

スマホのスローモーション撮影から“見えてきたもの” ~簡易実験の精度向上を目指して~

熊本県立宇土中学校・宇土高等学校スローモーション班 高校2年 吉田総一郎 西村健伸 沖田千怜 西野寧恵 龍 ひまり

要約

物理の授業では重力加速度は約9.8m/s^2と習ったが、さらに詳しく調べてみるとこの「9.8」という値は、場所だけでなく、時間によっても変化しており、精度が高くなると地下構造を理解したり火山噴火を予測したりすることさえも可能となるということを知った。近年、スマートフォンのカメラ性能の向上が著しく、フルハイビジョン画質(1080p)での撮影に加えて、スローモーション撮影も240fps(0.0042s毎)で可能なため、時間の精度も8倍に高まることから、これまでの重力加速度の簡易測定実験の5~10%程度の誤差を1%程度に抑えられると考えた。また、反発係数は、教科書に「衝突し合う物体の材質や形状で決まる定数と見なしてよい」とあるが、本当に「定数と見なせる」のかを検証する。また、手軽でより正確に諮る方法も考案する。実験結果から、重力加速度はg=9.797m/s^2で、誤差を0.03%に抑えることができた。ちなみに、慣性モーメントを考慮した実体振り子の式に実際の物理量を代入して重力加速度を求める式に当てはめたところ、g=9.8002m/s^2(宇土市の重力加速度9.800m/s^2と一致)となったことから、

公式により求めたg=9.797m/s^2は、偶然によるものではないことも証明できた。また、反発係数の測定は、振り子式を用いて行ったが、定数とみなせるほど一定ではなく、衝突を繰り返すごとに上昇し、その後下降することが分かった。

これまでハイスピードカメラは非常に高価で手に入れることは不可能に近かったが、スローモーション240fpsの登場によって、誰もが持っているスマートフォンで簡単にしかも無料で有効数字4桁の精度、かつ、誤差0.1%以下(今回の最小誤差0.03%)の値が得られることを示すことができた。これまで、スマートフォンのスローモーション撮影によって重力加速度の精度を高めたという報告はなく、今回の研究により、簡易性に加え、地球上の様々な場所に移動しても比較的高い精度が得られることを証明できたことは、教育や研究の視点から見ても大きな意味を持つと考える。

1 はじめに

<重力加速度の簡易的な測定方法の種類と誤差の影響>

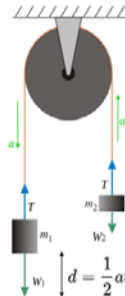
1 記録タイマー (準備物: 記録タイマー、記録テープ、おもり)

- 記録テープの摩擦
打点の不整脈
打点間隔の読み取りの限界 (~1mm)
空気抵抗



3 アウトウッドの器械 (ストップウォッチ、滑車、ひも、おもり)

- ストップウォッチのタイミングの限界 (~0.1s)
滑車の回転軸の摩擦抵抗
滑車の慣性モーメントによる影響
空気抵抗 (小さい)



g = a * (m1 + m2) / (m1 - m2)

4 ばね振り子 (つるまきばね、おもり、カメラ、ストップウォッチ)

- 鉛直方向以外の振動のぶれ
空気抵抗

T = 2 * pi * sqrt(m/k) = 2 * pi * sqrt(x0/g) より g = x0 * 4 * pi^2 / T^2



5 単振り子 (ピアノ線、おもり、カメラ、ストップウォッチ)

- 振れ角 theta が大きいと誤差大 (公式が使えない)
振り子の長さ l の読み取りの限界
空気抵抗 (かなり小さい)

T = 2 * pi * sqrt(l/g) より g = l * 4 * pi^2 / T^2



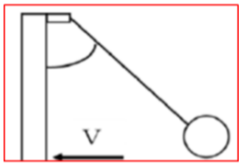
高校物理の教科書や副教材でも紹介されているが、それぞれにメリット・デメリットがあり、精度向上には限界がある。

<反発係数の測定の難しさと測定法>

- 空気抵抗の影響
衝突させる床や板の固さによって変化
同じ球を何回も衝突させると、球や板の温度が上昇し、反発係数に大きく影響

スローモーション撮影により周期の精度向上が期待できる単振り子を採用

空気抵抗の影響がほとんどない『振り子式(2017宇土高)]を採用



2 目的

最近スマートフォンカメラ性能の向上により、1080pHDの高画質(1920x1080画素フルハイビジョン画質プログレッシブ表示)で、240fps(0.0042s毎)でのスローモーション撮影が誰でも簡単にできるようになってきた。これを利用して重力加速度、反発係数の検証を行う。

1 重力加速度測定の精度向上を目指す

目標値: 重力加速度の誤差0.1%

2 反発係数測定の精度向上を目指す

(重力加速度を正確に求めるには空気抵抗を考慮した速度を知る必要がある。また、反発係数の測定のための実験が紹介されていないため。)

