

実験から見いだして理解する授業展開：単振り子の実験

著者	渡會 兼也, 小笠原 萌
雑誌名	高校教育研究
号	73
ページ	31-39
発行年	2022-03
URL	http://doi.org/10.24517/00067164



実験から見いだして理解する授業展開：単振り子の実験

金沢大学附属高等学校 理科・物理 渡會 兼也
金沢大学理工学域物質化学類 4年生 小笠原 萌

平成30年3月に告示された高等学校学習指導要領において物理分野では「見いだして理解する」という文言が入った。これは理科本来の実験や観察から自然現象に対する法則や規則性を探る活動を推奨するものである。本稿では、物理分野の振り子の実験に注目し、この単元を見いだして理解する展開を考え、実践した結果を報告する。

キーワード：学習指導要領 見出して理解 物理実験 単振り子

1. はじめに

平成30年告示の高等学校学習指導要領解説[1]の理科編では「見いだして理解する」という文言が随所に散りばめられている。文部科学省は「主体的・対話的で深い学び」の実現に向けた授業改善推進の中で、理科における学びを特徴づけており、その象徴が「見いだす」という表現である。今回の学習指導要領の改訂は、社会情勢に対応する資質を育成するために各教科においてその学び方に対する指針がある程度明確にした、という意味で画期的である。また、今回の改訂は高等学校における指導方法の課題を改善するためのメッセージも込められている。

高等学校の物理の授業において実験が不足していることは積年の課題である。例えば、山崎らが2007年に大学生2500人を対象に行ったアンケート調査によれば、高等学校の3年間で行った実験回数は平均6.1回であり、中には全く実験をせずに物理履修を終える学校が20%もあることが明らかになった[2]。学校が実験を行わない理由は、物理の時間が多く取れないこと、大学入試への対応、教師の多忙化、実験器具の不足やお金の問題など、様々な要因があると推測される。元筑波大附属高校の鈴木氏は、授業者が実験の重要性や必要性を理解しているかが本質

的な課題、と主張している[3]。筆者はこの主張には賛同しつつも、多くの学校が実験できない現状を見ると、授業者の問題よりもシステムの問題が重大であると感じている。

一方で、近年大学教育においてアクティブ・ラーニングが叫ばれ、これまでの教員による一方的な講義を中心とした学び方を変えようというムーブメントがある。物理教育研究の分野では1990年代すでに能動的な学習が講義型の学習よりも学習効果が高いことが指摘されており、2000年代から日本国内の研究會や学会等でも議論されていた。特に物理の概念理解の獲得には、実験を通じて学生が持つ認知的な葛藤を誘起する課題を提供することが重要であると考えられ、多くの教材も開発されている[4]。例えば、相互作用的演示実験講義(ILDs)の手法・教材は高等学校においても徐々に認知され、普及し始めている[5]。こうした物理教育研究においても、学習者自身が自然の法則を見いだして理解すること、授業者は学習者の理解をサポートすること、が重視されている。これは次期学習指導要領の考え方に一致している。

次期指導要領の中で「見いだして理解する」という単元は「物理基礎」で3箇所(①直線運動の加速

度、②運動の法則、③物質と電気抵抗)、「物理」で3箇所(①剛体のつりあい、②単振り子、③電磁誘導)ある[1]。どの箇所も「・・・実験などを行い、○○○を見いだして理解する」という文章になっており、実験をベースにした授業を前提としている。「実験など」という表現から実験をせずとも見いだして理解できればよいと思われるが、前述のように実験不足の状況から少しでも実験回数を増やしたいという文部科学省の意図を汲むべきであろう。

本稿では、「物理」の単振り子の単元において、過去2年間本校で実施してきた単振り子の周期と振り子の長さの関係を実験から見いだす授業展開を示す。なぜこの単元を選んだかという、現行の教科書と比べて明確に展開を変える必要があるからである。現行の教科書では、この単元は単振動に含まれており、単振り子を扱う前に通常の水平・鉛直ばね振り子は学んでいることが前提になっている。見いだして理解する授業の展開の詳細については2章で述べる。

