

仮説を重視した課題研究の試み

— 空気抵抗のある落下運動の教材化 —

山下 雅文

高等学校1年生総合理科の課題研究として「空気抵抗のある物体の落下運動」を取り扱った。課題研究に入る前に、素朴概念についての調査を行なった。その結果、生徒は空気抵抗は物体の質量には関係せず、物体の大きさによって決定すると考えており、物体に運動についても、重力との合力で考察することができず「空気抵抗が大きなものほどゆっくりと落ちる。」という結論を持っていることが分かった。調査結果を生徒に示し、空気抵抗の特徴の仮説を班討議させ、実験で検証した。実験で使用したコンピュータを利用した計測装置は自作した。

予備調査、仮説の設定、実験、まとめという流れの各段階で討議を繰り返すことで、生徒の興味関心が高まり、科学的態度の育成へとつながったと考えられる。

1. はじめに

旧課程での理科Iの力学分野では、運動の表し方や運動の法則、そして力学的エネルギーの保存について学習した。この中で、摩擦力については取り扱われるが、空気抵抗については触れられなかった。しかし、雨粒の落下運動などは空気抵抗の影響が無視できない。そのため生徒たちは、学校で学ぶ(理想化された)物理と身近な現象とを結びつけることができないことがあった。そして、ややもすると学校での物理は日常の運動とは違うものだという考えを持つ生徒が出てくる恐れがあった。生徒は日常経験より自然に対しての見方、すなわち日常知を持っている。この生徒の持っている素朴概念は学校で物理法則を学び演習をしてもそのまま残ってしまうことがある。

1994年より実施された教育課程で、本校の高等学校1年生では全員が総合理科を学ぶことになった。理科Iで取り扱った力学分野を、この科目ではより実験・観察を充実させ、物理学の歴史を取り扱いながら、生徒の興味関心が高まるよう発展させて展開している。

本研究は、広島大学附属福山高校1年生(41名)を対象として、総合理科の中で力学分野学習後に空気抵抗のある落下運動をテーマとして行なった課題研究について報告する。

2. 本研究のねらいと授業展開

この時点までの総合理科物理分野の学習は、空気抵抗の無視できるある面理想化された状況での現象を扱ってきた。しかし、身近な落下運動には空気抵抗があり、これも物理法則を用いて説明ができる。空気抵抗のある落下運動を課題研究のテーマとすることで、自然界の現象を物理的に見る視点を育て、物理を身近に感じ、これまで学習した法則を拡張して考察できる能力を養うことを目標とした。そして、この取り組みの中で、生徒自身が自らの中の素朴概念あるいはミスコンセプションに気が付き、概念の変換をおこなっていくことを望んだ。

これらのねらいを、達成するために次のような授業展開をおこなった。

① 落下運動についての予備調査(10分)

- ② 課題学習のガイダンスと自由落下の実験（1時間）
 - ③ 仮説の設定（1時間）
 - ④ 実験（2時間）
 - ⑤ コンピュータシミュレーション（1時間）
 - ⑥ レポートの作成（1時間）
- ②以降は、4人～5人の班編成（10班）を行ない、班の活動とした。

3. 落下運動についての生徒の予備知識

課題研究に入る前にすでに学んだ落下運動の概念がどうか、また、空気抵抗についてのイメージ（素朴概念）がどのようなものであるかを調べるため、以下のアンケート調査を行った。

