

生徒実験を分析しながらすすめる物理の学習

川角 博

東京学芸大学附属高等学校

〔要約〕 生徒実験により物理現象を調べ、そのデータに基づいて物理現象の仕組み・法則性を分析・理解し、法則を具体的な現象に演繹的に適用して応用的な理解をはかる学習を実践した。この学習の流れを具体例を通して紹介するとともに、ここで得られた具体的なデータを示す。

【キーワード】 生徒実験、物理授業、運動の法則、動摩擦力、最大摩擦力、重力加速度

1 はじめに

表題の学習スタイルは、自然科学の学習としては当たり前のことであり、目新しいものでもない。実際、中学理科の学習の基本スタイルになっている（少なくとも教科書では）。しかし、生徒実験が余りにもなされていないとよく聞くので、ここにあって当たり前前のことを報告することとした。

自然現象にアプローチすることのない物理の授業はあり得ない。物理の学習では、自然界の仕組みとその見方考え方を学ぼうとしているのである。つまり、生徒実験無しに、物理の授業はあり得ない。

興味を引く演示実験をすることも悪くはない。しかし生徒実験を演示実験に置き換えはできない。

2 授業の基本構造

私の原則的な授業の流れを以下に示す。

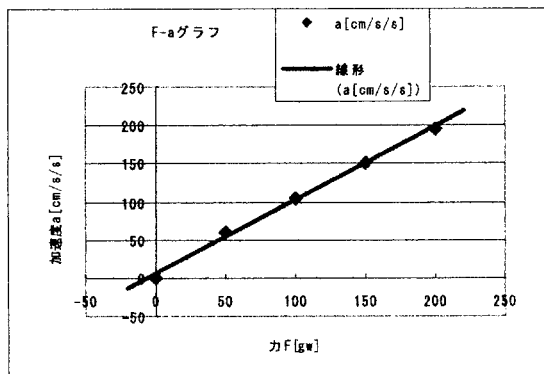
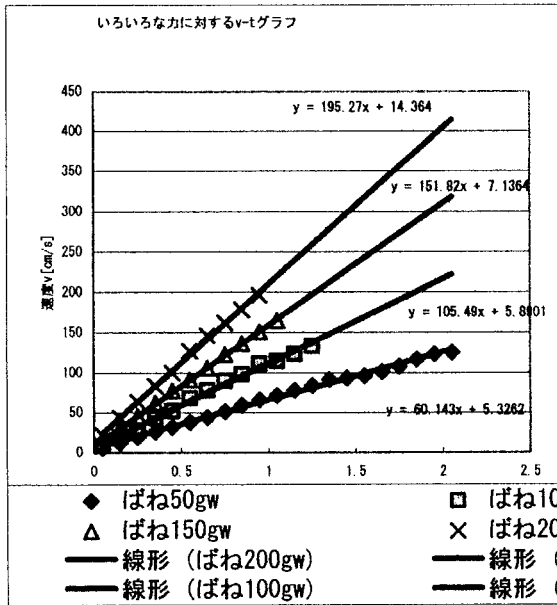
- ① 導入的な学習：現象の何について知りたいのかを明確にする。これを知るために必要な知識や技能を獲得する。
- ② 生徒実験：目的に向かって生徒が実験データを集め、分析解釈する。
- ③ データ分析と理解：生徒実験と同じ条件で実施した実験データに基づいて、そのデータについて分析・解釈し考察し、およその法則性を捉えたり、現象の意味を理解したりする。
- ④ 物理法則の理解：得られた物理法則が自然界の現象をうまく説明していることを、他の現象などに適用して理解を深める（問題演習も含む）。
- ⑤ 応用的理解：具体的・応用的な現象に対して、獲得した物理法則を実際の現象に適用して、結果を推測した上で、実験方法も企画し、結果を分析・考察し、

発表する。

3 授業の流れの例

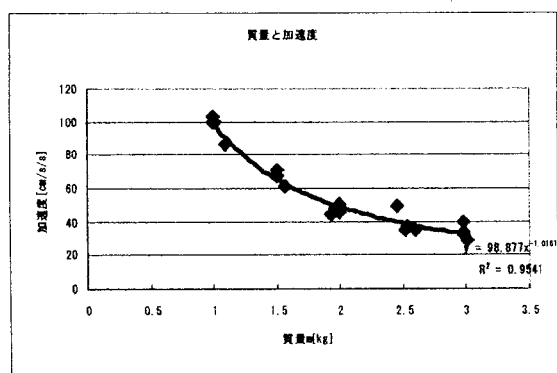
運動の法則に関わる学習の流れを例として示す。実験後は、レポートまたはグラフやワークシートなどによる報告を課している。

