

授業分析による「自然認識の過程」の研究*

——慣性の法則を事例として——

滝川 洋二

第1章 研究の目的と方法

1-1 自然科学教育にみられる自然の捉え方

人間が生活の必要のために自然に働きかけ、それを作り変えようとするには、自然現象の背後にある法則を無視してはその願いを実現することはできない。それ故これまで先人が築いてきた自然理解の成果を生徒に伝え、その理解を助けることが理科教育の目的とされている。

しかし、生徒の理解を助けるためには学習者の理解の素直なありかたをもっとよく知ることが必要である。教師やあるいは社会が生徒に対してどんなにすぐれた期待があっても教育をしようとしても、生徒のがわの理解のしかたに即した教育でなければそれは実を結ぶことができないからである。

このような考え方は、すでに一般的な常識になっているといわれながら、具体的な内容に即して「理解」がどのように進められるかについての具体的な研究はほとんどなされていないといっても過言ではない。

現在の中・高校では、教育されることによってかえって理科が嫌いになり、しかも学習とは「ただ言われたことあるいは黒板に書かれたことを写し、そ

※本論文は、著者が国際基督教大学に提出した教育学博士学位論文の内容の慣性の法則に事例をとった概要であり、本論文に取り上げることのできな¹⁾かった事例は別途発表の予定である。

れを暗記するしかないもの」と受け取り、記憶のみを追う人間に育てられているのが実情である。このことは、著者が直接かかわってきた物理ではとくに顕著である。小・中・高校と進むにつれて理科や物理嫌いの生徒の割合は急激に増え、高校を卒業するときには多くの生徒は、学習の結果として理科や物理が「わかりにくい」、「面白くない」と感じるようになる²⁾。

高校の物理（すなわち「理科 I」の一部および「物理」）に例をとってみると、授業後も大半の生徒はほとんどの内容が理解できていないのが実情である。とりわけ、「力」、「質量」などの概念、あるいは「力のつりあい」、「慣性の法則」、「運動の法則」などは力学の学習のなかで中心ともなるべきものであるにもかかわらず、これらが生徒にとってわかりにくく、物理が嫌いになる主要な要因になっているのである。

例えば次のような指摘は、物理教育の一つの側面をみごとにいい当てている。「高校で物理を学ぶ者にとって『力と運動』の単元は一大難関である。多くの生徒がここで落伍し、物理で受験することをあきらめる³⁾」。またこれを裏付けるような実態調査とその分析によれば「力と慣性または運動量との物理的意味が正しく理解されていない」、「2力のつりあいに対する理解が十分でない⁴⁾」という報告がある。またWarren J.W.⁵⁾は、イギリスでも同様な問題があることを指摘していて、日本のみの特殊な問題ではないことがわかる。

また物理が嫌いになる要因として、「よくわからない」、「理論がむづかしい」という理由が多く（189人中136人）、それらは「数式が多い」、「実験を好まない」などの理由を数においてはるかに引き離しているといわれている⁶⁾。

つまり「多くの生徒にとって理解できないことを教える」あるいは「理解できない仕方教える」ことが当然の如く行われているのであるが、これは何も高校に限った問題ではない。その一つの重要な原因は生徒の理解のありかたが教師によってまだ十分に把握されていないことにある。生徒は、力学での力の概念や慣性の法則を十分理解していず、単なる形式的な知識として

記憶や計算問題の習得に終始していることは今迄しばしば指摘されてきたとおりである。もちろん理解のありかたといっても、生徒一人ひとりの経験が違うために、ひとつの法則の理解を辿る道筋にいくつもの可能性がありうるし、これを単純な法則で割り切ってしまうことはできないであろうが、そうかといって理解を進める道筋は決して捉えようがないほど複雑ではない。

確かに、自然科学の知識を、様々な場合に使いこなせるように訓練することも、教育の一つの役割である。しかしより基本的な問題は、生徒がそういった知識を自分自身で主体的に捉えてゆくためには何が必要かということである。

ところが、生徒にとってわかる教育が大切だということはすでに幾度となく繰り返されてきたにもかかわらず、日本でも、外国でも今もって十分解明されていない問題である。問題の本質は、「生徒が具体的にどのような過程を経て理解を拡げてゆくか」にあるのである。

1-2 研究のねらい

本研究の主要なねらいを次のように定めた。生徒は自然の中で起こる現象について、それぞれ自分なりの解釈をもっている。そしてその解釈に基づいて新しい現象をみるとき、今迄の解釈で説明できなくなると、なんとかして新しい説明を見出そうと試みる。この新しい説明をどのようにして見出してゆくのかをできるだけ明らかにすることがこの論文の主題である。

すなわち、生徒は独力で理解を進めることが出来るわけではなく、そこには、クラスの友達との協力と教師による援助が必要である。ここで、教師がどのような援助を行うかは、生徒の理解のプロセスがつかめていなければだめであろう。それ故この研究は、授業をどのようにして組み立ててゆくかということの基礎的な研究でもある。

1-3 ケース・スタディとして力学を選ぶ

この研究ではケース・スタディとして力学的現象を生徒がどのように理解するかの過程の詳細な分析を課題としてとりあげた。この分野は中学・高校の、物理の柱ともいうべき内容であるにもかかわらず、生徒にとって大変わかりにくいとされているからである。

例えば、授業を行う前の予備的な調査で、「投げ出した物体には、進行方向に力が加わっている」と考える生徒が、90%前後にも達している。(第2章「力と勢いの分離」の項参照) こういった考えに生徒が自分で疑問を持ち、もっと違った考え方をすることは大変困難である。そして、力そのものが大変わかりにくいという理由で、中学や高校の力学の主題を「力」に置かず、「エネルギー」^{7) 8)}とか「運動量」^{9) 10)}に置く試みもある。また、問題になるであろう場面の正解を次々と提示して「正答率」を上げるなどの安易な解決に走る傾向が見られるが、著者は、もっと「力」の概念の理解に正面から取り組むことが大切だと考えた。