落下運動についての調査
<p>1. 地上1000mの高さから自由落下運動をする物体があるとします。この物体が地面につくのは何秒後ですか。また、地面での速さはいくらですか。</p>
<p>2. 重力による落下運動で、重力とは逆向きに抵抗力を受けたとします。この抵抗力が重力より小さく、一定の大きさであるとする物体はどのような運動をすると考えられますか。（この抵抗力は空気抵抗と直接関係しない仮想的な力とする）</p> <p style="text-align: center;">1.等速直線運動 2.等加速度直線運動 3.その他</p>
<p>3. 空気抵抗を受けての落下運動で、同じ高さから同時に次の2物体を落下させたとき、どちらが速く地面につくか答えなさい。なお、2つの物体が同時に地面につく場合は、○を記入しなさい。</p> <p style="margin-left: 20px;">① ある物体Aと、同じ体積（大きさ）で質量が2倍の物体B</p> <p style="margin-left: 20px;">② ある物体Aと、同じ質量で体積（大きさ）が4倍の物体C</p>
<p>4. 大きな雨粒Aと小さな雨粒Bの落下について次の各問いに答えよ。</p> <p style="margin-left: 20px;">① 地面付近での速さはどちらが大きいですか。</p> <p style="margin-left: 20px;">② 地面付近で受ける空気抵抗の大きさはどちらが大きいですか。</p>
<p>5. 物体の落下の際に働く空気抵抗はどのような特徴を持つ力だと思いますか。考えたことを書きなさい。</p>

1はすでに学んだ自由落下運動の知識の確認、2は運動の法則の確認である。回答者数39名中、1の時間の計算の正解が32名、速さの計算の正解が22名、2で等加速度直線運動と答えたものが34名であった。回答時間が10分と短かったため計算の正答が少なくなったが、基本的にはすでに学

んだ内容を理解しているものと判断できる。しかし、3、4では次のような結果を得た。（*印が正答）

3の解答

$$\begin{array}{ll} \textcircled{1} \text{ 同時} = 28 & \textcircled{2} \text{ 同時} = 5 \\ A = 2 & * A = 30 \\ * B = 9 & C = 3 \end{array}$$

4の解答

$$\begin{array}{ll} \textcircled{1} \text{ 同時} = 7 & \textcircled{2} \text{ 同時} = 1 \\ * A = 18 & * A = 31 \\ B = 14 & B = 7 \end{array}$$

3より空気抵抗は物体の質量とは関係なく体積（面積）によって決定し、体積の大きなものほど受ける空気抵抗が大きいと考えていることが分かる。4は雨の落下についての質問であるが、日常、大きな雨粒が速く落下し、霧雨のように粒が小さくなるにつれゆっくりと落下していることを観察していると思った。しかし、Aが速いと答えた生徒は半数弱である。これに対して、②ではほとんどがAが大きな空気抵抗を受けると考えている。この結果は3の考え方と共通であり、生徒は空気抵抗は物体の大きさにより決定することを第1に考えていることが分かる。また、空気抵抗が大きいものはゆっくり落下していると考えており、物体の運動を重力との合力で考察することができていない。空気抵抗と水平面上での摩擦力による運動との比較で考察しているのではと考えられる。以上のように、生徒のイメージをまとめることができるが、5より、中には空気抵抗は物体の大きさのみでなく速さによっても変化するものであると指摘している生徒もある。物体の加速度は空気抵抗の大きさだけでなく重力との合力で決定される。そのため重いものと軽いものでは終端速度が違う。この部分の考察を、班で仮説の設定をする際に討議させた。

4. 仮説の設定

生徒の空気抵抗についてのイメージ（上記調査結果）を生徒に紹介し、空気抵抗の特徴についての仮説を作る作業を始めにおこなった。この仮説を作る際の指標にと、次のような資料を利用した。

[仮説の設定]

予備調査では、ほとんどの生徒が空気抵抗が運動とは逆向きに働くことを指摘している。しかし、その大きさは一定であるか、運動に伴って変化するかは意見が別れてる。また、その大きさについても、物体の大きさ（断面積）に関係していると答えた人は多かったが、断面積だけに関係するか、物体の質量にも関係しているかなどの意見が別れた。日常体験と、これまで学んだ知識から空気抵抗を受けた物体はどのような運動をするか、また空気抵抗がどのどのような特徴を持つか班で話し合ってみよう。

