

3 物の落ち方

私たちは日常生活でいろいろなものが落ちるのを観察します。例えば、消しゴムを床に落とします。始めに消しゴムが動いていなければ、ほとんど真下に落ちることを私たちは知っています。しかし、具体的に、どのような速さで落ちるのでしょうか。そこまで考えて観察したことは無いのでしょうか。今回は、そんな物の落ち方を考えてみたいと思います。

- ストップウォッチ
- タイマー

3.1 落下の実例

では早速物を落としてみます。皆さんも一緒に観察してみてください。

ところが、残念ながら、物を落としてみるでも、速すぎてその落下の様子を詳しく見ることができません。人間の目の能力には限界があるのです。そこで、今度は、ビデオカメラで撮影してみましょう。そして、撮影したビデオの映像を、1コマずつ見たり、ゆっくり見たりすれば、落下する様子がわかるはずですが、ビデオカメラや通常のテレビでは、通常、1秒間に30枚の映像を表示しています。それが連続的に動いているように見えるのは、人間の目の能力が十分ではなく、一度見た映像が残っているからです。目に残った映像を残像といいます。従って、ビデオカメラで撮影すると、通常、 $1/30$ 秒 (0.0333...秒) に1枚の映像を撮影したことになります。これを見れば時間的な変化がわかるはずですが、

それでは、今度は、実際にボールを落とす様子をビデオカメラで撮影し、1コマずつ表示してみます。

このようにすることで、落下する様子が、よりわかりやすくなります。ただ、こうするだけでは、例えば落下するスピードまではわかりません。そこで今度は別の方法を試みます。切り出された1コマごとの映像について、それぞれ、その一部分を切り出し、切り出した物を並べてみるのです。具体的には、ボールが写っている部分を縦方向に切り出し、それを並べて1枚の写真に合成しなおしてみます。ここでは、本学で⁶開発したソフトウェアを用いて処理してみます。

この画像を見てください。今の場合、画像の縦方向が鉛直方向の位置 (つまり、高さ) に対応し、横方向は時間に対応します。この図では、右にいくほど時間が経過しています。このような図は、ちょうど、横軸に時間をとって、縦軸にボールの高さをとったグラフになっていることに気をつけてください。この図から、時間が経過することで、ボールの位置が下に下がっている様子が分かります。もう一つ重要な点は、時間がたてばたつほど、ボールの位置の変化が大きくなる、ということです。これは、つまり、時間と共に落下する速さが速くなっていることを意味しています。この例のように、通常、物質が落下する場合には、次第に速さが増すのが普通です。速度 (速さと運動の向き) の時間的な変化には名前がついていて、これを「加速度」といいます。また、加速度があるような運動 (つまり、速さや運動の向きが変化するような運動) を一般に「加速度運動」といいます。落下は、加速度運動の一例です。

⁶というより私が

3.2 落下の速さと大きさ

私は、空想特撮物のテレビ番組が好きです。そこで、気になる映像がありますので、これを見てください。こちらは、ウルトラセブンという特撮番組の一部です。この映像の中では、スローモーションになる部分があることに気づきます。具体的には、ウルトラセブンが倒れてビルが崩壊 ((瓦礫が落下する) するシーンシーンです。このシーンはスローモーションになっています。この講義を受けている学生の皆さんは、既に 18 才以上の人がほとんどですので、本当のことを言ってしまうと、ウルトラセブンは実在しません。そして、ウルトラセブンになっているのは、スーツを着た人間です。ところが、この特撮部分を見ると、人間が倒れるというよりも、本当に巨人が倒れ込んでいるように見えます。また、人間の大きさよりも小さいおもちゃのビルが壊れているのではなく、本物のビルが壊れているような印象を与えます。

これはどうした理由によるのでしょうか。試しに、私自身もミニチュアを作ってみました。これがその映像です。ビルの上に立っている人が、巨人の手によって落下する様子を表現してみました。どうでしょうか。それなりに見えるでしょうか。残念ながら、どうみても、普通のペットボトルの上の人形がぼろっと落ちたようにしか見えなと思います。

もちろん、模型の作り込みは大切です。ウルトラセブンを作成した円谷プロという会社は、第二次世界大戦のころからこうした特殊撮影技術を独自に積み重ねてきた会社です。その作りこみには定評があります。しかし、ここでは、そうした作り込みとは別の、落ちる時間に注目しましょう。私の作った映像について、落下時間を調べるために、例によって映像の縦の部分を取り取って並べてみます。その結果、わずか数コマ (ひとコマは、 $1/30$ 秒です) で落下してしまいます。人形の大きさを基準にすると、1 コマで落ちてしまっています。ところが、ウルトラセブンの場合には、わざとスローモーションにしてゆっくり落下させています。

