

物体の運動の関連性を可視化するモデルの開発

相馬 恵子

北里大学獣医学部

要旨

中学校理科第1分野「(5) 運動とエネルギー」の落下運動については、斜面に沿った台車の運動を中心に調べ¹、高等学校物理基礎では物体が空中を落下する際の運動の特徴及び物体に働く力の関係について学ぶ²。一般的な指導方法として、記録タイマーやビデオカメラなどを用いた実験があるが、鉛直方向に等加速度運動をしていることを生徒が理解することは難しい。そこで筆者は、中学・高等学校の物理の指導において、自由落下、水平投射、斜方投射など重力の働く場での物体の運動の様子を、コマ送りの映像のように0.1秒ごとの物体の位置で示すことのできるモデルを開発した。

本稿では、モデルの作成及び使用方法に加え、中学校第3学年の生徒を対象に、モデルを用いて行った授業実践例を示した。授業後、生徒が回答した「モデル利用に関するアンケート」の結果から、本モデルは自由落下、水平投射、斜方投射等の運動の様子を理解させることに有効であることが示唆された。

キーワード：物理、理科、教材開発、落下運動、中等教育

はじめに

中学校第1分野「(5) 運動とエネルギー」の単元にある落下運動は、教科書にあるストロボスコープ写真の提示や、記録タイマーの記録テープの打点を分析させて等加速度運動を導き出す指導が一般的である。しかし理解は深まり難く、物体は一定の速さで落下すると考える生徒も一定数存在する。そこで、自由落下運動をはじめ、鉛直投げ上げや水平投射等、重力が働く様々な物体の運動の関連性を示すモデルを工夫し作成した。このモデルは0.1秒ごとの物体の位置を示すものであるが、教室提示し易いように5分の1の大きさに縮小し、全長を1m余りとしている。中学・高等学校の物理の指導において、力と運動の関係を視覚的に関連させて理解させることができるモデルであると考えている。

モデルの作成方法

1 準備物

角材、アクリル板、塩ビ板、PPシート、発泡スチロール板、マジックテープ（裏面粘着テープ付き）、両面テープ、釘、接着剤

2 作成方法

120cm程の長さの角材の中央に、スタンドのクランプで挟む部分になる小さな角材を接着する。反対側には、角材と同じ長さで8cm程度の幅にカットした透明アクリル板を接着する（図1）。アクリル板に10cm間隔で11枚、発泡スチロール板を両面テープで貼り付ける。下から上に行くに従って1枚ずつ枚数を増やして重ねていく。球に見立てたPPシート等をぶら下げるために、発泡スチロールの中央に、木材に届く長さの釘を打つ（図2）。発泡スチロール板には、下から0m、0.5m、1.0m、1.5m・・・5.0mと数値を入れる。

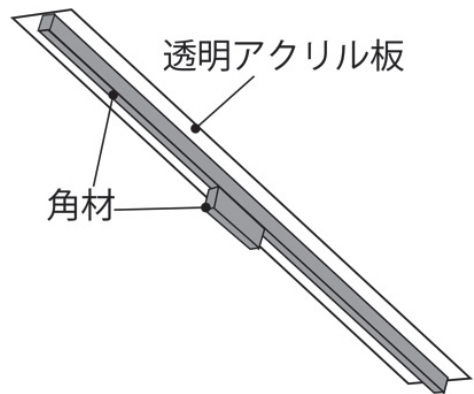


図1 角材と透明アクリル板を接着する

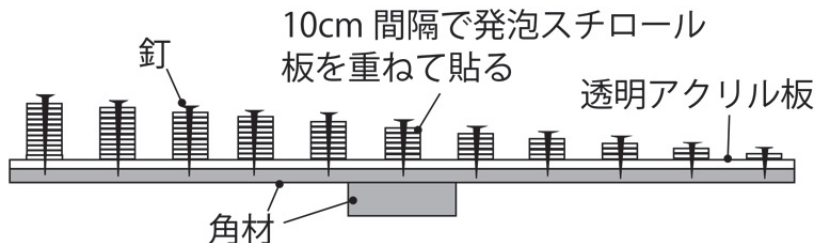


図2 アクリル板に発泡スチロールを接着する

球に見立てる円盤をつくるために、色のついたPPシートを直径6cmほどの円にカットしたものを11枚作り、隅の方に釘の通る大きさの穴を開ける。透明塩ビ板を、幅8cm程度、長さは「重力加速度を 10m/s^2 としたときの0.1秒ごとの落下距離 $\times 0.2 +$ 円盤の直径」程度にカットし、一端には釘の通る穴を開け、穴から落下距離に相当する位置に円盤が貼れるように、マジックテープを貼る（図3）。これを0.1秒～1.0秒まで10枚つくる（図4）。

