

力と運動の素朴概念を転換する IT 活用法の有効性

The Effectiveness of IT-based Teaching in Conceptual Development of Force and Motion

小林 昭三 (教育人間科学部理学科教育教室)

笠原 健 (教育学研究科修士課程)

村田 章知 (教育学研究科修士課程)

ITセンサーやデジタル器機を科学実験にリアルタイムで運動させることによって、これまでわかり易く教える点で困難が多かった「力と運動」などの教育分野を、“わかり易い”はもちろん“感動的な”授業として展開する道を開きつつある。具体的には、力センサーによって、衝突などにおいて働き合う力を「予測」させ「検証」する「運動の第三法則」の授業。動画カメラと運動分析ソフトによって、『位置』『速度』『加速度』などを視覚化して、運動法則をほぼリアルタイムで分析する授業や、距離センサーによって、運動する物体の『位置』『速度』『加速度』を視覚化して、運動法則をリアルタイムで分析する授業、などを行った。また、その授業の有効性について検証するために、授業に先立って事前テストを行い、授業年度の最後の時期にも事後テストを行った。その結果「こうした授業法は従来のものに比べてかなり有効である」ことが実証できたので、その詳細を報告する。

1 はじめに

実体験を重視する理科教育分野においては、バーチャルな世界に偏らないで、実験や観測を実際に行い、それをパソコンや液晶プロジェクター画面でリアルタイムに表示(視覚化)して、その詳細を自由に分析・解析できるようにITの新たな活用法が望まれている。その方向で特に注目されるのは、科学実験に運動させてITセンサーや運動分析ソフトやデジタル器機を使用して、その実験や観測をほぼリアルタイムで分析・解析する手法である。

これまでは、運動の詳細をつかむような観測や分析が困難であったために、この分野の授業の達成度が思わしくなないように思われる。それは、自由落下運動のようなものは目にもとまらないほど高速な運動であるために体験的な理解と詳しい分析が困難なため、豊富な実験体験を蓄積できなかったためと思われる。しかも、記録タイマーのような機器を使った授業では、カードの切り貼りというような煩雑な作業によって授業の本質を見失いがちであり、最も大切な「力学概念の形成・理解」が妨げられかねないのである。

しかし、現在では、たとえ高速運動の場合でもそれをデジタルカメラなどによって動画として記録し、それを即座にコンピュータに取り込んで、必要なだけゆっくりとしたスピードで繰り返し観察することができる。さらに運動分析ソフトの開発によって、運動法則の諸要素(位置や速度や加速度など)を手軽に分析・解析することが可能である。

また、距離センサーや力センサー、等を使えば、物理実験の詳細をリアルタイムで表示・分析・解析することができ、実験解析結果についての事前予測を即座に検証するような新しい魅力的な力学教育が可能である。

これによって、これまでわかり易く教える点で困難が多かった「力と運動」などの教育分野を、“わかり易く”はもちろん“感動的な”授業として展開できる見通しが得られるのである。

以下ではITセンサーやデジタル器機を科学実験にリアルタイムで運動させた次のような具体的な内容を紹介する。

力センサーによって、衝突などにおいて働き合う力を「予測」させ「検証」する「運動の第三法則」の授業

動画カメラと運動分析ソフト(VideoPoint)によって、『位置』『速度』『加速度』などを視覚化して、運動の第1法則や第2法則をリアルタイムで分析する授業や、距離センサーによって、運動する物体の『位置』『速度』『加速度』を視覚化して、運動の第1法則や第2法則をリアルタイムに分析する授業。

さらに、このような授業の有効性についての調査(事前テスト、事後テスト)をしたのでその分析結果を報告する。

従来までは「ITはバーチャルな世界や巨視的又は微視的な世界のシミュレーション等で有効に活用する」として、「とかく現実世界よりバーチャルな世界に偏重しがちな」実態があった。しかし、このような実体験を重視したIT活用法(実験による検証をリアルタイムで意識的に視覚化するIT活用)によって、従来は観測が困難だった分野でも、より感動的なものとして繰り返し認識することができ、実体験を伴う魅力的な科学教育に転換できるものと思われる。

2 運動分析ソフトと IT センサー

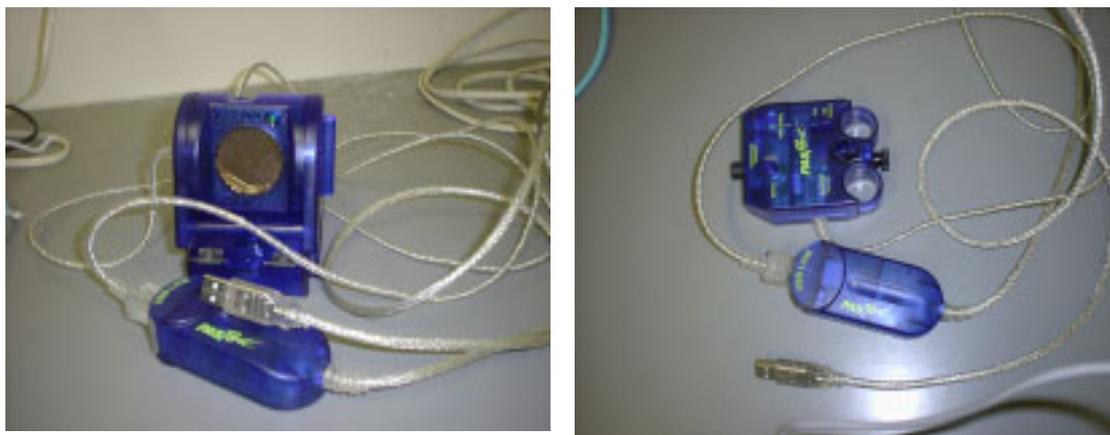
最初に Video-Point という動画解析ソフトを紹介しよう[1]。このソフトは、デジタルカメラで撮影した動画を、コマ送りしながらマウスでクリックして着目する物体の位置座標を取得するという、手軽で便利なものである。その取得した座標の時間的な変化を解析することによって、運動体の「位置」「速度」「加速度」などの時間変化を即座に（準リアルタイムに）グラフ化できる。デジタルカメラと動画解析ソフトを用いることによって、従来までは分析が困難だったような様々な運動—例えば、ドライアイス、ボールの自由落下・投げ上げ、羽根やシャボン玉の落下など—の分析が可能になる。Video-Point 使い方の詳細は、次の URL に、ウェブページとして示してあるので、これを参照されたい。<http://rika.ed.niigata-u.ac.jp/vidpoint/web/index.html>。

従来は記録タイマーによる速度や加速度の分析が主だったので、これでは、上記のような多様な運動や、往復するような運動、2次元的な運動等を扱うことは出来なかった。この制約から解放されるに留まらず、デジタル機器や情報技術のめざましい発展を教育分野に取り込み活用すれば、「運動現象の視覚的で効果的な表示法」においていっそう急速な進展が今後期待できるだろう。

次に、実験をリアルタイムに分析・解析する方法としては、IT センサー（距離センサーや力センサーのような各種センサーをパソコンに直結してグラフ表示する）による方法がある。

ここで、距離センサーとは超音波によって反射物体までの距離を測り、測定データをパソコンに記憶して位置、速度や加速度などのグラフを作成して自動的に液晶画面に提示するものである[2]。「力センサー」とは、力の大きさを計測してパソコンに記憶する装置である。その際、DataStudio というソフトを使えば、位置、速度、加速度、力などの時間変化を、同時に関連づけて液晶画面に提示できる[2]。

下の写真は、左が距離センサーで右が力センサーである。USB 端子でその測定データをパソコンに入力して、DataStudio というソフトでその値をリアルタイムで分析・表示する。



以下では、こうした運動分析ソフトや IT センサー、デジタル機器、等をリアルタイムで実験を視覚化するためにフルに活用して行うような、より効果的な授業法を開発研究してきたのでその成果を具体的に報告しよう。

3 「作用反作用の法則」を力センサーでリアルタイムに体験させる授業とその効果

力センサーを利用すれば、作用反作用の法則を視覚的に体験できる。そこで、その実験の具体例を挙げてみる。

●大型トラックと軽自動車の衝突実験

大型トラックと軽自動車の衝突させた場合、それぞれに働きあう力はどちらが大きいかを考えさせる。

まず、次の図のように、止まっている軽自動車に大型トラックを衝突させる実験を実演してみせる。

それぞれの力学台車には、しっかりと力センサーが固定されている。そのセンサーに手で力を加えると、液晶プロジェクターに力の時間的な変化を示すグラフがリアルタイムで表示される。上向きはトラックが受けた力、下向きは軽自動車受けた力だよ、と手でセンサーを押して押す力（センサーが受ける力）を実演してみせる。

その後、次のような問題を出して、その結果を学生に予測させる。その後、力センサーによって実際に検証するという流れで授業を行った。

学生には次のような問題[5]を出し、A から X までの選択肢の中から答えを選ばせる。

自動車とトラックの衝突を考えます。トラックは自動車より重いものとします。

走っている重たいトラックが、止まっている自動車に衝突した場合に、トラックと自動車の間に働く力について、最も適当と思われるものを、下記のA-F及びXの中から1つだけ選んでください。

A トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力よりも大きい。

B トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力よりも小さい。

C トラックと自動車は、互いに力を及ぼさない。ただ単に、自動車が粉砕される。

D トラックは自動車に力を及ぼすが、自動車はトラックに力を及ぼさない。

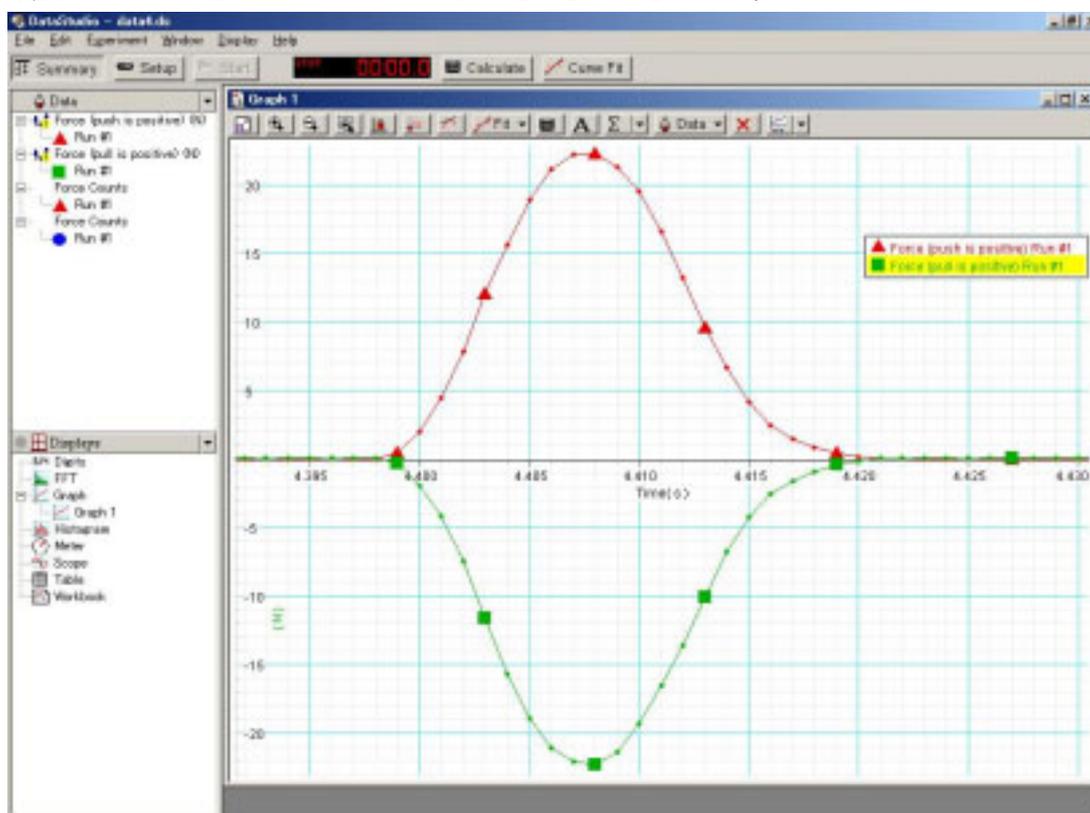
E トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力と同じである。

F 問題文だけでは、力の大きさはわからない。

X 上記以外。

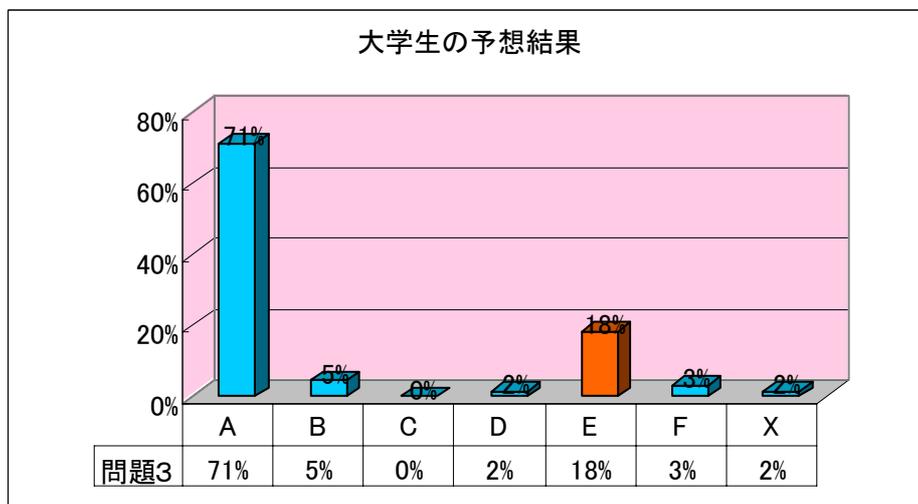


その後、2つの力センサーを使ってその予測を検証するという授業を行った。それぞれが受ける力（作用力と反作用力）をリアルタイムで検証した力センサーによる測定結果を下図に示す。ここでは、トラックが及ぼす右向きの力が正（上部の曲線）、軽自動車の左向きの力は負（下部の曲線）に表示されるが、相互に及ぼしあう撃力は千分の1秒単位まで相等しい（上下に対称なグラフである）ことが見事に示されている。



