

授業分析による「自然認識の過程」 の研究（Ⅱ）※

——運動の法則の理解と質量概念の形成を事例として——

滝川 洋二

筆者は、前号『教育研究27』で、生徒の理解をさぐるために、授業をどのように組み立てるか、またその授業の記録から生徒の認識過程を把握する方法を明らかにし、力学の学習、とりわけ慣性の法則の学習での生徒の理解を分析した。

本稿では、いわゆる運動の第二法則の認識過程と、質量の概念の形成過程とを分析する。¹⁾

第1章 運動の第二法則の認識過程と質量概念の形成過程の分析の課題

物理の中でも力学は物理の他の分野の手本となっただけでなく、近代科学の手本ともなっただけと言われている。その力学の中で最も基礎的な法則は、ニュートンの運動の三法則である。この運動の法則の中でここでとりあげる第二法則は、 $F = m a$ （物体に加わる力 F =質量 m ×加速度 a ）という式に表わされる。この式自体は形式としてはそれほど難しいものではない。ところが、具体的に物体が運動している場合について考えようとする、生徒にとっては大変難しいのである。その難しさは、この式で言えば力 F と質量 m との両方の理解にかかわっている。

※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概要の第二報（後半部分に相当）である。

一つは運動している場合の力について、生徒の生活経験を土台とした理解が、力学の概念と異なっていることが指摘されている。²⁾このことは、著者の前論文でも取り上げているが、物体が運動している場合に、「物体には進行方向に力が加わっている」とか、「落下している物体に加わる重力は、下に行く程大きい」あるいは、「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なければならない」などは、一つの物体に加わる力と運動との関係で生徒が日常経験をもとにして考えやすい力の解釈であり、これは力学の概念とは大きく隔たっている。³⁾

二つ以上の物体に同じ大きさの力を加えたときに物体に生じる加速度を比べるとき、物体の質量が問題になる。その場合の力についても生徒の生活経験をもとにした理解と、物理の力の概念とにはやはり、大きな隔りがある。それを事実に基づいて明らかにすることが、本稿の一つの課題である。

また、運動の法則の難しさは、力だけでなく質量とは何かをめぐり生徒に学習前にすでに一定の理解があり、その理解と力学的概念との違いが、法則の理解を困難にしているのである。そこで生徒の質量についての理解がどのようなものであるかをとらえることが本稿の第二の課題である。

第二章 運動の法則の理解の過程

この章では、運動の法則についての授業での生徒の発言（著者が授業中に筆記、あるいはテープレコーダーを利用し記録）や、生徒が自分の考えをノートに書いたものなどを分析する。この章での分析の対象となるクラスは主として1982年度2年a組（27人）である。

なお著者の授業の単元の構成を参考のためにあげれば、それはおよそ次の通りであった。

- § 1. 物体の弾性と力のつりあい
- § 2. 作用力・反作用力

- § 3. 力の合成・分解
- § 4. 摩擦力
- § 5. 等速運動している物体に加わる力（慣性の法則）
- § 6. 速度・加速度
- § 7. 物体の加速度が一定のときに物体に加わる力
- § 8. 運動の法則と質量

本稿では、「§ 8. 運動の法則と質量」の授業を分析する。

2-1 質量の異なる物体が落下するときの物体を地球が引く力

2-1-1 静力学的な力と落体に加わる力

物体に加わる重力（地球が物体を引く力）というのは生徒にとっては大変わかりにくい。そのわかりにくさの第一には、重さが力とどう関係しているかということ、第二に、物体が静止している場合にも重力（地球が物体を引く力）がはたらいっているかどうかということである。物体が静止している場合でも、自分の体験としての力と直接結びつかない力の存在を見抜くということは、そう容易なことではない。まして物体が落下を始めると、物体が落下するにつれて物体を引く力はだんだん大きくなると生徒は考え、物体が静止している場合より、生徒にとって明瞭でない運動と力との関係がつけ加わることになる。それ故、物体が運動している場合に比べるとより単純な、物体が最初から静止している場合について、この重力（地球が物体を引く力）の存在とその大きさを理解してゆくのが、力のつりあいの学習の一つの課題であった。

物体を引く一方の力が重力（地球が物体を引く力）である場合、もう一方が「針金が物体を引く力」であろうと「机が物体を押す力」であろうと、重力と向きは反対で、大きさは同じである。そこで、力のつりあいがわかれば、重力に対してつりあっている力に着目し重力の大きさを推定することが出来るようになる。例えば、次の図に示すように、ばねにおもりをつるすと、ば

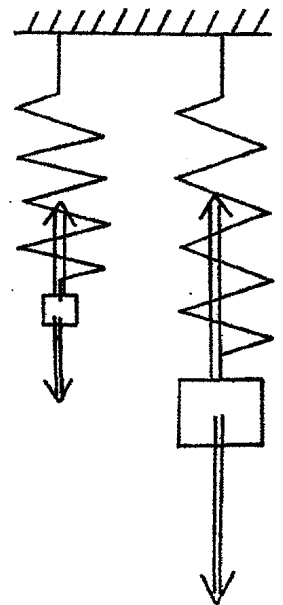
ねの伸びの大きい方が、重力も大きいことがわかるようになる。

著者の授業では、これに加えて静力学の中で、「物体を構成する部分部分（例えば原子一個一個）が地球にひかれ、その合力が物体に加わる重力である」と主張した生徒の考えを教師が繰り返し説明している。この考えを生徒が受け入れているならば、同じ材質の物体であれば質量の大きい物体は、加わる重力も大きいということになる。

ここで、質量という言葉が出てきたが、この言葉も静力学の中で教師から説明を加えた。教師の説明を聞いて生徒は、「力は地球が物質を引っ張る重力で表される。だから地球と月の上では力は変わってしまう。しかし、質量は物質そのものの量であるのでどこへ行っても変わらない。重力は、質量に比例して地球が物体を引っ張る力である」などと自分の言葉でまとめている。このまとめに見られるように、ここでの質量は重力の原因となる質量であり、この章で後に取り上げる、物体の加速に対する抵抗としての質量については触れていない。

さて、静力学的な力のつりあいや、重力についての学習を行ってきた生徒は（もちろんその学習の定着率などにも関係するであろうが）、それでは、物体が運動を始めても、静力学で学習した力を運動している場合にもそのまま適用して考えるであろうか。

次の課題は、この静力学的な重力の理解と落下の場合の重力の理解が、一つの大きな問題となる。なおこの課題を提示する直前に真空落下実験機（ガラス管の中に羽、紙、アルミがはいついて真空ポンプを用いてガラス管の中の空気を抜くことができる）を用いて真空中では羽、紙、アルミが同時に



ばねの伸びで重力の大きさを比べる。

落下することを確認している。

課題 1 A 75 g と 5 g の鉄の球を地球が引く力 ア
の大小を矢印の長さで表せ。

イ

生徒の予想	a 組 (82年度)	82年度全クラス
ア 75 g の方が大きい力でひかれる	8人 33%	47%
イ 75 g も 5 g も同じ力でひかれる	12人 50%	42%
ウ 予想がたたない	4人 17%	11%
	(24人)	(72人)

