

# ペットボトルロケットの運動解析

対象生徒 萱森智也 川手一翔  
指導教諭 笹川民雄

## 1. 目的

ペットボトルロケットは高校の物理教材としてよく利用されるが、その運動の詳細はほとんど調べられていない。特に、水噴出中の運動は瞬間的な現象なのでビデオカメラや高速度カメラを用いてなければ調べることが難しい。このように身近であるが未知の要素を含むペットボトルロケットの運動を詳細に研究することにより、生徒に科学研究の面白さを知ってもらうとともに科学的研究の方法を習得させることをねらいとした。

## 2. 研究概要

デジタルビデオ、および高速度カメラを用いて鉛直に打ち上げられたペットボトルロケットの運動の特徴を詳細に調べるとともに、水の噴出量から推進力を求めてロケットの運動のシミュレーションを行い、実際の運動と比較した。

## 3. 研究内容および結果

実験および解析は4月から11月上旬までの合計21時間（1時間は55分）で実施した。前期で15時間、後期で6時間である。また、夏季休業中に6日間ほど実験を行った。研究経過に沿って、簡単に研究内容と結果を以下に述べる。

### (1) 基礎実験（4月～5月 6時間）

4月の段階では生徒は物理の運動の分野を本格的に履修していない。そこで運動の法則を理解させるためにまず超音波センサを用いておもりで台車を引く実験を行った。パソコン画面に出力される台車の位置のデータをノートに記録し、速度を電卓で計算し、グラフ用紙に速度と時間の関係のグラフ（ $v-t$ グラフ）を描き、その傾きから加速度を求める実験である。さらに、おもりの質量と台車に生じる加速度の関係（運動の第2法則）を考察させた。データ処理の方法や測定誤差を理解させるために、あえて計測ソフトの計算機能に頼らずこのような解析方法をとった。

次に、デジタルビデオを用い木片を机上ですべらせたときの運動を解析した。デジタルビデオの映像データをビデオ編集ソフトでAVIファイルに変換し、それを運動解析ソフト「運動くん」でコマ送りしながら木片の位置を求め、そのデータをCSVファイルに変換し、表計算ソフト「エクセル」で読み込み、位置と時間のグラフや $v-t$ グラフを作成した。「エクセル」の関数の線形近似機能を用いて、 $v-t$ グラフの傾きを求め、加速度を求めさせた。この一連の実験および解析方法はペットボトルロケットの運動解析の基礎となるので時間をかけてよく理解させるように努めた。生徒は表計算ソフトをほとんど使ったことがなく、その指導に時間が必要であった。

### (2) ペットボトルロケットの製作と予備実験（6月 4時間）

ペットボトルロケットは発射台が付属しているキットを購入して製作した。この製作に2時間を要した。このキットには発射レバーが付いており、レバーを引くとロケットが発射され、水量や圧力を変えながら実験するの



図1 ロケット打ち上げの様子



図2 「MOA-2D」の解析画面

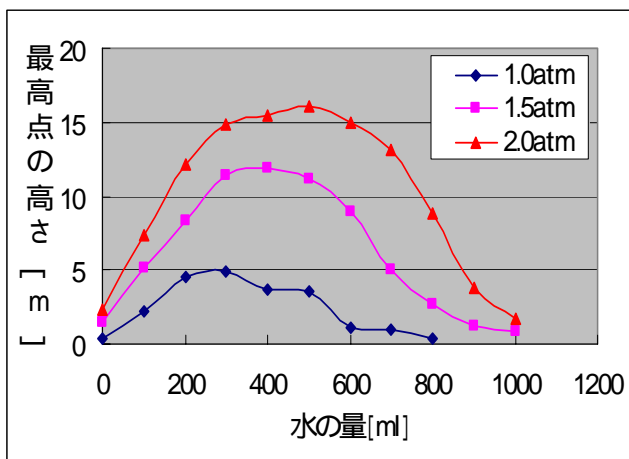


図3 初期水量と最高点の高さ

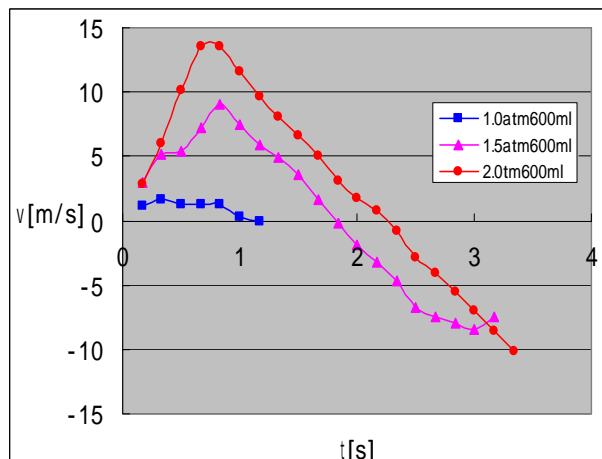


図4 ロケットのv - t グラフ

に適している。その後、予備実験を行い、ロケットが鉛直に飛行するかをテストした。その結果、ロケットが安定して鉛直に飛行しないことがわかった。また、風に流されやすいことが判明した。この問題は図1のようにカーテンレールをスタンドに固定し、レールに沿ってロケットを鉛直に誘導することで解決された。