1-4 研究の方法

そもそも授業はそれ自身教授と学習とが強くからみあった過程であるが、詳細な授業記録の分析から「どのようにして生徒が理解を深めてゆくか」を、実証的に抽出する方法をとった。

ところで、からみあったものを分けることは、なんらかの判断の基準に従わなければならない。このとき、次のことがまず基調になる。

それは、日常言語で表現される素朴な考えから出発することである。日常言語の世界では、幼児は行動や会話を通じて言葉を学習し、それを基礎にして自分や自然や社会を捉える作業をたえず行っている。そして、概存の体系的知識をこれまで学んできた日常言語とつなげてゆく努力をする。ここで重視しなければならないことは、生徒の自発的な活動にせよ、教師からの助言による活動にせよ、生徒それぞれがすでにもっている理解をふまえた上に、新しく加わった経験にあうよう修正することである。

それ故、この論文では、力学を問題にするにしても、日常的に生徒が用いる「力」という言葉の用例について生徒が反省する機会を与えるところから出発した。

例えば、力学の学習の最初の頃に提示した「すもうとりと子どもが物体を引き合った。しかし物体は動かなかった。物体に加わる左右方向の力を矢印で表せ」という問題に対しては、生徒が「すもうとりは力持ちだから、すもうとりの方が大きな力を出している」と、力を出す能力を力と呼んでいることや、「子どもが一生懸命に引いているから子どもの方が大きな力を出している」という、努力・熱心さを物理的な力と混同していることが予想される。それを一つずつ解決してゆくことは、発言した生徒だけでなく他の生徒にも問題を自覚させ、物理的な力の概念としてふさわしい内容をつかむために著しく有効であった。

1-5 帰納的方法

ここでは、帰納的な方法が極めて大切である。帰納的な方法とは、演繹的な方法に対比すべきものであって、「観察や実験を通して得られた結果から逆¹¹⁾にそのもとになる法則を探りだす」ことである。この場合、具体的な事実をもとに、その事実を説明しうる解釈を考えてゆくわけであるが、そこでは、極めて直感的な洞察が要求される。そのような解釈はいつもうまくいくという保証はないから、たえず解釈に修正を加えなければならない。

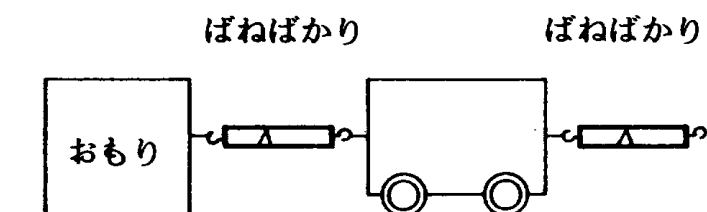
具体例を挙げれば、最初の段階で、「力学台車を一定の力で引き続けると台車の速さはどうなるか」という問題について、生徒に討論させた上で、全員に実験を体験させた。そして生徒達は「一定の力を加え続けると、台車はどんどん速くなる」ことを認めた。

もしも、前向きに力を加えるとどんどん速くなるのが事実ならば、等速で動いている場合に、前向きに一定の力が働いているはずだとは言えないのではないかという考えから、「自動車は、なぜ等速で走っているか」と尋ねてみると、生徒からは色々な意見が出てきた。予想どおり、「摩擦が減速させ

るので、加速させる前向きの力と打ち消しあい、加速も減速もしない」という意見もあった。しかし、それ以外にも多くの意見が出てきた。例えば、「エンジンの回転数が一定だから、等速になる」、「前向きに一定の力が加わっているから一定の速さだ。例えば乳母車や自転車なども力を加えているから等速になる」など、先に実験した「一定の力なら加速する」という事実と矛盾する考えが出ている。しかし、むしろ、こちらの方が生徒のそれまでの考えに強く結びついた考えで、先の実験一つでは、生徒の考えは容易には変わらないことが明らかになった。¹²⁾

この事実から、「摩擦は生徒に力としては明瞭に意識しにくく、摩擦のかかわる自動車や乳母車などの事例から導入するのは適切ではない」と思われるので、「生徒にとって力が加わっていることが感覚的にも明瞭にわかり、かつその合力が0のとき等速運動をしていることがわかるような事例について考察する」ことが、生徒の理解のプロセスの初歩にあたって必要だと仮定してみた。

教育の場において、これをさらにどう具体的すればいいかに答えて次の実験¹³⁾を企てた。



この実験では、台車と床との間の摩擦が無視でき、前向きと後向きに等しい力が加わるとき等速という事実が生徒に明瞭

なるのである。その詳細については第2章3節に記す。

このように見ると、授業分析から生徒の理解の過程を抽出するには、どうしても研究上主観的な解釈の介入が避けられないことが分かる。トライアル・アンド・エラーで、次への手掛りを探るという帰納的方法が十分役立つものであることは、著者のこの研究が一つの例示となるであろう。

1-6 授業のくみたて

授業記録を作成するにあたっては、もちろんきわめて周到な準備が必要であるが、具体的には、一度授業を実施した経験に基づいて修正した授業プランを、他の学級とか次の年度の学級に適用して逐次改善するという方法をとらざるをえない。このようなトライアル・アンド・エラーを経て著者のとった授業のくみたては、およそ次のようなものであった。