2. 見いだして理解する実験の設計・考え方

2.1 単振り子の授業設計

はじめに、高校物理での単振り子の周期について、単振動から導かれる式を書いておく。振り子の長さを L 、重力加速度の大きさを g とすると、振り子の周期を T は、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad \dots(1)$$

となる。ここで重要なのは、質量 m に依存しないこと、長さ L の平方根に比例すること、である。ただし、この式を導くには振れ角が十分に小さいという仮定が必要である。これまでの教科書では、この関係は単振り子の運動方程式から導出される関係式であり、この関係を見いだす必要はなかった。

これまでに単振り子の周期に関する実験は大きく分けて2種類ある。(a)周期が振り子の長さ L の平方根に比例し、質量に依らないことを確認する実験

と(b)式(1)を利用して、重力加速度を調べる実験である[6]。(a)(b)の実験は共に単振動の単元が終わった段階で行っている。(a)は事前に式(1)を学んでいるので、確認のための実験である。(b)は式(1)を利用した応用実験であるが、周期と長さをできるだけ正しく測定することで重力加速度が $g=9.8\text{m/s}^2$ を確認する実験とも言える。

では、単振り子の周期に関する法則を「実験から見いだす」には、どのような実験にすればよいか。単振り子の周期に関する変数は、おもりの質量 m 、紐の長さ L 、振れ角 θ の3つである。このうち振れ角については角度が大きくなると単振動からずれ、扱いが難しくなるため、本実験では主に質量と長さの依存性を調べる方に焦点を当てることにする。あくまで、実験により周期と質量や振り子の長さとの関係をグラフ化することで、周期は質量に依存せず、振り子の長さの平方根に比例することを見いだす。この実験後に式(1)の導出を行い、考察を深める授業を展開とした。

見いだして理解する実験の展開をまとめると以下のようになる。

・これまでの展開

①法則導出②内容整理③まとめ・実験

・今回(見いだして理解)の展開

①課題設定と実験②内容整理(見いだす)③法則導出

つまり、実験を通じて法則につながるストーリーを工夫する必要がある。実は現行の小学校5年生の段階で単振り子の学習が行われており、教科書に掲載された実験はすでに上述の展開になっている[7]。見いだして理解する授業は、というのは初学者が発見するプロセスを大切にせよ、ということかもしれない。

2.2 実験の準備と設計

単振り子の実験は2年生の単振動の基礎(水平・鉛直ばね振り子)が終わった後に実施した。2コマ

の授業（50分×2）で完結させるために、1コマ目で実験を行い、各班での測定結果を提出させる。その結果を教師が集積し、考察のための資料（グラフ）を作成した後に、2コマ目の授業でその資料を生徒に考察させた。

単振り子の周期測定は標準的な方法である（図1）。おもりを適当な高さまで引き上げた後に静かに手を放し、おもりが支柱の中心部を10回通過するのに要する時間を計測した後、その時間の10分の1を単振り子の平均周期とした。※プリントは巻末に載せてある。

本来実験は、同じ方法・同じ装置を使って、何度も測定を行い、測定誤差を求める必要があるが、高等学校の生徒実験は主に時間的な制約のため、多くのパラメータを調べることが難しい。特に単位数の少ない学校では実験に多くの時間を割くことができない。ゆえに、次のような工夫を行った。各班で行う実験では質量を固定するが、班毎に質量を変えた。振り子の長さは3種類測定させ、それぞれに対

し振れ角が大きなものとし、小さなもの2種類測定させることで、各班が6つのパラメータを調べるようにした。1つのパラメータの測定（3回測定して平均する）に対し、糸の長さの調整や記録などを含めると5分程度かかる。6つのパラメータを調べるには30分程度を要する。班毎に異なるパラメータを調べるので、集積した際には、質量が25g～85g、糸の長さは0.30m～1.1m、振れ角は5.2°～90°までのデータが得られるようにした。データの入力にはGoogle Spreadsheetを利用し、生徒が自分のスマートフォンやPCで入力可能にした。

3. 授業実践

3.1 生徒実験の実施

実験は2021年9月17日（金）と22日（水）に教育実習生の小笠原が本校の理系生徒90人（理系2クラス）に対して行った。測定データの共有から考察を行う授業は9月24日（金）と29日（水）に渡會が実施した。

