

1 実験に対する心構え

(1) 基本データと測定値の有効数字

- 実験での〔基本データ〕(1次データ)は、測定した装置で読み取ることができた値(目盛りから読み取る場合は、最小目盛りの1/10まで)が「有効数字」になる。せっかく、電子はかりのg単位表示で有効数字3桁~4桁まで読めた値を、問題演習のいつもの癖で勝手に有効数字2桁にして記録している人が散見された。実験の記録として〔基本データ〕の表中に示す値は、グラフを描くときや計算に用いるときに使用するための値である。可能な限り有効数字の桁数は詳しく記録しておきたいものであることを知っておこう。
- 実験の記録として、資料値(今回の実験では、地球の重力加速度の大きさ $g = 9.8 \text{ m/s}^2$)を元に計算した結果を表中に示すこともある。このときは、資料値の有効数字によって、計算結果の有効数字が決まるため、表中に記録する値の有効数字の取り扱いには注意が必要である。その表中の値をさらに次の計算に用いて、最終的に求めたい物理量を算出する場合には、本来の有効数字よりも1桁余分に値を記録したものを併記しておくほうが望ましい。これは「誤差の伝播」を防ぐための工夫である。
- 今回の実験レポート見本では、グラフの傾きを比較することを想定した考察であったため、グラフ中には本来の有効数字よりも1桁余分に記録した値をプロットした。実験で複数のデータが取れている場合には、その平均値や標準偏差を用いてグラフを描くことができるが、今回は各班で1つのデータであったため、このように処理した。レポートの内容によって、測定値をどのように扱うべきかを意識してみよう。

(2) 記録の大切さ

- 実験Aでは、走行直後に分銅(糸に吊るしたもの)の質量を測定する。基本データの記録で確認したように、実験で使用した分銅にはキズ等があり、質量が50gでないものも含まれていた。分銅にはたらく重力の大きさ F は、実際に吊るしていた分銅の質量で決まる。表中の記録を勝手に(分銅の質量の平均値)×(吊るした分銅の個数)としている人が散見されたが、その処理でいいのだろうか？
- 実験Bの台車に載せるおもりについて、約1kgのおもりが2つあったので、どちらを載せたかの記録が必要である。また、実験で使った電子はかりは約2kgまでしか測れない。台車+おもり+分銅の総質量は基本データから算出することになる。(有効数字は何桁まで取れるか、よく考えてみてほしい。)
- 各班の紙テープは8本。片っ端から実験してそのままにしておけば、どの条件下の記録かすぐに分からなくなる。大切な記録テープを紛失した人がいたことはとても残念です。

(3) 記録テープの処理

- 運動の法則を確認する実験では、紙テープの代わりにストップウォッチを用いる方法もある。そのほうが簡単にデータが取れるのだが、ストップウォッチによる測定では運動の様子(の時間経過)が記録として残らない。紙テープであれば、変なデータが出たときに、「ここで5mm読み間違ってる」とか「ここが4打点で切られている」なんてミスに気付くことができる。台車と記録タイマーの間で紙テープがたるんでしまった場合の記録もしっかり残る。やはり、面倒でも紙テープを用いたほうが良さそうである。
- 記録テープの雑な処理が散見された。紙テープを切るときはテープに直角に。斜めに切ると1mm程度の誤差はすぐに出てしまう。台紙に貼るときも底辺を揃えないと傾向が見えなくなる。理系なら当たり前丁寧に扱ってほしい。
- $v-t$ グラフから加速度を求める手順をしっかりと確認しておきたい。グラフの傾きを求める三角形を描き入れておけば、どの値を使って求めたのか後で見直すこともできる。また、原点(原点は測定値ではない!)と結んだ直線の傾きを求めてしまうようなミスも防げる。小さい三角形はわずかの読み取り誤差が傾きの計算結果を大きくずらしてしまうので、大きい三角形を描き入れる。これらはデータ処理の基本です。

(4) 再実験

- 明らかに変なデータが出ていて、実験中の操作ミスが疑われる。こんなときは再実験の希望を伝えてください。何が原因だったのか調べることも重要です。突発的なエラーによって生じた結果として処理する場合は、「外れ値」としてそのデータを無視して扱うこともある（ただし、表やグラフにはデータとして残す！）が、再実験においても同様の変なデータが出つづける場合は、そのデータに何か意味があるのかもしれない。新しい発見につながるかも。
- 「外れ値」を嫌ったのか、他の班のデータを借りてレポートしている人がいました。これは絶対にやってはいけません。基本データは各班によって違うはずなのにそれでいいの？「データの改竄を疑われたら科学の道には2度と戻ってこられない」という心構えで真摯に実験に向き合ってください。
- 実験がうまく行かず、一部のデータが取れなかった。他にも確かめたいことがある。こんなときも、都合が付く限り再実験の機会を用意してあげたいと思っています。一つの実験から学ぶことはとても多いのです。