これがヒントになりそうです。

3.3 落体の法則

こうした現象を詳しく調べようとした人がいました。ガリレオ・ガリレイです⁷。残念ながら、ガリレオだけで全ての謎が解けた訳ではありません。しかし、ガリレオやその後継者たちは、次の二つの重要なことに気づきました。

- ものが落下するとき、その落ち方は、物の質量 (「重さ」によらない⁸)
- ものが落下するとき、その落ちる速さは、時間に比例して速くなる

この講義の趣旨からすると、それを確かめたいところです。2 番目の項目については、先ほどのビデオである程度は確認することができます。また、定量的ではありませんが、ある程度なら、講義の中で実験することもできます。

それでは、次に、これらを基礎にして、ものが落ちる時間について考えましょう。いま、先ほどの人形と、普通の人間と、ウルトラセブンで考えることにします。そして、体の大きさと同じ高さだけ落下するのにどれくらい時間がかかるかを考えてみます。

⁷最近では、テレビ、映画、書籍などで名前を聞いた人もいかもしれません。

⁸「重さ」については、4.4 節で改めて扱います。

その時間は、おおよそ、

$$(\text{落下しはじめてからの時間}) = \frac{(\text{体の大きさ})}{(\text{落下する速さ})}$$

で見積もることができます⁹。落下する速さは、時間と共に増大します。しかし、ここでは細かいことを考えず、(落下する速さ)を(落下にかかった時間に対応する速さ)で置き換えることにします。つまり、

$$(\text{落下する速さ}) \propto (\text{落下しはじめてからの時間})$$

とする訳です。ここで、 \propto という記号は、「比例」することを表しています。例えば、「A は B に比例する」とは、「B が 2 倍になったら A も 2 倍になる」「B が 3 倍になったら A も 3 倍になる」といった関係のことを表すときに使う表現です。この場合、(落下しはじめてからの時間)が 2 倍になると、(落下する速さ)も 2 倍になる、(落下しはじめてからの時間)が 3 倍になると、(落下する速さ)も 3 倍になる、という関係を表しています。しかし、比例という関係をこのままの表現にしておくといけいので、等号を使った表現に改めます。

$$(\text{落下する速さ}) = C \times (\text{落下しはじめてからの時間})$$

ここで、 C は比例定数と呼ばれるものです。この C の値は現時点ではわかりません。(落下する速さ)と(落下しはじめてからの時間)とが比例することを等式で表すために仮りにもってきたものです。このような仮の係数を用いることで「(落下しはじめてからの時間)が 2 倍になると、(落下する速さ)も 2 倍になる」という関係を等式で表現することができます。

さて、このような二つの式があったときに、これをどのように扱うか考えてみましょう。通常、このように複数の値(変数)と式が現れた場合、代入することで、ある値を消し去る(消去する)ことができます。この場合、(落下する速さ)は、時間的に変化するので、これを直接「はじき」の式に入れることは、実はできません。しかし、ここでは簡単のためにそれができるとしましょう。そして、代表的な速さとして、地面に衝突するときの速さを使うこととしましょう。このように考えて、速度を消去してみましょう。移動距離については相変わらず体の大きさを考えることにします。

$$\begin{aligned} (\text{落下しはじめてからの時間}) &= \frac{(\text{体の大きさ})}{C \times (\text{落下しはじめてからの時間})} \\ C \times (\text{落下しはじめてからの時間}) \times (\text{落下しはじめてからの時間}) &= (\text{体の大きさ}) \end{aligned}$$

となります。

この結論を解釈してみましょう。まず、人間の体の大きさ程度で、ものが落ちる場合はどうでしょうか。実際に人間で試してみます。おおよそ、0.5 秒程度で、人間の大きさ分を落下することができることがわかりました。では、1~2cm の人形ではどうでしょうか。大きさが、1/100 倍です。すると、かかる時間は、1/10[秒]程度であることが予想されます。実際、私のビデオを見ると、それくらいの時間で落下しています。一方、ウルトラセブンはどうでしょうか。ウルトラセブンの伸長を、私たちのおおよそ 50 倍ぐらい(49 倍)の身長としましょう。すると、落下にかかる時間は、0.5 秒の 7 倍程度となり、3.5 秒ということになります。

