

空気抵抗

あなたが自由落下の物理の問題を解く時、しばしば空気抵抗を無視し、加速度を一定と仮定するように言われる。実際の世界では、空気抵抗のために、加速度一定で無制限に落下することはない。このことを確認する一つの方法は、1メートルの高さから1枚の紙とバスケットボールを落下させて比べることである。バスケットボールは、床に達しても加速されている、バスケットボールに対するよりも、空気は紙に対してより大きな影響を与える。空気抵抗が加速度を減少させ、ほぼ一定速度で紙が落下するまで、紙はそれほど長い時間加速されない。物体が一定速度で落下する時、私たちはそれが終端速度 v_T に達したと説明する。紙は少しの落下で終端速度に直ぐに達するが、バスケットボールはそうではない。

空気抵抗は、時として摩擦力として参照される。空気中で様々な物体の落下実験が行われている。これらの実験で、ある時は摩擦力が速度に比例し、またある時は摩擦力が速度の2乗に比例することが示される。どちらの場合も、摩擦力の方向は、運動方向の反対向きである。数学的には、摩擦力 (F_{drag}) は、次式で表される。次式の b と c は、摩擦係数と y と呼ばれ、物体の大きさや形に依存する。

$$F_{\text{drag}} = -bv \quad \text{あるいは} \quad F_{\text{drag}} = -cv^2$$

落下する時、物体には二つの力が作用する：一つは重さ (mg) であり、もう一つは空気抵抗 ($-bv$ あるいは $-cv^2$) である。終端速度では、上向きの力と下向きの力の大きさが等しい。つまり、摩擦力の関係式によって、次の関係のどちらかが成り立つ。

$$mg = -bv \quad \text{あるいは} \quad mg = -cv^2,$$

ここで、 g と b 、 c は定数である。終端速度は、物体の質量に影響される。これらの式から、定数を取り除くと、次の関係がわかる。

$$v_T \propto m \quad \text{or} \quad v_T^2 \propto m$$

もしも、質量に対する速度 (v_T) と速度の2乗 (v_T^2) のグラフを描けば、私たちはより適切な関係式がどちらかを決定できる。

この実験であなたはコーヒーフィルターの質量の関数として終端速度を測定する。そして、実験結果を摩擦力がどちらのモデルに当てはまるかを決定するために使う。コーヒーフィルターを用いるのは、短い距離で終端速度に達するほど質量が小さいからである。

目的

- ・ コーヒーフィルターの落下に対する空気抵抗の影響を観測する。
- ・ 落下物体の終端速度に空気抵抗と物体の質量がどのように影響するかを決定する。
- ・ 落下するコーヒーフィルターに働く空気抵抗に対する二つのモデルから、観測結果に近いモデルを選択する。

準備

LabQuest
LabQuestソフトウェア
バーニア社製運動検出器

バスケット型コーヒーフィルター (5)
(オプション)
Logger Pro あるいはグラフ用紙

事前問題

- 1枚のコーヒーフィルターを手で持つ。それを離して、地面に落ちるのを注視する。次に、2枚のフィルターを落下させる。フィルターを2枚にすると、より速く落下するか、それともより遅く落下するか、あるいは同じ速さで落下するか？落下速度とフィルターの枚数の間に存在するどのような数学的関係があるか予測せよ。
- 1枚のコーヒーフィルターを用いた場合の時間に対する速度のグラフを予想して描け。
- もしフィルターが一定速度で動いているなら、フィルターに働く力について、あなたは何か知っているか？

手順

1. 図1に示したように、運動検出器を床から2mの高さで下向きに固定する。
2. 運動検出器の感度をBall/Walkに設定する。次に運動検出器をLabQuestのデジタルポート1 (DIG1) に接続する。そして、FileメニューからNewを選択する。
3. コーヒーフィルターを運動検出器の下0.5mの位置に、あなたの手で支持する。ここで、コーヒーフィルターと運動検出器の間の距離が0.15m以内にならないようにする。
4. データの記録を開始する。その後、運動検出器の下でコーヒーフィルターを離し、床に向かって落下させる。あなたの手をできるだけ速く運動検出器の音波から出して、検出器がコーヒーフィルターだけを測定し、グラフにするようにする。
5. あなたの位置のグラフを調べる。
 - a. もしもフィルターの運動がバラツキ、滑らかなグラフが得られなかった場合は、あなたは実験をやり直す。練習によって、フィルターは周囲にズレずにほとんど真っ直ぐに落下する。
 - b. 実験をやり直すには、落とす準備ができた時、単にデータの記録を開始するだけである。滑らかなグラフが得られるまで、実験をやり直す。
6. コーヒーフィルターの速度は、時間に対する位置（距離）のグラフの傾きから決定できる。グラフの最初の部分は、傾きの大きさが増加する（速度が増加する）領域があるが、グラフが直線になる部分領域がある。この直線の傾きは速度なので、グラフの直線部分は、コーヒーフィルターが一定速度あるいは終端速度 (v_T) であることを示す。
 - a. グラフの直線部分の範囲を、タップしてドラッグすることで選択する。
 - b. 分析 (Analyze) メニューから、曲線回帰 (Curve Fit) を選択し、変数メニューの ☐ Position (位置) にチェックを入れる。
 - c. 回帰式 (Fit Equation) から線形 (Linear) を選択する。
 - d. 線形回帰の傾き (速度, m/s) の値をデータ表に記入して、OKを選択する。