1. 「教師による課題の提示」
2. 「生徒が課題にたいして立てた予想と、どうしてそのように予想したかという考えをノートに書く」
3. 「意見の発表と討論」
4. 「他の人の意見を聞いて明確になったこと・疑問に思ったこと・今の自分の考えをノートに書く」
5. 「実験や観察により予想の正否に反省を加える」
6. 「実験の結果とそれによって自分の考えが進んだところや疑問をノートにまとめる」
7. 「教師の助言と生徒間の討論によって結果をまとめる」

これは基本的には仮説実験授業の形式¹⁴⁾(板倉1971, 1974)に近いが、これに若干の修正を加えたものである。すなわち仮説実験授業では予想を立てる段階の討論に比重が置かれていて、実験はややもすれば実証に傾くきらいがあるが、ここではできるだけ生徒の自由な発想を尊重し、実験や観察の結果から直感的に読み取られた印象をもとにして、必要ならば、初めに考えた予想を再検討してゆくよう心掛けた。その意味から「教師ができるだけ結論を言わず、どこまで生徒が自分で考えを発展できるかに着目する」ことに重点を置いた指導を行ってきた。

またこの中の2., 4., 6.に記すノートの利用は、玉田等(玉田1978・松井1979, 1983)の授業研究に示唆を得たところが多い。授業中の討論や実験によって生徒が理解したことをノートに記録させておくことは、生徒が自

分の考えを明確に意識するためにも、また、授業中の机間巡視や提出させたノートから生徒の理解がどのように展開されたかを教師が知る上でも極めて有効であった。^{15) 16) 17)}

第2章 現象の理解の過程

この研究では、先にもふれたように、ケース・スタディとして力学の現象についての生徒の理解の過程を取り上げた。そこで取り扱われたテーマは次のようである。

1. 力とそのつりあい
2. 等速運動している物体に加わる力
3. 物体の加速度が一定のときに物体に加わる力
4. 運動の法則と質量の理解

以下は、ICU高校での1979～1983年の物理Iあるいは理科Iの中で、これらの単元についての授業の記録の分析である。力学の中での力の概念や質量の概念などの形成は、以上の単元のいたるところで学習がつみ重ねられるので、一つの単元のみでは生徒の理解の変遷が捉えられないと考えたからである。

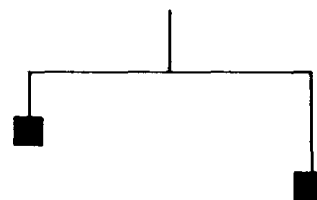
しかしこの報告では都合により単元1および2を中心として取り扱い、ここでの授業の忠実な分析を通して、生徒が力や質量などの概念をどのようにして形成し、また力のつりあいの法則、慣性の法則、などの法則をどのように理解してゆくかの解明を試みた。そして、その解明の手掛りを得るために、生徒の発言の注意深い分析が必要であった。ここではそこで得られた知見をできるだけ具体的に検討することにする。ここまでの分析の結果だけからも極めて重要な結論が得られたと思われるので、単元3、4については今後の報告にゆずることにした。

2-1 日常経験にもとづく常識的な理解と学習内容をどう結ぶか

教室での生徒の発言や、プレテストなどによって調べた、生徒の学習前の

力についての理解はおおよそ次のようなものであった。

- (1) 静止している物体に押す力を加えると動きだした。
- (2) 静止している物体には全体として力が加わっていない。
- (3) 針金は、針金につるしたおもりに力を加えていない。ただ支えているだけである。おもりに働く力は重力だけである。
- (4) 天秤に同じ重さのおもりを下げると、天秤からおもりまでの糸の長さの長い方に傾く。



このように力という言葉を使って現象を説明しようとする。しかしそれはしばしば互いに矛盾していて、よく注意してみると、それぞれの記述の中でつかわれている「力」という言葉は少しずつその意味が違うことが明らかである。また、

- (5) 運動している物体にはその進行方向に力が加わっている。
- (6) 真上に物体を投げ上げた場合、頂上では物体に力が加わっていない。
- (7) 落下している物体に加わる重力は下に行くほど大きい。
- (8) 物体の質量が異なっても、物体は同時に落下するから、地球の引く力はどちらも同じである。
- (9) 物体に等速運動をさせるには、物体と床との間の摩擦が無視できる場合でもたえず力を加え続けなければならない。
- (10) 物体に力を加えるとその力は物体に残る。
- (11) 等速で走っている人が静かにボールから手を離すと、水平方向の勢いは残っているが重力による抵抗によって勢いがへるので、ボールは人より後ろに落ちる。

子どもは就学前に学習した日常言語を、それぞれの生活の中での経験に照らし合わせて日常の世界についての理解をつくりあげているが、その後の学校教育では、また読んだり聞いたりして得たことばや知識を吸収する。しかし、それらがすべてよく消化されているわけではなく、時間をかけて次第に

その意味を理解できるようになる。例えば、上述の(9)のように「物体と床との間の摩擦が無視できる」とか、(11)の「重力による抵抗によって勢いが減る」とかいう言い方は摩擦とか重力、抵抗あるいは勢いとかいうことばが十分理解されないままに、ある意味でつじつまをあわせ、あるいは現象の説明をしようとして使っているものと解釈することができる。そのこと自身まったく正常な努力なのであって、「誤り」だとして非難されるべきことではない。

現在使われている教科書を見ることにする。

教科書では、まず、エアートラックの上に乗せた滑走体や、水平な面に置いたドライアイスがほぼ等速運動をすることを説明した後に、「この事実から一般に、物体に力がはたらかないとき、物体はそのままの運動を保ち続ける……これをニュートンの運動の第一法則、または慣性の法則という」といい切っている。

ところが、先に見たように、かなりの生徒は「物体に力が働かないとき、物体は静止したままであり、運動しているときは必ず力が加わっている」と、考えているのであるから、教科書でとりあげているエアートラック上の滑走体には力が加わっていると考えているものが多い。また力が加わっていると考えなければ、いずれは滑走体が止まるとして入る。

