

小学校理科における「振り子の運動」の 実験指導と誤差の扱いについて

塩野正明・松村敬治

Study of the Motion of Pendulum and Treatment of a Margin
of Error for Science Experimental Teaching in Primary Education

Masaaki Shiono and Keiji Matsumura

はじめに

自然科学の理解は定性的理解から定量的理解への流れがある。定性的理解とは性質や傾向までを把握することであり入門的な学習には有効であるが客観性に乏しい面がある。一方、定量的理解とは自然現象を数式や数値を用いて理論的に把握することであり、これにより現象の客観的な予測が可能となるので、自然科学の究極の目標となっている。小学校理科の単元で扱うものは、定性的理解だけを目標としたものが多いが、定性的理解から定量的理解までを明確に意識した単元が2つある。1つ目は第5学年で学ぶ「振り子の運動」の単元で、もう1つは第6学年で学ぶ「てこの規則性」の単元である。この2つはいずれも2008年3月に行われた学習指導要領の改訂で取り扱いが変更になった単元^{1), 2)}である。本稿では定性的理解から定量的理解への流れが、学習指導要領でどのように扱われているかを述べ、続いて「振り子の運動」を小学校の現場で指導する時の留意点を、実験誤差の問題を中心に考察する。

学習指導要領における「振り子の運動」の扱い

定量的理解は自然科学の究極の目標であるが、次に示す小学校学習指導要領の「理科の目標」の中で、それをどのような表現で織り込んでいるか確認して

みよう。

自然に親しみ、見通しをもって観察、実験などを行い、問題解決の能力と自然を愛する心情を育てるとともに、自然の事物・現象についての実感を伴った理解を図り、科学的な見方や考え方を養う。

[小学校学習指導要領²⁾ 第2章 第4節 理科 第1目標から]

ここで、下線で示した部分は定量的理解に関係した表現である。「見通しをもつ」ためには数式に裏づけされた予測が必要になり、「問題解決」も「実感を伴う理解」も数式を用いた議論の中で図られる。また、「(自然) 科学的な見方や考え方」の特徴は数式を用いた客観的な記述にあるので、小学校学習指導要領における理科の目標は、自然現象の定量的理解を目標にした表現になっているといえる。この中で、「見通しをもって」と「実感を伴った」という表現は、それぞれ学習指導要領の第6次³⁾と第7次改訂¹⁾で付け加えられた文言であるが、文部科学省はこうした文言を付け加えることにより、国際社会に通用する自然科学教育の徹底を目指していることがわかる²⁾。

一方、「振り子の運動」をどのように指導するかについては小学校学習指導要領の第5学年の理科の中で次のように記述している。

振り子の運動

おもりを使い、おもりの重さや糸の長さなどを変えて振り子の動く様子を調べ、振り子の運動の規則性についての考えをもつことができるようにする。

ア 糸につるしたおもりが1往復する時間は、おもりの重さなどによって変わらないが、糸の長さによって変わることを。

[小学校学習指導要領 第2章 第4節理科 第2各学年の目標及び内容 第5学年2内容 A物質・エネルギー (2) から¹⁾]

最初の文章の前半にある「おもりの重さや糸の長さなどを変えて振り子の動

く様子を調べ」という文言から、「振り子の運動を観察することにより、その運動の様子から振り子の特性に関する定性的なことを気付かせる」指導を行う必要があることがわかる。続いて、後半の「振り子の運動の規則性についての考えをもつこと」という文言から「振り子の運動に関する定量的な実験をする中で振り子の運動の規則を理解させる」指導を行わなければならないことがわかる。「ア」の項目の文章には、振り子の単元で児童が学習すべき内容が具体的に書かれている。ここで、「糸につるしたおもりが1往復する時間」と表現したものは、「振り子の周期」のことである。また、「おもりの重さなどによっては」と「など」を使って漠然と表記しているのは、振り子の「振幅」と周期の関係についても指導することを念頭に置いているからである。それゆえ、「振り子の運動」で学習する内容を要約すると、「振り子の周期は、振り子のおもりの重さや振幅によっては変わらないが、振り子の長さによって変わる」となる。ただし、この記述には「振幅が小さいとき」という暗黙の条件を付いている。