- ① 列車の $v-t$ グラフの解釈： $v-t$ グラフを読み、描けるようにする練習。加速度についても理解する。
- ② 生徒実験「斜面上での力学台車の運動」：記録タイマーを使って $v-t$ グラフを描き、加速度を求めることができるようにする。
- ③ 結果の分析： $v-t$ グラフの正しい表現とそれが表すこと、等加速度運動の定量的な理解
- ④ 生徒実験「力が運動に及ぼす影響」：力がはたらいっていると、運動の様子がどう変化するかを知りたい（中学での学習の発展）。ゴムひもを伸ばしてから力学台車を放し、ゴムひもが縮むとともに加速度がどうなるのかを調べる。
- ⑤ 結果の分析：はじめ、ゴムひもの伸びが長く、大きな力が力学台車にはたらき、 $v-t$ グラフの接線の傾きが大きい。やがて伸びが小さくなるに従い、 $v-t$ グラフの傾きが小さくなる。これらから力と加速度との間に何らかの関係があることに気づき（中学で学んだ、「力は運動の様子を変える原因である」が、「力は加速度を生じる原因である」と理解を発展させる。この関係を探る必要性があることを認識する。さらに、ゴムひもを放した後の $v-t$ グラフは右下がりの直線になる。これをどう解釈するかも考える。
- ⑥ 生徒実験「力と加速度」：班ごとに、4種類以上の力で力学台車を引き、 $v-t$ グラフから加速度を求め、力と加速度の間にある法則性を探る。



力学台車の質量は約 1 kg, 力と加速度の比例関係が分かる。

(3) 運動の法則 (質量と加速度)

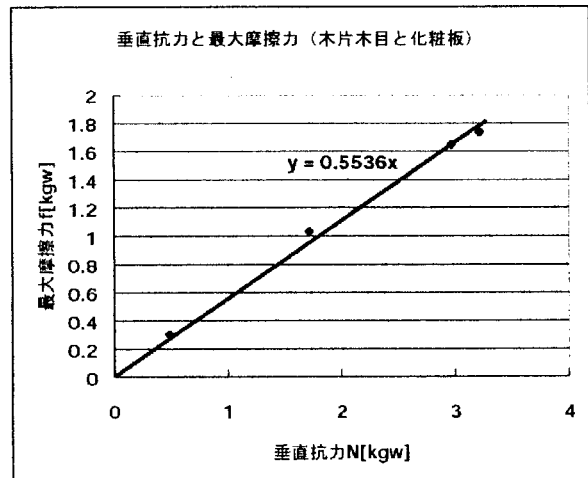
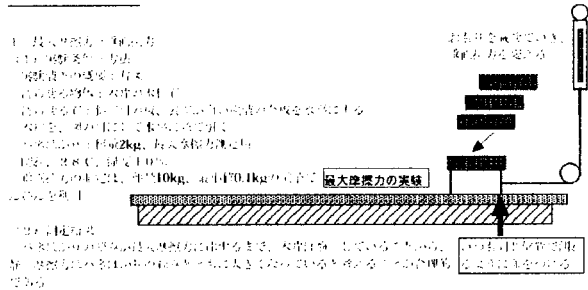


加えた力は、各班ともに 100gw, 累乗回帰から、質量と加速度が反比例していることが分かる。

(4) 静止摩擦力

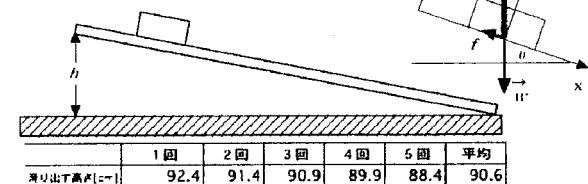
静止摩擦係数は、グラフから 0.55 程度と求まる。

摩擦角の実験分析説明図にあるように、斜面上の物体にはたらく抗力の面に平行な成分を摩擦力、垂直な成分を垂直抗力と呼んでいる。



3. 摩擦角

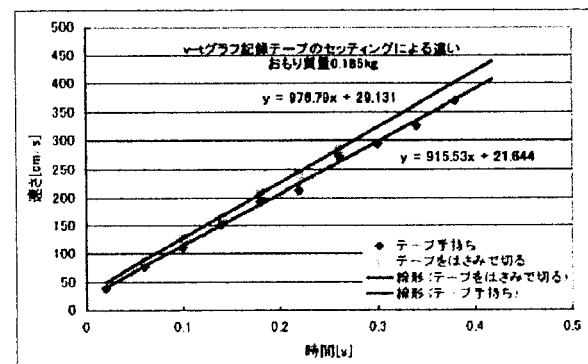
最大摩擦力の測定をした物体と板を壁、斜面上の物体が滑り出し高さhを試した。その結果を表に示す。斜面の長さには182cmであった。