① 運動のようすについて

運動の法則より空気抵抗が次のような力であったとすると、物体がどのような運動をするか考えてみよう。また、その $v-t$ グラフの特徴を考察しよう。

- I. 一定の大きさで、重力より小さい大きさの力が働く場合
- II. 一定の大きさで、重力より大きい大きさの力が働く場合

Ⅲ. 抵抗力が運動とともに大きくなる場合

($v-t$ グラフの予想図)

② 空気抵抗を決める要素について

どのようなものが空気抵抗を大きく受けるか

運動の法則より①でそれぞれの場合どのような $v-t$ グラフとなるか、各班正しい結論にたどり着いた。これより、Ⅱのケースはありえないことが分かる。

以上のような流れで、各班の仮説を作ったところ、空気抵抗がⅠと考えたのが2班、Ⅲと考えたのが6班、決められなかったのが2班であった。Ⅰと考えた班は、浮力との比較を行なっている。これに対しⅢと考えた班は、自転車で受ける空気抵抗を想起したり、凧上げの際の速さと抵抗の関係、そしてパラシュートでの落下運動などを根拠に仮説を立てていた。また、空気抵抗を決める要素については、断面積のみ4班、断面積と質量が5班、結論に至らなかったのが1班という結果であった。このような仮説を作ることで、どのような実験をすればよいのかについての実験計画が各班明確になった。

5. 実験とシミュレーションについて

空気抵抗の性質を測定するには、風洞実験が有効である。しかし、今回は生徒が過去の実験で原理を良く知っている落下運動の測定から空気抵抗の特徴を探る試みを行なった。

落下運動の計測・分析はコンピュータの利用により高い精度で行えるようになった。その測定方法では光センサーを利用した装置が考案されており、この光センサーを物体が遮るときの抵抗変化をコンピュータのマウス端子に入力し、計測する方法が杉本によって報告されている²⁾。また、同じく光センサーとマウス端子を利用するが、バーコードテープの利用により、センサーは1個で良いという簡易型の方法が石原によって報告された³⁾。

上記を参考に、今回はセンサーを15cm間隔

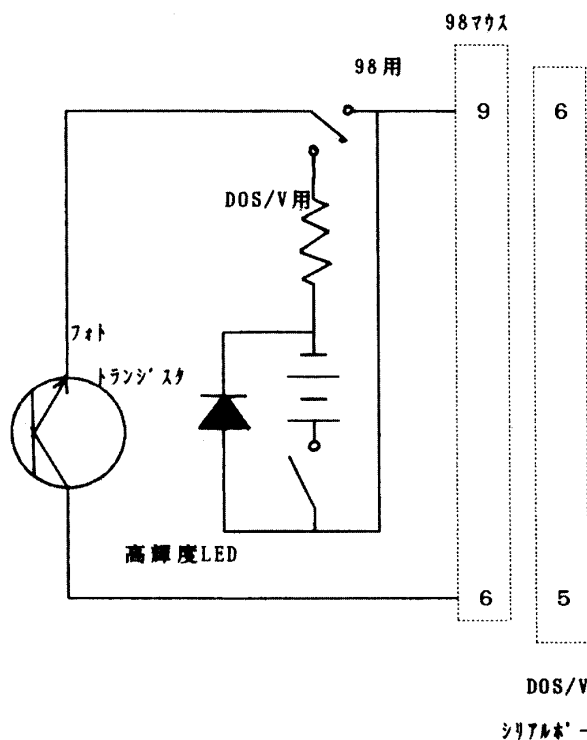


図1 光センサーを利用した測定装置の回路図

に10個直列に並べたもの(測定装置A)と、バーコードテープを利用する簡易型のもの(測定装置B)の2種を自作し測定に用いた。前者は物体と非接触の状態で135cmの落下距離の運動を分析できる。測定する物体もある程度大きなものも可能になるようにしている。この装置で、ピンポン球やスポンジなど大小のいろいろな物体の落下運動を測定・分析できる。また、透明な筒を利用することで、空気抵抗の影響の大きな落下運動を分析することができた。ただし、高輝度LEDや光セ

