

力学分野の素朴概念を転換できるリアルタイムIT活用教育

小林 昭三

新潟大学教育人間科学部理科教育教室

kobayasi@ed.niigata-u.ac.jp

要 旨: 実体験を重視する科学教育には情報技術(IT)を実験や観察においてリアルタイム活用できるような教材開発が期待される。このようなリアルタイム IT 活用教育をめざした力学教材の開発研究を私たちは進めてきた。バーチャル世界にとかく偏重しがちな現状を改善して、例えば、IT センサー(力センサーや距離センサー)や運動分析ソフトで運動現象を即座に記録・検証するような、IT の効果的な活用を特に重視して取り組んできた。力学分野においては、生徒が根強くいただいている素朴概念をどう克服して、科学的な力と運動の概念へとどのようにすれば感動的に転換できるかが問題となる。このような課題を解決できる教材や授業の見通しが、最近までにかなり開かれてきたので、そのような一連の授業実践について報告する。特に、「2003 年全国高校学力調査結果」では、力学分野の達成率は2~3割程度であったが、私たちのこのような新しいIT活用授業法によれば、それより4~5割程も高い達成率がもたらされることが、pre-post test による調査をもとに実証できることについても紹介する。

1. はじめに

実体験を重視する科学教育分野においては、バーチャル世界にとかく偏重しがちな現状を改善して、例えば、IT センサー(力センサーや距離センサー)や運動分析ソフトで運動現象を即座に記録・検証するよう情報技術(IT)をリアルタイムで活用する教育法が、特に重要になるとと思われる。そのために、

(1) 小・中・高等学校及び大学における科学教育を「わかりやすく感動的なものにする」ために、運動現象をデジタルカメラで動画としてパソコンに取り込み、それを即座に分析・解析するような運動分析ソフトとその活用法を研究開発し、それによる新しい力学教育システムの形成をめざしてきた。又、IT センサー(距離センサーや力センサーなど)を使った新しい科学教育の可能性を具体化し、これまでは困難であった多くの物理分野を感動的に教授する、教授・学習システムの開発研究を進めてきた[2,3]。

(2) IT を活用した新たなカリキュラム・教授学習システムを構想することにより、初等・中等・高等教育を体系的に見直した新しい科学教育システムの再構築をめざした。特に、予測を検証する主体的な学びをもとに、知的好奇心や探求心を高めて、基本的な科学概念の形成や論理的思考力伸ばすことに主眼を置いた「特色ある教材モジュール群」の開発を目指してきた。特に、「超軽量ミニ扇風機台車を作りとその運動法則教材開発」は私たちの生み出した特色ある教材モジュールである[2,3]。

3) 「抵抗の大きな世界」を理解できる教材の開発を進めてきた。従来までの力学教育では、抵抗が無視できる理想的な現象についての実験にのみ力点が置かれる

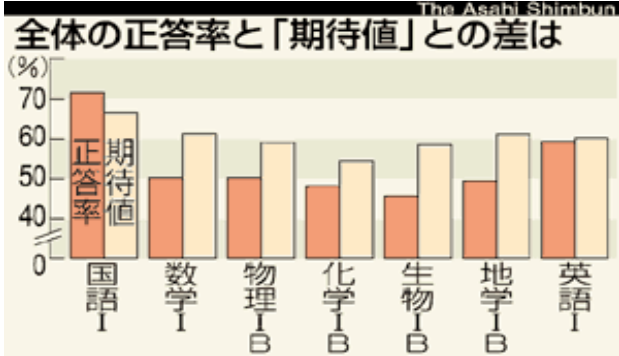
傾向が強かったが、IT を活用して、抵抗の大きな世界を、感動的に理解できる授業モジュールの作成が可能となるからである。例えば、きわめて軽い紙やアルミのカップ型容器の落下は、抵抗が支配的な世界(速さの2乗の空気摩擦による終速度への移行が素早く実現でき)の法則性が見事に実現できる教材である[2,3]。以下ではこのような新たな教材開発について報告する。