実際の指導に当たっての留意点は、小学校学習指導要領解説理科編⁴⁾の中で次のように記述している。

ここでの指導に当たっては、糸の長さや振れ幅を一定にしておもりの重さを変えるなど、変える条件と変えない条件を制御して実験を行うことによって、実験結果を適切に処理し、考察することができるようにする。その際、適切な振れ幅で実験を行い、振れ幅が極端に大きくならないようにする。また、伸びの少ない糸を用い、糸の長さは糸をつるした位置からおもりの重心までであることを留意する。さらに、実験を複数回行い、その結果を処理する際には、算数科の学習と関連付けて適切に処理するようにする。

[小学校学習指導要領解説 理科編⁴⁾ p.46 から]

ここに書かれた留意点の中で、特に「変える条件と変えない条件を制御して実験を行う」という表現は最先端の分野で定量的な理解を目指した実験を行う

ときの留意点に通じるものがある。それゆえ、学習指導要領は、振り子の運動に関して、その規則性を数値で認識できるレベルまで習得させようとするねらいが読み取れる。

以上、学習指導要領における振り子の運動の内容について見て来たが、この単元は自然科学における定性的理解から定量的理解までの過程をたどる一種のプロトタイプになっているので重要である。

振り子の周期測定と測定誤差

この章では、振り子の実験における測定誤差の問題を取り上げることにより、振り子の運動の単元の指導の留意点について議論する。

小学校5年の理科教科書の「振り子の運動」の単元では次に示す3つの実験を行うように記載されている⁵⁾。

[実験1]長さ50 cmの振り子を使い、振れ幅が大きいときと、小さいときで10往復する時間を3回はかり、1往復する時間を計算して比べる。

[実験2]振り子の長さを変えて、10往復する時間を3回はかり、1往復する時間を計算する。

[実験3]振り子のおもりの重さを変えて、10往復する時間を3回はかり、1往復する時間を計算する。

ただし、教科書によっては実験2と3を一つの項目で扱っている場合もある。振り子の振幅と周期の関係やおもりの重さと周期の関係は、長さが50 cmの振り子を使って実験をしている。振り子の長さや周期の関係では長さが25 cm、50 cm、および100 cmの振り子を使って実験をしている。振り子の周期は25 cm、50 cm、および100 cmの振り子で、それぞれ1.0秒、1.4秒および2.0秒になるが、ここでは、これらの値に対して実験誤差がどのように関わってくるかを考察しようと思う。

