいくような学習活動が必要であるとし、これを「意味継続的な学習」と呼び、このような学習の一例として、ディセッサの行ったダイナタートルによる力学の学習を挙げている。(p. 68)

この学習活動に関係してこの論文では、ディセッサの言う、学習の課題達成の必要条件を分析・系列化していく(教育内容・教材の構造化と考えてよい)2つの方法を紹介している。それは、課題の側の構造の論理的必然性によって、前提となる知識・技能を分析していく「論理的課題分析」と、与えられた環境への働きかけとそのフィードバックという相互作用を通して、学習者がどんなことを考え、試み、学んでいくのかを、実際の活動の中から見だし、多くの学習者の学習経路のうち最頻経路の背後にある物理的な認識内容を分析する「発生的課題分析」とである。そして、後者は、「最初から課題と学習者(の既有知識)がペアとして分析の対象となっている。それゆえ既有の知識とその改編を最初から視野にいたれた教授を可能にする」と述べる。(p. 72)

ところで、教育内容・教材の構造化を行う場合には、ディセッサの言うような、2つの分析方法に分けられるのかどうか。ディセッサの分け方の背景には、先に触れたように、初学者の場合、「一般的な理論と現象とを結び付ける知識の欠如」があるという判断がある。この判断については異論はない。ディセッサはその克服の方途として、「既有の知識」に基づいてしか学習できな

い学習者の学習経路に沿った教授を考える。一方、これまでみた愛知物理サークルや仮説実験授業でも、学習者の持つ日常の認識を支える知識とその形成のメカニズムを前提に、そうした知識の克服が目指されている。しかし、これらの教育内容・教材の再構成では、「発生的課題分析」でいうような、学習者の学習経路に沿った認識内容の分析がなされるわけではない。力学を構成している基本的な概念は、「生徒の認識を変革する視点で再解釈」される。それは、ディセッサのいう「論理的課題分析」というものでもなく、「一般的な理論と現象とを結び付ける知識の欠如」という問題に対して、「教えるべき内容を生徒の側にたって本質的な概念によって見直し、生徒の認識の武器となる論理や本質的なイメージにつくり直」すことで解決を図ろうとする方法がとられているといえる。

2 学習観・知識観に関わって

前節でみた、ディセッサと愛知物理サークルや仮説実験授業との違いは、どこからくるのか。村山らは言う、

「子どもが学習したのはダイナタートルであって、やはり力学をきちんと学ぶこととは違うのではないだろうか。ダイナタートルはダイナタートルで閉じた知識になっているのではないだろうか。このような疑問が生じてくるであろう。それは、力学は抽象的・形式的知識体系であるのだから、基礎から一ステップずつ教えなければならない、という考えが根強いからである。我々がここで問題にしているのは、そういう疑問をもつことの背景にある学習観・知識観そのものである。」¹⁹⁾

村山らは、更に、オテロによる科学の区別を紹介している。その区分とは、プライベートな科学とパブリックな科学であり、確立された科学、特に教育の場に現れる科学というのは後者であるという。「そこでは、科学的知識は正当化の文脈でのみ現れ、生徒は発見の文脈におけるもとの認識活動自体について考えることなく、これらを理解しなければならない」と言う。もっとも、このオテロの区別にしがうことで、村山らは正当化の文脈そのものをも否定しているわけではない。ただし、知識の確立を目指した活動全体の伝達も、活動の場が存在し、生徒の活動の場への参加によってしか達成しない、とまとめている。

愛知物理サークルの場合は、村山らの言う、根強い旧来の考えによる力学教育の方法となるのか。もちろんそうではない。確かに力学の構造は一見抽象的・形式的であり、正当化の文脈でのみ現れる傾向にある。しかしそれは、通常の力学教科書の叙述であり、定型化された理科教科書の場合においてである。このような「科学教育」を克服するという点では、両者は一致していると言える。しかしそれからの方向という点では両者は異なる。その意味では確かに知識観・学習観に関わる違いだと言える。