*このモデルは中学生を対象に作成したため、重力加速度を 10m/s^2 とした。高校生を対象にするならば、重力加速度を 9.8m/s^2 として作成するのがよい。

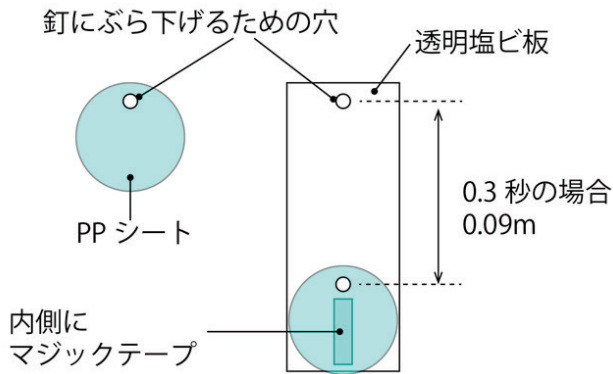


図3 円盤と透明塩ビ板の長さ



図4 透明塩ビ板にマジックテープ

モデルで可視化できる物体の運動

1 自由落下

5 mの高さから球を自由落下させた場合の0.1秒ごとの球の位置を示す。モデルの上部「5.0m」の高さ（5分の1に縮小したモデルであるため、実際の高さは1 m）に長めの細い棒（釘など）を設置し、球に見立てたPPシートを吊す。（これを0.0秒とする）同じ棒に0.1秒後の位置のマジックテープに球を貼り付けた透明塩ビ板を吊り下げ、さらに同じ棒に0.2秒後の位置の透明塩ビ板を、次に0.3秒後の・・・と加えていき、1.0秒後まで吊り下げると、高さ5 mから球を自由落下させた場合の0.1秒ごとの球の位置を示すことができる（図5）。

2 鉛直投げ上げ

鉛直投げ上げの場合は、真上に初速度5m/sで投げ上げた場合の0.1秒ごとの球の位置を示す。もし無重力空間であれば等速直線運動をするため、0.1秒ごとの球の位置は図6のように等間隔に並ぶ。しかし地球上では重力が働くため、0.1秒後には無重力空間なら0.1秒後にあるべき位置より、0.1秒間に落下する距離だけ下にあるはずである。そこで、0.1秒の位置に吊るしてある球を外して0.1秒の透明塩ビ板を吊り下げ、マジックテープに球を貼る。同様に、0.2秒後には無重力空間なら0.2秒後にあるべき位置より0.2秒間に落下する距離だけ下にあるはず。以下同様に1.0秒後まで続けると、図7のようになる。このモデルより、0.5秒後の位置を最高点として1.0秒後に最初の位置に戻ってくることがわかる。

3 水平投射と斜方投射

図7に示す鉛直投げ上げのモデルの支柱は、下から真上へ投げ上げたときの方向を示している。よって、この支柱を90°回転させると、水平に球を弾き出したときのモデルとなる。図8に示すモデルが、初速度5m/sの水平投射の場合の0.1秒ごとの球の位置を示すモデルである。