最初に、図1に示す振り子の運動について考える。ここで、糸の重さは無視

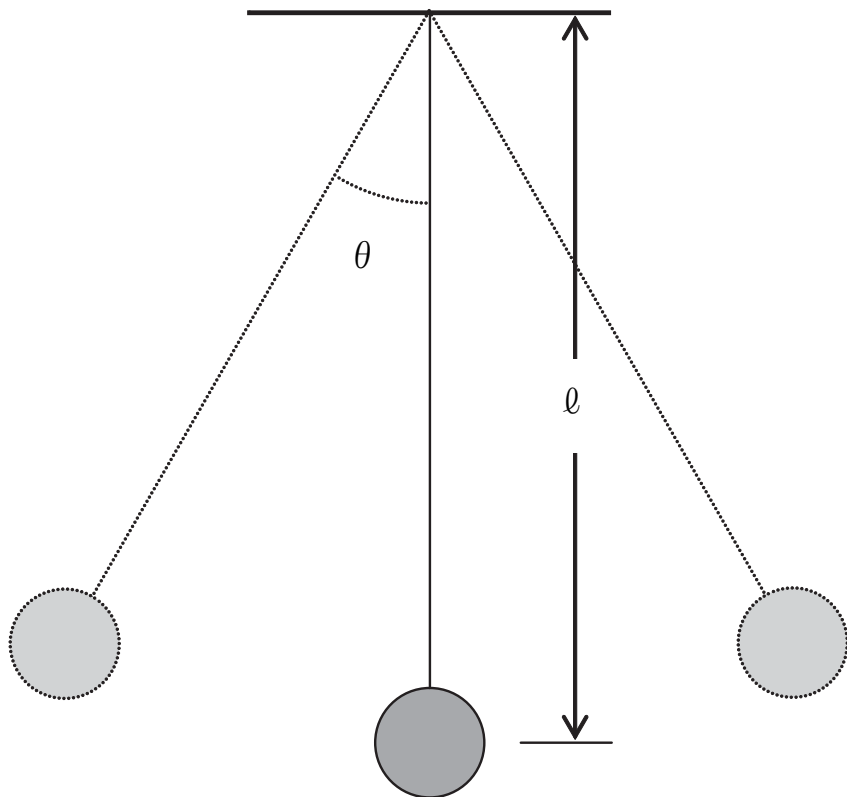


図1 振り子 ℓ ; ひもの長さ (振り子の長さ)、 θ ; 最大変位角

できるものとし、 ℓ は糸をつるした位置からおもりの重心までの距離とする。 θ は振り始めの角度、あるいは振り子が一番大きく振れたときの角度であり、最大変位角と呼ばれるものである。振り子の振幅が小さいときの周期 T は

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

と近似的に表現される。ここで、 g は重力の加速度である。(1) 式に示すとおり、振り子の振幅が小さいときは振り子の周期は最大変位角に依存しない。

振り子の実験で生じる誤差を (1) 式をもとに考察してみよう。学習指導要領に則した振り子の実験では、おもりの重さを変えても振り子の周期は変わら

ないことを実験で確かめないといけないが、このとき、おもりの重さを変えるとおもりの重心の位置の変化や糸の伸びの変化があるために l を一定にすることは結構難しい。この実験での l の変動を Δl とすると、周期の変動 ΔT は

$$\Delta T = \frac{1}{2} T \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

となる。50 cm の振り子での設定の誤差 Δl を 0.5 cm とすると周期の誤差 ΔT は 0.01 秒となる。

一方、重力の加速度 g は、約 9.8 m/s^2 の値となるが緯度や標高などの違いによって変動する^{6,7)}。しかし、重力の変動が 0.2% ある場合でも、周期の誤差は、(2) 式と類似の式を使うと $\Delta T = 0.001$ 秒となり、無視できるほど小さな値であることがわかる。また、振り子の運動の單元では「振り子の周期は、振り子のおもりの重さや振幅によっては変わらないが、振り子の長さによって変わる」ことを学習させるのが目的であり、 g の変動が関与する測定は目的としないので、同じ場所で測定する限り g を定数として扱うことができる。

振り子の振幅が大きいとき、振り子の周期 T は

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} (1 + \Delta(\theta)) \quad (3)$$

となる⁸⁾。ただし、

$$\begin{aligned} \Delta(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right\}^2 \sin^{2n} \frac{\theta}{2} \\ &= \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\theta}{2} + \frac{25}{256} \sin^6 \frac{\theta}{2} + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

である。 $\Delta(\theta)$ は最大変位角 θ の関数で、(1) 式に対する補正率とみなすことができる。図 2 に θ を 0° から 90° まで変化させたときの $\Delta(\theta)$ のグラフを示す。図 2 から振り子の振幅が周期に与える影響は θ と共に大きくなるが、 $\theta = 30^\circ$ のときでも 2% 以下であることがわかる。

以上、振り子の周期の測定における誤差について考察したが、ここでの議論は振り子が十分しっかりと固定してあり、振り子をつるした位置がぐらつかないことを前提としている。振り子がぐらつくときはそのギクシャクした動きが、振り子の長さ l や重力の加速度 g に実効的に効いてくるので、周期が変動す

ることになり、目的の実験ができなくなる。特にこの場合の変動は予測困難なので、振り子の実験をするときはおもりの重さが大きくなってもぐらつかないように十分な固定を行う必要がある。