2. 運動の法則をめぐるカリキュラムの課題

現行の理科の学習指導要領では、理解度が低いという理由で中学校から高校に先送りされた教材が多いのだが、その中でも特に力学分野での先送りが目立つ。例えば、水圧、浮力、力とばねの伸び、質量と重さの違い、力の合成と分解、仕事と仕事率、などがそれである。そして、高校の「物理 I」では、中学校からきた「生活の中で用いられている電気や磁気」から入ることが義務づけられ、その後、波動、それからやっと「力と運動」を学ぶという順番にされてしまった。さらに、高校では、1次元運動は物理 I、(放物線運動のような)2次元運動は II に分断され、運動学習の統一性は失われてしまった。その新指導要領で学んだ高校生が大学に入る 2006 年には、理数力の低下がさらに深刻な状態になることが危惧されている。

そのような結果を予測させるものとして、平成 14 年 11 月 12 日、公表された全国の高校生学力調査結果(国、公、私立の高校3年生 10 万 5 千人を無作為抽出)がある。それによれば、理科や数学分野での正答率は大幅に期待された正答率を下回った。例えば、全体の正答率の平均値で期待値をどれだけ下回ったかをみる

と、数学では61.2% 50.2%、理科では物理1Bは59.1% 50.2%と、いずれも約10%も下回っている。特に、下図（[1]にあるグラフ）のように、物理、化学、生物、地学の1Bは、いずれも10%ほど下回ったのである。



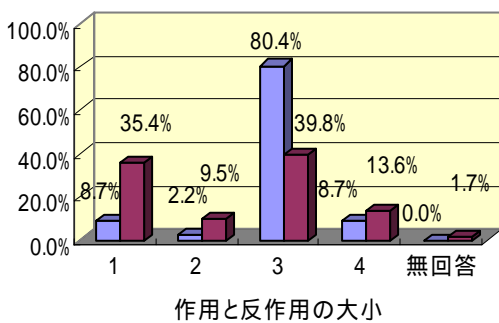
さらに、個々の問題の正答率を見ても、すべての理科1B科目で、6割から7割の問題で期待値を下回った。

しかし、高校物理の最も基礎的な分野とされてきた「力と運動」を工夫して教えれば、今ではそれらを感じ動的に習得できる可能性は大きく開かれてきている。それは、力学教育においてITセンサー（力センサーや距離センサー）や運動分析ソフト、等を効果的に活用することで、以下で示すように「科学的な概念の形成を感じ動的に実現できる」ことが、実証的に確かめられてきているからである。こうした力学分野の再構築をめざした、本来の物理分野のカリキュラムづくりに向けた、私たちの最近の取り組みについて紹介しよう。

3 作用・反作用についての取り組み

学力調査結果では、作用と反作用の理解度は著しく

明と里子の押し合い



低かった。例えば、明と里子の押し合いにおいて、「それぞれが相手に及ぼす力は作用と反作用の力で、お互いに等しい」という正解は、高校生の39.8%、誤答（明が里子に及ぼす力が大きい）は35.4%であった。

どの千分の1秒の一瞬にも、作用と反作用は等しいことを、力センサーによって感動的に体験できる。その授業を受けた大学生は、同じ問題のポストテストにおいては、80.4%が正解で、誤答はわずか6.7%だった。このように、作用と反作用の授業での力センサー活用

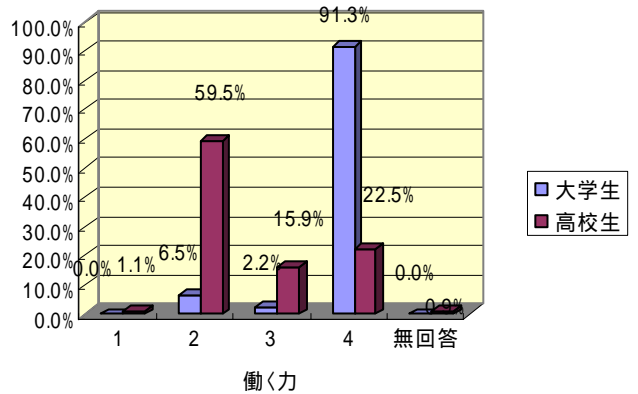
による授業はきわめて効果的であったと言える。

4 運動の法則についての取り組み

「力と運動」に関する子供たちの素朴な概念の多くは、実は、ガリレイやニュートンが克服したアリストテレス的な「力と運動」の概念にかなり類似している。その多くは、摩擦が支配的な世界における「押せば動きだし、押すのをやめると止まる」という日常経験に起源を持つ。そのような日常経験を体系的自然観として集大成したのがアリストテレスだった。素朴概念の根強さはこうした日常の経験法則を起源とするからで、それを克服して本格的な科学概念をいかに形成するかが力学教育の課題であり工夫し甲斐のある問題なのだ。