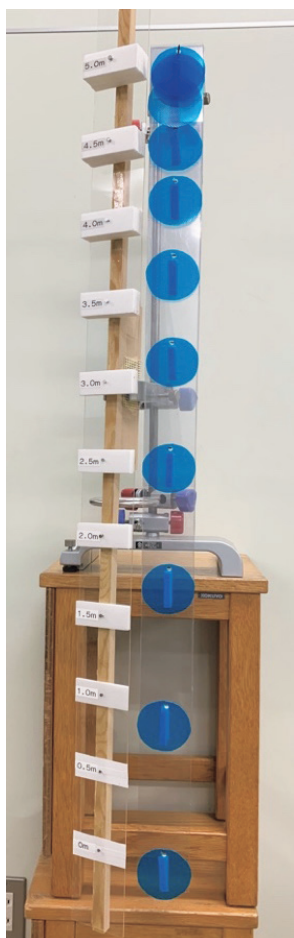


図5 自由落下

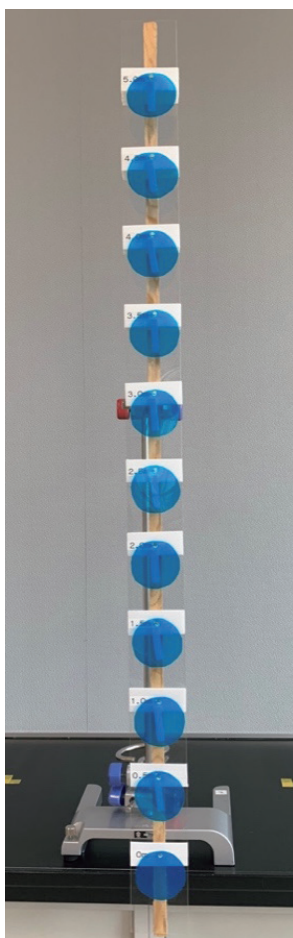


図6 無重力空間の鉛直投げ上げ

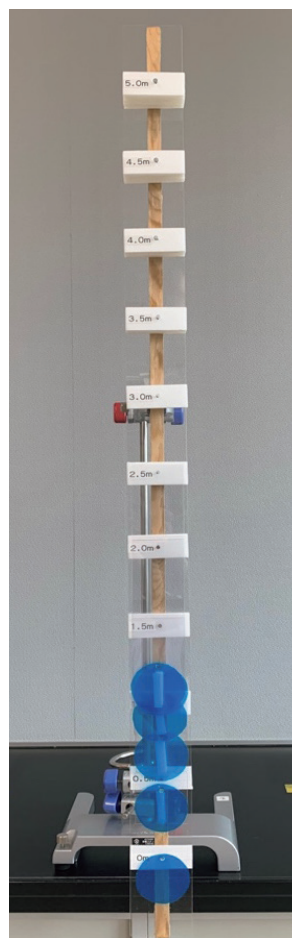


図7 地球上の鉛直投げ上げ

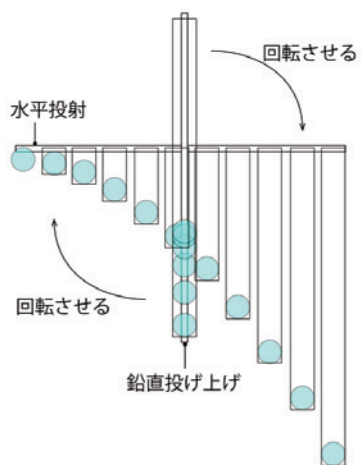
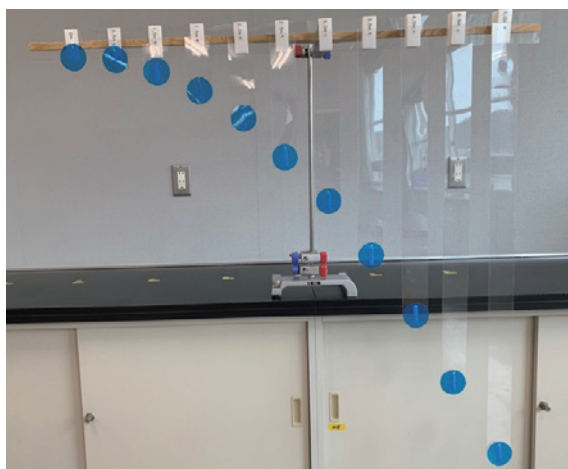