教科書に書かれていることは、決して間違っているわけではないが、実験を基として正しい結論に到達するまでの推論が必ずしも明確でなく、その意味で、生徒の間違った考えを変えさせるのには有効でない場合が極めて多い。

2-2 未熟な推論

日常生活の常識においては子どもは世界に起こっているものごとの原因と結果をある程度まで推論することを心得ているし、またなぜ、どうしてという疑問はかれらの知識欲を満足させるためにさかんに発せられる問である。けれどもその反面、比較的日常生活から離れたことがらにたいしては常識の感覚から直ちに記述が妥当か否かを判定し難い場合は、推論は順調には進まないのは当然である。

例えば、次のような生徒の発言について考えてみよう。

- (12) 質量が違っても、同じ時間に同じ距離だけ落下するから、物体に加わる力は同じである。
- (13) 物体を真上に投げ上げた場合、頂点では瞬間静止しているから物体には力は加わっていない。

(12)について「同じ」という言葉に引かれて十分内容を理解せず、あるいは(13)のように安易に静力学的な場合からの類推によって考えているように思われる。生徒が事実を論理的に説明しようとする努力は受け取れるが、推論を十分論理的な仕方で行っていないことが欠点になっている。

2-3 経験の裏付けなしに既成の知識を受け入れる

生徒の学習前の知識は、すでに見たように、生徒がそれなりに経験から築き上げてきた考えである場合が多い。しかし、記録の分析からも明らかなように、生徒がそのような経験によって裏付けられていないで、単に既成知識の文章表現をそのまま鵜呑みにしている場合がある。特に(9)、(11)のアンダラインを付けた部分に注目すれば、「まさつ」とか「重力による抵抗」とか不消化な表現が目立つ。その他に、

- (14) 物体が落下するとき下に動き始めるのは、物体を地球が引いているからだ。
- (15) 台車に一定の力を加え続けてどんどん速くなるのなら、人の力でも光速を越えられることになるが、実際は無理だから、台車は一定の速さになる。
- (16) 地球に近い方が重力が大きい。

なども外から与えられた既成の知識を、批判もせず比較的安易に受け入れていることを示す。

もう一度ここで2-1に紹介した生徒の記述の内容を振り返って考えてみることにしよう。まず(5)、(9)について見ると、これは摩擦が大きい場合に正しい解答であって、アリストテレスが観察によって法則として捉えたのはま

さにこの通りであった。

いま仮にこれを正しいと認めて、そこから出発すれば、運動し続けている物体に力が働いていることは当然である。したがって、たとえ一様な速さで運動していても力が働いていることは当然である。したがってたとえ一様な速さで運動していても力が働いていなくてはならないから、そこから速さと力とがほとんど同じものだとみなされ、「真上に投げ上げた物体にいつも上向きの力が働く」ということになる。そこから(6)にみられるように頂上に達したときに上向きの速さと下向きの力(重力)とがつりあうから、そこでは全体として力が働かないという考えが生まれる。これが恐らく現在高等学校で80~90%以上もの生徒が(6)が正しいと信じているという事実の根拠になっているものと思われる。

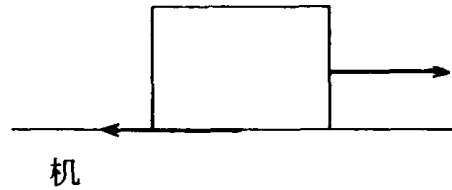
次に(5)に表れる、「地球に近い方が重力は大きい」ということも、この知識を直ちにここでは「物体が落下するとき、下に行く程速くなる」のは「地球に近い方が重力が大きい」からだというように結びつけるのは適当でない。形式的に受け入れた「正しい」知識も、生徒の経験と具体的に結びつかないならば、ここでみたように、結果的に「誤った」理解に導くことになってしまう。実際には、生活のあらゆる場面であらゆる情報をすべて批判的に受け止めることは困難であるが、逆にそれだからこそ授業という形態での学習の過程では、できるだけ経験や新たな現象と整合する説明を生徒自身が見出せるように導いてゆくことが大切なことがわかる。

2-4 理解の枠組みを変える

ではどのようにして、生徒が自分の考えを修正して、新しい理解を作りあげてゆくことができるかが問題になる。次に、具体的な事例に即してそれが可能であることを示そう。

次に示す課題1以下は、「力のつりあい」の単元に引き続いて行われた慣性の法則についての授業の中で示されたものである。

生徒は「まさつが運動のじゃまをする」という考えにはすでによくなじんでいるがかれらにとって「まさつは力である」ことは必ずしも自明ではない。また多くの生徒は、まさつだけでなく重力も運動のじゃまをしているとし、物体を動かすには、「重



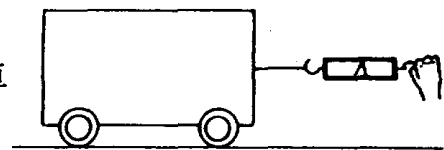
物体は静止している
ので右向きに力が加って
いれば左向きにも同じ大
きさの力（まさつ力）が
加わっている。

力+まさつ」が必要だと考えている。そこで、「平らな机の上に置いた物体を動かし始めるには、重力よりはるかに小さい(約 $\frac{1}{3}$)の力でよい」ことを事実で示し、その上で、「では物体が動きだす力より小さい力を加えているとき、物体には他にどんな力が働いているか」ということを考えさせたところ、「物体には加えた力と同じ大きさのまさつの力が働いている」ということが明確になった。