春の授業開始前にプレテストを行った結果 (1983年度 4月 398人) と比較すると、力のつりあいの学習のこの課題 1 A にたいする影響がわかる。プレテスト中に「10 g の物体と 100 g の物体を地球が引く力はどちらが大きいか」という問があるが、それへの解答の割合は次のようなものであった。

- (a) 10 g の物体を引く力 6.4%
- (b) 100 g の物体を引く力 62.7%
- (c) どちらも同じ 30.9%

これを比較すると、重力に関する限りにおいて、運動している物体に加わる力の理解にとって、静力学で力のつりあいを学習したことは大きな影響を与えていないということが分かる。

2-2-2 「どんな物体でも同時に落下するならこれを引く力は同じ」か
このような予想になる根拠を検討するために生徒の考えをみてみよう。
中崎 (ウ) 重さとは地球が引く力だから 75 g の方が大きい力で引かれるとも

考えられるが、他方では、同時に落ちるから、同じ大きさの力だとも思えて、わからない。

この中崎の意見は、アとイの意見の両方を代表しているともいえる。予想がたたないという生徒は単にわからないというだけではなく、自分の意見の中に、明確に対立した考えがあり、そのため予想がたたなくなっている場合も少なからずみられる。次の福岡の意見もそうである。

福岡（ウ）アにもイにもそれぞれ理由がありそうである。アの理由は、中崎君と同じで、物質の質量に対応して（比例して）地球の力が働くんじゃないかっていうことで、イに関しては、物質はちょっと力を加えるだけで動くから、（摩擦力の授業でロープでつるしてある10kg以上ある物体を横に動かし始めるのに、10gw以下の力しか必要としなかったことをさしている）物体を動かすには合力0でなければいいから、力は同じじゃないか。75gと5gのそれぞれがちょっとの力で動くから、引く力は同じでいい。

中崎と福岡の意見から、イには次の二つの根拠があることがわかる。

1. 質量がちがっても、物体は同時に落下するから重力は同じである。
2. 物体を動かし始めるには、わずかの（0でない）力があればいいので、質量が大きくても、小さくても動かすのに必要な力は同じである。

2. の意見は、摩擦力の学習により形成され強固になった考えである。というのは、ロープで吊してある10kg以上もある鉄のかたまりを10gw以下の力で動かすことができ、また息を吹きかけるだけでも（じつはこの方が加わる力は大きいのであるが）動きはじめるということを実験で確認しているからである。このことから、2. の意見は、動かし始める場合も、動かし続ける場合も同じであると考えたものである。

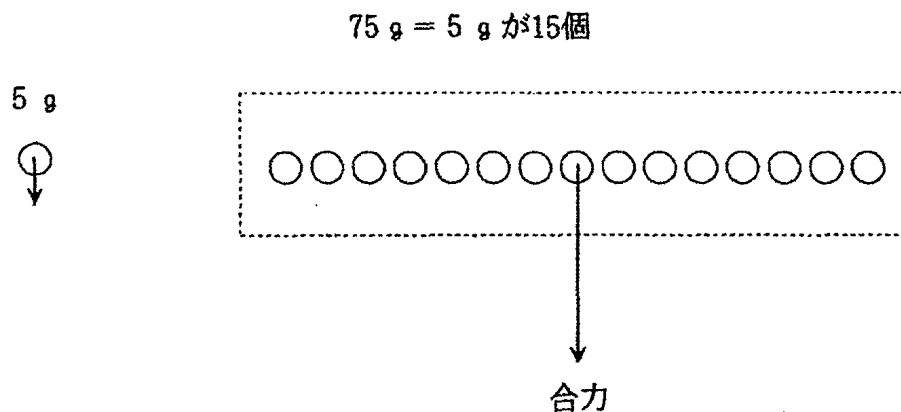
それに対し、1. の意見は、同時落下を根拠とし、同時落下については、かなりの生徒が（春のプレテストでは84%の生徒が同時に落ちると答えてい

る)知識としてはあるので、重力を考える際には1.の意見の方がより一般的であると考えられる。

アの意見には、さらに次のような考えがある。

池永(ア)地球の引き方(物体の速さ)は同じになるけど、地球が引く力は75gの方が大きい。でないと、今まで書いてきた図とかみんな違っちゃうから。

古谷(ア)75gの大きさっていうのは、5gの15倍でしょ。だから5gのを15個セロテープか何かでしばりつけて落としたら、5g、5gの一つずつにかかる地球の引っぱる力は5g一つで落としたのと同じでしょ。全体でみると5gの15倍のように見えるけど、一つ一つでは同じだから、落ちるのは同じになる。



千葉(ア)75gの物と5gの物を同じ速さで動かすには、75gの方が大きな力がある。

これらの意見の中で75gとか5gとかを生徒は力とは区別して使っている。それは、前(p.160)に述べた、「重力は質量に比例している」ということを使っているからである。ここで、ア(75gの方が大きい力でひかれる)という意見を整理しておく。

1. 重さは地球が引く力のことである。質量の大きい物体の方が重いから地球が引く力も質量の大きい方が大きい。

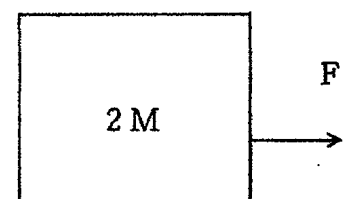
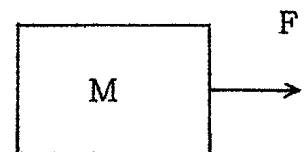
2. 今迄学習してきた力のつりあいでは、地球が物体を引く力は質量の大きいものは大きな力と考えてきた。
3. 物体を要素に分けると全体を引く力は、要素一つ一つを引く力の総和になる。
4. 質量の異なる物体を同じ速さで動かすには、質量の大きい方が大きな力がある。

この課題は、討論だけでは決着はみられない。しかしこの討論の内容に即して、重力（地球が物体を引く力）の大きさを実験で確認することも大変困難である。というのは、アの主張の1. 2. 3. (p.163~164)は静力学の中で既習の事柄であり、新たに実験で確認すべき内容は含まれていない。またイの主張の1. (p.162)の同時落下も既に実験で確認済みである。

アとイの主張の中で明確に対立し実験で確認しうるのは、アの4. (p.164)とイの2. (p.162)である。質量の異なる物体を同じ加速度で動かすのに、アは質量の大きい方が大きな力が必要だと考え、イはどちらも同じ力でいいと考えている。そこで、対立点を実験で確認できるように次の課題1Bを提示した。

2-1-3 質量は加速度に影響するか(1)

課題1B 質量Mの物体と2Mの物体を力Fで引き続けると、加速度はどうなるか。(摩擦は無視できるものとする)