図8 鉛直投げ上げから支柱を90°倒すと水平投射になる



斜方投射の場合は、支柱を水平から斜めの角度に回転させるだけで、任意の角度に初速度5m/sで球を打ち出した場合の0.1秒ごとの球の位置を示すモデルとなる（図9）。

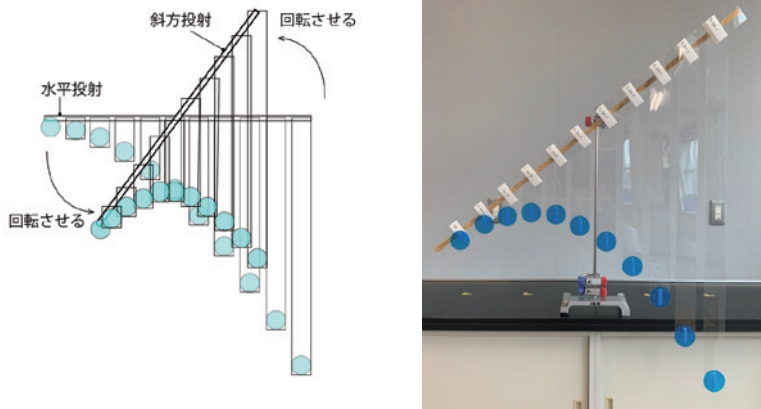


図9 水平投射から支柱を回転させ斜めになると斜方投射になる

モデルを用いた学習指導例

本モデルを用いて、2018年6月、青森県F中学校第3学年2学級の生徒63人を対象に（5）運動とエネルギー（イ）運動と規則性の単元で、「力と運動の関係」を考えさせる授業を行った。ここに示す授業の前には、記録タイマーと斜面・力学台車を用いて「力が働く運動」の学習をひととおり終えた後に実施している。なお、中学校の教科書³には「100gの物体が受ける重力は約1Nである。」とあることから、重力加速度を 10m/s^2 としている。

1 いろいろな運動の移動距離を求める

（1）等速直線運動

等速直線運動をしているある物体の時間と速さの関係のグラフから、速さ×時間＝移動距離、すなわちこのグラフとx軸とで囲まれる長方形の面積が移動距離になることを押さえる（図10）。

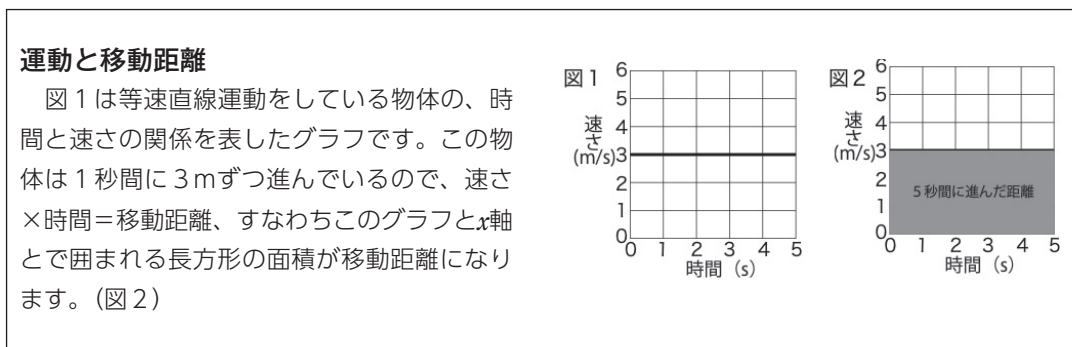


図10 ワークシートの一部

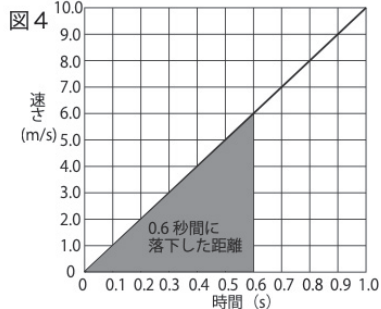
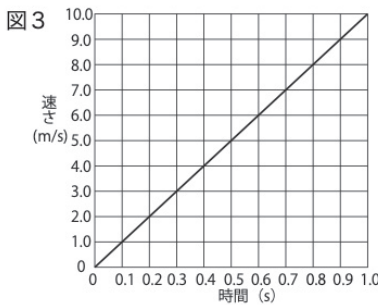
(2) 運動の向きと同じ向きに一定の力が働き続けるときの運動

自由落下する物体の速さの増す割合を1秒間に10m/sとして、時間と速さの関係のグラフを示す。この場合もグラフとx軸とで囲まれる三角形の面積が物体の移動距離、すなわち落下した距離になる。

ここで、落ち始めてから1.0秒後までの落下距離を、0.1秒ごとに計算させる。さらに塩ビ板に円形のPPシートをマジックテープで貼り付けたものを用い、長めの釘をスタンドに固定して、0秒から1.0秒までを順にぶら下げ、0.1秒ごとの球の位置を提示し、数値で求めた落下距離を実際にモデルで確認させる(図11)。

運動の向きと同じ向きに力が働き続ける運動

地球上の全ての物体には、地球の重力がはたらきます。物体が重力のはたらきだけで落下する運動を自由落下といいます。自由落下する物体の速さは、「運動と同じ方向に一定の力が働き続ける運動」なので、「時間とともに速さが増していく運動」になります。このときの速さの増す割合は、1秒間に約10m/sなので、時間と速さの関係を表すグラフは、図3のようになります。この場合も上と同様に考えると、グラフとx軸とで囲まれる三角形の面積が、物体の移動距離、すなわち落下した距離になります。(図4)