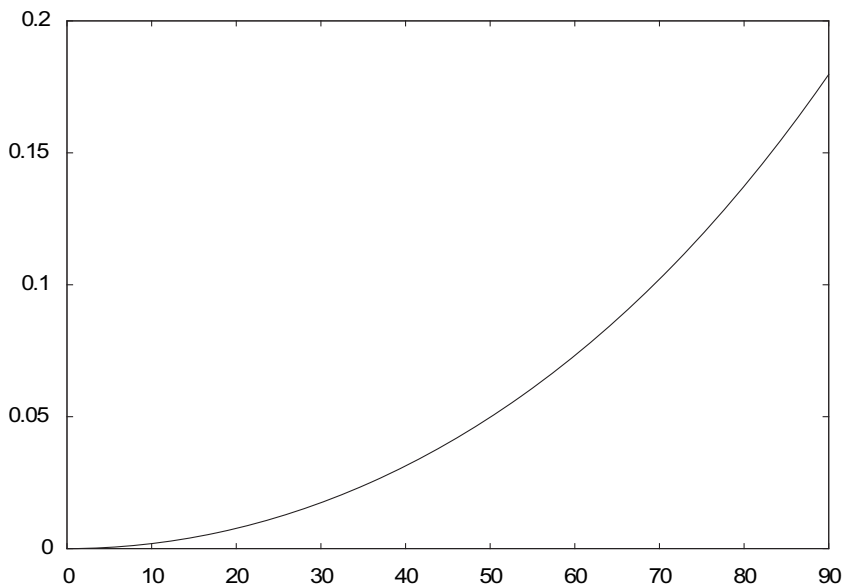


図2 最大変位角 θ を 0° から 90° まで変化させたときの $\Delta(\theta)$ のグラフ

教科書をもとにした振り子の運動の実験

この章においては小学校理科の教科書⁵⁾をもとに実際に行った振り子の実験について結果を報告する。

実験に用いた振り子は、水糸（ナイロン製；0.34 g/m）の端に重さ 50 g または 100 g のおもりを結びつけ、鉄製スタンドに目玉クリップとクランプで固定して吊るしたものをを用いた。前の章で紹介した実験 1、2、および 3 をもとに実験を行った結果を、それぞれ、表 1、2、および 3 に示す。ここで、周期の値に付属した括弧内の数値は標準誤差を示す。小学校理科の教科書⁵⁾では振り子が 10 往復したときにかかる時間を 1/10 秒の精度まで計測するように指導しているが^{9,10)}、用いたストップウォッチが 1/100 秒まで計測可能だったので、表では 10 往復する時間は 1/100 秒までの数値で示し、周期は 1/1000 秒ま

での数値で示した。

表1は振り子の周期 T と最大変位角 θ の関係を調べた実験(実験1)の結果である。実験には、ひもの長さ l が50 cm、おもりの重さが50 gの振り子を用いた。表1から、最大変位角 θ が 10° までは、周期は振幅に依存しないことがわかる。最大変位角が 15° 、 25° 、 45° になると、周期は0.01秒、0.02秒、0.05秒ずつ大きくなることがわかった。このように、今回の実験条件では、最大変位角が 15° を超えると周期は測定誤差を超えて大きくなることが確認できた。一方、(3)式から計算される周期⁷⁾は最大変位角 θ が 0° から 14° までは1.42秒であったが、 15° 、 25° 、 45° になると、それぞれ、1.43秒、1.44秒、1.48秒となり、これらの値は表1の実験結果と良く一致した。

一方、理科の教科書⁵⁾では振り子の振幅は指定してはいないが、説明文のイラストから振幅を5 cmと15 cmに設定してそれぞれの周期を測定しようとするようすが読み取れる。この場合、最大変位角 θ は5 cmと15 cmでは、それぞれ、 5.7° と 17° となるので、周期の変動は約0.01秒存在することになる。表1の周期の計測の標準誤差は0.01秒より小さいので、児童が行う実験でも周期の0.01秒の違いには検出される可能性がある。即ち、振り子の周期が振幅に依存しないことを述べるためには約0.01秒の違いには目を瞑っても良いかという問題になるのだが、これに関しては次のような4つの対策が考えられる。