$$\begin{aligned} \vec{W} &= R + \vec{w} = (mg \sin \theta, -mg \cos \theta) \\ \vec{R} &= (-f, N) = (-mg \sin \theta, mg \cos \theta) \end{aligned}$$

滑り出す直前で、 $\mu = f/N = mg \sin \theta / mg \cos \theta = \tan \theta$ となる。つまり、滑り出す直前の角θのとき、 $\tan \theta$ は、静止摩擦係数となるはずである。この角度を摩擦角とよぶ。実験結果のh = 90.6cmと斜面の長さ182cmから、 $\tan \theta = 0.57$ を得る。1の逆接関数 $\theta = 0.55$ である。

(5) 重力加速度

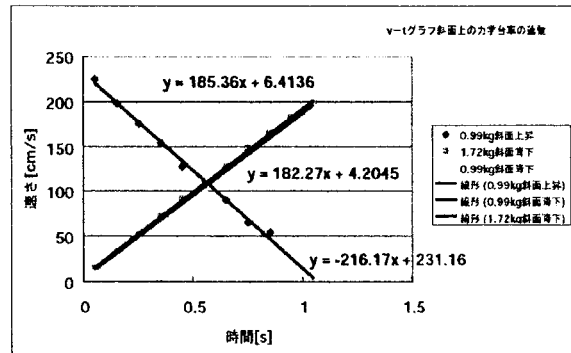


185gのおもりの落下を打点式の記録タイマーで記録しても、テープのはためきさえ無くす工夫をすれば、ほぼ $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ が得られる。等加速度運動していることから、落下中の物体にも一定の重力 (mg)

がはたらいていることが分かる。

2 斜面を降下する物体の加速度

長さL 182cm、高さh 37.5cmの斜面上で、方学台車の運動を調べた。方学台車が斜面に沿って等加速度運動をしていることから、方学台車は斜面方向に一定の力がはたらいていることが分かる。この加速度は、重力の一部がはたらいていることが容易に想像できるであろう。このため、斜面に降下させた場合と同様に、質量1.72kgの物体を降下する（右側の重力の速度より小さい値だが）実験結果も、ほぼ同様である。しかし、上昇する場合の加速度は、降下するの速度とは違うように見える（グラフが示しているのも、速度の向きと向きだからで、結局、斜面に沿って下向きとなり、降下の場合と同じ向きである）。重力が同じで、斜面が同じならば同じ加速度になる

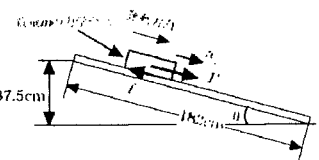


質量[mkg]	方学台車の質量[kg]	斜面方向の力[N]	加速度[m/s ²]
●	0.99	2.1	1.82
○	1.72	3.4	1.85
△	0.99	2.1	-2.16

1の場合、斜面方向に重力により方学台車に働く力Fとする。加速度をa、質量をmとすると、この運動方程式は、

$$F = ma \quad (1)$$

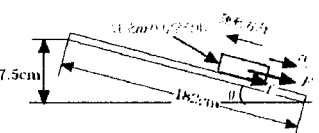
3の場合、斜面方向に重力により方学台車に働く力F（質量、斜面の傾きが同じなので）と同じと考えると



る。加速度をa、質量をmとすると、この運動方程式は、

$$F - f = ma \quad (2)$$

となる。(1)から、 $f = m(a_1 - a_2) / 2$
 $0.99\text{kg} \times (2.16\text{m/s}^2 - 1.82\text{m/s}^2) / 2 = 0.17\text{N}$



この傾斜、下る時は加速度を減速(Fとfが同向きなので)、の昇る時は加速度を増速している(Fとfが逆向きなので)と考えられる

$$F = m(a_1 + a_2) / 2 = 0.99\text{kg} \times (2.16\text{m/s}^2 + 1.82\text{m/s}^2) / 2 = 1.94\text{N}$$