学生の予想結果をグラフ化したものが下のグラフである。

71%が「A、トラックの方が大きな力を及ぼすだろう」と考え、正解「E、両者は相等しい」は18%だけだった。



そして、大方の予想を超えた力センサーの示した「驚くべき測定結果」に感動したのである。

この実験授業後に、授業の感想を学生に求めたところ、次のような反応が得られた。

- ・トラックの力の方が強い

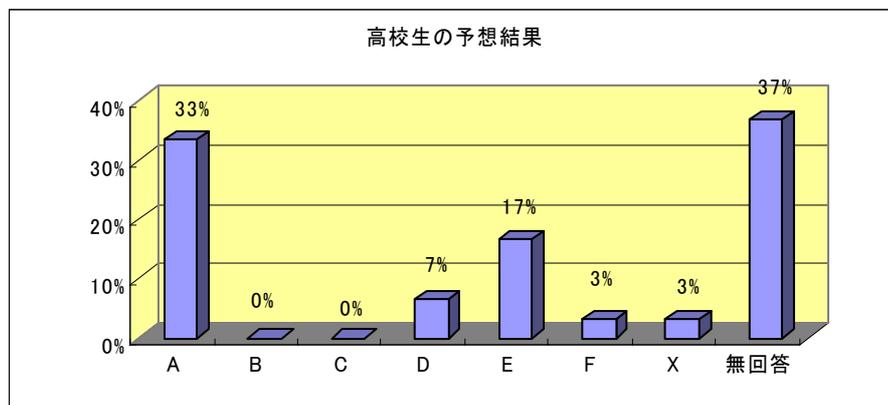
と思っていたのに、実際コンピュータを使って明確な結果を見て驚きました。どんな状況でも作用と反作用はいつも同じ大きさになるのですね。

・言葉だけでは、作用反作用を理解しようとしても想像しにくいですが、パソコンで目に見えるような形で示すと、すんなりと頭に入ってくるしわかりやすい。本当に上下が対称的になったグラフで驚いた。

- ・ 1000分の1秒の単位で作用と反作用の力が等しいとは思ってもおらず驚きました。今までは力を及ぼしてからその後にその反作用が働くものかと思っていました。物理の一部分の核心に触れたような気がする。
- ・ こうした学生の反応からも、情報技術を活用した実験がどのような感動を伴ったものであったか、具体的な実体験としていかに印象深いものであったか、などがよく分かる。

高校生1年生に実施した授業でも、全く同じような予想だった。

この場合は、33%が「A、トラックの方が大きな力を及ぼすだろう」と考え、質量が大きい物体、速度の大きい物体が大きな力を出すと考えた。正解の「E、両者は相等しい」は17%だけだった。



2002年の後期の理科教育関連の授業においては、上のような授業時の大学生にたいしては事前テスト (Pre-Test) と事後テスト (Post-Test) を行うことができた。実際に行った両テストの内容は以下のようなものである[4][5]。

問題3

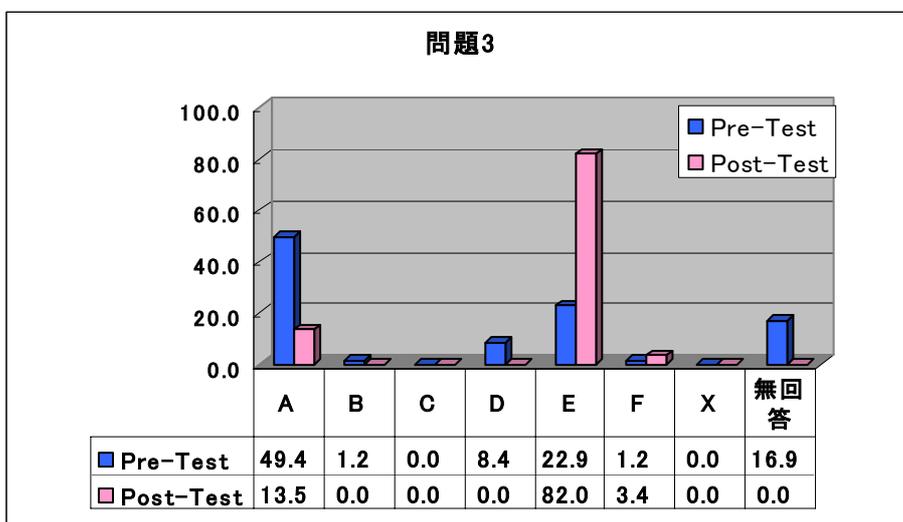
自動車とトラックの衝突を考えます。トラックは自動車より重いものとします。走っている重たいトラックが、止まっている自動車に衝突した場合に、トラックと自動車の間に働く力について、最も適当と思われるものを、下記のA-F及びXの中から1つだけ選んでください。

- A トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力よりも大きい。
- B トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力よりも小さい。

- C トラックと自動車は、互いに力を及ぼさない。ただ単に、自動車が粉碎される。
- D トラックは自動車に力を及ぼすが、自動車はトラックに力を及ぼさない。
- E トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力と同じである。
- F 問題文だけでは、力の大きさはわからない。
- X 上記以外。

Pre-Test では、誤答である A を選んだ学生が 49.4% と約半数近くを占めており、正解である E を選んだ学生は 22.9% であった。また、D を選んだ学生は 8.4% であった。

他方では、授業後しばらく間をおいて学年末に Post-Test を行った。



その結果では、正解である E を選んだ学生は 82.0% で正答率は 59% も大幅に上昇した。これは、力センサーによる授業が感動的な深い理解をもたらし、その効果がいかに大きかったかを如実に示した結果と解釈できよう。

Pre-Test で、A を選んだ学生が多かった理由は、走っている重たいトラックが止まっている自動車に衝突することから、質量の大きいトラックのほうが、より大きな力を及ぼすと考えたためであろう。また自動車が止まっているということから、D を選んだ学生もいたのではないかと考えられる。

同様な問題ではあるが、トラックが止まっている場合や互いに等速で衝突する場合というように、衝突するときの条件を変更させた場合にどう考えるかを質問したケースについても、Pre-Test と Post-Test を実施した。

問題4

自動車とトラックの衝突を考えます。トラックは自動車よりも重いものとします。走っている自動車が、止まっている重たいトラックに衝突した場合に、トラックと自動車の間に働く力について、最も適当と思われるものを、下記の A-F 及び X の中から 1 つだけ選んでください。

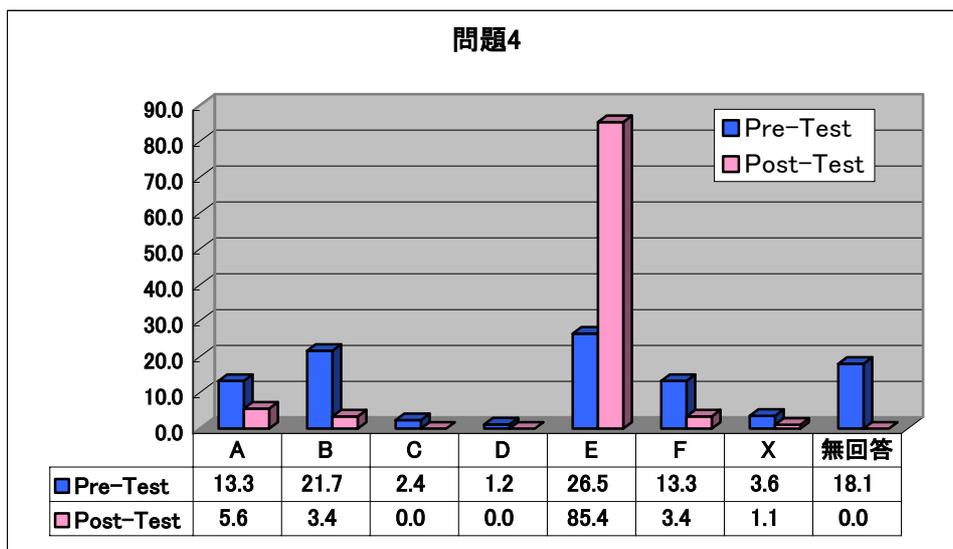
- A トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力よりも大きい。
- B トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力よりも小さい。
- C トラックと自動車は、互いに力を及ぼさない。ただ単に、自動車が粉碎される。
- D トラックは自動車に力を及ぼすが、自動車はトラックに力を及ぼさない。
- E トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力と同じである。
- F 問題文だけでは、力の大きさはわからない。
- X 上記以外。

次の図はに、この問題に対する Pre-Test と Post-Test の結果を対比した棒グラフである。

Pre-Test では、A を選んだ学生が 13.3%、B を選んだ学生が 21.7%、F を選んだ学生が 13.3% であり、正解の E を選んだ学生は 26.5% であった。この問題は、問題 3 とは逆に、トラックが止まっていることから自動車のほうが大きい力を及ぼすと考えたり、大体同じくらいかなと考えたり、具体的な速度や質量が出ていないために問題文だけではわからないと考えたりと 回答の割合がさまざまに分かれた状況を反映しているものと思われる。

一方 Post-Test では、正解である E を選んだ学生は 85.4% に達し、正答率は 49% も上昇した。従って、この場合でも力センサーによる授業の効果は著しかった。作用・反作用の法則をみづから検証した実験をもとに学んだことで、

この力学法則の本質をしっかりと身に付けることができたものである。

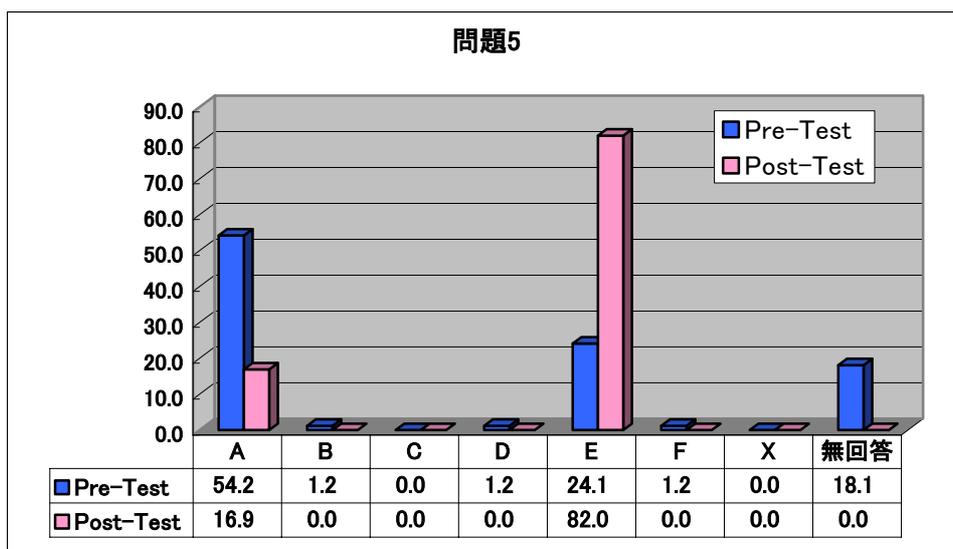


問題5

自動車とトラックの衝突を考えます。トラックは自動車よりも重いものとします。ほぼ同じ速さで互いに近づく「自動車」と「重たいトラック」が衝突した場合に、トラックと自動車の間に働く力について、最も適切と思われるものを、下記のA-F及びXの中から1つだけ選んでください。

- A トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力よりも大きい。
- B トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力よりも小さい。
- C トラックと自動車は、互いに力を及ぼさない。ただ単に、自動車が粉砕される。
- D トラックは自動車に力を及ぼすが、自動車はトラックに力を及ぼさない。
- E トラックが自動車に及ぼす力は、自動車がトラックに及ぼす力と同じである。
- F 問題文だけでは、力の大きさはわからない。
- X 上記以外。

この問題に対する、Pre-Test と Post-Test の結果を棒グラフで対比して示したものが次の図である。



Pre-Test では、Aを選んだ学生が54.2%と半数近くを占め、正解であるEを選んだ学生は24.1%であった。この問題はトラックと自動車の同じ速さでの正面衝突ということであるので「重いトラック」の方が大きな力を及ぼすと考えたものではないかと考えられる。

一方 Post-Test では、正解である E を選んだ学生は 24.1% から 82.0% へと、58% も著しく上昇したことは注目に値しよう。以上のように力センサーを活用した作用反作用の授業は正答率を 50% から 60% も上昇させ、80% 台に定着させた。

●磁石と鉄との作用反作用

授業の計画段階では、右図のような磁石と鉄はどのように力を及ぼし合うか（相手からどのような力を受けるか）について、学生に次のような設問によって回答させる。その後、実際にどうなるかを実験的に検証する。特に、力センサーを利用した実験で、予想を詳細に検証させる。また、同様なことを磁石と磁石の場合も行う。という流れで授業を組み立てていたが、時間の関係でこの場面の実施は本年度の理科教育関連の授業では省略した。