物体の落下距離は、図4の三角形の面積ですから、落ち始めてから0.1秒後の落下距離は、
 [0.1] (s) × [1.0] (m/s) ÷ 2 = [0.05] (m) となります。
 同様に、落ち始めてから0.2秒後の落下距離は、
 [] (s) × [] (m/s) ÷ 2 = [] (m) となります。
 以下、同様に落ち始めてから1.0秒後までの落下距離を、0.1秒ごとに計算してみましょう。

時間(s)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
落下距離(m)	0.05									

図11 ワークシートの一部

(3) 運動の向きと逆向きに一定の力が働き続けるときの運動

教科書に掲載されている鉛直打ち上げ運動のストロボスコープ撮影した写真⁴をもとに、なぜこのような運動になるのかを解明する。無重力空間なら、0.1秒ごとに球はどこにあるかを示し、地球上での位置は重力を受けて落ちる距離だけ下にあると考え、点を打たせていく(図12)。

次にモデルを使い、まず球に見立てたPPシートを釘にぶら下げ、無重力空間での球の位置を示す。それから0.1秒ごとに球を外しては塩ビ板をぶら下げ、球をマジックテープの位置に貼り付けるという作業を見せながら、「イの位置からこれだけ下に」、「ウの位置からこれだけ下に」・・・と次々とずらしていくことで、各時間ごとの球の位置を理解させていく。

運動の向きと逆向きに力が働き続ける運動

教科書には、「真上に打ち上げられた球の運動」として、図7のように、時間間隔1/16秒ごとのストロボ写真が載っています。球を真上に打ち上げると、どうしてこのような運動になるのでしょうか。

今、図8のア点から球を5m/sの速さで真上に打ち上げたとします。もしここが無重力空間なら、球は0.1秒ごとに0.5mずつ上がる等速直線運動をするはずですので、イ・ウ・エ・・・と移動します。しかし、地球上では球に重力が働きます。図8の○点から球を打ち上げてから0.1秒ごとの球の位置は、無重力空間のときの球の位置より、重力を受けて落ちる距離だけ下にあるはずで、重力を受けて落ちる距離は、図4の三角形の面積ですから、0.1秒では0.05(m)です。よって、球はイ点より0.05m下のP点になります。0.2秒では0.2(m)ですから、ウ点より0.2m下になります。これをQ点とします。0.3秒では0.45(m)ですから、エ点より0.45m下になります。これをR点とします。このように続けて0.5秒まで、S点、T点を打っていきましょう。

さらに0.6秒から1.0秒まで点を打つとすると、どうなるのでしょうか？

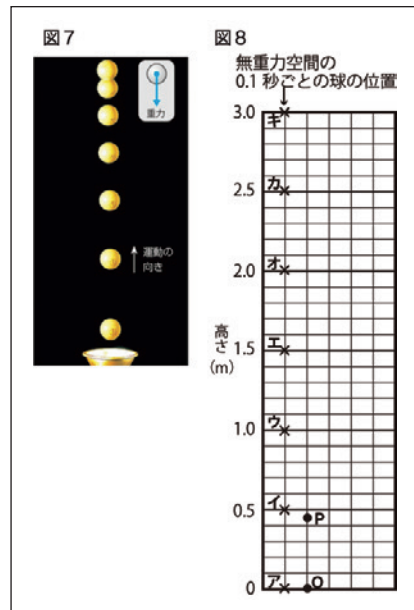


図12 ワークシートの一部

2 どちらのコインが先に落ちるか

「2つのコインを同じ高さから同時に、片方は自由落下、もう片方は真横に弾き出すと、どちらが先に落ちるだろうか」と問いかけ、予想を書いたのち、実験を行う。実験は2本の定規を用意し、片方の定規の