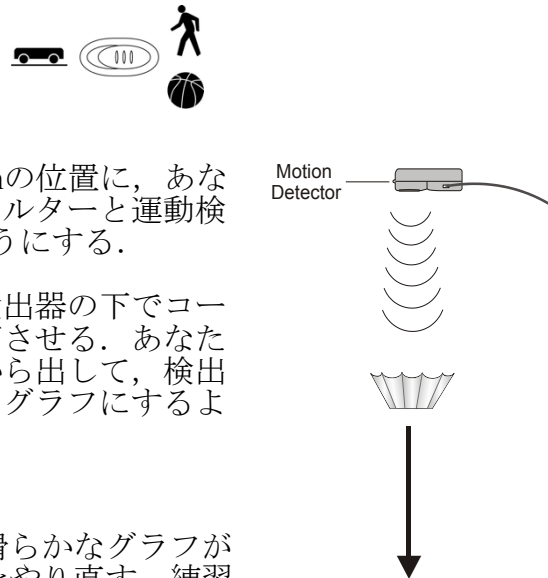


図1

7. 手順3～5の作業をフィルターの枚数を2枚, 3枚, 4枚, 5枚に変化させて, 繰り返して行う. ただし, 明確な終端速度を測定するために, 十分な落下距離を確保する.

データ表

フィルターの枚数	終端速度: v_T (m/s)	(終端速度) ² : v_T^2 (m ² /s ²)
1		
2		
3		
4		
5		

考察

1. 摩擦力に関する二つのモデルから1つを選ぶために, コーヒーフィルターの枚数(質量)に対する終端速度 (v_T) のグラフを作成する. 別々のグラフにフィルターの枚数に対する終端速度の2乗 (v_T^2) のグラフを作成する. LabQuestあるいはLoggerProあるいはグラフ用紙を使う. グラフの原点は, (0, 0) とし, それぞれの軸がゼロから始まるようにする.
2. 終端速度では, 物体に働く摩擦力が物体の重さ (mg) に等しい. もしも, 摩擦力が速度に比例するなら, $v_T \propto m$ である. もしも, 摩擦力が速度の2乗に比例するなら, $v_T^2 \propto m$ である. あなたのグラフから, どちらの比例関係があなたの実験結果に一致するか? つまり, どちらのグラフが原点を通る直線に近いのか?
3. 前の考察で選択した比例のグラフから, 摩擦力として, どちらの関係 ($-bv$ あるいは $-cv^2$) が実際のデータをよりよく表現しているか?. あなたは空気抵抗の異なる二つの説明の中から選ぶことに気付くが, 一方あるいはどちらのグラフもあなたが観測したことに一致しないであろう.
4. 落下時間はコーヒーフィルターの重さ (mg) (摩擦力) に関係付けられるか? もしも1枚のフィルターが時間 t で落下するなら, 4枚のフィルターの場合はどのくらいの時間で落下するか? ただし, フィルターは常に終端速度で落下すると仮定する.

発展

1. 小さなパラシュートを作り, 吊るす錘を増加させて, つまり質量を増加させて, 空気抵抗と終端速度の分析を行うために運動検出器を使う.
2. 落下するコーヒーフィルターの自由落下の図を描け. フィルターには2つの力しか作用していない. 終端速度 (v_T) に達すると, 加速度がゼロとなる. つまり, 力の総和もまたゼロ ($\Sigma F = ma = 0$) となり, あなたが用いた摩擦力によって, 次のどちらかの式となる.

$$\Sigma F = -mg + bv_T = 0 \quad \text{あるいは} \quad \Sigma F = -mg + cv_T^2 = 0$$

上記関係が与えられたとして, フィルターの重さを横軸 (x軸), 終端速度を縦軸 (y軸) として, グラフを描け. ヒント: 最初に v_T について解く.

出典

Kenneth Appel, John Gastineau, Clarence Bakken and David Vernier, " Physics with Vernier", MEASYRE.ANALYZE.LEARNTM., 2009.

評価版のダウンロード先 : http://www.vernier.com/files/sample_labs/PWV-13-COMP-air_resistance.pdf

注意

この資料には次の事項が含まれていない :

- ・ 安全に関する情報
- ・ 指導者のための基本情報
- ・ 学習指導要領（教育カリキュラム）との関係に関する情報
- ・ 実験を成功させるための留意点