【問】よく転がる丸い鉛筆を並べた上で、磁石と鉄を置いた場合に働き合う力は次の場合のどれか？

- (1) 鉄は磁石の方に動かされ、磁石は動かされない。
- (2) 磁石は鉄の方に動かされ鉄は磁石の方に動かされる。
- (3) 鉄も磁石も動かされない。

上図のような実験でその検証を行った。

以上のことから、磁石は鉄を引き寄せ、鉄も磁石を引き寄せることがわかる。さらにどんな間隔でも、等しい力が働き合っていることを定量的に確かめるために、磁石と鉄に糸をつけて、少し引き離れた時にはたらし合う 2 力を「力センサー」を使って測定する。そのような結果として「作用と反作用は逆向きで等しい」ことを定量的に検証する。

このような作用反作用の検証授業に引き続いて、男子学生と女子学生に、次の問題 1 [4] における太郎と花子を演じてもらって、センサーをそれぞれが持って引っ張り合いをし、それぞれに働く力を予測し、それを検証する授業を行った。

問題 1

太郎君と花子さんが手を握り合って、引っ張り合い競争をしたところ、花子さんは太郎君の方に動かされた。この動くときの、太郎君の手が花子さんを引く力と花子さんの手が太郎君を引く力を比べると次のいずれか。

- イ) 太郎君の手が花子さんを引く力の方が大きい。
- ロ) 花子さんの手が太郎君を引く力の方が大きい。
- ハ) 太郎君の手が引く力と花子さんのそれとは等しい。
- 二) その他

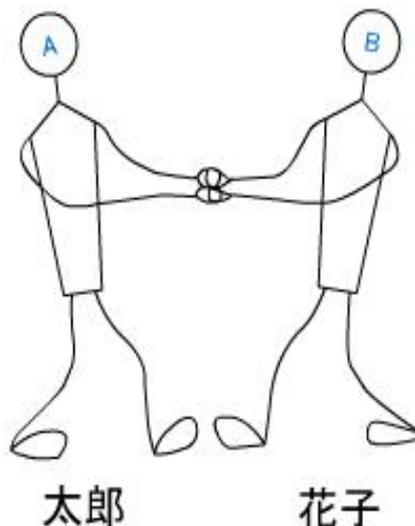
その理由は：

次のページの図(問題 1)は、この問題に対する、Pre-Test と Post-Test の結果を対比した棒グラフである。

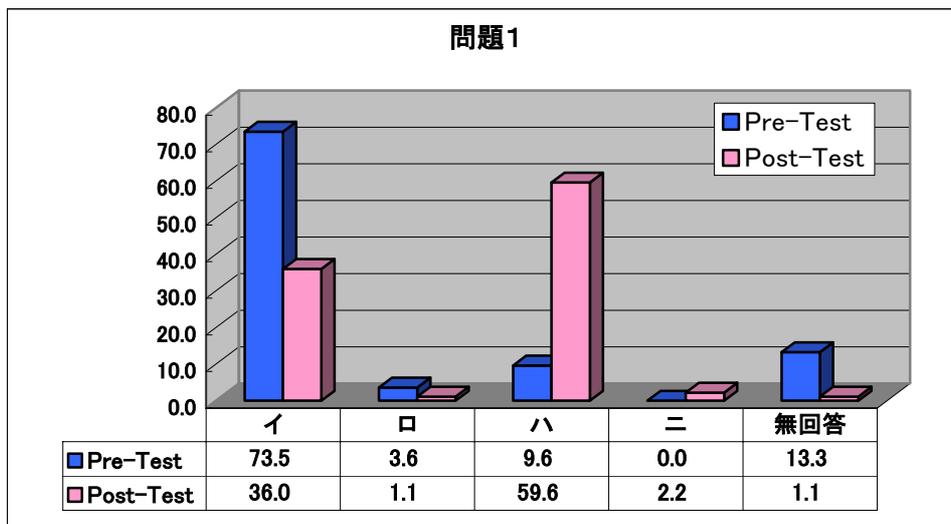
Pre-Test では、誤答であるイを選んだ学生が 73.5% と半数以上を占めた。そして、正解であるハを選んだ学生は、わずか 9.6% であった。

このように、問題でイを選んだ学生が多かったのは、花子さんが太郎君の方に動かされたことから、太郎君の手が花子さんを引く力のほうが大きいと考えてしまったためであろうと思われる。実際に力センサーでそれらが等しいことを確認することで、それは誤りであることや、作用と反作用の法則の意義を感動的に実感できたようである。

一方 Post-Test では、誤答であるイを選んだ学生は 36.0% と大幅に減少し、正解であるハを選んだ学生は 59.6% にまで上昇した。前述のトラックの場合に比較して、少し正答率が低いのは、実際の授業では時間の関係で、予想をちゃんと立てさせて討論させるという「予想と検証のプロセスを大幅に省略した」ためであろうと思われる。また、力セ



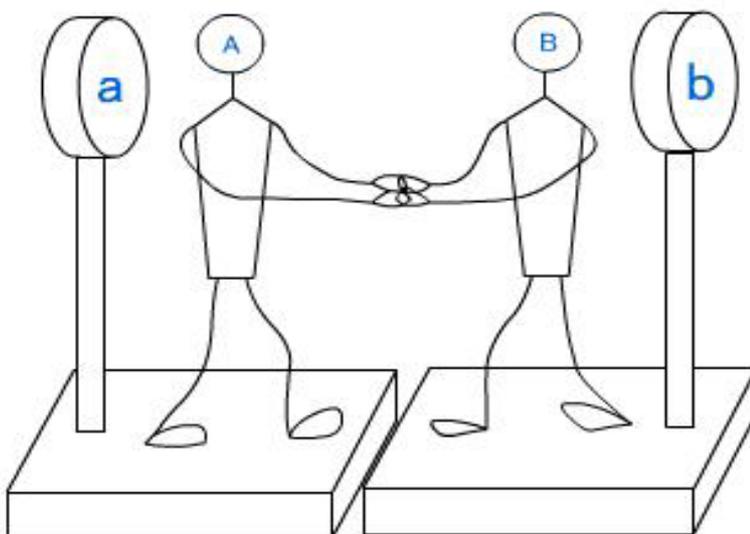
センサーが耐えられる力の限度が小さいために(最大値 50N)、椅子に腰をかけて手加減して引っ張り合いをさせたために、その印象が多少は薄くなった可能性もある。



次に示す、問題2の、1)、2)、3) は[4]、「授業では『予想を実験で検証する』授業は実施しなかったが、作用と反作用に関連する問題での Pre-Test と Post-Test は行った」というケースである。これによって、授業で実際に体験したか否かで達成率の向上はどの程度の相違をもたらすか、を判断する場合のたまかな目安が得られよう。

問題2

A君とB君は、それぞれ台ばかりの上に、図に示すように乗って体重を測っていた。その際、次のようなことをすると、はかり a の示す値と、はかり b の示す値、および、a の示す値と b の示す値の和は、何もしない時に比べてどうなるかを、それぞれの場合について答えよ。



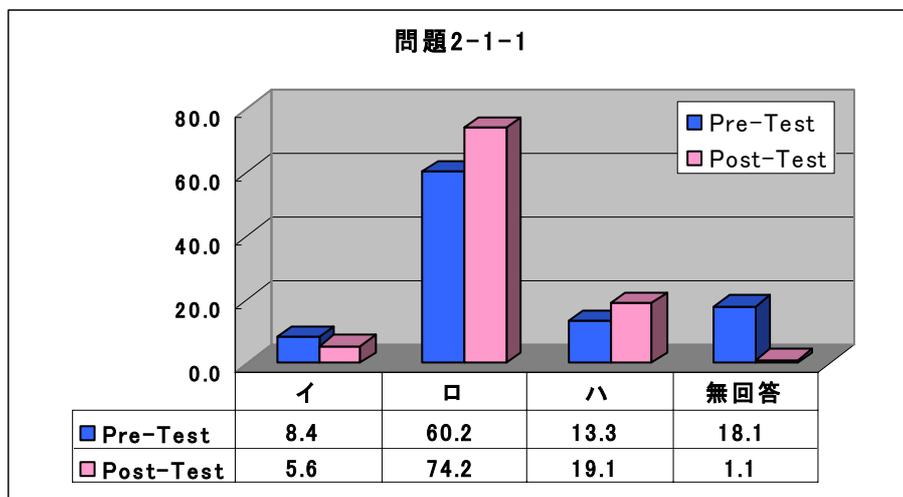
- 1) A君がB君の肩を下に手で押し下げようように力を加えた時。
- はかり a の示す値は イ) 大になる、ロ) 小になる、ハ) 変化しない
- はかり b の示す値は イ) 大になる、ロ) 小になる、ハ) 変化しない
- a の示す値と b の示す値の和は イ) 大になる、ロ) 小になる、ハ) 変化しない

理由：

次の図（問題2-1-1）は、**はかり a の示す値はどうか**という問に対する、Pre-Test と Post-Test の結果を棒グラフで対比して示したものである。

Pre-Test では、ハを選んだ学生は 13.3%、正解のロを選んだ学生は 60.2%と半数以上を占めた。

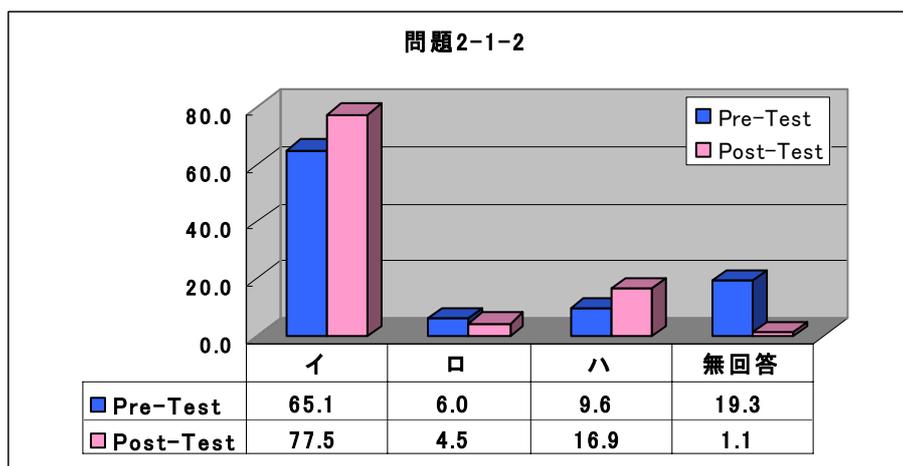
Post-Test では、ハを選んだ学生は 19.1%、正解のロを選んだ学生の割合は 74.2%と比較的高い数値を示した。14%だけ正答率は増加した。



はかり b の示す値はに対する回答は右図に示す。

Pre-Test では、正解のイを選んだ学生は 65.1%と半数以上を占めた。

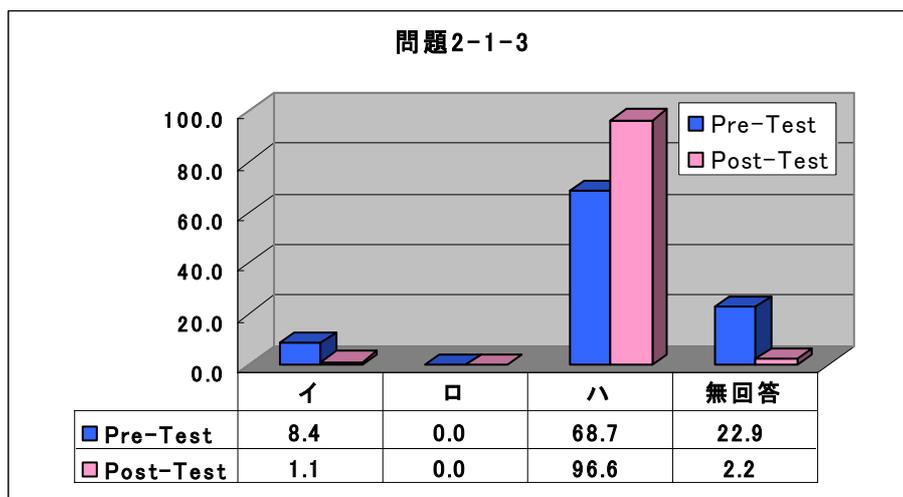
Post-Test では、ハを選んだ学生は 16.9%、正解のイを選んだ学生は 77.5%と比較的高い数値を示した。12%だけ正答率が増加した。



はかり a, b の和の値についての回答を右図に示そう。

Pre-Test では、正解のハを選んだ学生は 68.7%と半数以上を占めた。

Post-Test における正答率は 28%も上昇し 96.6%という高い数値を示した。



以上のように、この場合の Post-Test では 10%から 20%程度で正答率が上昇している。これは、「予想を検証する実体験をする授業は行わなかったケースであるため、実際に行った場合よりも正答率の上昇は小幅に留まった」とい

うように解釈できよう。その解釈が同様に成立するかは、次のPre-Test と Post-Test の結果で明らかになるだろう。

2) B君がA君の両腕をかかえ上げるように力を加えた時。

はかり a の示す値は イ) 大になる、ロ) 小になる、ハ) 変化しない

はかり b の示す値は イ) 大になる、ロ) 小になる、ハ) 変化しない

a の示す値と b の示す値の和は イ) 大になる、ロ) 小になる、ハ) 変化しない

理由：

はかり a, b, c の値についての回答結果は次の3枚の図に示す。

はかり a の示す値

についての Pre-Test では、正解のロを選んだ学生は 55.4%と半数以上を占めた。Post-Test では、ハを選んだ学生は 19.1%、正解のロを選んだ学生は 75.3% (+20%) と高い数値を示した。