見いだして理解する実験には、課題の設定が重要である。今回は、振り子の周期がどんな物理量で決まるのかを調べる、という課題とした（図1）。1つの班は3～4名とし、それぞれの班で測定する物理量の組み合わせを指示して実験を開始した。実験班の数は19班あり、各班で6つのデータを提出させた。

実験はプリントに沿って行うように指示した（図2）。明らかに間違った方法で実施している班には、再度プリントに沿って実施するように声をかけたが、それ以外の細かなミスはあえて声をかけないようにした。また、初期振れ角 θ は振り子の長さ L と支柱からの水平方向の距離を測ることで $\sin \theta$ を算出した。殆どの班が1コマ（50分）の時間で測定を終わらせ、入力を完了することができた。

3.2 実験結果の集約と考察

集約したデータの分析も生徒が自分で分析でき

実験の概要

・「単振り子の振動の周期はどんな物理量で決まるのか」を調べたい

班ごとに実験
→ 各班の実験データを集積
→ 周期を決める物理量を考えよう

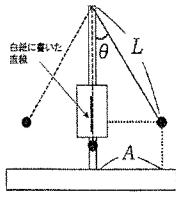



図1 授業で使用したスライド1

注意点



・プリントをよく読む!

- ・スタンドが倒れないように!
- ・できるだけ正確に測定してください。
- ・今回は測定まで、次回考察。測定が終わらなかつたら昼休みにやってもらいます。

実験が終了したら、班の代表者はデータを入力
 入力に関しては後で説明

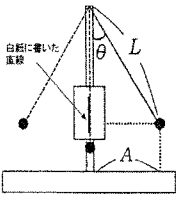


図2 授業で使用したスライド2

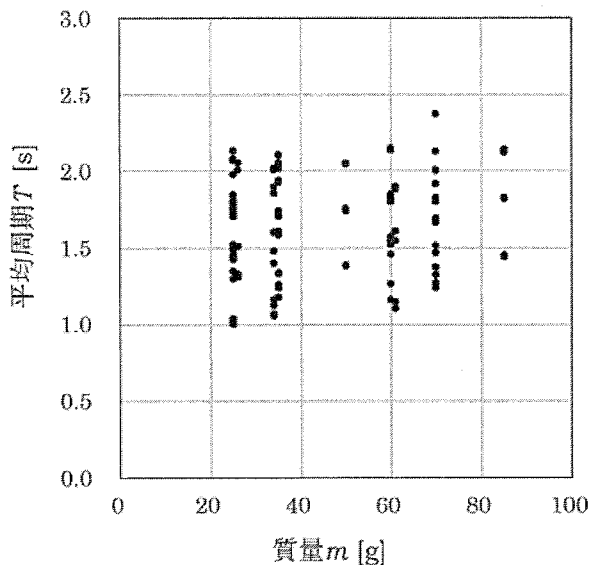


図3 平均周期とおもりの質量との関係（生徒実験2021年9月実施）。25gから85gのおもりを使用した。

ばよいが、分散の大きなデータの解釈や表計算ソフトのスキルの面で困難が生じる。今回は生徒から集約したデータのまとめは事前に教師が行い、考察に必要なグラフをプリント配布した。

2コマ目の授業で分析と考察を開始する前に、自分たちの班が取得したデータがグラフのどのあたりに来るかを班ごとに確認をさせる時間を取った。

図3が周期と質量の関係のグラフである。ここから班毎にわかることを考えさせた。ある質量に対して一定の幅で周期が分布するのは、振り子の長さが異なることを表している。そこで教師がExcelを操作する様子をスクリーンに投影し、振り子の長さが同じものだけをプロットすると、大体一定の周期が得られる。ここで教師は、データの分析をスクリーン上で演示するだけで、答えを言わないように注意した。分析を演示した後何ができますか、と問いかけ、しばらく時間を取った。班ごとに意見を聞くと、①周期は質量に依らない、②振り子が長いと周期も長い、の2つが得られた。教師は事実だけを黒板に記述し、次の考察に移った。