ンサーを10個ずつ使用するため、製作費用が1万円程度必要となる。これに比べ、後者は1000円程度で製作することができる。しかし、測定装置Bではバーコードテープが装置の小さなすき間を動くので、落下距離を長くするにつれ接触する恐れがある。特に空気抵抗の影響を受ける運動を記録する場合、落下距離が1 m程度は欲しい。

バーコードテープを薄いビニール板で製作し、図のように、上部に空気抵抗の影響を大きく受ける円錐状の物体（面積を数種類準備）、そして下部におもりをつけることで、①同じ断面積で質量が違ふ物体の場合の測定。②同じ質量で断面積の違ふ場合物体の測定をすることができる。これにより仮説の定性的な検証ができると考えた。しかし、この測定には熟練が必要で、生徒実験では思うほどの結果を得ることができなかった。



図2 測定装置A

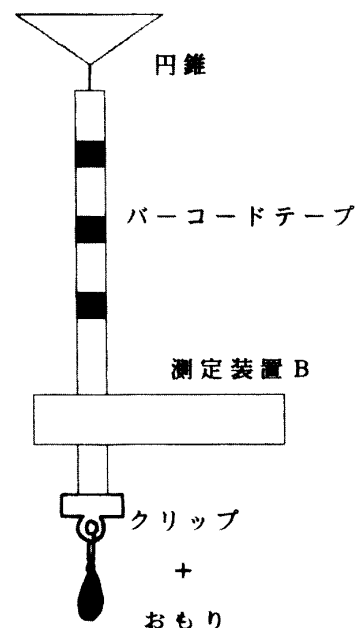


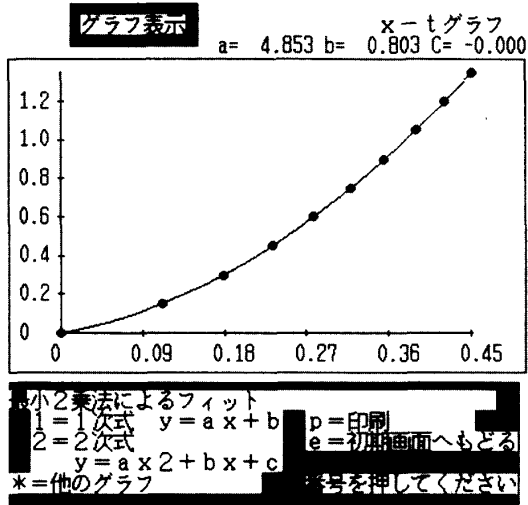
図3 測定装置Bでの計測

今回のコンピュータはDOS/V機を利用するので、信号の入力はマウス端子ではなくシリアルポート（RS232C-9ピン）に行った。このポートは本体に2個用意されており、通信用に利用されるものである⁴⁾。各端子は7つのI/Oポートアドレス（3F8H～3FEH, 2F8H～2FEH）を持っているが、今回は3FEHのモデム・ステータス・レジスタを利用した。

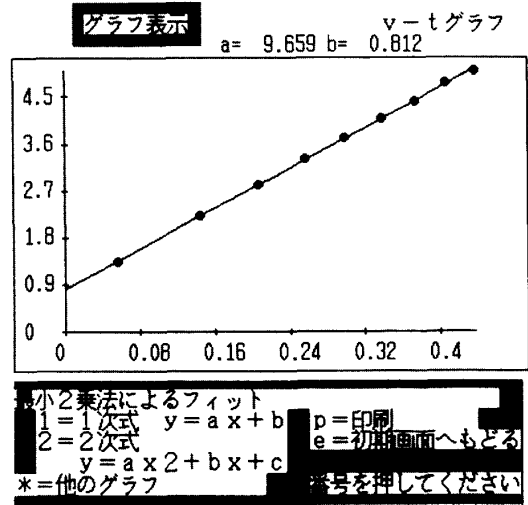
計測・分析プログラムはUBASICで自作した。UBASICはNEC98用、DOS/V機用、FMR用と3種類準備されており、それぞれの上で全く同じプログラムが動くというフリーソフトである⁵⁾。NEC98とDOS/V機の双方で測定できるようにと、今回はUBASICを利用し、装置も双方の機種で利用できる形にした。作成したプログラムは、物体の移動時間を測定し、 $x-t$ グラフ、 $v-t$ グラフ、 $a-t$ グラフ、 $a-v$ グラフが作成できる。また、それぞれのグラフで最小2乗法を利用して1次式と2次式をフィットさせることができる。