はかり b の示す値

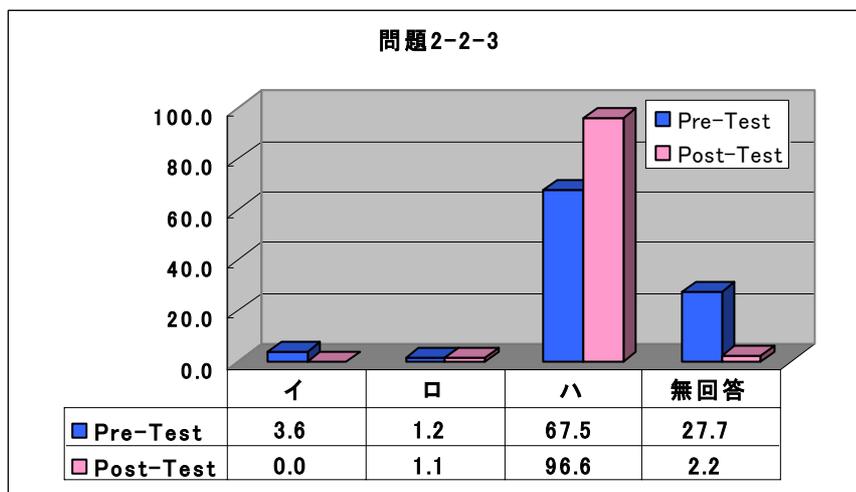
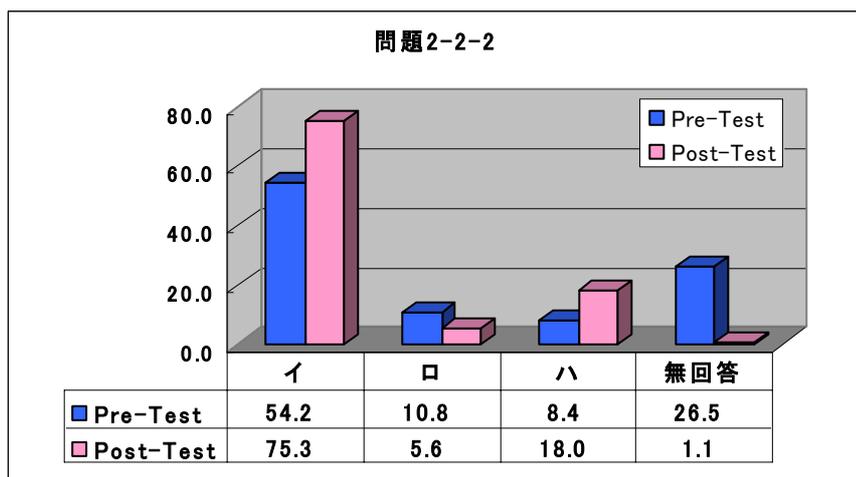
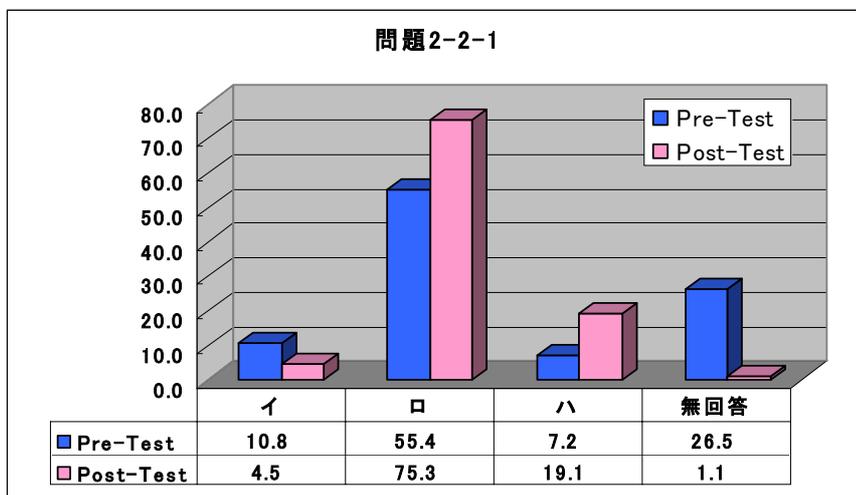
については、Pre-Test では、正解のイを選んだ学生は 54.2%と半数以上を占めた。Post-Test では、ハを選んだ学生は 18.0%、正解のイを選んだ学生は 75.3% (+21%) と高い数値を示した。

はかり a, b の和の値 については、Pre-Test では、正解のハを選んだ学生は 67.5%だった。

Post-Test でも、正解者の割合は 96.6% (+29%) と非常に高い数値を示した。

以上のように、2) の3つの回答のケースでは、いずれの場合も Post-Test では 20%から 30%程度まで、正答率が上昇していることがわかる。

1) の場合よりも少しだけ高い上昇率である理由は1) の場合よりも2) の場合の方が、状況を少しだけ理解しやすくなったためと思われる。



最後に、A君とB君が意識的に力をおよぼし合うという3)のケースについて、Pre-Test と Post-Test の結果を見ておこう。この場合は上の2つのケースと著しく異なる結果となっていることに注目されたい。

3) A君がB君の手を下に押し下げようとし、また同時にB君がA君の手を上押し上げようとしてお互いに手で、力を及ぼし合った時。

はかり a の示す値は イ) 大になる、ロ) 小になる、ハ) 変化しない

はかり b の示す値は イ) 大になる、ロ) 小になる、ハ) 変化しない

a の示す値と b の示す値の和は イ) 大になる、ロ) 小になる、ハ) 変化しない

理由：

はかり a の示す値

についての、Pre-Test では、誤った解答であるハを選んだ学生は62.7%と半数以上を占めており、正解であるロを選んだ学生はわずか8.4%であった。

一方Post-Testにおいても、誤った解答であるハを選んだ学生は76.4%と多く、正解のロを選んだ学生は22.5%(+14%)しかいなかった。誤答(ハ)も14%増加した。

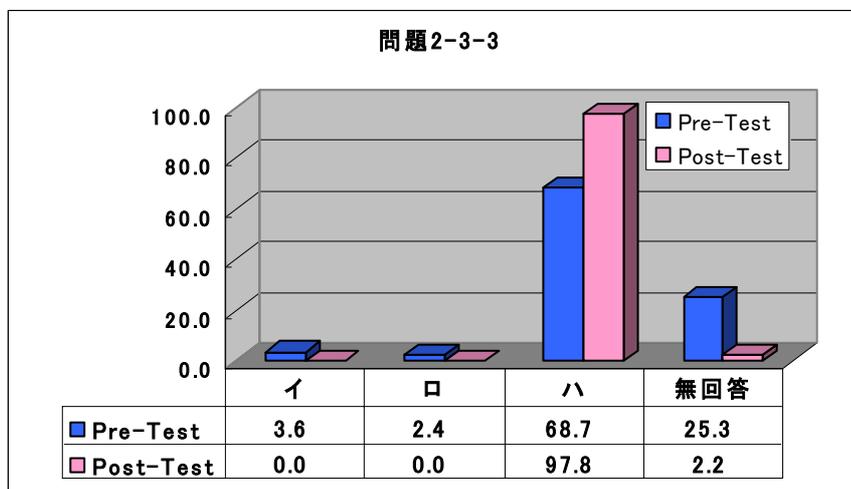
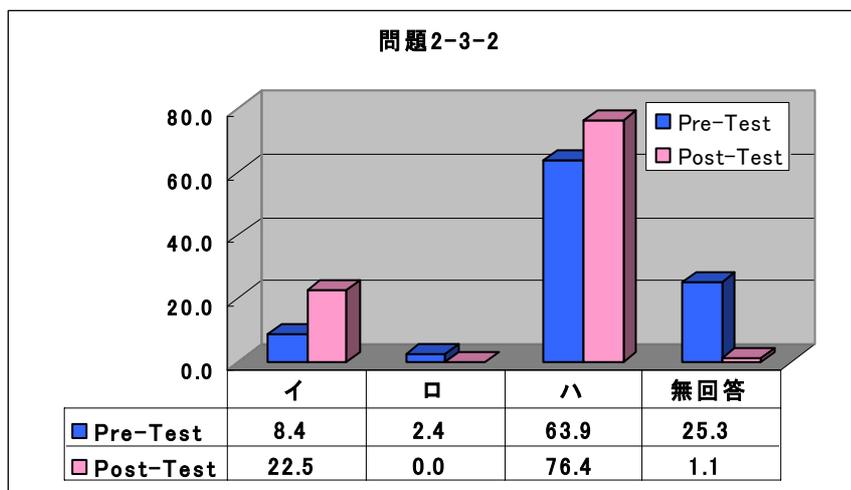
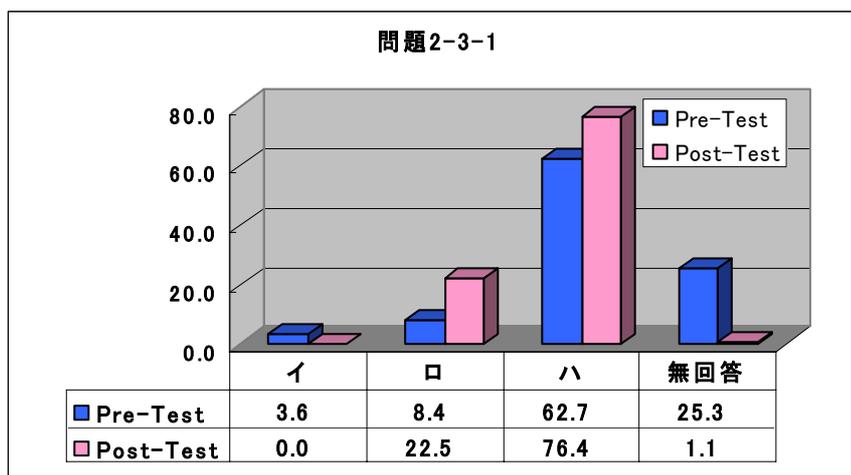
はかり b の示す値

についての、Pre-Test では、誤った解答であるハを選んだ学生は63.9%と半数以上を占めており、正解であるイを選んだ学生はわずか8.4%であった。

一方Post-Testにおいても、誤った解答であるハを選んだ学生は76.4%(+12%)と多く、正解であるロを選んだ学生は22.5%(+14%)しかいなかった。

はかり a, b の示す値の和についての、

Pre-Test では、正解のハを選んだ学生は68.7%と半数以上を占めた。Post-Testでも、正解者の割合は97.8%(+29%)と非常に高い数値を示した。



このように、はかり**3)**のA君とB君がお互いに手で力を及ぼし合った時の問題の場合には、誤った解答を選ぶケースが特に際だって多いことが注目されよう。多くの学生が「互いに異なる対象に働く作用と反作用における2力」と「同一の対象に働いて打ち消しあいをする(釣り合う)2力」とが明確には区別できていないことを示している。1)、2)、3)の問題設定は、何ら変わらない力の及ぼし合いであるのに、人間の意志が絡むということだけで、つまり「A君がB君の手を下に押し下げようとし、B君がA君の手を上を押し上げようとし、お互いに手で力を及ぼし合った時」というように「意図的に相手を押し合う」ということだけで「作用と反作用は打ち消し合ってしまう」と誤解してしまう。Post-Testでは(無回答が減って)誤答が1割増加しており、誤認識の根強さを示すものでもある。

以上のように、力センサーによる場合のような授業はしなかったために、1)、2)、3) どれにおいても「Pre-TestからPost-Testへの変化は2割前後の正答率の上昇」であった。

他方では、Pre-TestとPost-Testとにおいて1)、2)の正答率は共にかなり高く(75%台)、さらに、はかり**a, b**の示す値の和についての問題では、1)、2)、3)のどれにおいても95%以上の正答率に達した。しかし、3)の場合は「作用と反作用は打ち消し合って相殺してしまう」という誤認識が根強く、特に、はかりa, bのそれぞれが示す値を問う問題についての正答率は極めて低かった。

4 運動の第1法則や第2法則をVideo-Pointにより分析する授業とその効果

従来までは運動の分析が困難なために、目で見ても「ほら等速運動だよ」と単に例示していた場合が多かった。このような運動をきちんと運動分析ソフトで調べてみると有意義である教材が身の回りには豊富にある。運動を運動分析ソフトによって何度も体験することで、直接的に速度感覚を体得しうようになる。こうして自然に育てた速度認識を基にして、運動法則の探求をスムーズに行うことが可能になる。

等速運動(慣性の法則)をめぐる授業の展開

具体的な授業の展開としては、最初に、摩擦を小さくする工夫とはどのようなものかを考察させる。そして、摩擦がない世界において、「力が働かないときには、ものはどのような運動をするだろうか」という問題を考えさせる。

その運動を予測し、なぜそう考えるかを討論した後に、実際に実験とその運動の分析を行う。このようにして、「運動の第1法則(慣性の法則)を実体験するような授業は、力学の入門教材として位置付けられよう。

抵抗が無視できる等速直線運動の分析の例としては、[力学台車](#)、[バスケットボール](#)、[ボーリングボール](#)などの等速運動が豊富にある。次は、摩擦の少ない力学台車を手で押した時の運動、つまり等速直線運動の例である。