図4は周期と振り子の長さの関係である。振り子の長さが長いほど周期が長い。教師がスクリーン上

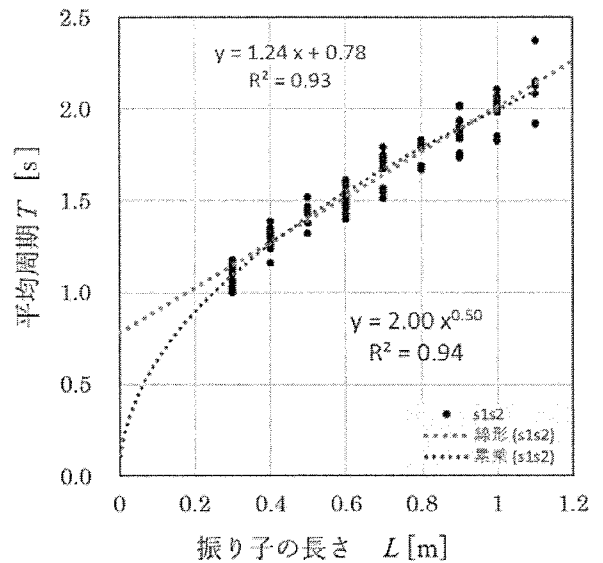


図4 平均周期と振り子の長さの関係（生徒実験2021年9月実施）。生徒のプリントには近似の直線と曲線は描かれていない。

でExcelの「近似曲線の追加」を実演し、線形（直線）でもフィットできるが、冪乗（曲線）でもフィットできることを示した。（※周期が直線でないことは、さらに長い振り子を使えば実験的に確かめられるが、支柱の高さを考えると生徒実験では1.2m程度が限界である。）直線の関係か、曲線の関係か、どちらなのだろうか、と教師は問いかけ、考えさせる。生徒からは、振り子の長さが0の極限を考える

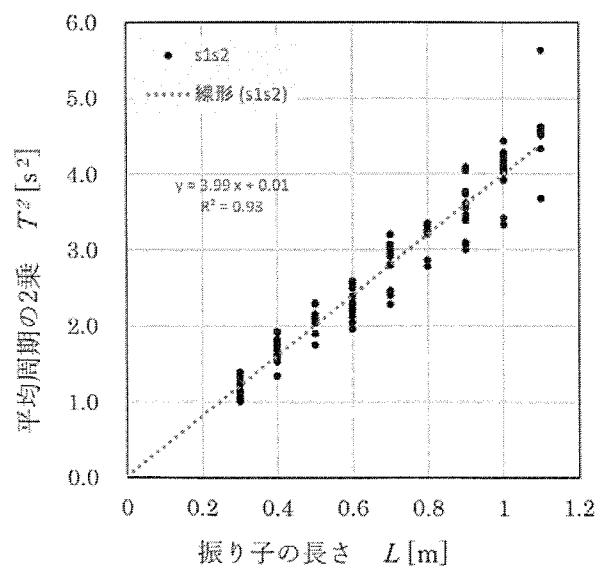


図5 平均周期の2乗と振り子の長さの関係。生徒のプリントには直線近似の線や式は描かれていない。

と、周期は0に近づくことが推測できるので直線ではない、という意見が出た。しかし、図4だけでは結論が出ないので図5の説明に移った。

図4で質問を投げかけた後に、縦軸を周期の2乗にしたものが図5であることを伝える。このグラフにExcelで近似直線を引くと原点を通る直線が得られる。これによって初めて、周期 T の2乗が振り子の長さ L に比例する、つまり、周期が振り子の長さの根号に比例すること ($T^2 \propto L$) がわかる。これを整理すると、

$$T = k\sqrt{L} \dots (2)$$

となる。ここで、 k は定数である。縦軸に周期の2乗をとる、という発想は、図4の議論が無いと論理の飛躍に思えてしまう。よって、図4を考えてから図5を考えるという順番が重要である。実験から見いだすことができたのは、図3から周期が質量に依らないことと、周期が長さ L と式(2)の関係にあるということだけである。

科学の世界では2つの変数の関係を見出す際に、両対数グラフをとる方法がある。例えば、周期 T と振り子の長さ L が「冪の関係」、 $T = aL^b$ を仮定すると、両対数を取ると、 $\text{Log}T = \text{Log}a + b\text{Log}L$ となり、両対数グラフの傾きが冪指数を表すことになる。生