次に、測定装置Aを使った3種類の測定結果を示す。

①おもりの落下運動

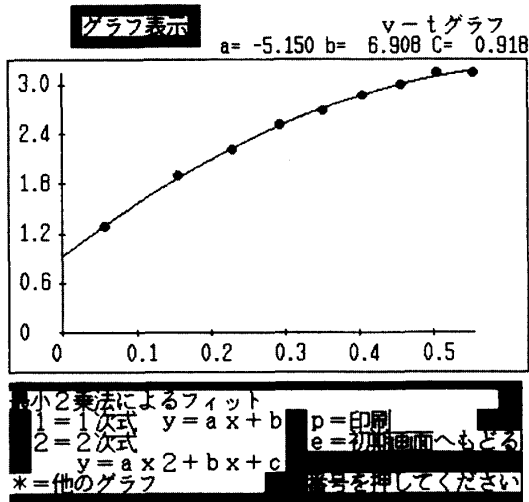


x - t グラフ

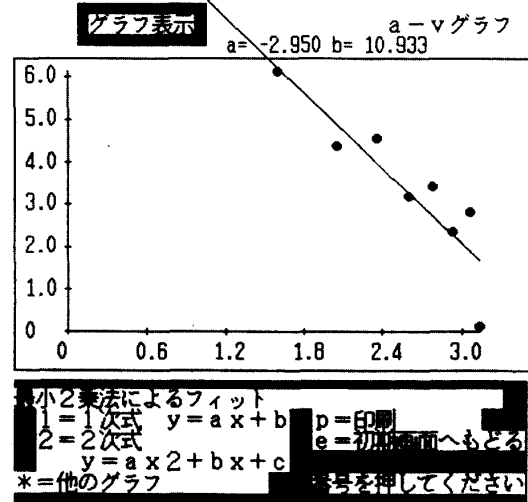


v - t グラフ

②スポンジの落下運動

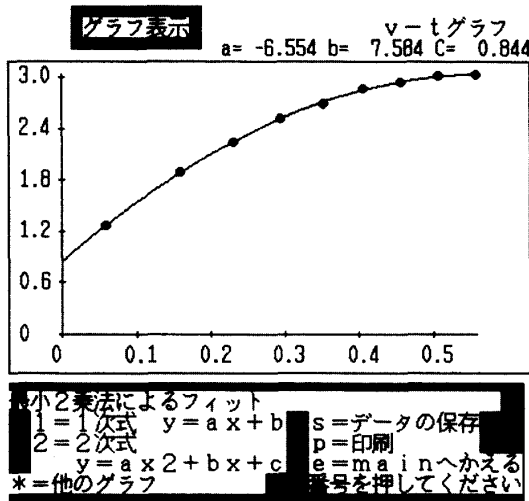


v - t グラフ

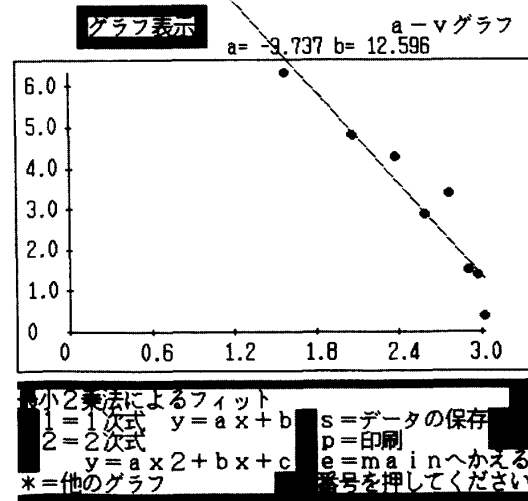


a - v グラフ

③筒の中を落下するピンポン球



v - t グラフ



a - v グラフ

①より空気抵抗の影響が無視できる場合の等加速度直線運動のようすを調べることができる。また、②、③より空気抵抗を受け物体が終端速度に近づいていくようすを見ることができる。②、③の図中の実線は目安として記入した2次曲線と直線であり、落下運動の特徴を示すものではない。

コンピュータシミュレーションは、Knowledge Revolution社のInteractive Physicsを利用した。このソフトは、画面の中に重力場や電界などの力の場を設定し、その中でいろいろな物体がどのような動きをするかをシミュレートする。ばねや斜面上の運動、跳ね返り、惑星の運動、剛体の回転など様々な運動を描き、その位置や速度、加速度、力などを表示、グラフ化できる。初速度や力なども自由に設定でき、生徒実験が難しい現象も仮想的に扱える。ただ、剛体の落下運動の際、実際には形により空気抵抗が違って、回転運動などが生じ複雑な運動になるが、そこまでのシミュレートはできない。1本あたりのコストも安くコンピュータルームでの利用に適したものである。

6. 結果