このグラフは上が位置の時間変化(縦軸が距離、横軸が時間)、中間が速度、下が加速度、の時間変化である。



宇宙船内の等速運動などのような通常では手に入りにくいものは、動画データベース化することによって、どこからでも取り寄せられるようにネットワーク化したいものである。

運動の第2法則をVideo-PointやITセンサーにより分析する授業

Video-Pointを使えば、様々な等加速運動の動画をデジタルカメラで撮り、速度が時間とともに直線的に増加・減

少する様子を分析することもできる。そこで、次のような運動の第2法則の授業を考えてみよう。

典型的な等加速度運動の例としては、「扇風機（プロペラ）付き力学台車」、「バスケットボールの自由落下運動（自由落下、投げ上げ、バウンドなどを含む）」、「ゼンマイで加速するミニカー（チョロキュー）」、「水ロケット」、「遊園地のジェットコースターやフリーホール装置」など、様々な運動があげられよう。

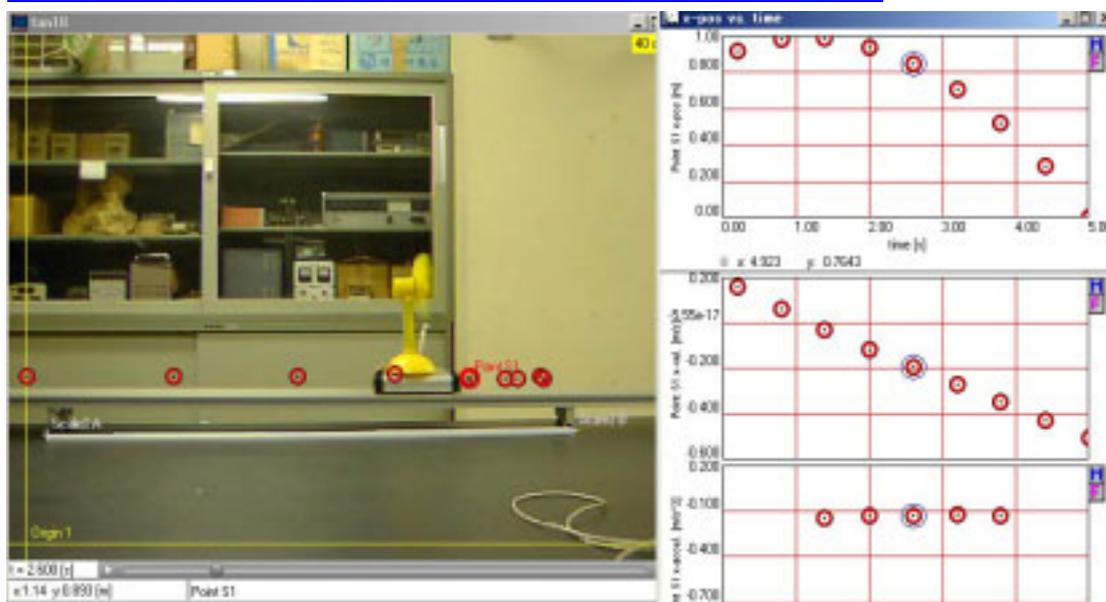
子供にとっては「体で記憶できる」ような、忘れがたい強烈な加速度体験のいくつかが「典型的な運動の第2法則」の実例として活用できることに注目したい。そのためにも、教材として使える面白い運動を普段から意識的に撮影しておく必要がある。

例えば、ロケットの発射、人工衛星内での無重力状態での各種の実験、航空機の運動、落下傘の運動、花火の打ち上げ、など。周囲を見渡せば、面白い加速現象は無数にある。

目的とする運動現象の秘密を解き明かすために、自分で工夫して撮影して運動解析ソフトで分析する醍醐味を味わうことが最初に不可欠であろう。

抵抗が無視できる等加速度運動の例

[下図は扇風機つき力学台車の運動分析結果（押し出されてから、戻ってくる等減速運動）](#)



理科教育法や免許認定講習、さらには高校生への授業、などで実施した授業実践の例

デジタル動画カメラや運動分析ソフト、距離センサーや力センサー、等々を使った授業実践を私の大学における理科教育関連の授業や、夏季休暇中の免許認定講習などで積み上げてきた。大学以外でも高校生や中学生に対する授業を実施しその効果を確認してきた。

これらの授業では、「Video-Point という動画解析ソフト」や「距離センサー」を使って、「予想した力や速さや加速度を測定して検証する、感動的な実体験ができる運動法則の探求授業」を行ったものである。

そして、例えば、次に示すような「運動法則を探求しよう—情報技術を活用して—」という90分の授業を「新潟県の高校1年生33人（新潟大学で2002年9月21日に実施）」に行った結果、次の感想に示すような「好評価」を得て確かになってごたえを感じる事ができた。

「台車が斜面を上るとき下る向きに力が働いているということを知って驚きです。自分の予想と大きく外れると、運動法則は奥がふかいなあと思えました。」

「自分が今まで考えていたことと大きく反していたのでとても驚きました。力はずっと動く方向にかかると思っていたので、{動く方向と} 反対方向にかかるということが一番の驚きです。」

「速さが変化していても一定の力が常に働いているということがわかって不思議だった」「いろいろな実験をして面白かった。新鮮な体験ができてうれしく思う」

「自分が立てた予想と違ってよい勉強になりました。なるほどなあと思うことがたくさんあって興味がわいてきました。」「今までの考えを変えるような実験をすることができてよかったと思う。」「プロペラを使って実験するの

が面白かった。興味深かった」「短い時間だったけれど、運動法則について大体理解できたと思う」「自分の考えていたものが全く違ったときは、驚いたというか、悲しんだというか、感心したというか。しかし、新しい正しい知識が得られたことは大きかったと思う。なるほどと思ったことがうれしかった。」等々。

「力∝速度」を「力∝加速度」にどう転換するか？

「アリストテレス的な力学観を克服して、いかにしてガリレイ・ニュートン的な力学観を形成するか」という課題に取り組む教育実践の場でもデジタル機器が大いに活用できる。

「力が働くと一定の速さになる」とか「動く方向にいつでも力は働いている」というような「素朴な力と速度についての考えかた」を私たちはいつのまにか根強く身につけてしまっている。抵抗が大きな日常世界において、「押したり引いたりして生ずる運動」、「力を働かせると動き、押すのをやめるとすぐ止まる」というような経験を日々繰り返すことで、この見方が強化されてきたからである。

例えば、空気中でもものが高速で運動する時は速度が上昇するにつれて空気抵抗が増加する。そのためにやがて推進力はその空気抵抗と等しくなる終端速度に達してしまう。より大きな推進力はより大きな空気抵抗をもたらすより大きな終端速度をもたらす。また、地上で荷車を押し引きするときには、積荷の質量（抗力）に比例する運動摩擦力と推進力が丁度つりあう速さで運動する。

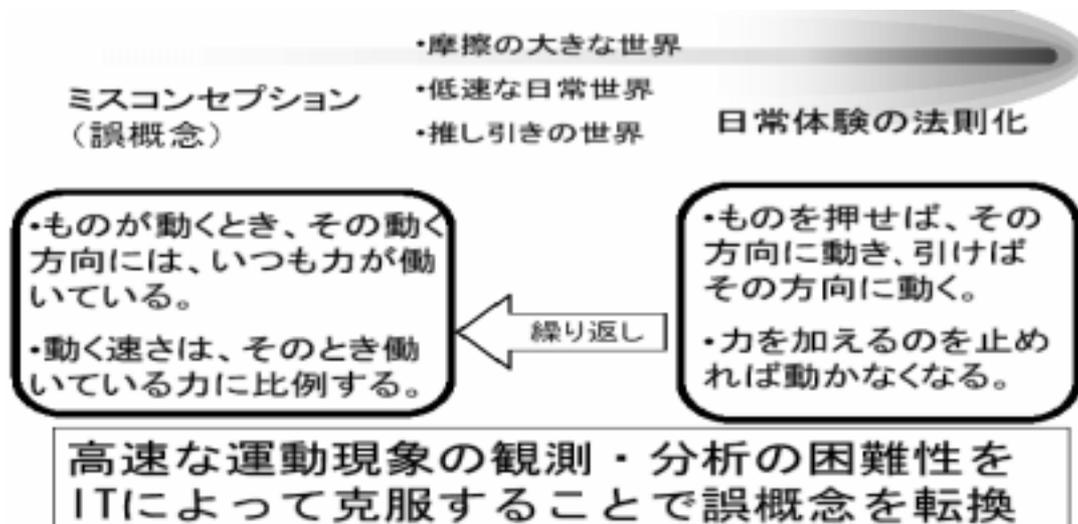
このように、「より速い運動」は「より大きな力」によって維持されるように見える。より大きな力はより大きな積荷を大量に運搬するという結果をもたらす（大きな力はより速く多くの荷物を運ぶ）。

このように、その抵抗に気づかないものは「力は速さに比例する」として「力と速さを直結させる」考え方をしてしまうのである。また「動く方向にはいつでも力がはたらいている」と考えてしまうのである。

こうしたアリストテレス的な力学観の誤りとは「摩擦に満ちた世界での終速度（等速運動）」という特殊な日常経験を無反省に法則化してしまったことにある。

したがって、摩擦を出来るだけ少なくした世界において、できるだけ誤認識を浮き彫りにできるように典型的な実験とその分析法を見出すことがポイントとなる。最新のデジタル機器を使えば、そのような実験をもとに、「素朴認識は誤りであった」、「一定の力が働くと、一定の割合で速度が増加・減少する」ということを感動的に身につけることが出来る。

それでは、このような観点からはどのような授業展開が可能だろうか。その一例として、私どもが実践した授業内容を次に例示してみよう。



一定の力を加え続ける運動の授業

従来は、力学台車をバネの伸びが一定になるようにうまく人が引く運動が試行された。しかし、今回は、プロペラを力学台車に固定し、プロペラの推進力によって一定の力を加え続ける運動を試行してみた。

今回の運動実験の新たな特徴は、推進力としてミニ扇風機（プロペラが柔らかいビニール製のものなので危険性が少ない）を使ったことである。ミニ扇風機は、最近、量販店などで安価で大量に販売されているので、適当な大きさ・形・出力のものをうまく精選すれば、安定した推進力をもたらす恰好な教材として活用できる掘り出し物となろう。

注目すべきは、ミニ扇風機つき力学台車によって、プロペラの推進力の方向とは逆方向にも始動できることである。これによって「運動方向と逆方向に力が働く」という予想外な結果を実体験して、「動く方向にいつでも力は働いている」という素朴概念を前述した感想のように、見事にくつがえす授業が実現できる。

なお、一定の力を働かせ続ける同様な方法としては、定滑車で錘の引く糸の方向を横に変えて台車を引く運動や、斜面の角度を変えて斜面方向の力成分を調整する方法があるので、より精度の高い一定の推進力を必要とする場合は、こちらの実験も併用すればよい。

しかし、プロペラによる推進力は手で触ってその大きさを実感できるし、ニュートンばかりで、大きさを測定することも可能である。必要なら、錘の重力とつり合わせてこれと等価な力であることを示すことができる。したがって、最も単純でかつ典型的な力による運動である「扇風機を使った運動の第2法則の分析」を取り上げる教育的な意義は大きいものと思われる。

1台のミニ扇風機による力学台車の運動

下図のような、摩擦が少ない滑走台と力学台車を2セット並べて用意する。1セットは力学台車に「ミニ扇風機」を固定して一定の力を加え続ける運動を行う。その真横に他の1セットを置き、ほぼ同じ等加速運動をする斜面の傾きに滑走台を調整して「台車が斜面を上下する運動」を行う。運動はVideoPoint 又は距離センサーを使って解析した。



実験に先立ち、生徒には次のようなアンケート用紙に予想を書いてもらう。

- (1) 斜面上で台車を離すとどのような運動をするか。そのときどのような力が働いているか。(5, 6個の選択肢は省略した)
- (2) プロペラが勢よく回っている台車を台上に置いて手を離すとどのような運動をするか。どのような力が働くか。
- (3) 斜面の上方向に勢よく台車を押して放し、上って、反転し、下るときに、それぞれの場所(上り、反転点、下り)ではどのような力が働いているか。
- (4) ミニ扇風機の推進方向と逆向きに勢よく走らせるとき、どのような運動をするか [($x-t$, $v-t$) グラフはどのようになるか]。途中まで走って、反転するとき、それぞれの場所(行き、反転点、帰り)ではどのような力が働いているか。

このような問題で「斜面の運動」と「ミニ扇風機による運動」のそれぞれを対比させて考察させ、それについて予測し検証するという流れで、演示実験や測定・分析実験を行った。

その際、任意の時と場所で「ミニ扇風機の推進力をゼロにする容易な操作」ができることを、プラスチックの透明なキャップをかぶせるアイディアで演示した。

そして、ミニ扇風機の推進力をゼロにすると、真横の同じ運動をする筈の「重力による斜面を落下する運動（その際に重力は表示できずゼロにもできない）」とは全然違う運動に変わることを演示した。