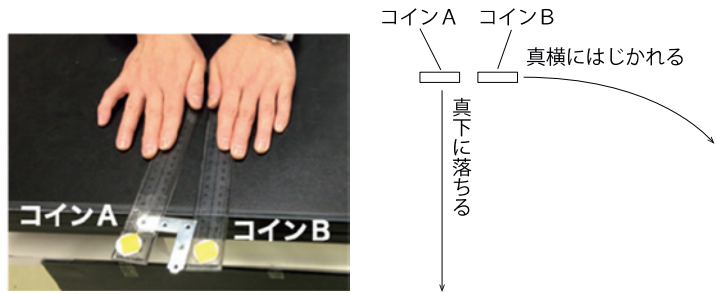


図13 自由落下と水平投射を同時に行う実験

先端に図13のようなL字金具を貼り付け、コインにぶつけて弾き出す方法を用いる。実験の手順は次のとおりである。

- ① 図13のように、机の上で2本の定規をVの字にして押さえ、先の方を机からはみ出させる。
- ② 定規の先にコインを1枚ずつ、黄色いテープが貼ってある方を上にして置く。2本の定規の先の方は、L字金具がコインBのすぐ横に来るような間隔で開く。
- ③ コインBの方の定規は動かさず、コインAが乗っている定規を素早くずらして左の定規にぶつけ、コインBをはじき飛ばす。コインAは慣性によってそのまま真下に落下する。
- ④ タブレットの「カメラ」アプリを立ち上げ、「ビデオ」を選択する。2枚のコインが床に着くところまで画面に入るようにタブレットを構える。撮影を開始したら、コインをはじく。タブレットは固定したまま動かさないで撮影する。
- ⑤ どちらのコインが先に床に着くか、ビデオをコマ送りで再生して確かめる。

実験でコインに黄色いテープを貼るのは、ビデオに写りやすくするためである。背景も暗い色の紙などを貼るとよい(図14)。この実験の結果から、真横に打ち出したコインも、真下に落ちたコインも同時に床に着くことを見出すことができる。どのような運動でも物体の運動は水平方向と垂直方向に分けて考えることができることを説明したのち、なぜ2つのコインは同時に落ちたのか



図14 同時に落ちる2つのコイン

を生徒に考えさせるのである。真横に打ち出されたコインが水平方向に力を受けるのはL字金具がぶつかったときで、そのあとは水平方向には何も力を受けていないため、もし無重力空間であればコインはいつまでも等速直線運動をし続けることになる。しかし実際は垂直方向に下向きの重力を受けているため、水平方向には等速運動、垂直方向には自由落

下運動を行う。よって2つのコインは同時に落ちることになる。このようにまとめたのち、鉛直打ち上げのモデルを提示し、支柱を水平の向きに倒して、コインの飛跡をモデルで確認する。

宇宙空間と2つの球

図1は、 $y=-1/10x^2$ のグラフです。2次関数のグラフを「ほうぶつせん放物線」ともいいます。物体を放り投げると、このグラフのようなコースを通って落ちてきます。

iPadのアプリ「写真」を開き、ビデオをコマ送りで再生してください。ボールは、3コマごとに背景の縦線2本分を進んでいます。すなわち、水平方向には等速で移動しているのです。

宇宙空間は無重力なので、物を放り投げると、手から離れた物体はそのときの向きと速さのまま、等速直線運動をし続けるので、永久に落ちてきません。

今、宇宙空間の点Oから、ある方向へ打ち出された球、Pがあります。Pは等速直線運動で宇宙空間をどこまでも進みます。一方、地球上でPと同じ方向、同じ速さで打ち出された球、Qがあります。図2は、2つの球の軌跡をコンピューター上で合成したものです。それぞれの軌道上の点は、打ち出されてから0.1秒ごとに通過した点です。

さて、ここで問題です。あなたはPの上に乗っているとします。PとQが同時に同じ方向に打ち出されたあと、Pに乗っているあなたから下方のQを見ると、Qはどのように動いて見えるのでしょうか。0.1秒ごとの自分とQの位置関係を見ながら考えましょう。

例えば、動いている電車に乗っているとき、自分が静止していると考えれば、外の景色は後ろに動いて見えますね。この場合も、動くPに乗っている自分が静止していると考えたなら、Qはどこかから何かを見たようすと同じように動いて見えるのではないのでしょうか。

図1

さて、ここで問題です。あなたはPの上に乗っているとします。PとQが同時に同じ方向に打ち出されたあと、Pに乗っているあなたから下方のQを見ると、Qはどのように動いて見えるのでしょうか。0.1秒ごとの自分とQの位置関係を見ながら考えましょう。

例えば、動いている電車に乗っているとき、自分が静止していると考えれば、外の景色は後ろに動いて見えますね。この場合も、動くPに乗っている自分が静止していると考えたなら、Qはどこかから何かを見たようすと同じように動いて見えるのではないのでしょうか。