2 理論値

(1) 実験 A

- 台車の質量を M , 分銅 1 個の質量を m とし, 糸の張力の大きさを T とおいて, (台車+載せている分銅) と (吊るしている分銅) についてそれぞれの運動方程式を立てて, 分銅 n 個 (分銅を引く力 (分銅にはたらく重力) の大きさ $F = nmg$) のときの加速度の大きさ a を求める.

$$\text{(台車+載せている分銅)} \quad T = \{(4-n)m + M\} \times a \quad \text{---①}$$

$$\text{(吊るしている分銅)} \quad nmg - T = nm \times a \quad \text{---②}$$

①, ②より $a = \frac{nm}{M+4m}g$ となり, 基本データの値 (各班で異なる) を使って計算すると, $a \approx n \times 0.41 \text{ m/s}^2$ と求まる.

これをグラフに描き入れる. 吊るした分銅 1 個の質量が $m = 50 \text{ g}$ の場合は,

$$(F, a) = (0.49 \text{ N}, 0.41 \text{ m/s}^2), (0.98 \text{ N}, 0.82 \text{ m/s}^2), (0.147 \text{ N}, 1.23 \text{ m/s}^2), (1.96 \text{ N}, 1.64 \text{ m/s}^2)$$

が理論値である. これらを結ぶ直線は原点を通る.

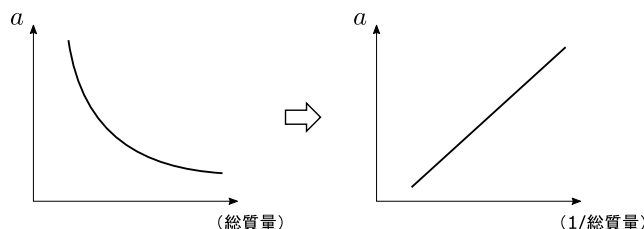
- 物体系で運動方程式を立てる場合は, $F = (M+4m) \times a$ より $a = \frac{F}{M+4m}$ となり, 基本データの値 (各班で異なる) を使って計算すると, $a \approx 0.83/\text{kg} \times F$ と求まる.

<実験 A の理論値の $a - F$ グラフ>

$F = 1.0 \text{ N}$ で $a \approx 0.83 \text{ m/s}^2$ を通る原点からの直線

(2) 実験 B

- $a - (\text{総質量})$ グラフは図のようになるが, ここから a と (総質量) の関係をにわかに論ずることは難しい. 反比例の関係であることを確認するためには, 横軸を $(1/\text{総質量})$ として比例関係を見いだしてやるのが良いだろう. 今後, 他の物理量の関係の決定にもこの方法は大きい利用してほしい.



- (台車+おもり+吊るしている分銅) の総質量を M , 分銅 1 個の質量を m とし, 物体系で運動方程式を考える. 吊るしている分銅 2 個にはたらく重力の大きさ (分銅を引く力の大きさ) は $F = 2mg$ で変化しないことと $F = Ma$ の関係から, 吊るした分銅 1 個の質量が $m = 50 \text{ g}$ の場合は, $a = \frac{F}{M} \approx 0.98 \text{ N} \times \frac{1}{M}$ と求まる.

<実験 B の理論値の $a - \text{総質量}^{-1}$ グラフ>

$\text{総質量}^{-1} = 1.0 \text{ kg}^{-1}$ で $a \approx 0.98 \text{ m/s}^2$ を通る原点からの直線

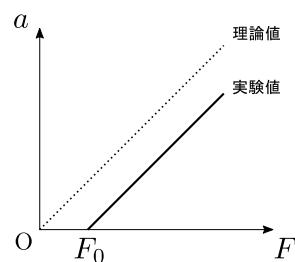
(3) 理論値の意味

- 理論値が得られる実験では、その意味を考えてほしい。この実験では、理論値を求めるために立てた運動方程式において、摩擦や空気抵抗などの物体系にはたらく抵抗力の大きさは無視できるものとしている。しかし、実際は抵抗力の大きさは0ではない。ということは、実験における加速度の大きさの測定値は理論値を下回ることが予想できるだろう。
- 実験結果から得られる加速度の大きさのグラフが理論値を上回っている人が散見された。得られたデータに忠実に従って解析しようとしたのだと思うが、理論値との比較からデータを疑う視点も持ってほしい。そのデータの処理にミスはないだろうか？（記録テープの打点の読み間違い、 $v-t$ グラフの傾きの読み間違いなど）