次の学力調査結果は「これまでの指導要領や教科書に示されたやり方ではこのような課題の基本的な解決法をもたらずものではなかった」ことを意味している。

ボールの投げ上げ



ボールを投げ上げたときの「v-t グラフをかけ」、また、上昇中、最高点、下降中、のそれぞれにおいて「どのような力がボールに働いているか。次のどれか？」。

- | | | | |
|---|-----|------|-----|
| | 上昇中 | 最高点 | 下降中 |
| 1 | 上向き | 上向き | 上向き |
| 2 | 上向き | 力働かず | 下向き |
| 3 | 下向き | 力働かず | 下向き |
| 4 | 下向き | 下向き | 下向き |

高校生対象の学力テストの結果は、上図のようで、正答率は22.2%、誤答率は59.5%であった。

運動分析ソフトの活用によって「ボールの落下運動の予測を感じ動的に検証する」という私たちの授業を経験した大学生に対しても、同じ問題でのポストテストを行った。上図はその結果を大学生と高校生を比較出来るように表示したものである。大学生の正答率は91.3%に達し誤答率は6.5%だった。

v-t グラフについては、高校生は23.1%という低い

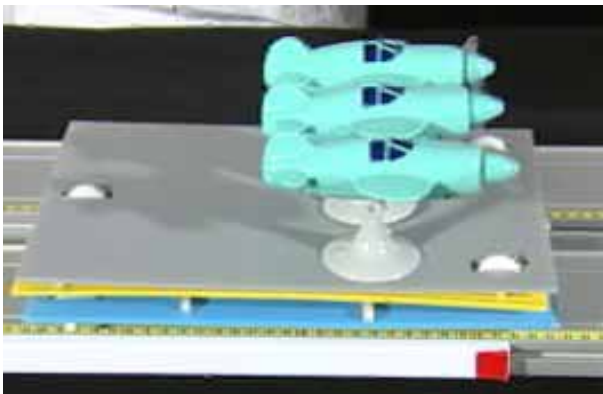
正答率だった。これに対して、大学生はポストテストで78.3%という高い正答率を得た。

私たちの行った授業では、抵抗が極小となるような超軽量の「携帯ミニ扇風機を載せたベアリング車輪付き力学台車（下の写真を参照）」を用いた[2,3]。

このような工夫により、面白い授業実践が沢山蓄積できるようになった。こうして、「運動分析ソフトや距離センサー」で「その運動の予想を即座に検証する感動的な授業」が可能となり、中学校や高校での「明るい未来のカリキュラム」が展望できるのである。

その「手作り超軽量力学台車」は身近で安価な材料による「ものづくり」実習も兼ねた授業としても好評である。しかも、従来型の重くて高価な力学台車（記録タイマー用テープを安定して引くための）に比べ、軽い分だけ摩擦がより無視できる世界（摩擦力は抗力＝重量に比例するので）が容易に実現できる[2,3]。

「記録タイマーと重い力学台車」という従来型の固定概念を大転換した「携帯扇風機を載せた超軽量力学台車とIT活用」教材によって、摩擦のない世界の運動法則を予測し、それを感動的に検証して、摩擦が支配的な日常世界の素朴概念を克服する授業が実現できた。



さらに、台車の推進力を変化させるには、上図のように、幅の広い手作り台車の上に携帯扇風機を必要数だけ乗せればよいのがこのシステムの優れた点である。

力学台車を同じ質量に保ち「ミニ扇風機の推進力を1から3倍」に変化させて加速度の変化を調べる。さらに、推進力が一定の時に力学台車系の質量を1から3倍まで変化させて加速度はどうなるかという課題にも挑戦できる。実は、従来型の重い力学台車では2-3台重ねると、摩擦力が増大して、少しも動かなくなる。

5 「抵抗の大きな世界」の格好な教材

今や、摩擦が大きな日常的な世界を分析する準備が十分に整ったので、空気抵抗や水の粘性抵抗などが支配的な空中や水中での物体の運動を解明出来るかどうかを見てみよう。それは私たちが陥りやすい素朴概念を作り上げた「抵抗の支配的な世界」での日常体験の理解であり、アリストテレス的自然観の起源を解き明かす醍醐味さえ期待し得るものである [2,3]。