徒に両対数のグラフを描かせるには数学の授業進度が重要となる。今回は2年生の数学で対数が未習であったため、紹介だけにとどめた。

測定した平均周期と式(1)との相対誤差と振れ角の関係を示したのが図6である。実験で得られた平均周期を T_e 、理論値を T_0 、相対誤差 ε は、

$$\varepsilon = \frac{T_e - T_0}{T_0} \times 100 \% \dots (3)$$

と表すことができる。生徒が行う実験では、振り子の長さや周期の測定が丁寧に行われているものばかりではない。それにも関わらず図6の縦軸を見るとほとんどの班の測定誤差が10%以内におさまっている。これは不思議ではないですか？と問いかける。例えば、真の長さが1.0mの振り子を誤って、1.1mと測定したとする。式(2)によれば、周期は長さの平方根に比例するから、 $\sqrt{1.1} \approx 1.05$ 倍となる。つまり、長さの測定を10cm誤っても周期の値はそれほど影響が無い。ここから、そもそも長さを適当に測定しても誤差が生じにくい実験だったことに気付かせる。

では、なぜ10%程度の誤差の広がりがあるのは何故かを問う。そうすると次は、周期の数え間違いの可能性が疑われる。実際に実験を見回ると数え間違いをしている班が何班か確認できている。振り子が中央の線の部分を横切ってから数える、と実験のプリントにはあるが、横切ったときを1として数えた班もあった。周期1回の測定ミスは誤差10%程度になる。このような考察をさせている学校がどれほどあるかわからないが、本校では誤差の原因を考えさせることも重要な要素だと思っている。

個人的な印象かもしれないが、最近の生徒は実験がうまくいかなかったり、理論値と実験値との差があったときに、実験器具のせいにして、誤差で片付けようとする傾向がある。自らの実験を振り返り、どこに不備があるのか、誤差の原因がどこにあるかを考える機会が不足している。その一因は、学

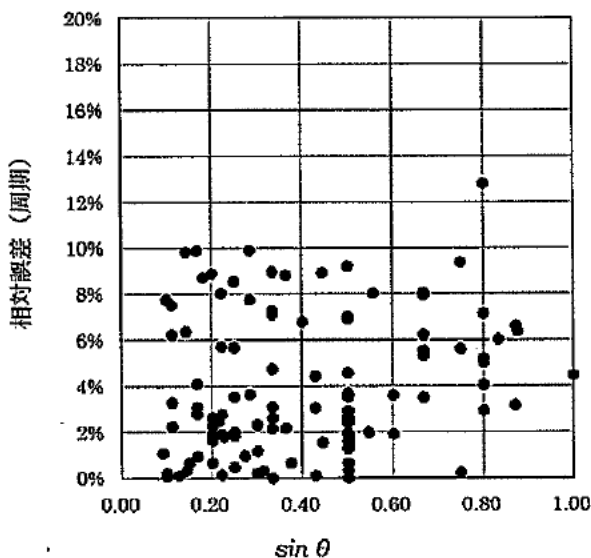


図6 平均周期と式(1)との相対誤差と振れ角との関係。

校教育にあるかもしれない。つまり、これまで教師は生徒がミスをしないように丁寧に指導した結果、失敗を経験する機会を奪ってしまったのではないだろうか。教師が生徒実験を設計する際は、それなりの結果が出るように準備するが、失敗する余地を残し、指導しすぎないことも大事なのではないかと考える。※注：最初から失敗させようと思って授業をしている訳ではない。正しい測定の仕方は説明し、プリントにも載せてある。

これらの考察の後に、振れ角 θ が小さい近似のもとで式 (1) の導出をスライドショーで行い、授業後にプリントを提出させた。※振れ角 θ が大きいときの扱いについて触れることも考えたが時間の関係で割愛した。

4. 自己評価の結果

この授業実践における4つの項目（理解度・実験精度・積極性・満足度）を生徒が自己評価した結果が表1と図7である。評価は5が高く1が低い。どの項目も自己評価は比較的高く、4と5の値を合わせると、理解度は90%、実験精度は86%、積極性63%、満足度は77%となった。積極性がやや低いのは、班員が4名の場合に手持無沙汰な生徒がいた影響が考えられる。実験精度は共同での考察や自分の班の実験を振り返って反省点をあげた生徒が多かった。