とすることで、この方学台車に働く重力は、 $0.99\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 = 9.7\text{N}$

である。一方、バネばかりの読み(210g)から、この方学台車に働いている斜面方向の力は、 $0.21\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 = 2.06\text{N}$

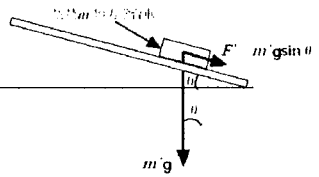
であった。方学台車に働く重力 $\sin\theta = 37.5/182$ (θ は斜面が水平となす角度)を乗じると、 $9.7\text{N} \times 37.5/182 = 2.00\text{N}$

となる。これは先に求めたFとバネばかりの読みとほぼ等しい。つまり、重力の斜面方向の成分が、斜面を下る加減の要因となっているのである

質量1.72kgの方学台車を降下させた場合の運動方程式を、先の図式を使って示すと、

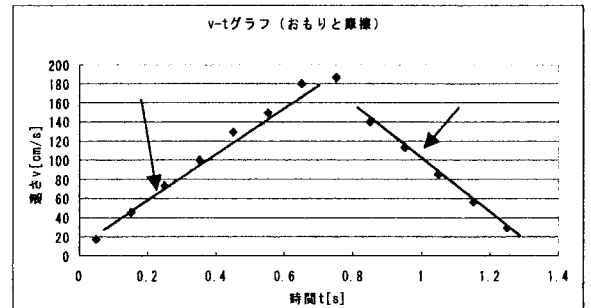
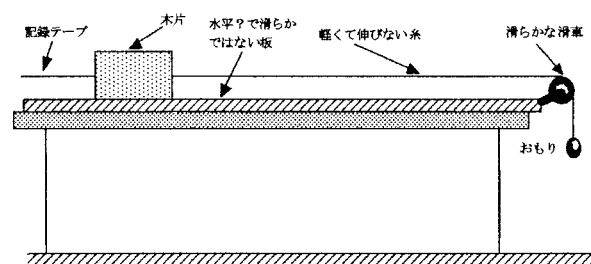
$$F - f = m'a'$$

ここで、 $F = m'g\sin\theta$ として加速度a'を求めると、 $a' = g\sin\theta - f / 1.72\text{kg}$
 $37.5/182 \times 9.8\text{m/s}^2 - 0.17\text{N} / 1.72\text{kg}$
 1.9m/s^2 となる。これは、ほぼ等しい。 1.85m/s^2 と等しい



以上から、地上の質量mの物体に、その運動状態は重力mgが働いていることが分かる。しかし、その重力がどのようにして物体に働くのか、重力の速度9.8m/s²を決定するの方向が、どうなる重力とはなにか等しくして、これからの話では分からない。一つ分かったことは、高さ1mのりんごも高さ10kmの飛行機も落下するから、高さ38kmの月も同様に地球に向かって落下するべきだとの発想は可能であろう(これは同じ物理法則に支配されているのだ)。

右肩下がりの直線的なグラフとなっている。つまり一定の加速度が生じていることが分かる。加速度を生じるためには力が必要である。これが、動摩擦力である。しかも、グラフから、動摩擦力が速さによらず一定値を示していることが分かる。



5 おわりに

私は、生徒実験から得られたデータから物理法則を作り上げるつもりも、教科書にある物理法則を検証つもりもない。「素朴な帰納主義」⁽¹⁾でもつけない。自然界の現象を合理的に説明しようとする物理法則の理解は、自然現象を観測しないことには始まらない。そこで得られる法則性は、場合によっては、かなりアバウトなものでもある。それは、いくつもの試練(検証や現象を演繹的に説明するなど)を経て、やっとみんなが認める(使える)法則となっていく。それでもいつまでたっても完全ではないことは明らかであり、物理法則が自然界の近似にすぎないことも分かる。また、現象を説明するために、用語を明確に定義しなければならないことも分かってくる。

自分たちで得たデータに基づいて、定量的に扱いつつながら物理現象の合理的な説明方法(物理法則)を考えさせるために、このような学習スタイルを取った。データに基づいて分析的に解釈を進めていくと、生徒達の先入観や勝手な定義(価値観)による誤解の様子もよく見えてきた。

参考文献 (1)「理科」の再発見(農山漁村文化協会 小川正賢)

(6) 動摩擦力

次に示すv-tグラフで、おもりが床に着いた後に