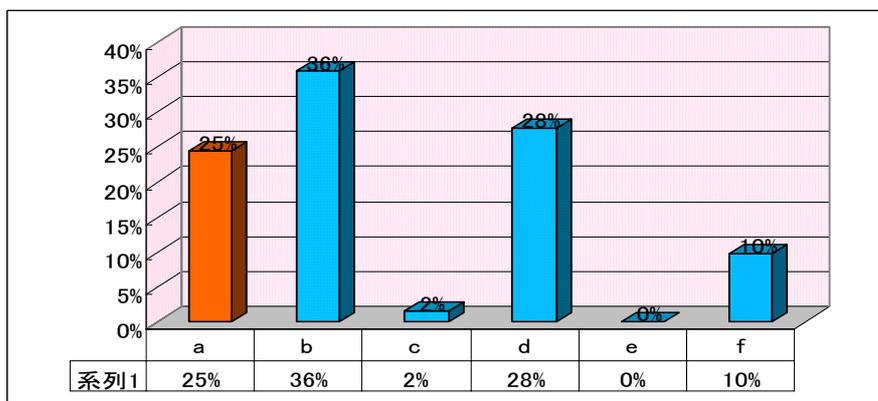
その結果、「一定の力は一定の速さをもたらす」「動く方向に常に力が働いている」というような誤認識を覆して、「正しい力と加速度の関係」についての認識を確立する授業が実現できたのである。

なお、今回の授業で使った台車の重さは500gで、ミニ扇風機の重さは170g、プロペラの推進力は0.10Nである。また、2.2mの力学台車用の滑走台を用いた[2]。

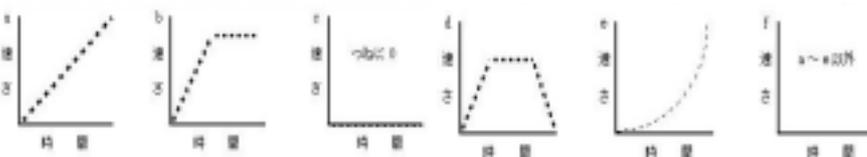
扇風機の推進力は横方向のニュートン秤で測定できるが、定滑車を使って縦方向にして測定すると、より信頼できる測定となる。この測定精度は0.01N程度であった。加速度測定の精度は $\pm 0.01 \text{ m/s}^2$ 程度で、台車を3倍程度（2kg前後）にすると摩擦の影響がかなり出現するので、注意が必要である。

ここで、(2) プロペラが勢いよく回っている台車を台上に置いて手を離すとどのような運動をするか？ に対する大学生や高校生の予想はどのようなものだろうか？

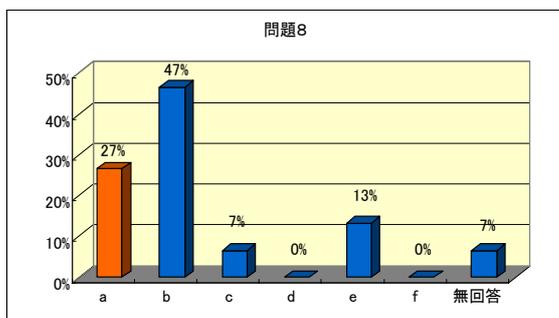
大学生の予想は次の図のようである。36%がbの「一定の力が加わりつづけると、速さは一定になる」という予測



を持つ。28%はdのあるところまで一定になりその後減速すると考える。いずれにしても、64%程度が「一定の力が加わりつづけると、速さは一定になる」というアリストテレス的な誤認識にもとづいた予測を持つのである。「力は速さに比例する」という見方が根強いことが解かる。



ここで、a から f までの選択肢は、その下の図にあるような、速度の時間変化 (v-t グラフ) のどれに対応するかを問うたものである。



同じことを高校生に行った場合の、高校生の予想結果が左図に示す。

この場合も、bは47%で「一定の力が加わりつづけると、速さは一定になる」というアリストテレス的な誤認識を示している。この高校生は1年生なので、まだ力学の勉強はしていない。そのためか、eや無回答も10%前後ある。

同じような誤認識は「ミニ扇風機付の力学台車を推進方向と逆向きに勢いよく走らせるとき」と「斜面の上方向に力学台車を勢いよく走らせるとき」にそれぞれ力学台車をどのような運動をするかを問うことで、より明確に現れる。

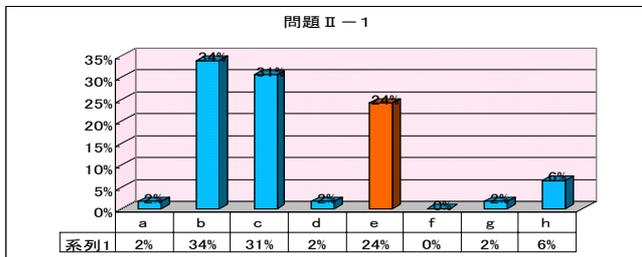
「動く方向に必ず力が働いている」という誤認識の例として、大学生（2001年）と高校生（2002年）における予想調査の結果を次に示そう。

なめらかな斜面の上での台車の運動です。

台車を押して斜面を上らせた（手から離れた）あと、坂を途中まで上がっているとき、反転する間、下っているときには、どのような力が働いていると思いますか？次の中から選びなさい。

- a 斜面を上がる向きにだんだん強くなる力が働いている。
- b 斜面を上がる向きに一定の大きさの力が働いている。
- c 斜面を上がる向きにだんだん弱くなる力が働いている。

- d 斜面を下る向きにだんだん強くなる力が働いている。
- e 斜面を下る向きに一定の大きさの力が働いている。
- f 斜面を下る向きにだんだん弱くなる力が働いている。
- g 力が働いていない（つまり0の力）
- h 上がる向きから下がる向きに反転するような力が働いている。



最初に斜面を上昇するときの回答を示そう。

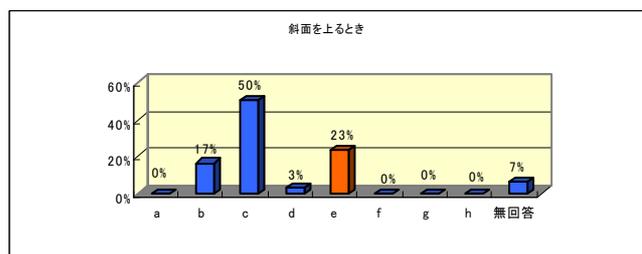
左のグラフは大学生と高校生に実施したアンケートの結果である。上が大学生の予想結果、下が高校生の予想結果を示す。

大学生は34%がb、31%がcで、合わせて65%は「斜面を昇る向きに力が働く」という誤認識にとらわれた考えを持っている。

高校生の場合には、50%が「bの斜面を昇る向きに一定の大きさの力が働いている」と答えた。

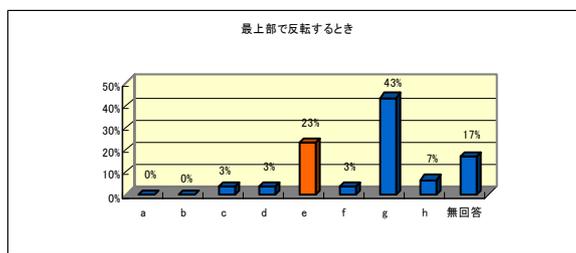
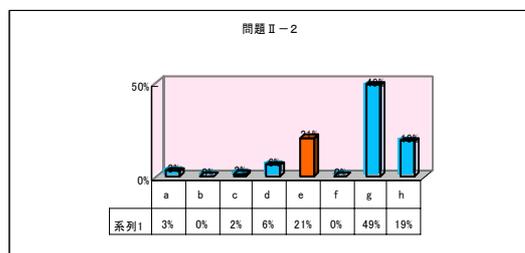
このようにして、「斜面を昇る向きに力学台車車が動くときは、その動く方向に必ず力が働いている」という誤認識がいかにも根深いかがよく示された結果となっている。

そして「速さは力に比例する」という誤認識を持つケースが、学生や高校生においては、



いかに多いかという深刻な現状が以上の結果からよく見て取れよう。

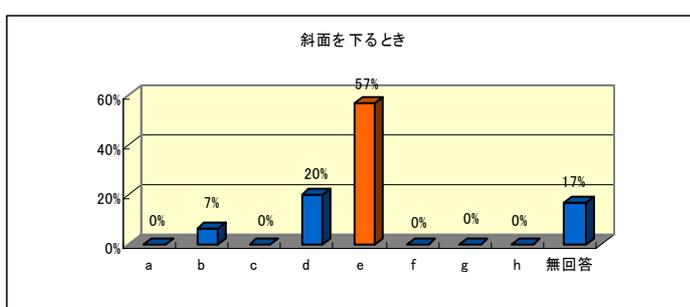
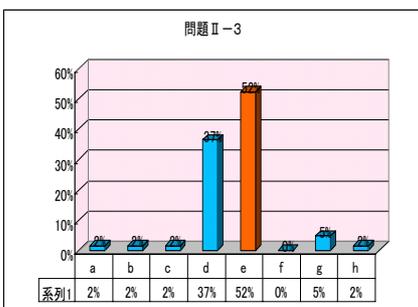
最上部で反転する間に働く力に対する、大学生と高校生の予想（選択肢は上るときと同じ）。



このときは、

「gものがとまっている時には、力が働いていない（つまり0の力）」が40%から50%ほど見られる。大学生に場合は「h上がる向きから下がる向きに反転するような力が働いている」もあり、「e斜面を下る向きに一定の大きさの力が働いている」という正解は大学生が21%、高校生は23%となっている。

最後に斜面を下るとき的大学生と高校生の予想を見ておこう。



上のグラフのように、斜面を下る時でさえ、「d 斜面を下る向きにだんだん強くなる力が働いている」とする大学

生は37%、高校生は20%もいる。「速さが大きくなればなるほど力も大きくなる。速さは力に比例する」という誤概念を持ち続けている。そのため、「e 斜面を下る向きに一定の大きさの力が働いている」という正解は、大学生では52%、高校生では57%に止まっているのである。

以上のような結果から、「ものが動くときはその動く方向に必ず力が働いている。速さは力に比例する」、というアリストテレス的な誤認識がいかに根深いかが明白になった。

従って、以上の分析結果は「斜面を下る力学台車の運動と扇風機つき力学台車の運動を対比させて、アリストテレス的な誤認識を転換させる丁寧な実体験による学習」がいかに重要であるかが具体的に示されたものと言えよう。

前述の場合と同様に、2002年の後期の理科教育関連の授業においては、上記のような授業時を行った大学生にたいして、次のような問題で[4][5]、事前テスト (Pre-Test) と事後テスト (Post-Test) を行うことができた。

実際に行った内容は次のようである。

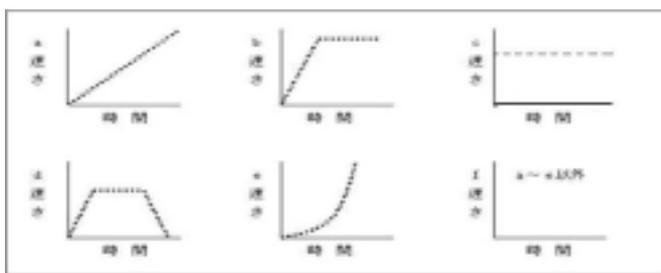
問題6

力学台車（摩擦がほとんど無視できる水平な滑走台上）を、勢いよく正の方向に手で押し出した後は、どのような運動をするか。

台車の速さの時間的な変化のグラフ (v-t グラフ) は右のどのようになるか？

また、どのような力が働いているか。

(a 正方向に一定の力, b 正方向にだんだん弱くなる力, c 力は働かない, d 負方向に一定の力, e 負方向に弱くなる力, f その他の力働いている)

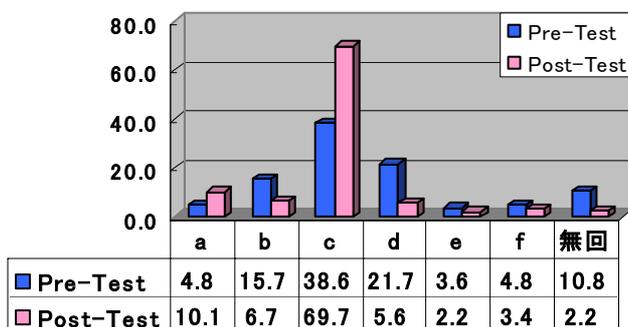


台車の速さの時間的な変化については、Pre-Test では、bを選んだ学生が 15.7%、dを選んだ学生が 21.7%、であった。

このような単純な問題に対しても、正解である c を選んだ学生は 38.6%程度であった。

一方 Post-Test では、正解の c を選んだ学生は 69.7%にまで達し、30%ほどの正答率の上昇が見られた。

問題6の回答のグラフ



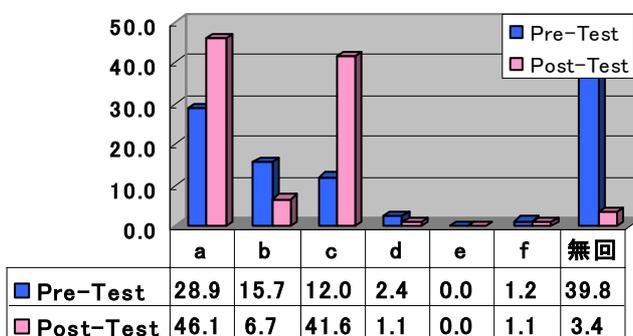
そのときどのような力が働いているかについては、

Pre-Test では、aを選んだ学生が 28.9%、bを選んだ学生が 15.7%、であった。

正解である c を選んだ学生はわずかに 12.0%であった。

一方 Post-Test では、正解の c を選んだ学生は 41.6%と上昇したが、誤認識である a を選んだ学生も 46.1%と上昇している。

問題6力



この結果は、1 回だけの授業では

「動く方向に力が働く」という誤認識を克服するには、まだ不十分で、数回の丁寧な授業が望まれることを意味している。又、一部に試行した運動量概念、運動量保存則の考え方と結びつけた学習への展開が、これに引き続いて必要に思われる。動く方向には、力でなく運動量という概念が対応して、それが保存される効果を「力や慣性力」のよう