生徒の予想	討論前	討論後
ア Mの方が大きい	9人	10人
イ どちらも同じ	10人	10人
ウ 2Mの方が大きい	0人	0人

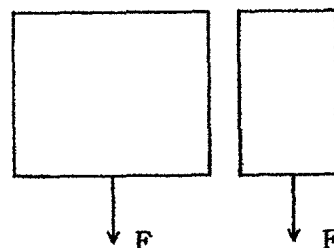
エ 予想がたたない 5人→ 5人

課題1Aのア、イと課題1Bのア、イは、生徒の予想の中でも、大まかには対応関係があることが、この課題1Bの予想の人数をみるとわかる。また、その予想の根拠には明確に対応関係がみられるものが多い。それを次に記す。

課題1Bの生徒の考え

池永（ア）もしMの方が加速度が大きいなら、2MがMと同じ速さで動くにはFの2倍の力が必要。75gの鉄の球を5gの鉄の球と同じ速さで運動させるためには75gの方が15倍の力が必要だ。

高岡（他組）（ア）上下の力の関係は重力と垂直抗力でつり合っている。だから、上下の力は0でFを重力とたとえる。課題1Aの図を90度回転させると、右の図のようになる。すると同じ重力で引くことになるからMの方が加速度が大きい。



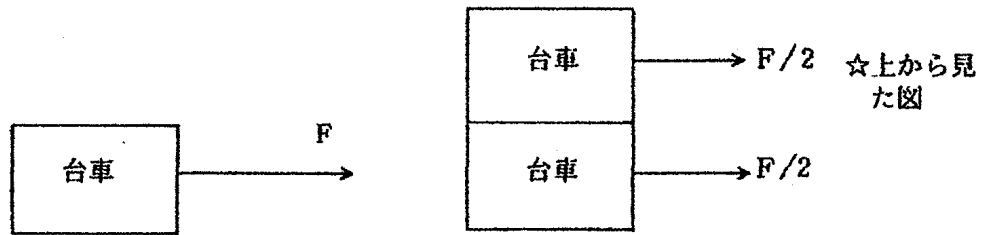
三枝（他組）（ア）もし氷の上で軽い物と重い物をそれぞれ同じ力でおして見たら、多分、軽い方が遠くの方へすべって行くだろうと思ったから。

池永や高岡の意見は、この課題1Bでの自分の意見と課題1Aでの意見との明確な対応関係を示している。そして質量の大きい物体は同じ力を加えたのでは加速度は小さいことを主張している。

三枝は、課題1Aとの関連は明確ではないが、重い物（質量とは表現していない）は、動きにくいことを主張している。このことをより明瞭に展開した意見をもておく。

大沼（他組）（ア）台車を横に引くとき重ねていようと並べていようと摩擦は変わらない。この場合摩擦は無視できるから、重ねないで横に並べて考えてみる。2台の台車をFの力で引くと、1台の台車には $\frac{1}{2}F$ の力がかかる。質量Mの台車を $\frac{1}{2}F$ で引くのとFで引くのでは、Fの方が加速度は大きいと思う。故にMをFで引く方が2MをFで引くのより

も加速度は大きくなる。



これに対してイ（どちらも同じ）という意見も、課題1Aと課題1Bとの関連性を明確に主張する。

布井（イ）引力やなんかの働かない宇宙なんかでは、前にやったけど、大きい物でもちょっとの力で動く。ようするに、重力、質量は関係ないから75gも5gもそういう状態では同じだと思う。そして同じだけの力を加えれば、どちらも動くんだから、同じ力を加えたら加速度も同じになる。そしてこの加える力というのは課題1Aの地球が引く力で同じだと思う。

大川（他組）（イ）質量は加速度に影響しない。

イの意見は、大川の「質量は加速度に影響しない」に代表される。

布井の意見は課題1Aの討論で福岡が主張した(p.162)ことと共通した意見であり、「動かしはじめるとき質量の大きい物体もほんのわずかの力しかいらぬ」ということを、「加速しつづける」ときにもあてはめて、その結果質量には関係しないということを推論したものである。

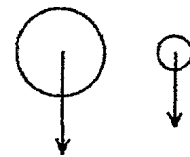
アとイの意見を見ると、課題1Aと課題1Bとでは、討論の主題が、重力の大きさから質量へと変わってきていることがわかる。課題1Bでの意見の対立点は一言で言えば「質量は加速度に影響するかどうか」ということであることが、生徒の意見からわかる。

2-1-4 討論によって完全な説得は出来ない

以上は課題1Bの予想の根拠をめぐる討論であり、まだ実験は行っていない。この課題1Bでの討論は、討論後のア、イ、を予想する人の数に変化をもたらさなかった。(p.164参照) このことは、どちらも、一定の事実とのつな

がりを持った意見であるためと思われる。つまりアの意見は日常生活でも、重い物は動かすにくいということが経験にあるため、ところが摩擦がないという条件は生徒は実際にはほとんど体験がなくそのため、イの意見のロープに10kg以上のおもりを吊下げて動かしたことも、無視できない事実と考えられるわけである。従って、この課題1Bの討論後、この課題1Bの先に生徒に提示した課題1Aについての予想の変更も次に見るように余りないわけである。

課題1A 75gと5gの鉄の球を地球が引く力の大小 ア
を矢印の長さで表せ。

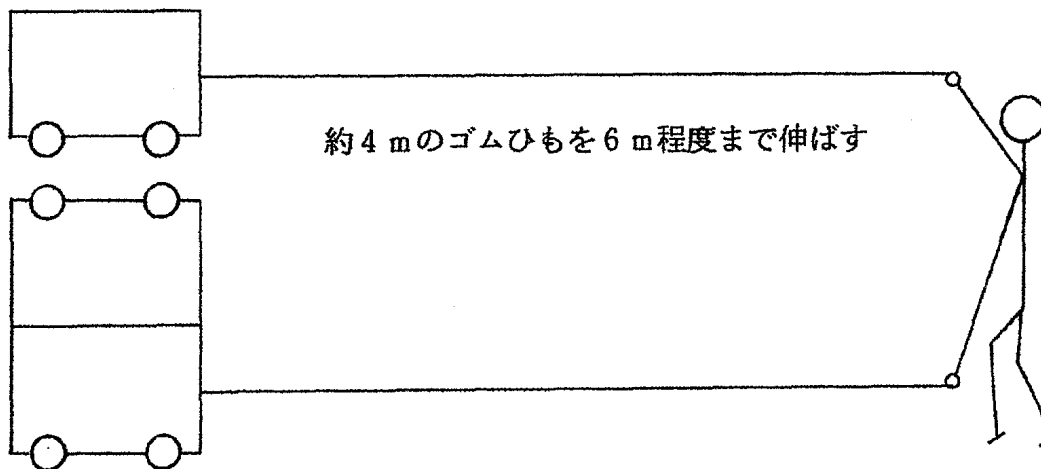


生徒の予想	a組	課題1Bの討論前	討論後	イ
ア	75gの方が大きい力でひかれる	8人	→ 10人	
イ	75gも5gも同じ力でひかれる	12人	→ 10人	
ウ	予想がたたない	4人	→ 4人	