スポンジや箱の落下実験を進める中で、各班とも空気抵抗を受ける物体の $v-t$ グラフが直線ではないことに気付いた。断面積や形の違いについて調べるために落下させる箱の向きを変えたり、板の落下運動を調べる班があった。質量の違いについては、スポンジに水を含ませ落下させたり、箱の中におもりをいれて落下させる工夫が見られた。また、質量の違いについては、実際の実験だけでなく、シミュレーションを行なうことで現象の理解に大いに役立った。実験やシミュレーションで空気抵抗を受けた落下運動では、時間につれ終端速度に近づくこと、そして、大きさが大きい物体ほど速く一定の速さに近づき、その終端速度も小さいということについて理解が進んだ。一方、同じ大きさで、質量の違うものでは、重いものが終端速度が大きい。また、その時の空気抵抗は重力に等しいので質量の大きいものにはたらく空気抵抗が大きいことが分かる。しかし、この点の考察について生徒の理解が十分ではなかった。物体に働く力の関係や運動方程式への拡張は、限られた時間内で生徒の自主的活動だけでは難しかった。そこで、実験がある程度終わった段階で、空気抵抗が速さに比例する場合どのような運動になるかということについて討議させ、理論の紹介をした。

シミュレーションの利用で、終端速度に着目し、終端速度は物体の半径に反比例し、質量に比例するという関係を求めた班もあった。

実験後のレポートでは、「今回のテーマが難しかった」という意見が多数あったが、それに加えて、「仮説を立てて実験をすることは初めてでおもしろかった」、「始めに思っていたことが全然違って大変ショックだったけど、そのぶんやりがいがあった。このように本質に近づけるような勉強が好きだ」などの好意的意見が多かった。以下、特徴的な生徒の感想を挙げる。

・空気抵抗というのは、いつも身近にあって何だかすぐ分かりそうだけど、実はとてもやっかいで分かりにくいものだった。コンピュータを使えば実験でのデータをうまくいかせていけるし、正しい情報が得られるので実験の無駄を無くすことができました。先生が授業の中でおっしゃっていたように、雨粒一つでも空気抵抗を受けている。つまり自然の中にも空気抵抗があるので、身近にいろいろ考えてみるとおもしろいと思いました。