なものと考えるためとも思われる。このような問題の検討は今後も引き続き必要と思われる。

問題7

台車が斜面を下っているとき、斜面方向にはどの力が働いているか？

台車の摩擦力や空気抵抗は無視できるものとして、あてはまる答えを選択してください。

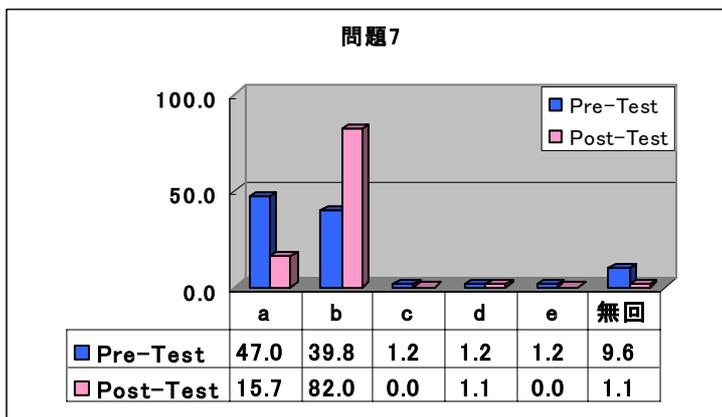
- a 下る向きに、だんだん強くなる力が働いている
- b 下る向きに、一定の大きさの力が働いている
- c 下る向きに、だんだん弱くなる力が働いている
- d 力が働いていない（つまり0の力）
- e その他の力が働いている

台車が斜面を下っているときの問題に対する結果は次のようである。

Pre-Test では、a を選んだ学生は 47%で、正解である b を選んだ学生は 39.8%であった。

斜面を下る台車の運動では、速度がだんだん速くなることを経験的に知っていることから、だんだん強くなる力が働いていると考える学生が多かったためと思われる。

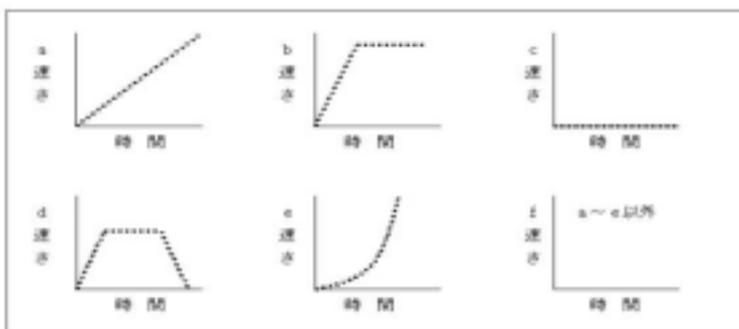
一方 Post-Test では、正解である b を選んだ学生は 82.0%にまで上昇した。このように、斜面を下る場合はこれだけの高い正答率が得られるのであるが、前の昇るときに見られたように、「下向きに動くので下向きに力=動く方向に力が働く」という誤認識の学生もこの中には含まれている可能性があるため、この結果には必ずしも満足してはいけなない。



問題8

滑らかな滑走台の上に台車が静止しています。台車には摩擦力が働いていないものとします。

この台車に、ミニ扇風機で、一定の大きさの右向きの力を働かせつづけたら、台車の速さは次のどのグラフのようになると思いますか？あてはまる答えを選択してください。

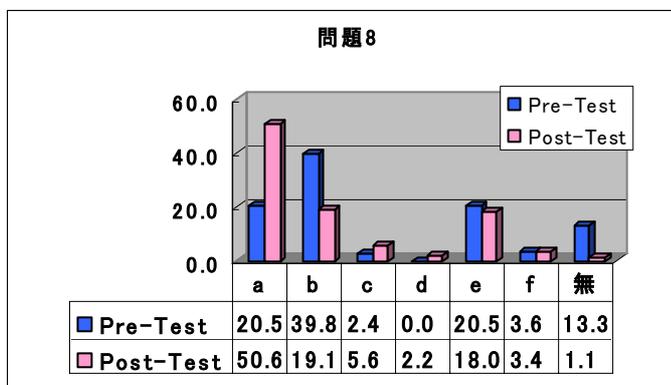


ミニ扇風機による一定の大きさの右向きの力の場合の回答状況：

Pre-Test では、b を選んだ学生は 39.8%、e を選んだ学生は 20.5%であった。この問題で b を選んだ学生が多かったのは、一定の大きさの力を加えつづけるといったことから速度も一定になっていくものを選んだのか、摩擦力が働いていないと問題文に書いてあるにもかかわらず、いつかは一定の速度になると考えたのではないかとと思われる。

他方で、正解である a を選んだ学生は 20.5%であった。このように、等加速運動を予測する学生は少数である。

一方 Post-Test では、正解である a を選んだ学生は 50.6%にまで上昇した。そして、誤答である b, e を選んだ学生はいずれも 20%以下に減少した。正答率の上昇率は 30%で有意にレベルではあるが、必ずしもまだ十分とはいえない。



問題9

台車を手で押して斜面を上がらせませす。台車は手から離れたあと、坂を途中まで上がり、反転して下ってきました。台車の摩擦力や空気抵抗はほとんど無視できるものとし、次の質問にあてはまる答えを選択してください。

1 台車が斜面を上がっているときには、どのような力が働いていると思いますか？

- a 斜面を上がる向きに、だんだん強くなる力が働いている
- b 斜面を上がる向きに、一定の大きさの力が働いている
- c 斜面を上がる向きに、だんだん弱くなる力が働いている
- d 斜面を下る向きに、だんだん強くなる力が働いている
- e 斜面を下る向きに、一定の大きさの力が働いている
- f 斜面を下る向きに、だんだん弱くなる力が働いている
- g 力が働いていない（つまり0の力）
- h 上がる向きの力から下がる向きの力に反転するような力が働いている



台車が斜面を上がっているときの結果は次のようである。

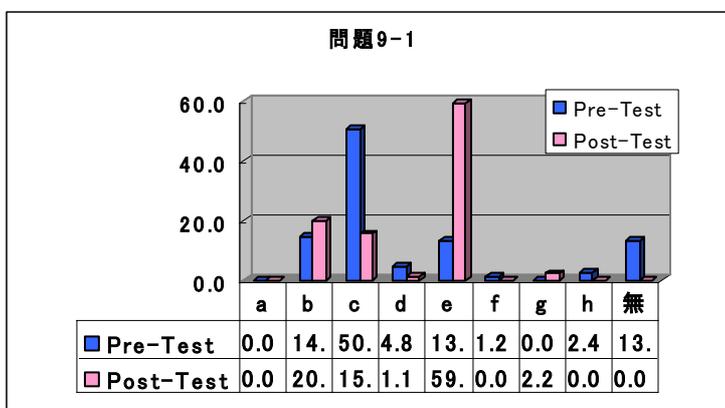
Pre-Test では、c を選んだ学生が 50.6% と大多数を占めた。

そして、正解である e を選んだ学生は 13.3% とわずかであった。

斜面の運動では、垂直方向に働く力と水平方向に働く力を分解して考えなければならず、水平な面の運動に比べて、物体に働く力の理解が多少は難しいことも、正しい理解の障害になったのであろう。

この場合は斜面を上昇する運動であり、だんだんとその速度が小さくなることから、台車に働く力と台車の速度を混同して、速度が小さくなったからだんだん弱くなる力が働くという c を選んだ学生が多かったものと思われる。

Post-Test では、正解である e を選んだ学生が 59.6% と、正答率は 50% 近くも著しく上昇した。しかし、b の上る方向への力を、まだ 2 割ほどが選んでいるので、十分な誤認識の転換が行われたとは即断はできない。

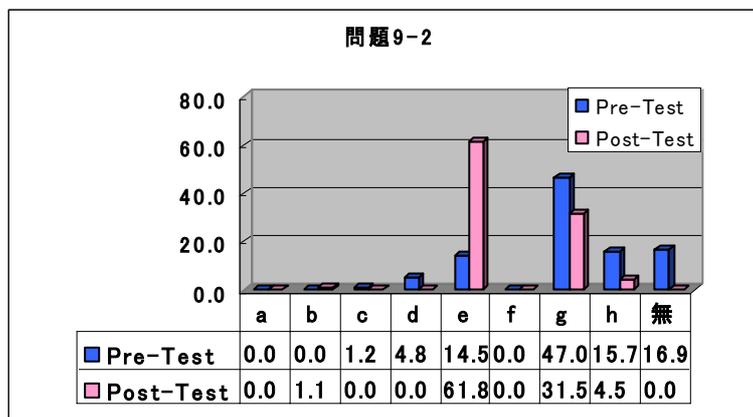


2 台車が斜面を上がった後の、反転する間にはどのような力が働いていると思いますか？

- a 斜面を上がる向きに、だんだん強くなる力が働いている
- b 斜面を上がる向きに、一定の大きさの力が働いている
- c 斜面を上がる向きに、だんだん弱くなる力が働いている
- d 斜面を下る向きに、だんだん強くなる力が働いている
- e 斜面を下る向きに、一定の大きさの力が働いている
- f 斜面を下る向きに、だんだん弱くなる力が働いている
- g 力が働いていない（つまり0の力）
- h 上がる向きの力から下がる向きの力に反転するような力が働いている

反転する間にはどのような力が働いているかの回答結果：

Pre-Test では、g を選んだ学生が 47.0% と大多数を占め、正解で



ある e を選んだ学生は 14.5%と、先ほどの問題と同様にわずかであった。

この問題における台車の運動の様子は、斜面をあがっていき、最高点に達したとき（つまり、下り始める直前）に働く力を聞いている問題である。台車の運動は瞬間的に止まっているので何も力が働いていないという g の解答が多かったと思われる。

Post-Test では、正解である e を選んだ学生が 61.8%と非常に高くなった。正答率の上昇が、この場合も 5 割近くに達していることは注目し値しよう。しかしながら、ご認識は根強く、「g 力が働いていない」を 3 割近くが選んでいることも無視できない事実と思われる。

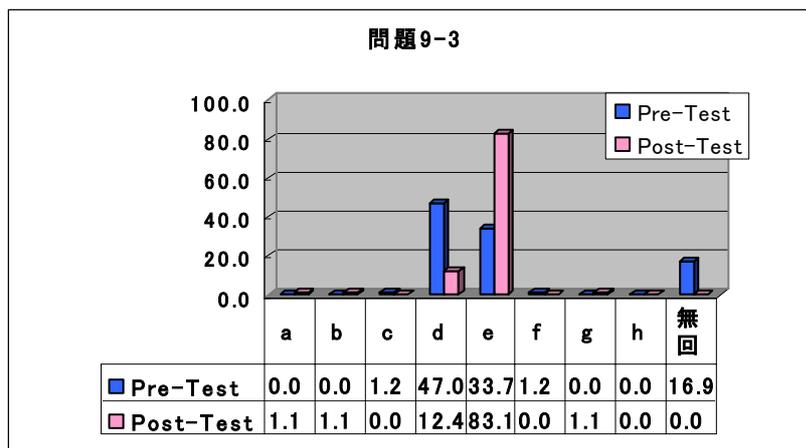
3 台車が斜面を下っているときには、どのような力が働いていると思いますか？

- a 斜面を上がる向きに、だんだん強くなる力が働いている
- b 斜面を上がる向きに、一定の大きさの力が働いている
- c 斜面を上がる向きに、だんだん弱くなる力が働いている
- d 斜面を下る向きに、だんだん強くなる力が働いている
- e 斜面を下る向きに、一定の大きさの力が働いている
- f 斜面を下る向きに、だんだん弱くなる力が働いている
- g 力が働いていない（つまり 0 の力）
- h 上がる向きの力から下がる向きの力に反転するような力が働いている

台車が斜面を下っているときの結果は次のようである。

Pre-Test では、d を選んだ学生が 47.0%と多数を占めたが、先ほどの 2 問に比べれば、正解である e を選んだ学生は 33.7%と比較的に多かった。

この問題では、台車が斜面を加速しながら下っていく運動を扱っている。加速しながら下っていくので、Pre-Test では、だんだん強くなる力が働いているという d を選んだ学生が多かった。また、先の 2 問と比べて、Pre-Test での正答率が比較的高かったのも注目すべき点であろう。物体に働く力の向きと、物体の運動



する方向が一致しているから、理解しやすかったのかもしれない。

そして、Post-Test では、正解である e を選んだ学生が 83.1%と非常に高くなった。他とほぼ同じように 50%にも及ぶ正答率の上昇が見られる。誤答は、d 斜面を下る向きにだんだん強くなる力の 12%程度であった。

問題 1

ボールを真上に投げ上げます。ボールは手から離れたあと、途中まで上がり、一瞬静止したあと落ちてきました。ボールには摩擦力や空気抵抗が働いていないものとして、次の質問にあてはまる答えを選択してください。

- 1 ボールが上がっているときには、どのような力が働いていると思いますか？
- a 下向きに、だんだん強くなる力を出している
- b 下向きに、一定の大きさの力を出している
- c 下向きに、だんだん弱くなる力を出している
- d 上向きに、だんだん強くなる力を出している
- e 上向きに、一定の大きさの力を出している
- f 上向きに、だんだん弱くなる力を出している

g 力が働いていない (つまり0の力)