3 転がり摩擦力

(1) $a - F$ グラフが原点の下を通る理由

実験 A の結果をグラフにすると、だいたい図のようになる。



ここでは「原点を通らない理由」ではなく「原点の下を通る理由」が議論の対象である。つまり、計時のズレのような「偶然による誤差」ではなく「(常に一方向にズレる) 系統的な誤差」の原因を考える。理論値の導出により、「実際には物体系の運動において抵抗力があるので、加速度の大きさが小さくなって原点よりも下を通る」なんてことは誰でもわかっている。(わかっているほしかった！)

問題は、グラフの横軸との交点 F_0 が何を意味しているかである。

- 実験結果から得られるグラフは、物体系を引く力の大きさが F_0 のときには、台車(物体系)に加速度が生じないことを示している。これは、 F_0 の大きさの力を打ち消すような抵抗力が進行方向と逆向きに存在しているからだと考えることができないだろうか。
- ここで「加速度 0 だから、この抵抗力は静止摩擦力だ」と安易に判断してはいけない。「加速度 0 = 静止」とは限らないよね？
- 物体系を引く力の大きさ F を小さくしていけば、 F_0 でついに加速度が得られなくなるということなので、これは静止状態ではなく等速運動の状態と解釈すべきである。つまり、大きさが F_0 に等しい抵抗力の正体は、運動状態における抵抗力と予想できる。
- この抵抗力には、台車が運動中に実験機から受ける摩擦や、滑車の軸受け部の摩擦(精密滑車を使用しているため、これはかなり小さいと見積もれる)、空気抵抗などが含まれる。ちなみに、台車が運動中に実験機から受ける摩擦力は「転がり摩擦力」*1と呼ばれるものである。高校物理の授業では「静止摩擦力」*2と「動摩擦力」*2しか取り扱われないが、実は摩擦力にはいろいろな種類があって、その理論も実に奥が深い*3。
- 実験 A では、台車が机から受ける垂直抗力の大きさは、載せている分銅の数が変わっても大きくは変化しない(変化率: 最大 20%) ため、摩擦力の大きさはほぼ一定であると仮定してみよう。抵抗力の要因として、摩擦力の影響が大きい場合は、理論値と実験値の差がほぼ一定になると考えられる。一方、空気抵抗の大きさは速さに比例する(または速きの 2 乗に比例する) ため、空気抵抗の影響が大きい場合は、加速度の大きさ a が大きいときほど、理論値と実験値の差が広がると考えられる。*4
- 実験から得られたグラフの傾きに注目すると、理論値のグラフとほぼ平行であると判断できるので、この実験における抵抗力の正体は「転がり摩擦力」だと言えないだろうか。

転がり摩擦力の大きさが F_0 に等しいと考えると、その大きさが見積もれる。

また、台車が机から受ける垂直抗力の大きさを台車の上に分銅を載せていないときの条件で概算し「転がり摩擦係数」を求めてみると、動摩擦係数(すべり摩擦係数)に比べてとても小さく、車輪による摩擦の軽減の効果がよくわかる。

*1 車輪などの円形物体が表面上を転がるときに生じる抵抗力をいう。一般的に転がり摩擦力はすべり摩擦係数よりも小さい。

*2 2つの物体が互いに接した状態で相対運動しようとするとき、あるいはしているとき、その境界面で運動を阻止しようとして接線方向にはたらく力を「摩擦力」(相対運動に対する抵抗力)と考える。2物体が境界面で転がらないものとして、境界面で「すべり」が生じない場合の摩擦力を静止摩擦力、境界面で「すべり」が生じる場合の摩擦力を動摩擦力(すべり摩擦係数)とする。

*3 摩擦力の起源については、凹凸説ではなく凝着説と呼ばれる説(分子間力による、接触部分の結合)が有力である。しかし、その仕組みは現在でも十分に解明されているとは言えないため、高校物理では深入りしないでおこう。

*4 【提出用レポート用紙 No.3】の $v-t$ グラフの傾きが一定であることに注目して、空気抵抗の影響が無視できる程度であると結論付けたレポートもあった。確かにその視点での考察も可能である。