・落下するときに空気抵抗を受けるという、ひどく日常的というかありふれたことのようにとてしまいがちな問題を、これだけの実験や理論によってもすべて分からないことに驚きましたし、新たに、科学への関心を持ちました。

各自が現象がどのようになるのか予想し、現実の運動を想起し仮説を立て、実験で検証するという流れに対して、生徒は高い関心を示した。また、実験も、3時間では足りず半数の班がこれに加えて授業以外に2～3時間の時間をかけて実験を行なった。しかし、空気抵抗という課題の難しさのため、空気抵抗のある運動の定性的理解は進んだが、理論的な理解は十分なもとはいえない状況で終了してしまった。

7. 反省と考察

物理の授業では、落下運動などの自然現象を取り扱う際、まず空気抵抗や摩擦などのない（理想的な）ものを考え、そこにある法則を導く。しかし、理想化され現象のみを扱うので終わったのでは、生徒は身の回りの自然現象に目を向け、説明する力はつかない。逆に、学校での学んだこととは相いれない素朴概念を強固に持つ原因になる場合がある。落下運動についてはアリストテレスで代表されるように、日常生活からは、学校で学ぶ自由落下とは程遠い素朴概念を作りやすい。今回、空気抵抗を題材に、身近な自然現象そのものを扱い、この素朴概念を物理概念に変容させるよう取り組んだ。

中山は、「素朴概念が物理学で認められている概念へと変容するためには、生徒が事象を目の前にして、素朴概念の説明力の限界を感じ、それよりも物理学の概念が理解可能で、もっともらしく、大きな説明力を持つことを納得しなければならない。」と指摘した⁶⁾。今回の展開で、予備調査で生徒の考えをまとめ、それと班討議により仮説を作り、実験に入る。この流れを作ることで生徒の考えの問題点がある程度明確になり、素朴概念を変容させるきっかけづくりに役立ったと考える。また、実験に主体的に取り組む姿勢が見られ、各班の実験それぞれに工夫が見られた。しかし、空気抵抗は、物体の大きさや質量および速さに関係しており、全員が実験で正確な概念をもったとはいえない。実験については、コンピュータを用いた計測とコンピュータシミュレーションを活用することが有効であった。

今回の研究を通して、生徒が自然現象の説明に速さや加速度、力という量を適切に扱えない場面が見られた。これは、生徒の素朴概念あるいはミスコンセプションと密接な関係がある。また、「重いものと軽いものが同時に落下する」という概念は、これまでの体験から習得したのではなく、ガリレオの落下運動の逸話を根拠に概念を組み立てている生徒がいることも分かった。

今回の研究では生徒の用いる言葉の間違いまで掘り下げての指摘や、素朴概念が何を根拠に各自作られているのか等の分析はできていない。この点の継続した研究と、日頃より仮説を作らせながらの授業展開を工夫することが重要であろう。また、課題研究のテーマとして空気抵抗が適切かどうか。また、空気抵抗を扱う際、理論的なものをどこまで要求できるかなどもこれからの課題としたい。

8. 参考文献

- 1) 長澤武ほか：「本校における新教育課程『総合理科』の構想」，中等教育研究紀要，第34巻，pp63-69，1995，広島大学附属福山中・高等学校
- 2) 杉本良一：「サイエンスツールとしてのパソコンの活用に関する研究」，鳥取大学教育学部研究報告，第33巻，1991
- 3) 石原哲：「簡単な自作インターフェイス・バーコードテープ利用の物体の運動測定システム」，FD教材データ11月号，学研，1994
- 4) 芦達剛：DOS/Vテクニカルリファレンスマニュアル 増補版，ソフトバンク，1995
- 5) 木田祐司：UBASIC86 多倍長計算用BASIC 第8.7版，日本評論社，1994
- 6) 中山迅：「高等学校理科における物理教育の課題と展望」，理科の教育，Vol.42 pp396-398,1993，東洋館出版