そこで、台車は10gw程度まで力を加えないと動き始めないことをばねばかりで台車を引いて示し、台車の車の床との摩擦力は、10gwより小さいことを確認した。

その後、次の課題（生徒に考えさせるための主発問）を提示した。

課題1 力学台車を摩擦力より十分大きい一定の力（例えば30gw）で引き続ける。台車の速さはどうなるか。



生徒の予想は次のようなものであった。

- (ア) どんどん速くなる
- (イ) 最初速くなり、後に一定の速さになる
- (ウ) 予想がたたない

小関(ア) ちょっと押すと台車はすぐとまる。これは摩擦のせいで、摩擦がなければ、ちょっと押しただけでどんどん（等速で）進む。この場合、

摩擦は関係しないので、何回も（断続的に）押し続けると、速さはどんどん増える。

米森(ア) 摩擦力が小さいので一定の力を加えるとそれはスピードになり、
（正しくはそれはスピードを増す結果となるというべきところである）
一定の力（により速くなったスピード）+スピード+スピード+スピード、
となってどんどん速くなる。

実験の結果

力を加え続けると台車の速さはどんどん速くなり、台車を引いている人を追い越してしまう。（これは一定の速さで動かすために必要な引く力が段々小さくなってしまい一定の力で引くことができなくなってしまうというようにも解釈できる。）

実験結果の考察

三宅 ある力で引っぱると動き出し、それにまた力を加える、というように断続的に力を加えたと考えるとどんどん速くなるのだと思う。

野見山 予想とちがってだんだん速くなった。これは、初めに加えた力がスピードになり、その上にまた一定の力を加えるので、だんだん速くなるということです。

この生徒の議論の中で特徴的なのは、力とスピードの混同、あるいは力がスピードになるという考え方（三宅・野見山）である。この考えを受け入れる生徒の割合は大変多く、ある組では45%（2年1組1983年度40人中）の生徒が、実験後にもなお自分の考察としてノートに書いている。

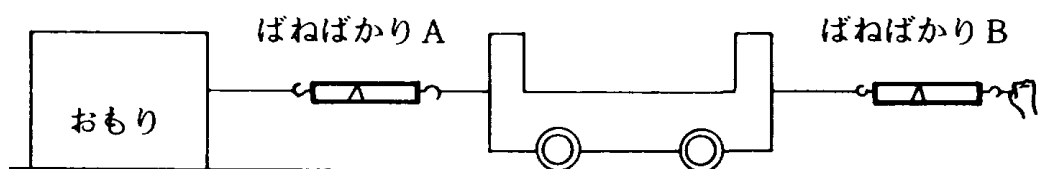
このように、力の捉えかたは未だ多くの混乱を含んでいる。つまり、力を加え続けるとどんどん速くなるという事実を説明するために、加えられた力がスピードとなるとか、スピードがあるというべきところを「物体は力を持つようになる」と考えたりする。

次の課題2では課題の提示に先立ち、おもりを一定の速さで引き続けると

き、ばねばかりは常に1.2kgwを指すことを演示実験により示し、台車と床との間の摩擦力は、これに比べると無視できることを教師は説明した。そして次の課題を提示した。

課題2

あるおもりを一定の速さで引くにはたえず1.2kgwの力があることがわかっている。おもりを力学台車の後につけ、力学台車を等速で動かしたい。力学台車はどれだけの力で引く必要があるか。



車と床との間の摩擦力は無視できるほど小さい

実験前の生徒の予想と討論

塚越 力を加え続けると、課題1の実験の結果から考えたのと同じように加速すると思う。だから1.2kgwより小ではないかと思う。

白木 引き始めるときは1.2kgwより大きな力が必要。しかし、同じ力で引き続けたら、課題1の実験ではどんどん速くなった。だから力はどんどん小さくする必要がある。

内藤 1.2kgwは、物体が等速で動いているときの摩擦力。物体を1.2kgwで引けば、等速で動く。1.2kgwより大のとき加速する。力学台車も台車の摩擦を考えなければ、等速で動く。

実験の結果

ばねばかりAとBとの読みは二人の生徒が手わけをして同時に測定することを繰り返す。その読みは常にほぼ同じ値であった。

ばねばかりBを引いて台車を動かすとき、それほど正確とはいえないが速さは目測で一定に保つ。要点は2つのばねばかりの読みがほぼ同じであるこ

とを確かめればよい。おもりと床との間の摩擦に比べて台車と床の間の摩擦が十分小さいので後者が無視できることがこの実験を組み立てる場合のねらいである。

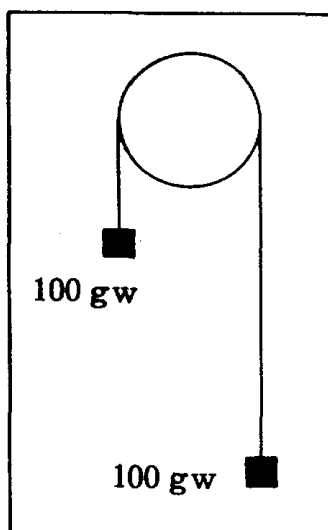
実験の結果の考察についての討論

村松 等速になった。動いているものにどれだけ力を加えれば等速を保てるかというのがこの問題の趣旨だから、(台車を前向きに引く力と後向きに引く力は) 同じ力で良い。初めから動いているものは、速くも遅くもならない。

高柳 今回の実験では後に1.2kgwの(摩擦がある)ものを置いたので1.2kgwの力で引っばると、ちょうど台車に加わる合力は0になって等速運動する。また1.2kgw以上の力を加えると加速し続け、1.2kgw以下だと止まってしまう。……ということは、前の実験では後ろに1.2kgwのおもりがないが台車にかかる摩擦力と同じ力で引くと等速運動をしそうだ……しかしその実験で加速し続けたのは台車の摩擦力より引く力の方が大きかったからである。