予想は対立したまま、実験を行った。実験は次のようなものである。⁴⁾

実験

片方には台車1台、もう片方には台車2台重ねて、それぞれ同じ長さのゴムひもを伸びが同じになるよう引っぱり、同時に離した。



実験の結果は、明らかに、台車1台のほうが加速度が大きい。このことを生徒がどう受け止めたかをみてる。

野中 結果はMの方が加速度が大きかった。

Mと2Mを同時に落とした場合、同時につく。それは地球が2Mを2倍の力で引いているからである。つまり、Mと2Mを同じ速さにしたいときには、地球は2MをMの2倍の力で引かなければならない。つまり、地球がすべての物を一定の同じ力で引いていたら、同時に（同じ加速度で）落ちるということはない。よって、地球は重い物ほど大きい力で引いている。

中平 摩擦がなくても物体の重さが違くと加速度は質量が軽いと大きい。

高岡 加速度は質量に関係あるようだ。この実験は課題1Aと同じ条件だから課題1Aの答えも必然的にア（75gのほうが地球の引く力は大きい）。

この実験から、質量についてのとらえかたが明確になり、それと同時に重力（地球が物体を引く力）についても理解が深まっていることがわかる。

しかし、一方で、この実験についての疑問もだされている。

常磐 今の実験と前の課題との関係がわからない。

小西 摩擦は質量に関係するが、この場合、摩擦は無視できるのだから、質量は無視できるはずなのに（質量は加速に関係はせず、摩擦のみに関係し、摩擦が加速に関係していると考えている）、質量が関係したのはどうしてか。

討論の中でも課題1Bと課題1Aとの関係が何度も意見としてだされているが、しかし、常磐のようにその関係がつかめない生徒がまだ残っていることもこの段階での状況である。どうしてその関係がつかめないかということについては次の二つのことが考えられる。

1. 課題1A (p.161)で、75gの方が重力が大きいと予想をたてたが、その根拠として、重さが重力であるということなどをあげ、運動については、

考えていない。従って、アを予想したのが、同時落下の説明は自分ではまだ納得ゆく説明ができていない。課題1B(p.164)は運動・加速度・質量などを問題にしているため課題1Aとの関連がつかめない。

2. 質量と重力や摩擦力を混同したままのため、課題1Bで、小西のように、この実験の意味がつかないため、課題1Aとの関連がつかめない。

1. 2. とともに今後の課題や討論での焦点のしぼりかた、課題の順序などについて重要な示唆となっている。

またこの節で、生徒が討論により相手の考えをわかった上でかつ納得出来ず予想変更も出来ないという事実を見た。これは、教科書や教師が正答している生徒と同じ内容を説明しても、疑問をもっている生徒にしてみれば納得できないことを示している。授業の中で疑問がないように見えてもそれは、生徒が納得できているのではなく、分からないでいるか、あるいは納得できないけれども教師や教科書という権威に自分の力では批判できないでいるだけであることになる。

2-1-5 定量的理解以前の定性的問題

しかし、この課題1A・課題1Bの討論と実験を通じて、質量と力と加速度のきわめて初歩的な関係が問題になった。なぜ初歩的かといえば、ここでは、どういう関係があるかということではなく、関係があるかないかが問題になったからである。そして、地球が物体を引く力と質量の関係も多くの生徒にとってはこの課題1Aの学習以前に比べればかなり明瞭なものとなり少なくとも、重いものは(生徒によっては質量の大きいものは)動きにくいということや、力(重さ)と質量と加速度との間には関係があるということについては事実との関係もふくめて認めるざるをえない(納得したかどうかはまだ疑問の残る生徒もいる)ところまで来たといえる。

この後、台車2台の加速度を、台車1台と同じにするためには、2台の方に加える力を2倍にすればよく、また同じ質量の台車の片方を2倍の力で引

くと加速度も2倍になることを実験で確認し、その事実をもとに教師から
 物体に加える力 $F = \text{物体の質量 } m \times \text{物体の加速度 } a$
 という運動の第二法則の導出の説明があったが詳しいことは省略する。

2-2 重力と質量の区別

2-2-1 質量は加速度に影響するか(2)

質量と力についての初歩的な関係、つまり物体に一定の力を加えるとその質量が大きいほど加速度は小さくなることを学習した生徒は、形式的には質量を理解したかにもみえる。しかし、この段階で質量の意味を具体的にどう捉えているかを次の課題の生徒の応答から検討することにする。

教師はまずエアトラックに風を送ると、エアトラックの上にあいている穴から風が吹き出し、その上の物体が浮きエアトラックと物体の間の摩擦がなくなると物体はほぼ等速で動くということを説明し、そのうえで実際に風を送って物体がきわめてスムーズに動くことをみせ次の課題を提示した。

課題2

おもりMは下からの風で浮いている。おもりmの加速度は、mが自由落下するときの加速度に比べてどうなるか

生徒の予想 (82年度)	a組	c組
ア 同じ	12人	13人
イ 小さくなる	9人	6人
ウ 予想がたたない	3人	1人

この生徒の予想をみると、過半数の生徒が、おもりMがあってもなくても、おもりmは自由落下のときと「同じ運動をする」あるいは、「同じ加速度で運動する」と考えていることがわかる。この課題を実施した2クラスともに同様の傾向を示しているが、生徒がどのように考えてこう予想したかを、生徒の意見発表や討論から探ってみることにする。

ア (同じ) という意見

坂野 (ア) Mの方は、水平方向に力が働いていない。滑車の左側では (mに) 縦向きの力が働いているけど、それを滑車を使うことによって、横向きの力に変えている。今Mがもしmの加速度に関する (力を加える) とすれば水平方向の力だけど、Mは水平方向には力が働いていないから、mの運動は自由落下のときと同じになる。

清水 (ア) mにかかる力で重力以外に上に行く (引く) 力にはMが引く力しかないけど、Mは力を持たないでしょ。滑車と反対方向に行く (引く) 力が全く摩擦がないから、その反対方向に行く力が全くないということ、すなわちmにかかる上向きの力がないから、自由落下のときと同じ条件になる。

比護 (他組) (ア) この場合は摩擦力がなく、台車の実験のときは摩擦力が少しはあった。台車の場合だったら、Mとmとを合わせた (足し算した) ものが質量になるが、今回は摩擦がないから、質量Mは関係なくなるのだと思う。

堤林 (ア) $F = ma$ ってなっているんだけどMの重力は実は抗力で打ち消されてしまっているから、重さは関係なくなっている。

生徒の表現は未熟であるが、それを解釈すると、アの意見は、質量Mのおもりは、おもりと床との間に摩擦がなくなると、それを動かすのに力がいらぬ、また逆におもりは糸やmのおもりを引くような力を加えない (清水、坂野) ということを主張している。そのことから、摩擦がないとき質量Mの物体を横に動かすのに質量は関係なくなると考えている (比護)。どうして、Mの質量Mが関係なくなると考えているのかといえば、Mの重力が抗力で打