(2) 記録テープの処理についての誤解

レポートの中に「記録テープの解析で、最初の打点を読み取りやすいところを $t=0$ としたことが、 $a-F$ グラフが原点を通らない理由である」という、謎の記述があった。記録テープを解析して得られた $v-t$ グラフの「傾き」から加速度の大きさ a を算出していることがわかっていれば、この議論がどれだけの的はずれであるかわかると思う。

(3) 静止摩擦力についての誤解

レポートの中に「静止摩擦力を超えるまでに時間がかかり、台車が動き出すのが遅くなった」という謎の記述があった。今回の実験における測定では、台車に糸の張力が最初からかかっている手で押さえておくことでそれを打ち消していたのだから、手をはなした瞬間から最大摩擦力を超える大きさの張力がはたらき、 $t=0$ s のとき初速度が 0 でも加速度は生じている。ここにタイムラグはない。また、加速度を求めるときに用いているのはすでに動いている台車の速度の変化なのだから、加速度の値に静止摩擦力は影響しない。

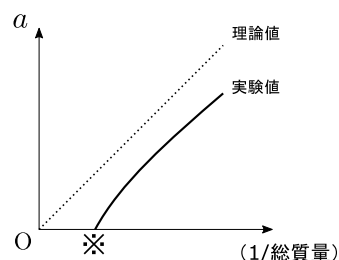
(「静止摩擦力」は「運動の法則」には影響しない。)

この実験では、運動状態のデータを用いて台車に加速度が生じなくなる条件を外挿^{*5}によって予想することができる。そのときの抵抗力を転がり摩擦力だと推定するなら、物体系にはたらく力の合力が 0 の条件から、転がり摩擦力の大きさを求めることができる。なお、摩擦力の特徴について、最大摩擦力（静止摩擦力）と動摩擦力の値が連続でないことからわかるように、運動状態のデータのみから最大摩擦力の大きさや台車が静止するための条件（減速する必要があり、加速度の成分がマイナスになる状況はこの実験方法ではありえない）は特定できないことにも気付いておきたい。

(4) $a - \text{総質量}^{-1}$ グラフから読み取れること

実験 B の結果をグラフにすると、だいたい図のようになる。

(物体系を引く力の大きさが一定の条件で、質量と加速度の大きさの関係を確認する。)



グラフの横軸との交点（※とする）は何を意味しているのだろうか。

- 実験結果から得られるグラフは、物体系の総質量が大きくなると加速後の大きさがだんだんと小さくなり、ついにはグラフ※印のときに加速度が生じないことを示している。※印の値の逆数が、この物体系を引く力（分銅 2 個にはたらく重力）の大きさでは加速度が生じなくなる質量を意味する。
- 実験 B では、台車が机から受ける垂直抗力の大きさが実験 A とは異なり 3 倍程度変化するので、転がり摩擦力の大きさも変化する。このため、厳密にはグラフも直線にはならないと考えられるが、測定できたデータが少ないためにそこまでの傾向を読み取ることは難しいだろう。

実験結果から得られるグラフの※印の値の逆数が物体系の総質量となっているときの転がり摩擦力の大きさは、実験 B における物体系を引く力（分銅 2 個にはたらく重力）の大きさと一致すると考えられるため、ここから「転がり摩擦係数」を求めることもできる。実験 A による転がり摩擦係数の算出値と比較してみるのも面白いだろう。誤差は含んでいるが、ともに動摩擦係数（すべり摩擦係数）に比べてとても小さいという結果が得られる。「車輪の発明」が人類の歴史のなかで重要な発明として位置づけられている所以が何となくわかりますね。

^{*5} 「外挿」ってなあに？と読んでいて思った人、自分で調べましょう。何でもかんでも人に頼らないの。

4 最後に

理論値が出せる実験では、実験結果の評価が重要になる。本来であれば、まず理論値との差を相対誤差で捉えて、「これだけの精度で運動の法則が確認された」という結論も必要になってくる。その上で摩擦力や摩擦係数、空気抵抗の見積もりを考察していくことになる。

今回は進学校向けの物理実験で、レポートの書き方がわからずに苦労した生徒もいたと思いますが、かなり深く思考を巡らす時間を経験できたのではないのでしょうか。実験から学べることを今後も大切にしてください。

【物理の授業は、「物理を学ぶ」のではなく「物理に学ぶ」時間である。

その方法論を習得するのに実験以上の教材はない。】

と尊敬する先生が言っていました。

個人的には、川和高校の生徒実験のレポートのレベルに「さすがは川和生」だと思っています。でも、皆さんならもっとできる気がします！ これからの成長を期待しています。