力学の本質を認識成立とその展開という観点から改めて分析するならば、力学の構造を構成する諸概念やそれらの相互関連は、そうした教科書風の叙述とは違って、ダイナミックな内容をもつものとして捉え直すことができる。そのようにして、愛知物理サークルでも仮説実験授業でも教育内容の構造を再構成している。そこには、知識の改編は学習者の学習経路に寄り添うだけでは保障されないものであり、日常経験的な知識の内容は「文脈を背負った構造知識」とは言っても、そうした抽象的な言い方では済まされない根本的な自然観（アリストテレス的自然観）の組

み替えに関わる問題であり、したがって科学的認識を確実に形成することのできる教授プランを客観化することは不可欠なものとして位置づく、という考え方をみることができる。

なお、ここで紹介したオテロや村山らの考えは、佐伯胖の、「学習は納得過程」であり、文化遺産の継承というよりも、「科学すること／科学者すること」が大事という考え²⁰⁾と共通したものである。

この佐伯の論に対して板倉聖宣は、佐伯の提起に基本的には賛成しながらも、同時に危惧を示している²¹⁾。それは、一つには、どうすれば納得でき、科学者することができるのかを科学的な認識の道筋に即して、具体的な内容と手だてを明示していない点に対してである。二つには、「科学すること／科学者すること」とは言っても、科学にはいろいろあり、子どもたちには一流の科学者のやってきたようなことを教えるべきであるのに、それが曖昧になるという問題である。この板倉の意見が、採られるべき方向を示しているように思われる。

〈注〉

- 1) 川勝博・三井伸雄・飯田洋治『学ぶ側からみた力学の再構成』新生出版、1992年。
- 2) このような認知心理学からの最近の動向の検討を、筆者も以下の論文で試みた。寺岡英男・柳沢昌一・流真名美「学習過程における認識発展と〈追求－コミュニケーション編成〉の展開」『福井大学教育学部紀要』第46号、1993年。
- 3) 遠山啓「能力主義の克服をめざして」『教育』1972年6月号。
- 4) 田中一「科学教育と世界観の教育」『講座現代教育学の理論 2 民主教育の課題』青木書店、1982年。
- 5) 板倉聖宣「自然認識の歴史」『教育学全集 7 自然と法則』小学館、1968年、53－54頁。
- 6) 1) に同じ236頁。
- 7) 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年、12頁。
- 8) これらは他の科学教育協議会のメンバーの実践にも取り入れられている。例えば、滝川洋二「運動と力－慣性の法則」『理科の授業実践講座 8 力と運動』所収など参照)
- 9) 1) に同じ、53－54頁。
- 10) 7) に同じ、93－96頁。
- 11) 『学ぶ側からみた力学の再構成』は、Ⅰ、Ⅱ部が「力の原理」からのアプローチを中心に、Ⅲ部が「相対性原理」からのアプローチを中心に書かれている。しかしそれらは併せて捉えるべきものであろう。飯田洋治も、動力学で使いこなす科学の論理は、力の原理と相対性原理の2つの原理につくるのではないかと、そしてこれらの原理が使いこなせるためには、初期の段階から原子論的自然観の積極的導入をはかっていくといいのでは、と述べている。1) に同じ195頁。
- 12) 1) に同じ、59－68頁。
- 13) 1) に同じ、214－219頁。
- 14) 7) に同じ、59－60頁。
- 15) 1) に同じ、84－86頁。
- 16) 7) に同じ、123頁。
- 17) 倉賀野志郎「『自然科学教育を問い直す』ために」『教育』1987. 12
- 18) 村山功・宮下孝広「科学における問題解決と理解」岩波講座『教育の方法 6 科学と技術の教育』岩波書店、1987年。

19) 同上, 70頁

20) 佐伯胖「納得による文化的実践への参加」『教育学研究』第60巻第1号, 1993年。

21) 板倉聖宣「『学校知革新の可能性を探る』に参加して」20) に同じ