ち消されているからだという（堤林）。この堤林らの意見は、大変興味深いものである。なぜなら、この意見には重力が抗力で打ち消されれば、質量がなくなる、つまり質量を重力と同じに考えていることがうかがえるからである。この意見では、重力そのものが物体の運動に対する抵抗の働き、つまり物体の水平方向の速さを減少させる役割をしているということであり、それ故、重力が抗力などで打ち消されると、運動に対する抵抗も無くなると考えるわけである。

アの意見の中の、重力と質量を混同し、重力が運動に対する抵抗であるという考えが、どんな経験的事実をもとにしているか、その考えが力の学習の中でどう変化してきているかを次の章で検討することにし、ここでは、アの意見に対する、イ（ m の加速度は、 m が自由落下するときの加速度に比べて小さくなる）の意見と、その意見の他の生徒に対する影響を検討する。

イ（ m の加速度は、 m が自由落下するときに比べて小さくなる）の意見
 中崎（イ） $F = m a$ という式があって、 m に働く力（重力）は $F = m a$ の a に g を代入すると mg だけど、 mg という力（重力）で m の本体だけでなく M の方も引かなくてはならないから、ここでまた $F = m a$ を使うと加速度は質量が大きければ大きい程小さくなるということがわかる。

（質量は $M + m$ になる）

池永（イ） M は摩擦もないし、水平方向に関しては M には重力も働いてないから、台車を動かすときみたいになっていると思ったから。台車を動かすときに摩擦がなくても質量があって力があるから遅くなると思う。

五十里（イ）もし M の物体がなければ m のおもりはおもりにかかる重力による自由落下だけで落ちてくる。だけど M の物体に反対から引っぱられているから力は少なくとも減るわけでしょ。だから加速度も減る。

中崎は、物体を引いて動かす力は重力だけであるが、その重力によって動かされる質量は M と m であると考えている。池永は、先に学習した課題 1 B

の実験で、台車を動かすのに力が必要であり、力の大きさは台車の質量が大きければ大きいほど大きな力が必要であったことから、この場合もMを動かすのに力は必要であると考え。また、五十里の場合は、mのみに着目し、mには重力以外に上向きに引く力があること、その力はMが引く力であると考え。これらの考えは池永が主張する、台車を水平方向に動かす実験との共通性に着目したり、あるいはそこで確認した質量と力の関係に着目しているものと解釈することができる。

2-2-2 認識形成での中での討論と実験の役割

アとイの意見の対立点も討論の中で明確になった。堤林の重力は抗力で打ち消され重さは関係なくなる、という意見に対して次の意見がだされた。

中崎（イ） $F = ma$ のmは質量であって、Mが浮いているってことは（浮くと質量がなくなるという意見があったけれど）それは直接質量には関係ない。重力というのは、質量に比例して大きくなるけど、質量ってというのは物体がもっている重さだから、重力が打ち消されていても加速するには力があるから、mはやはり遅く（加速度が小さく）なる。

この中崎の意見には、重さと質量の表現上の混同がみられるが、重力が打ち消されても重さ（質量）が残っているから動かすのには力があると考えていることがわかる。しかし重さという表現ではあるがその意味するところはここで問題になっている質量と同じである。

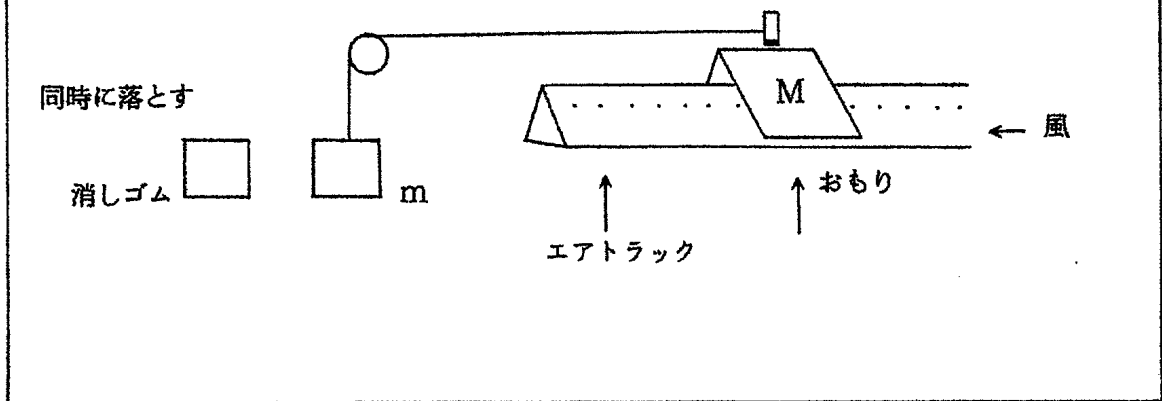
この討論での対立点が、重力が抗力で打ち消されても質量の影響が残り、加速するのに力が必要か否かにあることが明確になった。この討論での生徒の考えの変化を、討論前(p.170)と討論後の予想の変化により検討する。

(82年度)	a組		c組		合計44人中	
	討論前	討論後	討論前	討論後	討論前	討論後
生徒の予想						
ア 同じ	12人	3人	13人	7人	57%	23%
イ 小さい	9人	18人	6人	12人	34%	68%
ウ 予想がたたない	3人	3人	1人	1人	9%	9%

この予想の変化の特徴は、討論前はア（同じ）が多く、討論後はイ（小さい）というのが多くなることであり、討論により重力が抗力で打ち消されても、質量の影響が残り加速するのに力があると考えた生徒が多くなったことがうかがえる。このことは、討論の中で、イの意見が、すでに見た台車1台と2台を同じ長さのゴムひもで引く実験などの共通経験のある事実をもとに主張したことも関連があると考えられる。

実験

図のようにおもり m を滑車を通しておもり M につなぎ、 m の横に消しゴムを並べて同時におもりと消しゴムの手を離した。消しゴムはおもりに比べ大変速く落下した。



実験の結果は、明らかにおもり m の方が遅くなっている。

実験の考察

千葉（宴） m が M を動かすには力があるし、従って加速度は小さくなる。

千葉（智） $F = m a$ の式で、 F は mg で m は $(m + M)$ だから、

$$mg = (m + M) a$$

$$a = mg / (m + M)$$

大沼（他組）加わる力は両方とも mg だが、動かす質量は片方は m で、もう一つは $(m + M)$ である。力 = 質量 × 加速度 から、 $(m + M)$ の方が加速度 a は小さくなる。

小山（他組） $F = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]} \times m \text{ [kg]}$ （ m に働く重力）

$$\begin{aligned}
 a &= F \text{ [N]} / (m+M) \text{ [kg]} \text{ (} m+M \text{の加速度)} \\
 &= 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]} \times m \text{ [kg]} / (m+M) \text{ [kg]} \\
 &= 9.8m \text{ [m/s}^2\text{]} / (m+M)
 \end{aligned}$$