対策1. 実験3での誤差は0.01秒より大きいことが予想されるので、実験1での約0.01秒の違いも、児童の実験における測定誤差として扱う。

対策2. 振幅が5 cmから15 cmと300%も増えたにも拘らず周期の変動は1%にも満たないので、振幅は周期に殆ど影響を与えないと結論する。

対策3. 振幅を10 cm以下に設定して測定することにより、周期は振幅に殆ど依存しないことを実験的に証明する。

対策4. 振幅を5 cm、10 cm、15 cmと複数箇所に設定して周期を測定

することにより、振幅の小さいところでは周期は振幅に殆ど依存しないことを実験的に証明する。

表1 実験1：振り子の周期と最大変位角の関係 ($\ell = 50\text{cm}$)

最大変位角 θ	10 往復する時間 (秒)				周期 (秒)
	1 回目	2 回目	3 回目	平均	
2°	14.22	14.18	14.19	14.20	1.420(2)
4°	14.15	14.25	14.09	14.16	1.416(8)
6°	14.19	14.22	14.18	14.20	1.420(2)
10°	14.22	14.12	14.22	14.19	1.419(5)
15°	14.31	14.25	14.28	14.28	1.428(3)
25°	14.44	14.34	14.35	14.38	1.438(6)
45°	14.75	14.70	14.72	14.72	1.472(3)

以上、いろいろな対策が考えられるが、対策の1から3までは結論を急ぎすぎで実験にゆとりが感じられないので、対策4のやり方で実験を指導するのがベストであると思われる。ただし、周期の測定を1/10秒の桁の精度で行うことを前提とする場合¹⁰⁾は、実験指導はうまく行くであろうが、精度を落とそうとするやり方に問題を感じる。周期を1/10秒の桁まで扱うか、あるいは、1/100秒の桁で扱うかについては後で再び議論する。

表2は振り子の周期 T と振り子の長さ ℓ の関係を調べた実験(実験2)の結果である。実験には、ひもの長さ ℓ が25、50、および100 cm、おもりの重さが50 gの振り子を用いた。この表からわかるとおり、振り子の長さが長くなると周期が大きくなることは容易に実験で示すことができる。特に、全ての

表2 実験2：振り子の周期と振り子の長さの関係

振り子の長さ ℓ	10 往復する時間 (秒)				周期 (秒)
	1 回目	2 回目	3 回目	平均	
25cm	10.09	10.03	10.12	10.08	1.008(5)
50cm	14.07	14.13	14.19	14.13	1.413(6)
100cm	20.08	20.09	20.12	20.10	2.010(2)

実験が終わった後で、長さ 25 cm と 100 cm の 2 つの振り子を同時に振らせて、長さ 100 cm の振り子の周期が長さ 25 cm の振り子の周期の 2 倍になっていることを実演することは、児童が興味を持つので効果的である。ただし、「周期の 2 乗が振り子の長さとの比例関係にある」ことを児童に伝えるかどうかは小学校の範囲を逸脱していることに留意して児童の理解のレベルから判断することになる。

表 3 は振り子の周期 T とおもりの重さの関係を調べた実験（実験 3）の結果である。この実験には、ひもの長さ l が 50 cm、おもりの重さが 50 g と 100 g の振り子を用いた。この表からわかるとおり、おもりの重さは周期に影響を与えない。しかし、おもりの重さを変えると重心の位置も変わり易いので、小学校の現場では l を一定に保つように指導するのが難しいかも知れない。そんなときでも、周期の変化を 0.1 秒以下に押えることは困難ではないので、振り子の周期がおもりの重さに依存しないことは児童に伝えることができる。

小学校で児童が実験するときは、ストップウォッチの扱いの未熟さにより、3 回の時間計測データに 1 秒程度の差を持つ測定値が出るかも知れない¹¹⁾。そういうときでも、平均値を出すことで、周期の測定誤差は 0.05 秒以内におさえることができるので、児童に「振り子の周期は、振り子のおもりの重さや振幅によっては変わらないが、振り子の長さによって変わる」ことを理解させることは可能である。ただし、誤差の問題に深入りしないで児童に納得させることは、教師のテクニックと児童との信頼関係にかかっている。ともかく、児童にごまかしたという印象を与えないために、落ち着いて時間にゆとりを持って指導することが大切である。

表 3 実験 3：振り子の周期とおもりの重さの関係 ($l = 50\text{cm}$)