「紙やアルミのカップ型容器」の落下実験

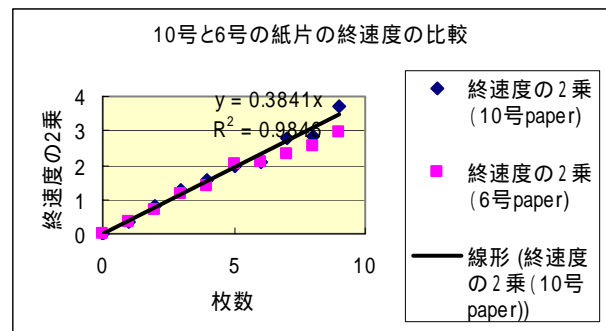
非常に軽い「紙やアルミのカップ型容器」を空中で落下させる実験をする。紙カップを重ねる枚数を変化させることで下向きの重力を自由に換えられる。

この落下実験では、軽い紙のような素材ほど「空気抵抗が支配的な世界」をうまく実現する。弁当のオカズ入れ入れに使うアルミ片の間に挟んである紙カップは、特に軽いので10枚前後重ねて落下させても、すぐに終速度に達する。力学台車の場合は「軽いほど抵抗が無視できる世界を実現できた」とは対照的である。



抵抗が支配的な世界では、1秒間に、紙カップの上面積 S の面積が、長さ V （落下速度）だけ動いた時の円筒の体積（ $=SV$ ）の空気分子が、1秒間に紙カップに衝突する。それぞれの空気分子が平均して V の速度を受け取る。そのときの運動量の変化は SV^2 に比例する。この運動量の変化が、空気がカップに及ぼした抵抗にあたる。従って、速さの2乗の空気抵抗を受ける。そのため、速度と共に抵抗は急速に増加し、すぐに紙カップの下向きの重力を打ち消す大きさに達する（終端速度になる）。また、 S/m が等しい相似形の紙カップ（又は、アルミカップ）は、その大きさによらず（3号から10号までの大きさの如何にかかわらず）すべてが同じ落下運動をする。このような空気抵抗が支配的な世界（アリストテレス的世界）における特徴的な「終速度に関する美しい法則」を調べることができる。

実はアリストテレスの説のように（終）速度は重さ（重ねた枚数）に比例する」のでなく「重さの平方根に比例する。空気抵抗が支配的な世界でも、ニュートンの運動法則は「アリストテレス説を超えた見事な規則性」を予測し実証できる。その終速度の2乗は枚数に比例することが、その終速度の2乗と枚数との関係をグラフ化した次の図から、明瞭にわかる。



前述の「3号から10号まで、その大きさの如何に

かわらず、すべて同じ落下運動をするという美しい法則に従う」ことも、上図のように「同一枚数では6号と10号の紙片は同一終速度で」「終速度の2乗は枚数に比例する」ことから確認できる[2,3]。

紙とアルミのケース(6号、8号、10号等)を、重ねて落下させるとどうなるか、ビデオポイントで落下速度と空気抵抗との関係を調べ、終速度を測定しよう。

加えて、次のような予測・検証実験をすると、生徒の探求心が高まり、さらに意義深い探求活動となる。

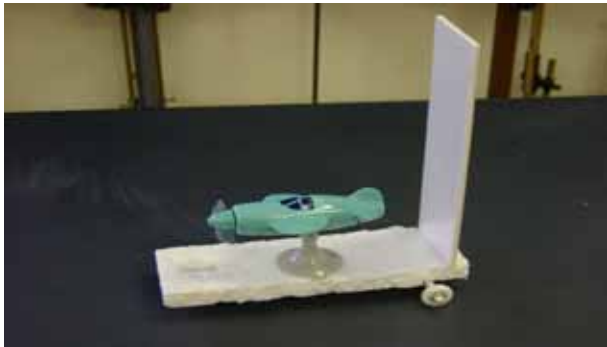
1 10号の紙片1枚と、6号の紙片1枚とを同時に落としたときどちらが早く落ちるか?アルミでは?

2 アルミ片と紙片を同じような落下をさせる方法はアルミ片1枚 に対し 紙片は何枚か? ; 1、2、3、4、5、6・・・枚のどれか?