堀内（他組）力＝質量×加速度で加速度 a は g だから、 M がある場合には

$$a = mg / (m+M) \text{ となるが、} M \text{のない自由落下の場合には } a = mg / m = g \text{ となる。}$$

千葉（宴）や大沼の意見は M の質量がこの場合にも関係していることを認めた内容である。また、特徴的なのは千葉（智）、小山、堀内のように、質量の意味を了解し、式をたてて加速度を求める計算までできるようになってきた生徒がいることである。

この節での生徒の討論後の反応は、前節での生徒の反応と、討論により生徒の意見の変更がかなり見られた点で違いがあった。その二つの反応は、討論の役割や限界を示していると思われる。その第一は、両方の共通点である最終的に討論だけでは決着がつかないという問題である。これはどんな場合にもというわけではないが、多くの課題で見られる傾向である。とりわけ生徒の今までの生活経験や授業での事実により形成された理解と異なる理解を必要とする（例えばここでの課題1Bと課題2の二つの課題のような）場合、討論だけでは相手を説得できないことがむしろ当然なのである。しかし、討論はそれでは無意味なのかと言えそうではない。それまで生徒が漠然と考えていた、意識の上では顕在化していない理解を自分の言葉で明確にするとともに、自分の考えと異なる意見を聞くことにより、これから見る実験で何に着目して見るのかという実験を見る視点を明確にもつことが可能になるからである。

第二に、予想の外れた生徒にとってはもちろん、予想はあっても実験後は大変自己との葛藤の場となる。実験は、単純に予想については当たったかはずれたかが明確になるものの、考え方については語ってくれるわけではない。それゆえ、生徒はその一つの事実だけでなく、今までの経験や実験事

実を総合して考えることをせまられる。この課題2で、課題1Bの実験事実との共通性を見抜けるかどうかが生徒にとって理解が深まる契機であったことはこの討論からわかる。また、実験が単に予想や仮説の検証という役割だけでなく、生徒にとって新しい経験的事実となり、それが、自分の考えを深めてゆくきっかけになったといえる。この実験後、式をたてて加速度を求める計算まで行う生徒が増えていることもそれを示している。

第3章 質量概念の形成過程

3-1 概念形成における「経験とその反省」

生徒は法則の理解や概念の形成を白紙の状態から行うのではない。この質量概念に関しても、加速に対する抵抗という意味での質量は生徒にとってみれば初めてのものである。しかし、この概念を形成する上で生徒は、自分の経験を土台にした理解を、新たな経験とその反省を抜きにしては行うことが出来なかった。つまり、「摩擦がなくなると質量は関係なくなる」、「重力は抗力で打ち消されているから、重さ（質量）は関係なくなる」などの意見は、質量を摩擦や重力が原因であると経験から考えていることを示している。自分がこのような理解をもっているということを意識の上に顕在化し、その上で、新しい事実をみることにより、生徒の概念が変容したと言える。

3-2 摩擦・重力と質量の混同

この授業の記録の分析から質量と摩擦や重力との混同が、明らかになったが、これはこの授業の過程でのこの授業に固有な教え方に起因する問題なのか、それとももっと一般的な生徒の理解なのかが問題となる。そこで、この運動の第二法則の授業以前の生徒の発言などから、質量についての生徒の理解には一貫性のあることや、その変化の過程を探ることにする。

重力が運動の抵抗になるという摩擦や重力と質量との混同が授業の中でど

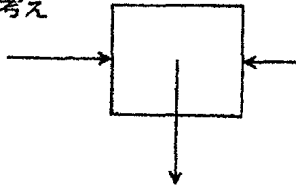
のような所で見出されたかを見ることにする。以下の課題や問題の上にある小見出しの後の§は著者の授業の単元(p.158~159)を示している。

3-2-1 運動の抵抗としての重さ(重力)

力とつりあい(静力学)の中で(§1)

問題 机の上に置かれた物体に左右から力を加えて押したところ、物体は右に動き始めた。この時物体に加わる左右の力を矢印で表せ。

生徒の考え



- ・ 右向きの力が物体の下向きの力(重力)と左向きの力を足したものよりも大きいので右に動く。

この生徒の考えは、摩擦が無視できるほど少ない場面でも、水平方向の運動に重力が影響を及ぼすという考えである。

摩擦力が関係する場合には事情はもっと複雑になる。重力と摩擦力が分離できないで混乱しているために、極めて多くの生徒が物体の動き始めるときの抵抗として重力を考えている。

摩擦力の学習の中で(§4)

課題 5.6kgwの物体を机の上で動き始めさせるには、水平方向にはどれだけの力が必要か。



生徒の予想(2年1組83年度)

討論前 討論後

ア 5.6kgwより大

31人→28人

イ 5.6kgw

1人→0人

ウ 5.6kgwより小

7人→9人

エ 予想がたたない

0人→2人

ア(5.6kgwより大)と予想した生徒の考えの中から

- 物体の重さが5.6kgwなので、5.6kgwの力を加えればつりあって静止するから、動かすには、それ以上の力がある。
- 物体を動かすには（重力+摩擦）より大きい力が必要。

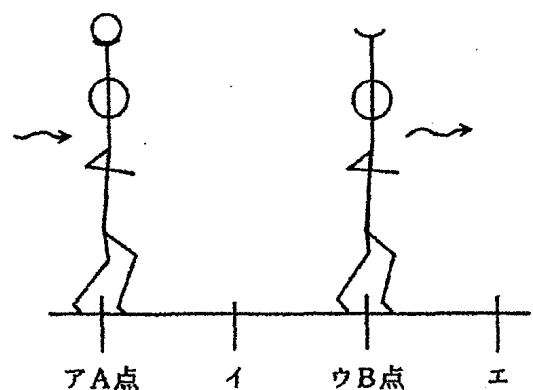
この課題でア（5.6kgwより大）を予想した生徒の多くが重力と同じ大きさの力では止まったままだと考えている。このことは、多くの生徒が、重い物は動きにくいという経験から、動きにくさの原因が重力にあると意識的にか無意識的にかは別として考えていることを示している。

もちろんこういった考えが事実と矛盾していることは、摩擦力の学習（§4）の中での実験（例えば、この課題での実験では、重力の約1/4の約1.5kgwで引くと物体は動き始める）で明らかにされ、摩擦力の学習の中では、生徒は物体の動かすにくさの原因が重力ではなく、重力に比例した摩擦力であることを（従って重力が関係ないのではなく、摩擦力の大きさに比例していることを）理解してきている。

しかし、この摩擦力の学習では、動き始めの問題に限られ、また摩擦がある場合に限って重力と摩擦との区別が理解されたのであって、一般的に重力が運動の抵抗にはならないという理解にはなっていないことが、次の慣性の法則の学習の中の課題についての生徒の考えから明らかになる。