3 方法

単振り子

※使用鋼球: 直径40mm、286.0g

- (1) ピアノ線におもりを吊るしたときの振り子の長さ l (固定値) を測る。
(2) 振り子の横軸にものさしを設置して中心線(振動の中心)を設定する。
(3) 振り子のように iPhone のスローモーション撮影(240fps)でストップウォッチと一緒に撮影し、ピアノ線が中心線を通る時刻を読み取る。
(4) 振れ幅を5cm(5.7)、2cm(4.5)、1cm(4.2)で揺らして測定する。
(5) g = l * 4 * pi^2 / T^2 に代入して、g を算出する。



反発係数

- 1. 鉄球を鉄線で吊り、振り子の原理で壁から約40cm、16cmから引っ張ってはなす。
・40cm ビースピを用いて、2点間距離の移動時間を測定して、速度を算出する。
・16cm 壁への衝突前1cm、衝突後1cmの移動時間を、スロー再生ソフト(ウゴトル)でカウントして、速度を算出する。
2. e = |v'/v| に代入して反発係数を出す。
3. 再現性を確保するため、それぞれ10回ずつ行う。(計 20回)



4 結果

単振り子

単振り子における重力加速度 g の算出

反発係数

振り子における反発係数の算出

衝突速度: 大→小

振り子の長さ l (支点から重心までの距離)

g = l * 4 * pi^2 / T^2

※ l は 0.768733 m, T は表の平均周期を代入

l = 768.73 ± 0.243 mm

Table with columns for pendulum length l and period T for different amplitudes.

g = 9.698 m/s^2 誤差 1.04%

5 cm 振れ幅

Table for 5cm amplitude pendulum data.

g = 9.747 m/s^2 誤差 0.54%

2 cm 振れ幅

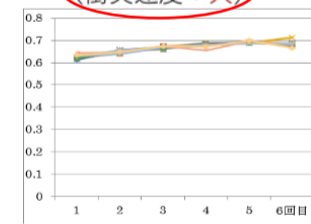
Table for 2cm amplitude pendulum data.

g = 9.797 m/s^2 誤差 0.03%

1 cm 振れ幅

Table for 1cm amplitude pendulum data.

(衝突速度: 大)



(衝突速度: 小)

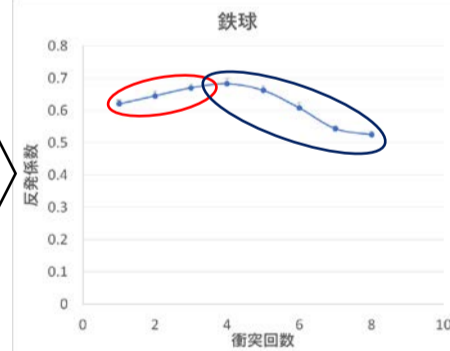
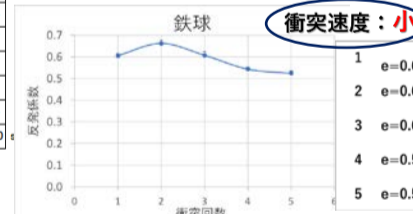


Table showing coefficient of restitution values for different collision velocities.

5 考察・結論

単振り子

- 振れ幅が小さくなるにつれ、誤差も小さくなることを確認できた。
単振り子の公式でも、誤差を1%以下(今回: 0.03%)に抑えられることがわかった。

単振り子はばらつきがなく、精度が高い

追加

慣性モーメントを考慮した実体振り子で重力加速度を求める!

理由:

- より実験環境に近づけ、精度を向上させるため
偶然性を排除するため

※慣性モーメント: 回転のしにくさの程度を表す物理量(大学で履修する内容)

①、②で式を作成

g = 4 * pi^2 * (l + r) / T^2 * (1 + 2 * r^2 / (l + r)^2) * (1 + theta^2 / 8)

Table of measured physical quantities for the physical pendulum experiment.

反発係数

グラフは、衝突を繰り返すごとに上昇し、ピークをむかえてから下がることを確認できた。

なぜピークをむかえるかはわからない。

反発係数は一定ではない!

Table showing the effect of amplitude on the measured gravity acceleration.

Table showing the effect of amplitude on the measured gravity acceleration when considering the physical pendulum.

公式 g = l * 4 * pi^2 / T^2 を利用した場合でも高い精度が得られた。慣性モーメントを考慮した g との比較から、測定の精度が担保できた!

宇土市の重力加速度 9.800 m/s^2 に一致!

結論

- 記録タイマーやアウトウッド、ストロボ撮影による重力加速度の誤差は、5~10%程度であるのに対して、スローモーション撮影240fpsを用いた単振り子は、誤差が1%以下(今回0.03%)に抑えられることがわかった。
スローモーション撮影によって、反発係数は「定数とみなせる」ほど一定ではなく、衝突を繰り返すごとに上昇し、その後、下降することが新たにわかった。
正確に反発係数を求めることに成功した。(振り子式反発係数測定法の確立)

今後の展望

- 振り子式反発係数測定法を用いて、いろいろな材質の球の反発係数を求める。
反発係数が、衝突を繰り返すごとに上昇し、その後、下降する原因を突き止める(上昇は熱エネルギーの影響と考えられるが、下降する要因は不明)
スローモーション撮影(240fps)によって、精度が向上する実験が他にないか調べる。

<参考文献>

- 教科書「改訂 物理」(東京書籍)
兵庫大学 剛体テキスト
http://www.sci.u-hyogo.ac.jp/material/electro_phya/