こうして、数学的な力を借りて、次のような結論を得ることができました。

⁹いわゆる「みはじ」の法則とか、「はじき」の法則などとして覚えている人もいるかもしれませんが。「はじき」とは、「はやさ」×「時間」=「きょり」を、また、「みはじ」とは、「みちのり」=「はやさ」×「時間」を表しています。このように時間と移動した距離と速さの関係を言い表したものです。このように、いろいろなモノの関係を暗記してしまうのは、物理学の本道である考えることとは反しています。そこで、私は個人的にはこのような考え方は好きではありません。

身長自身と同程度の距離を落下するためにかかる時間は、伸長の平方根 () に比例する。

$$(\text{身長と同じ高さを落下する時間}) \propto \sqrt{(\text{身長})}$$

これを、ここでは、「身長分を落下するのにかかる時間の法則」と、仮りに名付けましょう。物理学では、このように、既に分かっている事柄から、数学的な手続きで新たな法則性を見出すことができることがあります。この例はその一つです。

さて、話を元に戻します。ウルトラセブンでは、スローモーションにせず、そのままのスピードで落下させると、いかにも人間が倒れているように見えてしまうので、わざとスローモーションにして、大きな物体が落下しているように見せている訳です。逆に、私たちがそのように感じるということは、私達の頭の中に、既にそのような法則性を感じていたことを意味します。今回考えてきたのは、とりたてて新しいことではなく、なんとなく私たちが感じていたことだったのです。

この話をまとめるにあたって、改めて次の2点を強調したいと思います。

- 「大きな物が落ちるときは、” ゆっくり ” 落ちるように見える」という物理法則は、既に私たちの頭の中にできあがっているのだ、ということ。

だから、特撮でそのように撮影すると大きなものが崩れたように感じる訳です。私たちは、経験の中から物理法則を見つけ、頭の中に自然と形作っている訳です。

- 数学を使うことによって新たな法則を作ることができること。

落体の法則と「はじき」を用いて新たな法則「身長分を落下するのにかかる時間の法則」を見出すことができました。

3.4 空気の抵抗

しかし、実際にはこのような理論通りの落下は起こりません。その理由は、空気の抵抗があるからです。

ここからは余談になります。ガリレオはピサの斜塔で鉄の玉と木の玉を同時に落下させたとされています¹⁰。そして、同時に落下することを示したとされています。ところが実際には、木の玉が鉄の玉に若干遅れた、そして、それは空気の抵抗のためであると、ガリレオは見抜いた、とも言われています。このエピソードが本当かどうかは疑問があるようです。しかし、このエピソードは面白い点を含んでいます。

まずひとつは、「思考実験」についてです。ガリレオの時代には、とても大きくて透明な真空容器を作ることは難しかったことでしょう。そこで、実際に空気の抵抗が無いような状態で実験をすることはできなかつたに違いありません。そこで、実際にはできないけれども、「こうだったらどうだろうか」と頭の中で考えて実験を行うことがあります。これを「思考実験」といいます。

もちろん、このような「思考実験」は、「観察事実によりどこを求めつつ、法則性を追求すること」という観点からすると、観察事実と違うことを法則として考えることは邪道のように思えます。しかし、おそらくガリレオは、布や紙や糸や、そうしたものを沢山落として、それらの落下の

¹⁰このような話の真偽はわからなくなっています

様子を見て、軽いものほどまた、形が風を受けやすいほど落下が遅くなることを知っていたのだと思います。そして、そうした観察をもとにして落体の法則を見出したのではないのでしょうか。

さて、話を元に戻します。空気の抵抗があることによって、落下の速度は低下します。実際に、カードを落として実験してみましょう。もしも空気の抵抗が無ければ、カードをどのように落下させても同じように落ちるはずですが、しかし実際には同じように落ちません。カードの面を鉛直方向に平行にしてから落とす場合と、カードの面を水平面に平行にしてから落とす場合を比べてみましょう。皆さんは、それぞれどのように落下すると思いますか？あらかじめ考えてみましょう。