おもりの重さ	10 往復する時間 (秒)				周期 (秒)
	1 回目	2 回目	3 回目	平均	
50g	14.28	14.25	14.28	14.27	1.427 (2)
100g	14.29	14.28	14.19	14.25	1.425 (6)

おわりに

ここでは本稿を終えるにあたり、周期を $1/100$ 秒の桁まで扱うか、あるいは、 $1/10$ 秒の桁で扱うかについて議論する。

小学校で行う理科の実験の扱いに関しては、指導要領解説⁴⁾に「実験を複数回行い、その結果を処理する際には、算数科の学習と関連付けて適切に処理するようにする」と述べられている。ここでは、小学校の算数において小数がどのように扱われているかを中心に確認することで、振り子の実験での精度の扱いについて議論しようと思う。

平成 20 年に告示された新学習指導要領¹⁾には、小学校 3 年の算数で割り算と $1/10$ の位の小数を学ぶことが記載されている。小学校 5 年ではさらに $1/100$ の位の小数まで扱い、円周率として 3.14 を用いるように指示している。また、数値の扱いとしては、小学校 4 年では概数と四捨五入を学び、小学校 5 年で小数の乗法や除法の計算を学んでいる。また、小学校 6 年では比例・反比例の関係や平均についても学んでいる。

一方、平成 10 年告示の旧学習指導要領³⁾の算数では、小数は第 4 学年からの扱いであり、小学校 5 年の内容の取扱いの中で、「 $1/10$ の位までの小数の計算を扱うものとする」という指示と、「円周率としては 3.14 を用いるが、目的に応じて 3 を用いて処理できるよう配慮するものとする」という指示がある。また、反比例は小学校の範囲になっていない。

以上の記述から、周期の測定は、旧学習指導要領の下では $1/10$ 秒の桁の扱いが限界であったが、新学習指導要領の下では $1/100$ 秒の桁まで扱っても良いことがわかる。実際の測定では、実験精度に則して、振り子が 10 往復したときにかかる時間を $1/10$ 秒の精度で数回測定し、平均値を $1/10$ 秒の桁まで表わし、周期はさらに 10 で割るので $1/100$ 秒の桁まで表わすのが妥当であると思われる。

今回の実験で用いたストップウォッチは、100 円ショップで購入した安価なものであるが、 $1/100$ 秒の精度まで測定できる高性能なものである。一方、教科書⁵⁾の記述は $1/10$ 秒までしか表示できないストップウォッチを用いて解説している。たしかに、人間の手による時間の計測は $1/10$ 秒程度の誤差があるの

で、小学校の実験では1/10秒まで表示するストップウォッチが最適であるといえる。しかし、1/10秒までしか表示できないストップウォッチは、特殊な時計の部類に入り、高価で身近には存在しないので、教育現場での使用は現実的ではない。小学校で行う実験では安価なストップウォッチを使い、1/100秒の位を四捨五入して用いるのが妥当であると思われる。しかし、このやり方は、小学生に理解させるのは困難かも知れないので、教示方法に工夫が必要になる。教師用指導書⁹⁾には、1/100秒まで表示できるストップウォッチを使うときは1/100秒の位の表示部分をビニールテープなどでマスクして、1/10秒まで読ませるように指示していた。この方法は、1/100秒の桁を切り捨てるので精度を落としていることが気になるが、これも一つの方法であるかも知れない。ともかく小学校で実験を行うときは、1往復する時間の表示を1/100秒の桁までにおさえるために、10往復する時間の計測は1/100秒ではなく、1/10秒の桁までの測定であることを念頭に置かないといけない。

以上、振り子の周期の測定における誤差に無視できない影響を及ぼす物理的要因を、最大変位角を中心に議論したが、その他にも空気抵抗などの要因が存在する。これらについては、補足でコメントしているので参照されたい。

振り子の運動の実験はガリレオ・ガリレイが振り子の等時性を発見したときから、自然科学の基礎となる興味あるテーマである。この実験は、小数が現れるが数値的にきれいな関係を見つけることのできる基本的な実験であり、児童が理科に興味を持つきっかけになる実験でもある。それゆえ、児童にこの実験を提示するときは、事前にテスト実験などをして、これまで述べた留意点に注意しながら、安全で適切な実験指導が行われることを切に願う。