実験の感想・コメントを記述する欄には、多くの意見が書き込まれていた。文章の分析をすると、驚きや発見について記述した生徒が19% (13/70)、次の実験への意欲を記述した生徒が26% (18/70) いることがわかった。従来の生徒実験では、確認できたことに対する驚きや発見は少ないと思われる。このような見いだすことを意識した授業展開による効果かもしれない。

表1 各項目の自己評価。

項目/評価	1	2	3	4	5	合計
理解度	0% (0)	0% (0)	10% (7)	61% (43)	29% (20)	100% (70)
実験精度	0% (0)	1% (1)	13% (9)	39% (27)	47% (33)	100% (70)
積極性	0% (0)	9% (6)	29% (20)	41% (28)	22% (15)	100% (69)
満足度	0% (0)	1% (1)	22% (15)	51% (36)	26% (18)	100% (70)

各欄の上段の数値は%、下段のカッコ内は人数を表している。※小数点以下を四捨五入しているため合計が100%にならない場合がある。

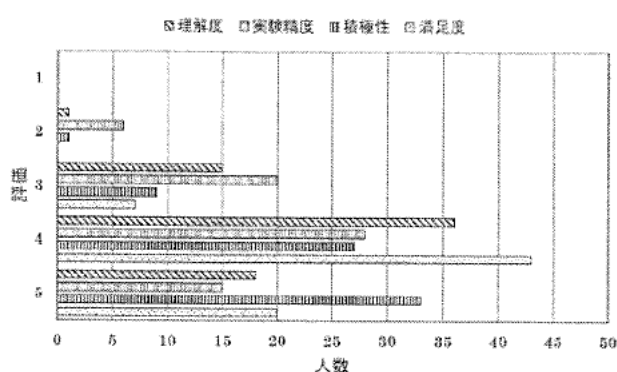


図7 自己評価の度数分布。評価は1が最も低く、5が最も高い。

以下、特徴的な感想を挙げる。

- 平均周期と振り子の長さとの間に曲線が引けることから、振り子の長さは平均周期の2乗と比例関係にあるといえることがわかった。実験結果の誤差が少ない理由がわかった。
- 今まで振り子の周期は質量に依存していると考えていたが、今回の実験を通じて振り子の周期は振り子の長さとの比例関係にあり、質量と関係はないということがわかった。
- 実験では現象の大枠は捉えられるけれど細かな式等は導出できないことがわかったので、理論的な裏付けも科学には必要だと思った。
- 意外にもおもりの質量は周期に影響を及ぼさないということを知って驚きました。
- 誤差が10%以下におさまっていて驚いた。授業で、なぜ10%以下におさまったかを知れて納得した。

- 周期と振り子の長さ・重さの関係や誤差の現れ方などをよく理解できた。特に誤差の現れ方は興味深かった。
- 振り子という単純なものの中に、物理の内容がかなり詰まっていた驚いた。
- 実験はとても楽しいことを実感しました。手を使って実際に理論を確かめるのはとても嬉しいです。また、実験のデータの分析もとてもおもしろかったです。これからも実験あったら頑張りたいです。とても楽しくなってきました。これからも物理頑張りたいです。

5. まとめ

本稿では、次期指導要領の「見いだして理解する」という趣旨に沿った授業展開例を実践した。

従来の確認実験とは異なり、見いだす実験は科学本来の考え方に基づくためか、生徒の自己評価が高い結果となった。今回の実験の感想には、実験の重要性や分析の際の解釈など、法則そのものよりも科学の考え方に気がついた生徒が多くいたように思われる。

実験誤差は小さいほど良いが、実験の仕方や科学の考え方を教えるには、必ずしも精度が高い必要はない。従来の確認実験は、法則を確認するためであるから、実験の目的が法則に一致しなければ、それまで学んだことに説得力が無くなってしまう。それに対して、今回の授業（実験）は関係性を見いだすことが目標になっており、正しいことを確認する実験ではないため、実験のプロセスや誤差にも目を向けることができる。そういう意味でも、実験から見いだして理解する授業展開を考えていくことは重要である。