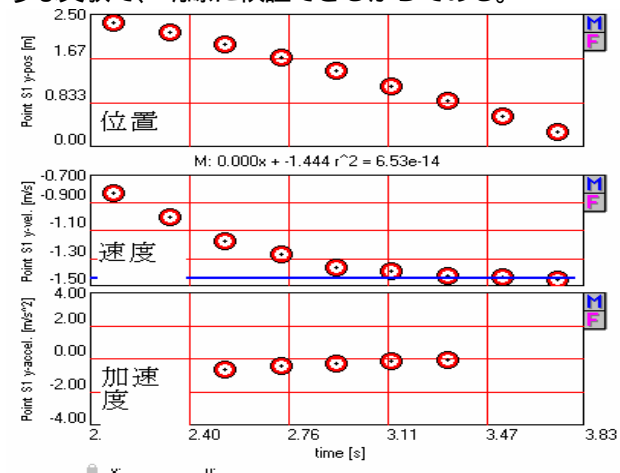
3 紙1枚、紙2枚、紙4枚、紙9枚をほぼ同時に着地させるには紙1枚の時の約何倍の高さから同時に落下させるか?

6 風板をつけた軽い扇風機台車の空気抵抗

体育館の広い床を用いて、次図のような「面積を変化できる風板」を付けた「軽い扇風機台車」で「空気抵抗の面積依存性」を調べることは興味深い実体験となる。実際に、「空気抵抗は風板の面積に比例し、台車



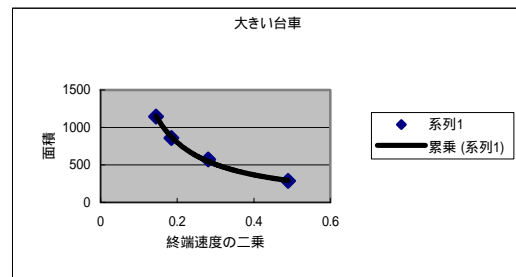
の終速度の2乗は面積に逆比例する」ことが、次のような実験で、明瞭に検証できるからである。



この図は、比較的大きい台車に 1144cm²の風板を付けた場合をビデオポイントで分析したx-t、v-t、a-tグラフである。図は、中央のv-tグラフは、すぐに水平

になり、明らかに終端速度に達していることを示している。そこで、各風板の面積を次々と変化させて、終端速度の大きさがどう変化するかを求めることができる。次は、その結果をグラフにしたものである。

この実験結果から、「空気抵抗は風板の面積に比例し台車の終端速度の2乗は面積に逆比例する」ことが、運動分析ソフトを用いて検証できる[2,3]。



水中の運動

さらに、こうした現象は水中ではどうなるか調べると面白い。具体的には、同じ形で質量だけが変化するような物体を次々と水中を落下させて終端速度を求める実験や、水中での振り子の減衰振動を実験して運動分析ソフトで検証するような教材の開発を行った。

水中では、物体は速度に比例する粘性抵抗を受ける。そのため、物体の形が一定であれば、終端速度はその質量に比例するという美しい法則性が得られる。

こうした、水中を落下する物体の終端速度や、水中での振り子の減衰振動の実験、等をIT活用によって詳細に分析し、デジタル化・視覚化して、何度も感動的に実体験する授業実践についても報告する。

動画DVD「リメディアル フィジックス」[4]

最後に、これらの成果を含んだ力学教材の集大成として、実験動画DVD「リメディアル フィジックス・力と運動([4])」を制作・完成したので、その特徴的部分を実演して紹介しよう。現場の教師が、このDVD活用法も含んだITセンサーや運動分析ソフトを思いのままに自由に活用した新しい科学教育の展開ができるように、講習会、研修会、ワークショップなどを各地で試みてきた。こうした新しいIT活用法の実習・普及活動や力学授業法の改善の取り組みも報告する。

参考文献：

- [1] 平成14年度高等学校教育課程実施状況調査(国立教育政策研), http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/16/01/04012302.htm
- [2] 「力と運動の素朴概念を転換するIT活用法の有効性」、『教育実践総合研究』新潟大学教育人間学部附属教育実践総合センター研究紀要, No.2(2003), pp.39-62.
<http://yuyu.ed.niigata-u.ac.jp/report03>.
- [3] 「ITを活用した力学教授法は誤概念を克服するのにどれほど有効か」『理科教室』星の輪会刊 2004年3月 pp.54-59.
- [4] メディア教育開発センター企画、小林・田中制作担当、大学物理教育協議会：江尻・並木監修、2004年6月発行。