図2

図15 授業で用いた資料

3 木から落ちるサルを撃つにはどこを狙えばいいのか

「木にぶら下がっているサルを撃とうとした猟師は、サルは驚いて発砲と同時に木から落ちるに違いないと考えた。猟師はどこを狙えば弾はサルに当たるだろうか。」という課題を解決するために図15の資料を配付し、班で討議させる。最初の生徒の予想は「サルの少し下を狙う」「サルを狙う」「サルの少し上を狙う」に分かれたが、資料をもとに班で話し合わせると、多くの生徒が無重力空間で打ち出された球Pの軌跡は鉄砲を向ける方向であり、Qは実際の弾の飛んでいく軌跡であることを見抜いていた。各班の話し合いの結果を発表させると、全ての班が「サルを狙えばいい」という結論を出していた。授業の最後でモデルの支柱を水平から斜めに向けることで、球は放物線を描き、サルが鉄砲からどの距離にいても、必ず弾に当たることをクラス全員で確認し理解を深めた。

モデル利用に関するアンケート結果より

上記の授業を行った中学3年2クラス63人を対象に、モデル利用に関するアンケートを実施した。質問は表1に示した3問で、「とてもそう思う」から「全くそう思わない」までの5件法で回答させたところ、いずれの質問も「とてもそう思う」が8割を超え「あまりそう思わない」「全くそう思わない」の回答は無かった（図16）。

さらに、「このモデルで学習して、特にいいと思ったところがあったら具体的に書いてください。」と「このモデルで学習して、わかりにくいと思ったところがあったら具体的に書いてください。」という問いに対して、「わかりにくいと思ったところ」の回答は無かった。「特にいいと思ったところ」の回答の一部を表2に示す。

これらのアンケートの結果から、このモデルは重力が働く場の物体の運動において、0.1秒ごとの物体の位置を可視化していることにより、等加速度運動がイメージしやすく、力と運動の関係を視覚的に関連させて理解させることに有効であることが示唆された。

表1 モデル利用に関するアンケートの質問

質問内容
このモデルによって、ボールを真上に投げ上げたときの、ボールの運動の様子がどうなるか、よくわかった。
このモデルによって、ボールを水平に投げたときの、ボールの運動の様子がどうなるか、よくわかった。
このモデルによって、ボールを斜め上に投げたときの、ボールの運動の様子がどうなるか、よくわかった。