次期学習指導要領によって学びの方針が示されたのは良い機会であると我々は考えている。今後多くの学校で開発・実践されていくことを期待したい。

謝辞

本研究について有意義な議論をしていただいた、石川県教育総合研修センターの関戸暢氏に感謝する

参考文献

- [1] 高等学校学習指導要領（平成30年告示）解説 理科編 理数編，文部科学省，平成30年7月
- [2] 高校物理実験の実態 山崎 敏昭，井上賢，谷口和成，内村浩 物理教育 第55巻 2007年，p33-38
- [3] 学習指導要領の深い学びと高校での物理実験教育 鈴木亨，大学の物理教育，2018年，24号，p45 - 48
- [4] 「科学をどう教えるか」エドワード・F・レディッシュ 著，丸善出版，2012年，P206-P210
- [5] 「Interactive Lecture Demonstrations, Active Learning in Introductory Physics」David R. Sokoloff, Ronald K. Thornton 著，2006, Wiley
- [6] 物理基礎，物理 啓林館，平成21年度指導要領準拠
- [7] 新しい理科 小学校5年生，東京書籍，令和2年

2021年 月 ()	クラス S1・S2	出席番号 組 番	班	氏名
----------------	--------------	-------------	---	----

単振り子の周期 1：実験編

目的 単振り子の周期が、物体の質量や糸の長さなどのような関係にあるかを調べる。

準備 糸、おもり、スタンド、クリップ、ストップウォッチまたはタブレット端末・スマートフォンなどの計時機能

方法・手順

◎各組で糸の長さ（2種類）と質量（2種類）を変え、振り子の周期を測る。
※確認したら口にチェック✓を入れなさい。

□ (1) おもりに糸を付ける（取れないように）。クリップをスタンドにはきんで固定し、クリップで糸をはさむ。糸の端を結んで、クリップからずり落ちないようにする。

□ (2) 直線が書かれた紙を、スタンドの下部にテープで止める。※前方から見ても直線と振り子の意図が静止状態で重なるように。

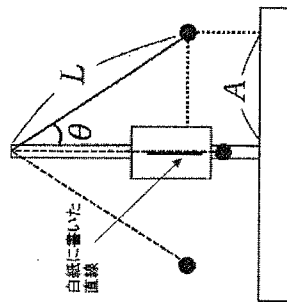
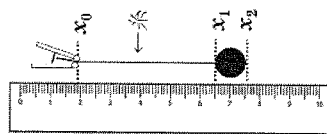
□ (3) 右上図のようにおもりの長さ（あるいはメジャー）を糸に沿って鉛直に立て、水平方向からの糸の先端 x_0 、おもりの先端 x_1 、おもりの先端 x_2 をそれぞれの測定前に読み取る。

$$L = \frac{(x_1 - x_0) + (x_2 - x_0)}{2} = \frac{x_1 + x_2}{2} - x_0$$

を計算し、振り子の長さ L とする。

□ (4) 支柱からの水平距離 A を測定し、 $\sin\theta$ を求める。※後に Excel シートで計算可能。

□ (5) 1 つのパラメータに対し、10 周期に要する時間を 3 回計測する。10 周期分の時間を計測するたびにストップウォッチをゼロに戻し、3 回の計測がすべて独立事象になるようにする。振動回数は、白紙に書いた直線上を、糸が同一方向に通過する回数を数える。



結果と整理

①振り子の長さ L が 1.0 m になるようにして、質量を変える

質量 m : [] g 水平距離 A : [] m ※同期は 0.01s 単位まで測る

測定回数	10 周期に要する時間	質量 m [g]	水平距離 A [m]
1 回目	S		
2 回目	S		
3 回目	S		
		10 周期の平均	S
		平均周期 T	S

質量 : [] g 水平距離 A : [] m

測定回数	10 周期に要する時間	質量 m [g]	水平距離 A [m]
1 回目	S		
2 回目	S		
3 回目	S		
		10 周期の平均	S
		平均周期 T	S