人間は空気の抵抗についても、これを活用しています。これは、パラシュートで落下する人の落下する様子をグラフにしたものです。これを見ると、最初は速度が変化する(加速度をもった運動をする)ものの、すぐに速度が一定になることがわかります。抵抗がある場合には、空気の抵抗と重力のバランスで丁度一定の速度で落下するようになるのです。このような速さを終端速度といいます。パラシュートが開いていない状態では時速 200km 弱程度が終端速度です。新幹線よりも遅い程度の速さです。一方、パラシュートが開くと、時速 20km 程度です。こちらはマラソンランナー程度の速さです。マラソンランナーが壁に激突しても怪我をせずにショックを吸収できるように、パラシュートを開いて落下すれば怪我をせずに着地することができます。

終端速度について、もう一つ、みなさんが興味を持ちそうな話を紹介したいと思います。皆さんは空の雲を見て、「どうして雲は落ちてこないのだろうか」と思ったことはないのでしょうか？あるいは、「雲に乗れば空を飛べるのではないか」と思ったことはないのでしょうか？実は雲は、雨と同様に水の小さな粒でできています。雨は落下しますが、雲はなかなか落ちてきません。これはどうしてでしょうか。

例えば木材を切るとき、木屑と呼ばれる細かな木の粉が発生します。そして、その粉は宙を舞います。木材が宙を舞うことは、大風が吹かない限りありません。水もそうです。海の水が大量に空中に舞うことは考えにくいですが、ところが、海で発生する水しぶきは空中を舞います。これらは、大きさが小さくなると、重力に対して空気の抵抗が大きくなるために起こると考えられます。

大きめの雨粒の落下速度は、人間が全速力で走る程度の速さで落下します。しかし、小さくなるにつれて落下速度は小さくなり、 $10\mu\text{m}$ ($1/100\text{mm}$) の大きさの雲粒では、わずか、1 秒間に 3mm しか落下しなくなります。これは、雲の中の上昇気流の速さと同じか、それよりも遅いくらいです。そこで、雲は空中に浮かんでいるように見える訳です。

3.5 その他の空気の働き

このように、空気には物体を落下させる時に抵抗となって、ゆっくり落下させる働きがあります。このような働きは、いろいろな場面で重要な役割を果たします。

風に流される植物の種はその一つの例です。タンポポの種が綿毛によって遠くまで流されることは良く知っていると思います。タンポポの場合、綿毛のついた種が落下するのにかかる時間が長いために、その間に吹く風によって種が流されます。遠くまで種が飛ぶことで効率よく繁殖地を増やすことができる訳です。このような例は他にもあります。ユリノキ、イロハモミジ、アオヤギなどは、種の形が空気の抵抗を浮けやすくできています。ケヤキの場合は、枯葉のついた小枝ごと落下することで遠くまで飛ばすことができるようになっています。枝ごと落とすという意味で、「落枝(らくし)」と呼ばれています。

これを人工的に利用する場合があります。例えば野球のボールです。野球でピッチャーがいわゆる「ストレート」を投げるとき、ボールに回転を与えます。このしくみは実演した方がわかりやすいと思いますので、紙コップを二つ組み合わせた実験装置で実演してみましょう。このように回転を与えながら落下させると、落下する様子が変わります。このように回転しながら移動すると、特定の方向にずれていくことは「マグナス効果 (あるいはマグヌス効果)」として知られています。野球のボールのストレートは、マグナス効果によって上向きにスライドします。回転によって落下量を減らしている訳です。この回転を止めると、ボールは重力によって素直に落下します。これが「フォークボール」と呼ばれているものです。

また、野球のピッチャーが投げる球種である「カーブ」や「シュート」もマグナス効果を利用したものです。ストレートが鉛直方向の変化であるのに対して、これらは水平方向に変化するものです。

3.6 人工衛星

皆さんは地球の周りを回っているものとしてどのようなものを知っているでしょうか。例えば月です¹¹。月のように地球の周りを回るものを「衛星」といいます。あるいは、GPS には、「GPS 衛星」と呼ばれる人工的に作った衛星が使われます。このように人工的に作られた衛星を「人工衛星」といいます。日々、宇宙から地球表面の雲などの様子を記録している気象衛星「ひまわり」も人工衛星の一種です。

このような人工衛星はいったいどのようにして地球の周りを回りつづけているのでしょうか。どんな燃料を使っているのでしょうか。実際には、月や人工衛星は、何ら燃料を使わなくても地球の周りを回りつづけます。月や人工衛星は、地球の万有引力によって落下しています。しかし、落下しても地球が丸いものですから、依然として上空にありつづける訳です。こうした運動については、また改めて扱います。

¹¹正確には、月と地球は月と地球の重心の周りを回っています。しかし、近似的に月は地球の周りを回っていると考えていいです