慣性の法則の学習の中で（§5）

課題 等速で走っている人がA点でボールを手から離した。ボールが地面に落ちたとき人はB点にいた。ボールはどこに落ちたのでしょうか。（空気抵抗は無視できるものとする）



イ（AとBの間）に落ちるといふ生徒の理由

- ・ ボールを手から離すと、勢いは残っているが、重力による抵抗があるので、イに落ちるといふ。

討論前にイ（AとBの間）を予想した生徒は慣性の法則を学習した後であるのに40%前後いる。その中の、少なからぬ生徒がこのように考えていると思われる。つまり、水平方向の運動に対して、重力が抵抗になっているという考えである。この考えも、この課題の実験により事実と矛盾することが、生徒に明らかになっている。

以上の課題に対する生徒の考えは、それが直接質量概念だというものではないが、物体が運動するとき、その運動の妨げとなる原因として、摩擦も重力も区別していなかったということである。最初の段階では、それらはすべて重さと表現されていたことになる。これは、2-1-4での生徒の発言「摩擦力が無視できるということは、重力が無視できるということで、そうすると質量も無視できるはずだ。それなのに、質量が2倍の台車の方が遅くなったのはなぜなのか」(p.168)という考えと一致している。生徒にとってみれば、運動は等速度運動であっても加速度運動であって、どちらでも重力は抵抗の役割を果たすと考えていることがわかる。

生徒の日常の経験では、重力と摩擦（力）と質量は区別のつけにくい概念であったことがわかる。つまり重たい物は摩擦が大きく、摩擦が大きいため動かしにくい。だから、重たい物は動かしにくいという考えは多くの生徒に共通した考えではあるが、重たい物は動かしにくいということがわかっているからといって、ここで問題にしているような加速の抵抗としての質量概念が形成されているとはまだ言えないということになる。

3-2-2 一般的に見られる摩擦・重力と質量の混同

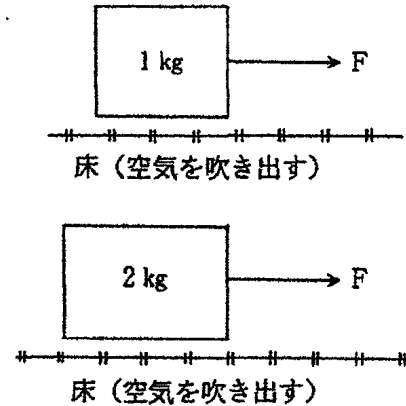
重力と摩擦と質量が混同していることは、著者の授業の中での生徒の発言を検討することで、明確になったが、さらに、著者の授業を受ける前の生徒

の理解を調査したので、それを検討する。

— プレテストの問題から '83.4.実施238人

問題 小さな穴から空気を吹き出し物体を浮かせる装置がある（床との摩擦がない）この装置の上にある1 kgの物体と2 kgの物体を同じ力Fで引き続けた。一定時間後の物体の速さは

- | | | |
|---|--------------|-----|
| a | 1 kgの物体の方が速い | 53% |
| b | 2 kgの物体の方が速い | 15% |
| c | どちらも同じ | 30% |



このプレテストの結果を見ると、日常生活では重たい物が動きにくいという経験があるにもかかわらず、c（どちらも同じ）という考えが多いことがわかる。このことは、多くの生徒が摩擦がなくなると、それと同時に重力や質量の運動に対する影響もなくなるということを裏付けているといえる。あるいはこれを言い換えれば、「摩擦がなくなるほど、水平方向に動かす（加速・等速ともに）力はどんどん小さくなる」と考えているとも言える。

以上の分析は、いわゆる慣性質量という概念も、重さと生徒が言葉で表現する中に萌芽的に存在するということを示している。その萌芽的な概念は、重さ・重力・摩擦・質量などの混在したものであり、生徒にとって普段日常生活においては意識的に区別する必要のないものである。しかし、こういった未分化な概念を用いて具体的な事例を生徒がどのように解釈し、現象を予測するかを分析することが、生徒の認識が変化してゆく条件を明確にする上で大変重要であることも、この授業分析からより一層明らかになったことである。今まで、教科書などに取り上げられていた、運動の第二法則の学習では、「力・質量・加速度」の定量的な関係を求める実験により $F = ma$ という式を定式化していた。しかし、実は生徒にとってみれば、質量が関係する

かどうかが第一の問題であることがこの分析からより裏付けられたのである。また、質量が関係するか否かをめぐる討論が、重力や摩擦と質量との概念を分離する必然性を生徒に明確にし、実験事実を見た後で、生徒にとって以前より明確な質量概念が形成されることが、この分析から裏付けられた。

第4章 理解の分析の反省と今後の課題

4-1 生徒の理解の研究の役割

著者にとって、生徒が質量を重力や摩擦と混同しているということは、生徒の発言を分析することによって初めて明らかになったことである。この研究以前にそれを指摘した研究は皆無ではないであろうが、日本の物理教育が100年を超える歴史を持ちながら、現実には生徒の理解の現状を把握しないまま、それ故生徒にとって納得のゆかない法則の形式を提示したり、あるいは生徒にとって本質的な問題を提示しないまま、形式を実験により「検証」する授業が主流になっていることは、この授業分析からも明確に読み取れることである。この分析は今後の授業の展開に有用な指針となると考える。

この授業分析を支えた授業そのものは、「予想」、「討論」、「実験」という骨組みで構成されている。この骨組みはすでに仮説実験授業や、あるいはその提唱者である板倉氏からも「仮説実験授業の前身ともいえる存在」⁵⁾とよばれている「理科ノート」方式⁶⁾(細谷純・永野重史・新田倫義の三氏により開発された)、あるいは玉田泰太郎氏らの授業方式としても著明である。著者はとりわけ仮説実験授業や玉田氏らの研究から、授業中での課題や実験、あるいは討論の果たす役割を多く学んだ。しかし、仮説実験授業では、「理科ノート」方式を「授業研究の手段」であったとし、また授業プラン作成が教師であるとする点を批判し、この方式を毎日の授業そのものの手段としてとらえ、⁷⁾またそれ故に、「それぞれの教師がとくべつに授業プランを作成したり、参考資料を準備しなくてもすむように」し、「数十クラスの授業の成果をもとに一応満足しうる『授業書』と授業プランを作成することによって、現場の教師が数少ない経験にもとづいて授業プランを作成するよりもずっと

すぐれた授業プラン」を提供することが目的であるとしている。⁸⁾

これに対し、著者の研究では、教師がクラスのその時々⁸⁾の状況を的確に判断しそれにもとづいて適切な対応をするために、「定まった授業プラン」ではなく、生徒の自然理解をどのように推測しうるかを示し得た点に特徴があるといえよう。生徒の理解そのものについては、この研究はまだ、端緒であり著者にとってもこれからの大きな課題である。また、この方法で推測しえた生徒の自然理解を参考に、どのような授業プランを作るかは、授業の条件（生徒・教材・学校環境その他）の異なる各教師の課題である。それだからこそ、いわゆる教育研究者のみでなく、すべての意欲的な教師が授業者であるとともに自分が教えている生徒の理解の研究をすすめることを可能にし、またそういった研究の協同作業化をはかってゆく上でこの研究で行ったような方法が広く役立つことを期待したい。