謝辞

本稿の作成にあたって里朋華さんから有益な助言をいただいた。ここに記して、心から御礼申し上げる。また、本稿は日本学術振興会科学研究費、基盤研究C課題番号[23501037]の補助を受け執筆したものである。

補足：振り子の周期に影響を及ぼすその他の要因

本稿では、振り子の糸の長さや最大変位角から生じる振り子の周期の測定における誤差を議論したが、振り子の周期に影響を及ぼす物理的因子は他にも存在する。

その中の一つに、空気抵抗がある。空気中を運動する物体の速度が十分遅いとき、空気抵抗は速度に比例する。振り子のおもりが球であるとする、空気抵抗 f は、空気の粘性率を η 、おもりの半径を r 、おもりの速度を v とおくと、

$$f = 6\pi\eta r v$$

と書ける (Stokes の法則)。なお、空気の粘性率は室温で $18.2 \times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s}$ である¹²⁾。振り子の変位角 θ が十分小さい時、最下点からのおもりの水平方向のずれを x とおくと、速度は $\frac{dx}{dt}$ 、 $\sin(\theta) = \frac{x}{\ell}$ と近似でき、運動方程式は、

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + 6\pi\eta r \frac{dx}{dt} + mg \frac{x}{\ell} = 0$$

となる。ここで、 m はおもりの質量である。この方程式の一般解は、

$$x(t) = A \exp\left\{-\frac{3\pi\eta r t}{m}\right\} \exp\left\{t \sqrt{\left(\frac{3\pi\eta r}{m}\right)^2 - \frac{g}{\ell}}\right\} \\ + B \exp\left\{-\frac{3\pi\eta r t}{m}\right\} \exp\left\{-t \sqrt{\left(\frac{3\pi\eta r}{m}\right)^2 - \frac{g}{\ell}}\right\}$$

で与えられる。ここで、 A と B は任意の定数である。 $\left(\frac{3\pi\eta r}{m}\right)^2 - \frac{g}{\ell} < 0$ の条件のもとでの特解のひとつは、

$$x(t) = C \exp\left\{-\frac{3\pi\eta r t}{m}\right\} \sin\left\{t \sqrt{\frac{g}{\ell} - \left(\frac{3\pi\eta r}{m}\right)^2}\right\}$$

であるが (C は任意定数)、これは時間と共に振幅が減衰する調和振動をあらわし、空気中の振り子が時間と共に振幅が小さくなり、遂には停止する現象に対応する。このときの周期 T は、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g} \left(1 - \frac{\ell}{g} \left(\frac{3\pi\eta r}{m}\right)^2\right)^{-1/2}} = T_0 \left(1 - \frac{\ell}{g} \left(\frac{3\pi\eta r}{m}\right)^2\right)^{-1/2}$$

となる。ここで、 T_0 は空気抵抗を無視した場合の周期であり、空気抵抗が周期に影響を与えることを上式は示す。しかし、 ℓ を 1 m、 r を 0.015 m、 m を

100 g として計算した場合、周期は、 6.8×10^{-11} 秒程度大きくなるに過ぎない。これは実験上無視できる値ではあるが、教師の立場としては是非知っておきたい事象である。ちなみに、 $\left(\frac{3\pi\eta r}{m}\right)^2 - \frac{g}{\ell} \geq 0$ の条件のもとでは、振り子はもはや周期運動を行わず、おもりはただ落下して最下点で停止するのみである。この現象は、おもりの質量が極端に小さいか、振り子の周囲が空気ではなく、粘性の非常に大きい流体である時に見られる現象である。例えば、粘性が空気より約 2 桁大きい水の中では、通常の振り子を振動させるのは困難であることが、この解析結果から読み取れる。