この実験事実について、なお納得できないという生徒も少なからずいる。その代表的な意見は次のようなものである。

五箇 ばねばかりAとBとの力は等しい。だから合力0になる。合力0では動かない。右向きに大きな力を加えないと動かないのではないか。



課題3 重さの等しいおもり2つを、滑車の左右につるす。左のおもりを右より高い所に置き、静かに手を離すと、左のおもりはどうなるか。(糸の重さは無視できるものとする)

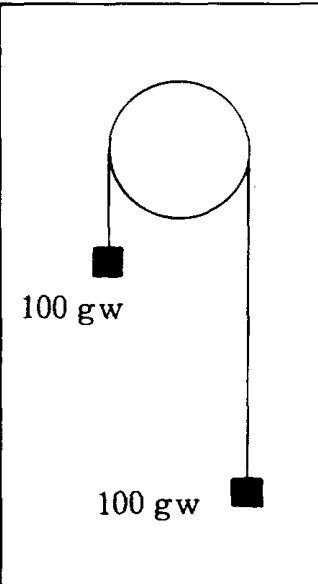
生徒の予想

- (ア) 上に動き始める
- (イ) 止まったまま
- (ウ) 下に動き始める

実験の結果 おもりは静止したままである。

生徒による実験の考察

吉岡 つりあって止まったままだった。物体にかかる力は合力0で動かない。



課題4 重さの等しいおもり2つを、滑車の左右につるす。左のおもりを下向きに手で力を加えて動かす。手を離した後おもりの速さはどうなるか。

生徒の予想

- (ア) どんどん遅くなる。
- (イ) 等速
- (ウ) だんだん遅くなる。
- (エ) すぐに止まる。

実験前の生徒の発言

中谷(イ) 摩擦を考えなくていいのなら(イ)になる。合力0で止まっているところに力を加えると加えられた力は(勢いとして)保たれて等速で動く。摩擦がないのだったら、ストップさせる力がない。一定の速さで動き続けるとしか考えられない。一回力を加えると(勢いとなって)減りもしないしふえもしない。だから等速で動く。

しかし、「力は保たれて動く」という考えには、力を勢いあるいは速さと

混同していることがうかがえる。次の意見はこの意見と鮮明な対立を示した。
 白木(エ) 手で加えた力は持続しない。手を離すと力は無くなり、力が加わらないからすぐ止まる。

生徒による実験の結果とその考察

長岡 合力は0なので等速で動く。だが摩擦はやはりあるので、あまり小さな力で引くと止まってしまう。

市村 合力が0ということは、スピードを速くする原因もないし、遅くする原因もないので等速運動をする。

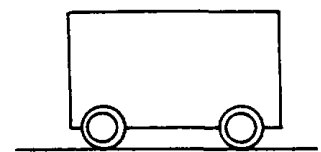
教師は、課題3、課題の実験の結果について、次の説明をつけ加えた。

物体に加わる力の合力が0であれば、最初静止している物体は止ったまま(課題3)、最初動いている物体は等速直線運動をする(課題4)。これを慣性の法則と呼ぶ。

次にこの一連の実験とその結果にたいする討論のあとで生徒の理解がどの程度変化したかを調べるために、次の課題5にたいして答えを求めた。

課題5

台車に力を加えて右に動き始めてからすぐに力を加えるのをやめるとしばらくして止まる。このときまでに台車に加わっている水平方向の力の向きを矢印で表し、それが何による力かを説明しなさい。



台車は右に向いて走っている

生徒の予想(討論前)

- | | |
|-------------------|-----|
| (ア) 前向きの矢印と後向きの矢印 | 17人 |
| (イ) 後向きの矢印のみ | 14人 |

ここで後ろ向きの力の矢印は台車と床との間の摩擦によるものを表すと答えた。

以上の解答の分布は大変興味深い。なぜなら慣性の法則についての理解を

徹底的に追いつめてゆけば(ア)の意見とは矛盾することは明らかであるが、それにもかかわらずなお多数の生徒が(ア)が正しいと考えていることは注意すべきである。それでは(ア)とした生徒はどのように考えたのであろうか。これについて次のような意見が述べられた。

(ア) と答えたものの考え

- (1) 加えた力が残っている。
- (2) その力はだんだん消耗されてゆく。
- (3) 左向きに力が加わるだけだと左向きに感じがし、右向きに進むのはおかしい
- (4) 動いているから右向きの力がないとおかしい。

(イ) と答えたものの考え

これに対し、(イ)とした生徒の意見は次のようなものであった。

- (5) 糸が台車を引く力のようにいつも台車に力を加える物体（この場合糸）があるはずだが、台車を右向きに引いている物体がない。
- (6) 今力は加えられていない。
- (7) (ア)の右向きの力が加わっているとすると、課題1とおなじになり、右向きに台車は加速することになる。
- (8) 慣性の法則は合力0で運動を続けるということを表しているのだから、右向きの矢印はいらない。

この討論では、「もらった力」と「外から加わっている力」と全く同じ意味に扱い、同じ矢印であらわすと、大変混乱することが明確になった。そこで、「もらった力」と「外から加わっている力」とをこれからは、区別して扱わねばならないことを確認した。

ここまでの授業の記録から、生徒の持っている力の概念の発展を検討すると、課題1の実験を見た後の生徒の考えの中にあつたように、力と、速さや勢いとを混同したままの概念は、混同しているから役立たないのではなく、その混同をまともに受けて区別を明らかにすることが、課題2の予想に役立

ち、慣性の法則の理解を助けていることに注意する必要がある。





力と勢いの分離

力と勢いとは生徒自身の中で区別できているかどうかを学習後に定期試験で調べたところ次のような結果が得られた。

問 物体を斜め上に投げ上げたところ右図のような放物線を描いた。A点で物体に加わる力を矢印で示すとどうなるか。（空気の抵抗は無視できるとする。）

物体は左から右に動いている

解答は次の選択肢から選べ。

(ア)  (イ)  (ウ)  (エ)  (オ) その他

1981年度に79名の生徒に対して行った調査の結果は次のようであった。なお、参考のために、同じ対象ではないが、1982年度に70名の生徒に対して同じ問題を授業開始前にプレテストとして行った結果をあわせて表に記してある。