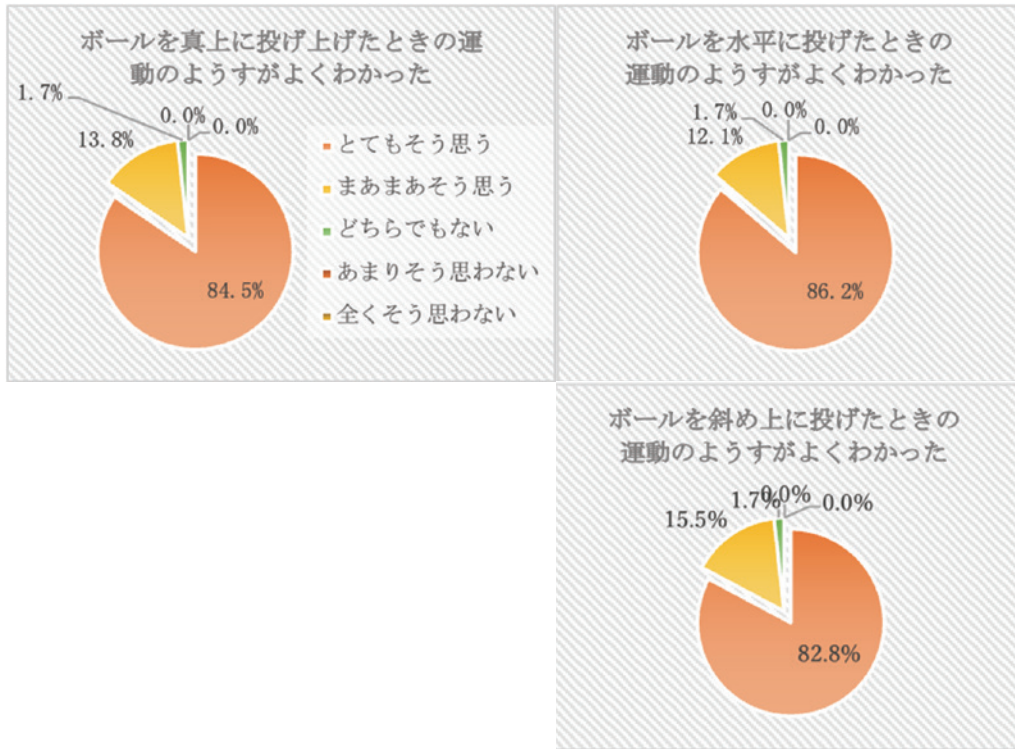


図16 アンケートの結果

表2 「特にいいと思ったところ」の回答

球の動きがわかりやすい。
全ての秒の位置が一度に見れていいし、放物線がきれい。
一定時間ごとの速度の変化がよくわかった。
どの方向に投げた軌跡も、細かく見られてわかりやすかった。
ボールの位置の移り変わりのわかりやすさ。
軌道が1つ1つ止まっているので、分かり易かった。
どの角度で投げたらボールはどのような軌道になるのかが分かりやすくてよかった。
何秒後にどの位置にあるのかというのと、他のボールの位置で比較しやすくていいと思った。
目で見てパッとわかるものだったので、すぐに理解できた。そんなような感じで、一目でわかりやすいところが良かった。
棒の向きによって投げる角度が変わること。
自由落下運動も、投げたときの軌跡もわかるので、すごいと思った。
ボールの運動のようすがはっきりわかるのでいい。
斜めに投げたときの運動の様子もわかること。
一目でボールの運動のようすがわかること。使い方が簡単なこと。

どう投げても同じモデルで表せるから、同じ決まりがあるんだと分かりやすかった。
どの場合にどうなるのかを目で見て理解できたところ。
ボールの少しずつの動きが分かりやすかった。
落ちていく様子がとても分かりやすかったところ。
傾けると距離なども分かるところ。
いろいろな角度でいろいろなボールの動きが見られてよかった。
いろいろな場合の運動のようすがわかりやすかった。
傾きを変えることで、ボールの動きが容易に理解できたこと。
ボールが半透明になっていて、ボールが遅く進む時の移動もよくわかった。
斜め上に投げ上げたときなど、視覚でわかるので、わかりやすかったです。
ボールの間隔や向きから運動のようすがよくわかった。
動きのようすが一目でわかってすごくわかりやすかったこと。
コマ送りのようで、ボールの軌道がイメージしやすかったところ。

おわりに

モデルを用いて授業を行った中学校第3学年の生徒を対象に行った「モデル利用に関するアンケート」の結果から、本モデルは自由落下、水平投射、斜方投射等、重力の働く運動の様子を理解することに有効であったと考えられる。

従来から用いられている記録タイマーによる記録テープの打点の分析は、0.1秒ごとにテープを切って並べて貼ることにより、時間の経過に伴う速さの変化をグラフで示すことのできる非常に優れた教具である。しかし一方で、打点間隔を間違わずに数えてテープを切ることや、テープの順番を間違わずに隙間なく方眼紙に貼り付ける作業が苦手な生徒、グラフの意味を解釈することが困難な生徒にとって、この方法だけでは運動の様子を理解することは難しい。筆者はそのような生徒にも、視覚的に十分理解を促せるようなモデルを模索し、本モデルを作成した。生徒が力と運動の関係を理解する方法は様々であり、記録テープの打点の分析でよく理解できる生徒もあれば、それでは理解できないが本モデルを見たら理解できるという生徒もある。前者の生徒も、モデルを見ることによって多角的なものが見方ができ、さらに理解を深めることができると考えられる。本モデルは、記録タイマーによる記録テープの打点の分析と合わせて使用することで、よりその効果が発揮できるものとする。

本稿は中学校3学年を対象に「(5) 運動とエネルギー (イ) 運動の規則性」の単元の授業でモデルの活用を試みたが、高等学校物理基礎「(1) 物体の運動とエネルギー (イ) 様々な力とその働き⑤物体の落下運動」や、物理「(1) 様々な運動 (ア) 平面内の運動と剛体のつり合い④放物運動」などの単元においてもモデルの活用が可能であると考えられる。今後は高等学校物理基礎や物理の授業において効果的なモデルの活用法を探り、授業実践において検証実験を試みたいと考えている。

参考文献

- 1 中学校学習指導要領（平成30年告示）解説 理科編 理数編 文部科学省
- 2 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
- 3 霜田光一、森本信也ら（2021）「中学校 科学1」学校図書株式会社
- 4 霜田光一、森本信也ら（2019）「中学校 科学3」学校図書株式会社