②振り子の長さ L を [] m に変え、質量を変える

質量 : [] g 水平距離 A : [] m

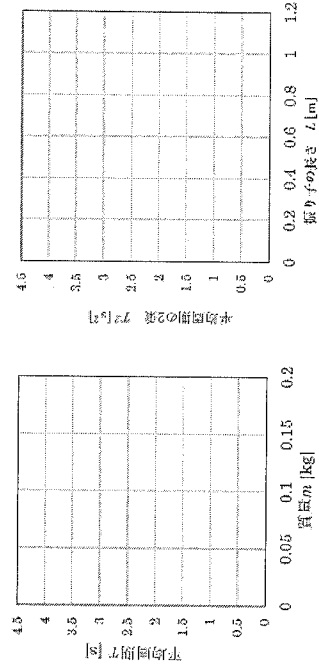
測定回数	10 周期に要する時間	質量 m [g]	水平距離 A [m]
1 回目	S		
2 回目	S		
3 回目	S		
		10 周期の平均	S
		平均周期 T	S

質量 : [] g 水平距離 A : [] m

測定回数	10 周期に要する時間	質量 m [g]	水平距離 A [m]
1 回目	S		
2 回目	S		
3 回目	S		
		10 周期の平均	S
		平均周期 T	S

※ここまで出来たら、 L 、 m 、 A 、 T を報告しに来てください。

予想：みんなのデータを集積すると、どんなグラフになるだろうか？



2021年 月 日 ()	クラス S1・S2	出席番号 組 番	姓 氏名
------------------	--------------	-------------	------

振り子の周期 2：結果 & 考察編

結果

S1とS2で測定したデータを併せ、図1～4のようにまとめた。※理論予測とのズレが20%以上のデータは除いている。

★自分たちの頭が取得したデータがどのあたりにあるか、図中に印をつけなさい。

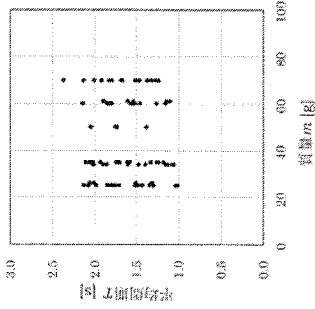


図1 平均周期と質量の関係 (L=0.30～1.1m)

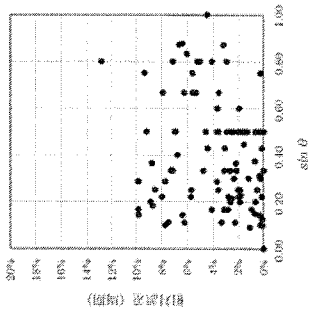


図2 理論予想との相対誤差と sin θ の関係。

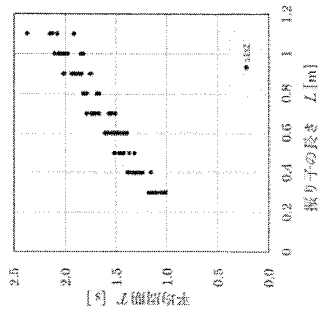


図3 平均周期と振り子の長さの関係。

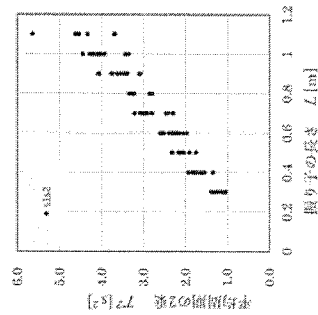


図4 平均周期の2乗と振り子の長さの関係。

考察

(1) 図1から分かることは何か？

(2) 図2から分かることは何か？

(3) 図3、図4から分かることは何か？

Q 10回振動する時間の測定の仕方が間違えた場合、どの程度のずれが生じるか。

Q 振り子の長さの測定が10%程度ミスしていた場合、どの程度のずれが生じるか。

自己評価 ○をつけてください。(5：高い ⇔ 1：低い)

(1) 満足度	5	4	3	2	1
(2) 信頼性 (協力・貢献度)	5	4	3	2	1
(3) 実験精度	5	4	3	2	1
(4) 理解度	5	4	3	2	1

感想・気付いたこと

※提出月 9月 日 ()