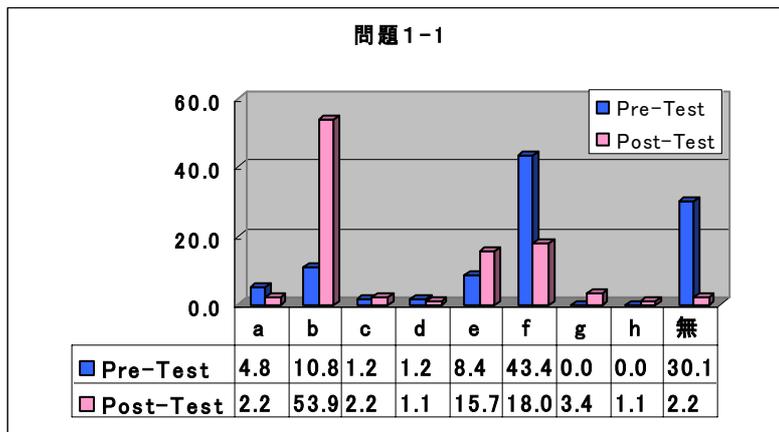
h その他の力が働いている

ボールが上がっているときの力：

Pre-Test では、f を選んだ学生が 43.4%と多数を占め、正解である b を選んだ学生は 10.8%ときわめてわずかであった。

この問題は鉛直投げ上げの問題である。先ほどの斜面の運動のときと同様、物体の運動する方向と、物体に働く力を明らかに混同した。

ところが Post-Test では、正解である b を選んだ学生は 53.9%へと 43%も高くなった。



2 ボールが上がったあと、落ち始める瞬間 (一瞬静止したとき) には、どのような力が働いていると思いますか？

a 下向きに、だんだん強くなる力を出している

b 下向きに、一定の大きさの力を出している

c 下向きに、だんだん弱くなる力を出している

d 上向きに、だんだん強くなる力を出している

e 上向きに、一定の大きさの力を出している

f 上向きに、だんだん弱くなる力を出している

g 力が働いていない (つまり0の力)

h その他の力が働いている

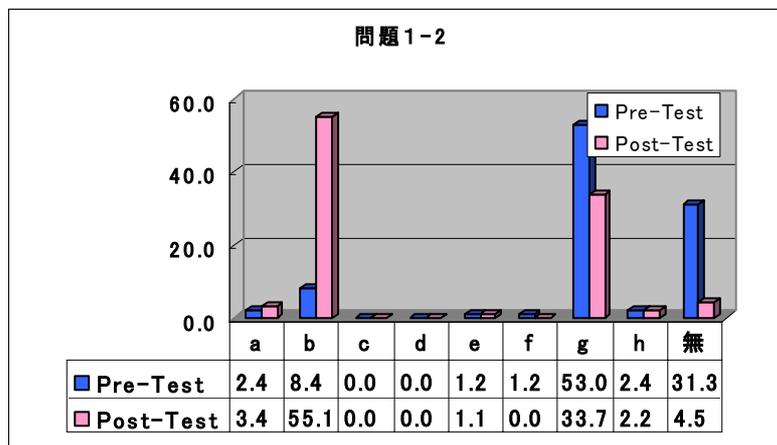
ボールが反転する瞬間：

Pre-Test では、g を選んだ学生が 53.0%と大多数を占め、正解である b を選んだ学生は 8.4%ときわめて僅かだった。

この問題は、鉛直投げ上げ運動の最高点における転換点で働く力の問題であるが、斜面のときと同様に、物体がいったん静止すると力は働かないという根強い誤認識に陥ることが判明した。

Post-Test では、正解である b を選んだ学生が 55.1%に増加し、正答率の上昇は 50%近くに達し、47%も上昇した。

しかし、それでも典型的な不正解の例である g を選択した学生は 33.7%にも及んだ。



3 ボールが下に落ちているときには、どのような力が働いていると思いますか？

a 下向きに、だんだん強くなる力を出している

b 下向きに、一定の大きさの力を出している

c 下向きに、だんだん弱くなる力を出している

d 上向きに、だんだん強くなる力を出している

e 上向きに、一定の大きさの力を出している

f 上向きに、だんだん弱くなる力を出している

g 力が働いていない (つまり0の力)

h その他の力が働いている

ボールが下に落ちているときの力：

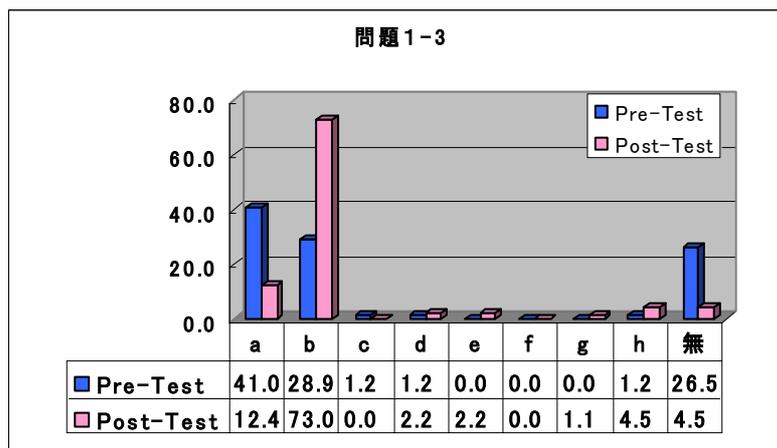
Pre-Test では、a を選んだ学生が 41.0%と多いが、正解である b を選んだ学生は 28.9%と、先の 2 問に比べてある程度多かった。

斜面の運動のときと同様、物体の運動の向きと、物体に働く力の向きが一緒になっているため、理解しやすかったためだと考えられる。

Post-Test でも、正解である b を選んだ学生が 73.0%に達し、44%も正答率は増加した。この正答率は前の 2 問に比べてかなり高かった。

最後に、「IT センサーを使って予想を検証するという実体験を伴う授業はしなかったが、一般的な解説による授業は行ったというケースにおいて、Pre-Test と Post-Test は行った場合の典型的な調査結果」について報告しておこう。

この場合にも力センサーの場合と同様に、以下に示すように、1 割から 2 割程度しか正答率は上昇しなかったという結果が得られている。



問題 2

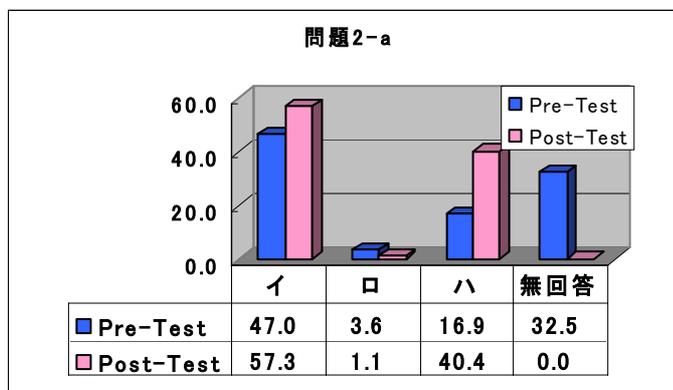
空気中を空気の抵抗を受けながら飛行しているジェット機がある。

a) エンジンを働かせて、一定の速度で飛行している時、エンジンの推進力（前方に進めようとする力）と空気の抵抗力（摩擦力）の関係は次のいずれか。

- イ) 推進力は抵抗力より大きい
- ロ) 推進力は抵抗力より小さい
- ハ) 推進力と抵抗力とは等しい

b) その後、急にエンジンが動かなくなった状態で飛んでいる時、ジェット機の推進力は次のいずれか。

- イ) 働く
- ロ) 働かない



一定の速度で飛行している時：

Pre-Test では、「イ) 推進力は抵抗力より大きい」という「力は動く方向に働く」というタイプの誤認識を選んだ学生は 47.0%とかなり多かった。

他方、正解である「ハ) 推進力と抵抗力とは等しい」を選んだ学生は 16.9%と僅かだった。

Post-Test では、正解であるハ) を選んだ学生が 40.4%で、実体験をした授業分野とことなり、正答率は 23%だけの増加に留まった。特に、Post-Test では無回答が無くなったのに伴い、イ) の誤答率が 10%も上昇したことは見逃せない。

エンジンが動かなくなった状態：

Pre-Test では、「イ) 推進力は働く」という、やはり「力は動く方向に働く」というタイプの誤認識を有する学生は 39.8%とかなり多かった。他方、正解である「ロ) 推進力は働かない」を選んだ学生は 25.3%だった。

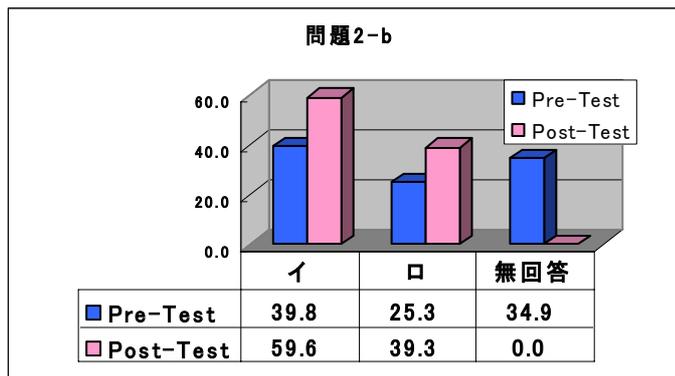
Post-Test では、正解であるロ) を選んだ学生は 39.3%で、実体験をしない場合の正答率の上昇レベルである 14%だけの増加に留まった。しかも、無回答率が 4 割減ったのに伴い、誤回答率は Pre-Test よりも 20%も増加している。59.6%もの多数の学生が「エンジンが止まっても推進力が働く」と考えているという異様な実態が浮き彫りになった。

このような誤認識を抜本的に転換させるには、それ相当な手立てが必要と思われる。いきおいを力の一種と見なしていることがその要因の一つとも考えられる。そこで、運動量概念をきちんと身につけるようにし、「運動量と力」との区別を明確化するというような新たな授業展開を含むような授業法を開発することが、今後における重要な課題の一つと思われる。

以上のように、ITセンサーの活用による検証を伴うような体験的な授業としては取り上げなかった場合（単に正解を解

説した程度）は、1割から2割の正答率の上昇であることが、作用反作用の場合と同様に、ここでも確かめられた。

つまり、「動く方向にいつも力は働く」という誤認識が非常に根強いために「従来のような授業だけでは、1割から2割程度しか正答率の向上効果が得られない」という場合に相当している。



5 おわりに

運動分析ソフトやITセンサー等を活用して、現象をリアル（準リアル）タイムで予想し、それを分析・検証する授業の有効性を、事前テスト（Pre-Test）と事後テスト（Post-Test）を行うことによって、詳細に調査した。

その結果、現象をリアル（準リアル）タイムで予想し、それを分析・検証する授業を、運動分析ソフトやITセンサー等を活用して行うことは、力学概念の形成においてきわめて効果的であり、従来の授業に比較して画期的な授業法であることが分かった。

具体的には、力センサーを用いた作用・反作用の法則を感動的に検証する授業の効果は、正答率が50%から60%も上昇して80%台という高いレベルで定着したことによって実証できた。また、この力センサーによる授業の場合のような検証授業を行わなかったケースでは、Pre-Test から Post-Test への変化は2割前後の正答率の上昇であった。

運動分析ソフトやITセンサーを活用する運動の第2法則に関する授業においては、Pre-Test と Post-Test とを比較すると、正答率が30%から40%ほど上昇するという結果が得られた。

他方では、こうした現象をリアル（準リアル）タイムで予想してそれを分析・検証するような授業をやらなかったような問題に対しては、正答率は10%から20%しか上昇しないという結果が得られた。特に、空中を空気の抵抗を受けながら飛行しているジェット機の問題においては「エンジンが止まっても推進力が働く」と考える学生が59.6%にのぼった。このような誤認識を根本的に転換できるような実体験を伴う新たな授業法の開発が必要と思われる。

以上のように、運動分析ソフトやITセンサー等を活用して予測を検証する授業を行うような、本報告で示した新しいタイプの授業は、「運動と力の関係についての基本的な概念の形成において著しい効果をもたらす」ことが、事前テスト（Pre-Test）と事後テスト（Post-Test）を行うことによって実証できた。

従来までは「とにかく現実世界よりバーチャルな世界に偏重しがちな」実態があった。しかし、以上のような「実体験を伴うリアルタイムでの情報技術の意識的な活用・適用」によって、従来までは誤概念の克服が比較的困難であった分野でも、実体験を伴う魅力的な科学教育分野として再構築できるものと思われる。このようにして、科学教育における様々な新しい可能性と豊かな展望が急速に切り開かれることを強く期待するものである。

参考文献

- [1] 「VideoPoint」; Lenox Softworks という米国の会社の動画分析ソフト。http://www.lsw.com/videopoint/
- [2] 米国のPASCO社製PASPORT USB Sensor、DataStudioというソフトを使用する。
- [3] http://rika.ed.niigata-u.ac.jp/videopoint/web/, http://rika.ed.niigata-u.ac.jp/~factory/に[1] [2]や運動体解析ソフト「VideoPoint」や「運動くん for Windows」の活用事例集を示す。
- [4] 小林昭三: 「力学形成の論理と力学教育の論理 (II)」『新潟大学教育学部紀要』第22巻、1980、pp. 11~26、及び、同 (IV)、第24巻、第1号、1982、pp. 8~25。
- [5] Thornton, R. K. and Sokoloff, D. R. (1998), American Journal of Physics, 66(4), 338-351.