	81年度事後テスト	82年度プレテスト
(ア)	1%	9%
(イ)	<u>85%</u>	<u>7%</u>
(ウ)	10%	70%
(エ)	4%	10%
(オ)	0%	4%

これを見ると授業前は少なくとも90%前後が「力」と勢い（または速さ）が分離してとらえなかったものが、授業後にはその違いがはっきり捉えられたことを示すようである。

しかし、この結果だけですべて問題が解決したというわけではない。仮に、運動の速度を変化させるものを力と呼ぶと約束すれば、投げた物体では重力だけが力ということになるが、「勢い」と「力」との関係はもっと詳しい検討が必要であって、ここでの議論の範囲を越えるものであるからである。

2-3 再び帰納的な推論について

ここで、この帰納的な方法が生徒の現象を理解してゆく上でどのような意味をもっていたかを、さらに考察しよう。それは、自然科学教育の中で、実験についての位置付けにかかわる問題である。

高校での理科 I あるいは物理の教科書を見ると、実験以前にすでに法則があり、それを例証する材料として実験を用いるという場面が大変多いことに気づく。先に見た慣性の法則の説明でのエアートラックの実験はその一つである。ところが、実験そのものは、現実には、そこから探り出された結果としての法則の「厳格な論理的証明の根拠」には成り得ない。そのことは、慣性の法則での課題2の実験が大変うまく仕組みられているように見えても、このことから言えることは、「力が働かなければ物体は等速運動をする、という法則が正しいければ実験にあう」ということを言っているだけで、逆に実験が正しいならば、「力が働かなければ物体は等速運動をする」ことの論理的な証明にはなっていないことに注意すべきである。

この結論はちょっと考えるよりはずっと重要な意味をもっている。一般にどんなにうまい仮説をたて、それから期待される結果が実験にあったからといって、その仮説を証明できたことにはならないからである。その意味からいっても「検証実験」という言い方は誤解を招きやすいと言える。

第3章 この研究の反省と今後の課題

3-1 どこまで生徒の理解の過程を探ることができるか

この研究の基礎となる（生徒に考えさせるための質問）や実験により、第1章でも述べたように、トライアル・アンド・エラーを通して、生徒の理解の進展を取り出すことにつとめてきた。そして、例えば力の概念形成や法則の理解について得られた知見は、同時に生徒にとっても学習を発展させることに役立つものであった。生徒が自分の経験をもとに作りあげてきた理解がその次の段階での予想に役立てることができるとき、はじめてそれは生徒の積極的な活動を捉すことができる。またその予想が適切でない場合にはこれを裏切るような実験を教師が呈示することによってこれをさらに考えなおすきっかけを与えることができる。そして、その授業での生徒の理解を、単に教師の意図にのみとらわれずできるだけ客観的に分析しようとする努力により、生徒の理解の変容を把握することができるようになる。

しかし、生徒の理解を探るために、必ずうまく行くという絶対的な方法があるわけではない。理解を助けるための課題や実験あるいはそれらの順序などは、その授業以前の生徒の理解から演繹的に導かれるものではなく、逆に生徒の反応からまさに試行錯誤を経て帰納的に推定するほかはない。それは物理の法則を求めると全く同様である。

3-2 生徒の自発性をどのように育てるか

以上の観点は主として教師が助言を与えるのに「学習過程」の研究がどのように役立つかを述べたが、それに劣らず大切なことは、学習者自身が自力で試行錯誤の過程で自分の考えが、(1)論理的につじつまがっているかを試し、また(2)自分の試行が妥当かどうかの判断を自分なりに予見する判断能力をもつようにすることである。それは「正解は教師によって与えられる」という考えを持たせることを止め、生徒といっしょに考えるよう努力することであり、学習過程の研究の成果はそれに役立つことを強調したい。すなわち

既述のように生徒の考えが論理的につじつまが合わなかったり、経験にそぐわなかった場合に、それを誤りとして捨てさせ、正しい答えを示すことでなく、誤りを追求する過程の中からより正しい解答をつかみ出すという経験をさせることが、とりもなおさず既存の科学教育の欠陥を補う第一歩であると考えられる。

3-3 力のケース・スタディの今後の課題

最後に、理科の教科研究の一コマとしての力学教材についていえば、このケース・スタディでは、物体が運動している場合の物体に加わるニュートンの力概念を、物体が静止している場合や日常経験とのつながりをも含めて、つじつまのあうように記述してゆくために、今迄力という言葉で「勢い」「速さ」をも含めて表現していたものを分離する問題を論じてきた。しかし既述のようにそれは、運動量やエネルギーなどに関する考察をまっしてはじめて可能となるのであって、それらの点について今後さらに具体的な検討を続ける予定である。

謝辞

この研究を進める上で、研究の視点や方法を含め、全般にわたって有益な指導・助言をいただいた柿内賢信前国際基督教大学教授に深く感謝する。多くの有益な示唆を頂いた国際基督教大学理科教育研究室の方々とくに三宅彰教授、田坂興亜準教授に厚くお礼を申し上げます。また指導方法の構成については、玉田泰太郎、松井吉之助両氏の貴重な研究に負うところが多い。

引用文献

- 1) 滝川洋二『授業分析にもとづく自然認識の過程の研究 — 力学の学習を例として —』国際基督教大学大学院教育学研究科提出博士論文1984
- 2) 北沢弥吉郎「知能発達に基礎をおく教育」物理教育 Vol.23.No.1. 1975, p. 2.
- 3) 柏木聞吉「力と運動の問題点」物理教育 Vol. 5 . No.3.1957, p. 3.