4-2 理解を測る問題の作成

ここでいう生徒の理解をはかるとは、第2章でみてきたような、生徒が具体的にどのように考えているか、またその考えがどのように変容していくかということ捉えることである。生徒の理解を測ることは、この研究で取り上げたものも含めて、さらに組織的にまた広汎な教材にもわたって集計することが望ましく、それは著者自身の課題であるとともに、これからの教育研究の中心的な課題であるともいえよう。そこで、問題にされなければならないのは、「理解をはかる問題の作成」である。テストする側の思いつきに従って大量のデータの集積を行ったとしても、その結果がどれだけの意味を持つかは保証の限りではないからである。例えば、著者の授業の中で行った生徒の予想の変化を挙手により調べる方法は、もしそれだけに頼るならば他の生徒の挙手に影響されたり、あるいは問題作成者の意図とは全くことなっただ点に生徒が着目して「質量Mと2Mの台車を同じ力で引くとき、どちらの方が加速度が大きいか」という問に対して、Mの方が大きいという生徒の反応が得られたとしても、それは必ずしも生徒の質量についての理解を示すも

のと解釈することは出来ない。第2章での生徒の発言のように「摩擦が小さい方が加速度は大きくなる」と考え、質量を問題にしていない場合もあるからである。問題にたいする生徒の予想やその変化の人数を調べるだけでは、生徒が具体的にどのように理解しているかの測定は困難である。

生徒の理解をはかる方法の最も基本的なことの一つは、生徒の具体的な発言やノートに筆記された意見を分析することである。そして、生徒の理解がかなり進んだと思われた段階で、授業中の意見分布を挙手により調べるならば、それらのデータは互いに助けあってきわめて有利に働くことになる。

この例として、第2章、3章で検討した重力と慣性質量を生徒が混同していることとその混同を生徒が意識的に区別し、質量の概念を形成してゆく過程の分析がある。この場合、研究としての端緒は、授業中での生徒の「(一般に)摩擦は質量(重力)に関係するが、この場合は摩擦が無視できるのだから、質量は無視できるはずなのに、質量が(加速度)に関係したのはどうしてか」という発言(2-1-4)の分析であった。もし生徒が質量と重力や摩擦を混同しているならば、他の場面でもそういった発言があるはずであり、それを第3章で「力とつりあい」、「摩擦力」、「慣性の法則」などの学習中での生徒の発言で裏付けることが出来た。また、この生徒の考えの混乱が生徒自身にとって問題になるような「課題2」(第2章)を提示することで、生徒の考えをより具体的に捉えることが出来た。また「課題2」の討論や実験を通じて生徒がどのように自分の考えを変化させる可能性があるかも見通しを持つことが出来るようになった。

この場合を例にとれば、「課題2」は一つの重要な「理解をはかる問題」であったが、この問題を作成する上で、それ以前の授業での生徒の発言を分析することが大変役立っている。摩擦を無くした場合に、生徒が運動をどのように考えるかを調べることのできる「問題」を作成することに焦点をしばれたからである。この分析に基づいてさらにふさわしい「理解をはかる問題の作成」を行うことが次の研究課題となる。もちろん生徒の発言の分析は一つの手掛りでしかなく、それをもとに演繹的に優れた問題を作れるわけでは

なく、まさに試行錯誤の過程を経るしかない。

このように、「理解をはかる問題の作成」は作成者の直観に依存した試行錯誤を行わねばできないのではあるが、それにもかかわらず、今後力学のみでなく、他の教材にも広げて生徒の理解をはかる上ではきわめて有効な方法であるこの確信をこのような研究によって深めることができると考える。

謝辞

この研究を進める上で、研究の視点・方法を含め、全般にわたって有益な指導・助言を頂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る。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——慣性の法則を例として——」国際基督教大学学報 I - A 教育研究27」国際基督教大学教育研究所 1975, pp.183~209
- 2) 越後幸男, 梅川正誠「生徒の実態調査『物理診断テスト』(力と運動) I」物理教育 Vol. 17. No.3. 1969, p.52
- 3) 滝川前掲論文pp.191~194
- 4) 京都理科サークル編著『物理教育入門』新生出版1979, p.12に愛知の理科サークルで行われていると紹介されている。
- 5) 板倉聖宣『科学と仮説』季節社1971, p.256
- 6) 細谷純・永野重史・新田倫義・谷萩武男「ばねとゴムを利用した力の概念の形成」,『学習心理』小学館1963, 1月号・2月号
- 7) 板倉前掲書p.257
- 8) 板倉聖宣『科学と方法』季節社1969, pp.219~253

**THE PROCESS OF
UNDERSTANDING NATURAL SCIENCE
AS SEEN IN CLASS ACTIVITIES**
— Learning Process of the Second Law of Motion
and the Concept of Mass as a Case Study —

Yoji Takikawa

According to the conventional Physics education method, students were introduced to the Second Law of Motion by deriving the formula F (force) = m (mass) \times a (acceleration) from an experiment designed to obtain the quantitative relationship among force, mass, and acceleration when an object is accelerated. Through this research, we have discovered that it is significant that prior to the understanding of to what extent mass is related to the acceleration of an object, the very understanding whether mass is related at all to the same must be grasped by the students.

1. Analysis of students' responses in the sessions concerning the Second Law of motion clarified the following facts about their understanding of mass:

They think that in absence of friction, they do not have to consider the mass when an object of mass M moves. One of their reasons for this is that the gravitational pull exerted on M is balanced off by the reaction from the table on which the object lies. This opinion is very interesting because it shows that they believe that mass disappears when the gravitational pull is cancelled by reaction — that mass is identical with gravitational pull. Some other students give a second reason: an object moves easily if there is no friction, therefore difference in mass does not affect acceleration. These students think that mass and friction are the same. The concept unconsciously formed through everyday experiences such

as heavy things are difficult to move tends to be a confused idea encompassing mass, friction, and gravitational pull and is often expressed as "weight".

2. Through analysis of the students' understanding before learning the Second Law of Motion and even before taking the Physics course, we have found out that this concept was indeed at a very unrefined stage.

1) They believe that it requires a force greater than gravitational pull in order to move a stationary object horizontally, even in absence of friction.

2) They also believe that the horizontal vector of the velocity of an object that is propelled horizontally is constant if there is no gravitational pull but will become smaller if there is.

These ideas show that they think that mass acts as a resistance not only to acceleration but also to motion.

3. We have found out that at a stage where the concept of mass is not sufficiently formed, the concept of force is also not clearly grasped. This may be seen in their view that "since objects of various mass reach the ground at the same time when dropped, the gravitational pull of the earth is unaffected by their mass." There is a considerable gap between the students' understanding founded on their everyday experiences and the Physics' concept of force as in $F = ma$.