おもりの慣性モーメントも振り子の周期に影響を与える。おもりの大きさを無視した時の振り子の慣性モーメントは、おもりの質量を m とすると、 $m\ell^2$ で与えられるが、おもりが半径 r の球であった場合、おもりの重心周りの慣性モーメント、 $(2/5)mr^2$ を加えた $m\ell^2 + (2/5)mr^2$ で与えられる。この時の周期は、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}} \sqrt{1 + \frac{2r^2}{5\ell^2}} = T_0 \sqrt{1 + \frac{2r^2}{5\ell^2}}$$

となる。ここで T_0 は、おもりの大きさを無視したときの周期である。 ℓ を 0.25 m、 r を 0.015 m とすると、周期は 7.0×10^{-4} 秒だけ遅くなるに過ぎないが、極端な例として、 ℓ を 0.25 m、 r を 0.15 m とすると、周期は 0.07 秒だけ遅くなり、無視することができない値となる。現実的には、25 cm の振り子に半径 15 cm のおもりを吊るすことは無いであろうが、極端に短い振り子を用いて実験を行う場合は、できるだけ小さなおもりを用いることが賢明である。密度の大きな材質をおもりとして使用し、体積を小さくすることにより、大気中における浮力や付加質量¹³⁾の問題も回避できる。

その他にも、おもりの運動に伴う遠心力によるひもの伸びも周期に影響を与えるので、本文でも言及したように、弾性係数が大きな材質を、おもりを吊るすために用いるべきである。

参考文献および注

- 1) 文部科学省『小学校学習指導要領 平成 20 年 3 月告示』東京書籍 (2008).
- 2) 松村敬治「新学習指導要領のねらいと小学校理科の展開」西南学院大学人間科学論集 第 5 巻 1 号 pp.47-65 (2008).
- 3) 文部省『小学校学習指導要領 平成 10 年 12 月告示』大蔵省印刷局 (1998); 文部科学省『小学校学習指導要領 平成 10 年 12 月告示 平成 15 年 12 月一部改正』改訂版 独立法人国立印刷局 (2004).
- 4) 文部科学省『小学校学習指導要領解説 理科編』大日本図書 (2008).
- 5) 戸田盛和、有馬朗人他 47 名『新版 たのしい理科 5 年下』大日本図書 (2005).
- 6) 国土地理院のホームページの重力のサイト (<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/gravity/>) から
- 7) 文献 6 によると、重力の加速度 g の値は、赤道面と極とでは約 0.5% の差があり、標高についても 1 m につき約 0.3 ppm の差がある。日本国内では、同じ海面上でも南と北では約 0.2% の差がある。重力加速度の値は場所によって異なるため、国際度量衡会議では標準重力加速度の値を「北緯 45° の海上の重力加速度の値」と定義し、その値を 9.80665 m/s^2 と規定している。ちなみに、福岡市の重力加速度の値は約 9.79615 m/s^2 であるので、本文の周期の計算にはこの値を用いた。
- 8) R. A. Nelson and M. G. Olsson, *Am. J. Physics*, 54(2), 112-121 (1986)
- 9) 津幡道夫他 10 名『新版 たのしい理科 5 年下 教師用指導書』大日本図書 (2005).
- 10) このやり方で実験を行うと振り子の周期は 1/100 秒の精度で求まるが、2005 年版の教科書⁵⁾を良く見ると、求めた数値の 1/100 秒の位をさらに四捨五入して 1/10 秒の桁で振り子の周期を記入した実験ノートの例を記載している。
- 11) 測定回数をさらに 2 回増やして 5 回にし、得られた 5 つのデータの中から最大値と最小値のデータを取り除いて、残り 3 つのデータを測定値にするというやり方もある。この方法を用いると 1 秒以上の開きのあるデータは殆どの場合排除できるはずである。ともかく、測定ミスが明らかなデータは取り除く必要がある。
- 12) 理科年表 丸善 (2000)
- 13) 流体中では、剛体は周りの流体を引きずりながら運動する。そのため、見かけ上の慣性質量が真の質量より大きくなる。流体中の見かけ上の質量と真の質量との差を付加質量と呼ぶ。浮力と付加質量は、振り子の周期に影響を与える物理量ではあるが、小学生児童が行う実験の精度を考慮すると、おもりに密度の大きな材質を使用する限り無視して差し支えない。