- 4) 越後宰男・梅川正誠「生徒の実態調査『物理診断テスト』(力と運動) II」物理教育Vol.18.No.1.1970, p.51.
- 5) Warren, J.W., "Understanding Force," John Murray, London, 1979, p.11.
- 6) 室善助「物理教育の二, 三の問題点」物理教育Vol.13.No.1.1966, p.39.
- 7) 石川孝夫「エネルギーを中心とした力学の展開」物理教育Vol.15.No.2.1967, p.1
- 8) 中村敏弘「『エネルギー概念を中心とした力学の展開』の実践」理科教室1969, 11月臨時増刊号1970年3月・5月号
- 9) 和田武久「“いきおい”による動力学の教材化」『授業をつくる』2号「授業をつくる」刊行委員会1981, pp.90~124.
- 10) 唐木宏「高校の力学教育過程の分析」物理教育Vol.15.No.2.1967, pp.19~20.
- 11) 柿内賢信『理科教育の課題』東洋館出版1959, pp.77~79, 147~152.
- 12) 滝川洋二「認識の形成過程を探る—慣性の法則と力を例に—」理科教育学会研究紀要Vol.24.No.2.1983, pp.19~25.
- 13) 川勝博「高校物理なげこみ教材」理科教室Vol.19.No.8.1976, p.12.
に飯田洋治氏の開発した実験として紹介されている。
- 14) 板倉聖宣『科学と方法』季節社1969, pp.219~253.
- 15) 玉田泰太郎『理科授業の創造』新生出版1978, pp.189~194, 232~236.
- 16) 松井吉之助『授業ノート・化学の基礎(2)』松井1979,
- 17) 松井吉之助著「自然科学の授業」『楽しくわかる中学理科の授業1 第一分野(上)』あゆみ出版1983, pp.24~68.

**THE PROCESS OF
UNDERSTANDING NATURAL SCIENCE
AS SEEN IN CLASS ACTIVITIES**

— Learning Process of the Law of Inertia as a Case Study —

Yoji Takikawa

It is a fact that a majority of students end up disliking natural sciences and physics. The real problem lies in the present situation whereby students are taught to deny learning through active contact with nature using their own minds and hands, but instead to passively accept what is written on the blackboard and presented by the instructor, convinced that those items are only to be memorized by rote. This problem arises from a lack of comprehension of the process of learning.

It is all the more a necessity in the modern world, innudated as it is with information, to make a major effort to let the students grasp the meaning of what they are learning through concrete, actual experiences. But it is difficult to realize the inquiry method which is better for this purpose. On the other hand, the students have difficulty grasping the meaning of knowledge presented through the lecture method. This is why it is imperative that such research be carried out now.

Therefore it is necessary to extract, as objectively as possible, from the class records of a carefully planned course, the actual stages of leaning in which the students proceed to a new level of understanding from what they have already studied.

The next step is to express the process of learning which is not merely just an orderly reproduction of the deductive logic in a lecture type classroom, but a wholesome mental activity directed towards comprehending

natural phenomena in correlation with one's everyday language in a form transferrable to others.

Surely, there are yet other and numerous problems to be overcome before this goal can be realized. The present author has been trying to extract the exact steps in which students develop their understanding from actual cases through extensive analysis of "lessons" which are a process in which learning and instruction are strongly interlocked. Merely taking a close look at the records is not enough for separating the combined elements; one needs to set criteria to distinguish these elements.

The major principle that was employed to extract the process of recognition from class records was to clarify how the students changed their previous understanding in order to adjust to a new experience that was acquired through either self-motivated activities or those performed with the instructor's advice.

It is difficult to be objective in picking out the process of recognition from an analysis of lessons. One key to pinpointing the cause of the development of an elementary understanding to a more advanced stage may be indirectly suggested from experiences teaching in class. On the other hand, another is to search for what is yet unknown by induction, which is a trial-and-error method of guessing the next step in that naive way of understanding innate in man. A reflective way of thinking is effective when it is impossible to prove this by deduction. This requires a flexible way of thinking and keen intuition; therefore, this must be found in the class records.

The final structure of the lessons that has been devised by the present author through trial-and-error is as follows:

1. Presentation of a theme by the instructor;
2. Predictions and supporting reasons concerning the theme are made and recorded in a notebook by students;
3. Class presentation of ideas, followed by discussion;
4. Recording in note form what is clarified, what is still in question, and

what one personally thinks after listening to others' ideas;

5. Checking one's predictions after observation of an experiment;
6. Recording in note form what is made clear or what new doubts have resulted from the experiment.

In this manner, the process of how high school students acquire the concepts of mechanics was probed.

General Conclusion

1. There is a strong consistency in the students' naive understanding of force acquired through their everyday experiences. On the other hand, there is a deep confusion in their interpretations of phenomena. Thus, in order to revise such interpretations, a set of experiments and observations that present new experiences are required.
2. Among such interpretations are those which are formed merely from an easy analogy between similar phenomena or from gullibly accepting ready-made information unconfirmed by any actual experience. In such cases, students face difficulties in deriving their own understanding.
3. The experiments must be designed after clarifying the conditions under which the phenomenon in question happens, preparing conditions that satisfy them as much as possible. Careful consideration must be given to the technical means required for the phenomenon to occur.
4. The experiments rarely present evidence for a rigidly logical proof, which means that inductive reasoning is required.
5. The information of scientific concepts was discovered as follows:

Taking the concept of force as an example, students distinguish force from momentum or energy which they call impetus, when they encounter experiences that make them realize that they have no use different names for those concepts previously lumped together as "force" in their everyday usage.