(3) 実験および運動解析 (7月～8月 5時間+夏季休業中2日)

7月の下旬に2時間をかけて、初期圧力と初期水量を変えながらロケットを30回ほど連続して鉛直に打ち上げ、デジタルビデオで映像を記録した。水量を100mlずつ増やしながらの夏の炎天下でのこの実験は、かなりの忍耐力と体力を必要とした。その後2時間かけて運動解析ソフト「MOA-2D」でロケットの最高点の高さや運動を調べた(図2)。しかし、このデータ解析中に噴射口の部品の締め付け不足により、実験回数を重ねるうちに空気が漏れていることがわかり、実験のやり直しをしなければならなくなった。そのため、実験場所のテニスコートが空いている土曜日に生徒を登校してもらい、再度実験を行った。ところが、その実験の最中に空気入れにロケットの水が逆流し、圧力計が正常に作動しなくなるトラブルに見舞われた。空気入れをロケットに接続したまましばらくして空気入れを作動させると水が逆流することがわかった。このため、空気入れの中の水が乾くまで数日間実験を中止せざるを得なくなった。実験は思い通りには進まないということをもって体験することになった。結局、3回目の実験で正確なデータをとることができた(図3, 図4)。この間、打ち上げ回数は延べ90回ほどになった。

(4) 高速度カメラでの撮影 (夏季休業中4日)

水噴射時のロケットの運動を詳細につかむために、高速度カメラを用いて撮影した(図5, 図6)。また、ロケットの推進力を求めるために、室内でロケットをスタンドで固定し水量の変化を高速度カメラで撮影した(図7)。通常のビデオカメラでは1秒間に30コマであるが、今回レンタルした高速度カメラは1秒間に250コマ～1000コマの撮影の性能を持つものである。



図5 高速度カメラ



図6 高速度カメラの映像

#### (5) ロケットの運動のシミュレーション(10月 6時間)

ビデオ映像によるロケット内の水量の変化から質量保存により水の噴射速度  $u$  が求まり、それを利用してロケットの推進力  $S u^2$  を求めることができる。ここで、 $\rho$  は水の密度、 $S$  は噴射口の面積である。 $m$  をロケットの全質量として運動方程式  $m a = S u^2 - m g$  を表計算ソフト「エクセル」で数値計算してグラフ化した。このあたり内容は高校生にはやや高度なことであるが、1秒間噴出する水についての運動方程式を立てさせ、短い時間では加速度、速度はほぼ一定と見なせるという説明で数値計算の方法(オイラー法)を理解させた。初期圧力 2.0atm、初期水量 600ml の場合のシミュレーションの結果は、ビデオ映像から求めた実測値をほぼ再現していることがわかった。(図8)

#### 4. 評価

##### 生徒の評価

- ・ 予想外のトラブルや風などの気象条件で実験がうまく行かないことが多かったが、それを克服しながら1つのテーマをじっくりと取り組むことができ達成感や充実感があった。
- ・ 普通の授業にない面白さや成果があったが、科学研究の奥深さや難しさがわかった。
- ・ 運動解析やシミュレーションを数多く行い、データ処理能力や表計算ソフトを使う能力が向上した。
- ・ リハーサルや発表会を経験して、人前で発表する力がついた。
- ・ 研究論文やプレゼンテーション作成などで書く力やまとめる力がついた。
- ・ 時間が足りなかった。もっと多くの実験を行い、より正確なデータをとりたいかった。
- ・ 高校生でもわかりやすいテーマであったが、シミュレーションはやや高度であった。

##### 教員の評価

ペットボトルロケットの実験は比較的簡単なのでスムーズにいくのではないかと考えていたが、実際にやってみると、空気漏れや空気入れへの水の逆流などがあり、ロケットの水量や空気圧などの条件を一定に保ち、鉛直に打ち上げるには工夫が必要であることがわかった。また、屋外での実験なので、無風状態の日に実験しなければならず、7月後半の炎天下での数多くの打ち上げ実験はかなり体力的にきついものがあった。このような厳しい状況で試行錯誤しながらの研究であったが、アンケート結果からすると生徒はこの一連の実験や解析を通して科学研究の方法を習得することができたといえる。ただ、中間発表のためのポスター作成や発表会の準備のために時間が多く費やされ、生徒がじっくりと考察したり、実験したりする時間がもう少し欲しかった。

#### 5. 今後の課題

昨年度の課題研究は大学での実験・実習であり、実験回数が3回と少なく校内での取り組みはデータ処理やプレゼンテーションの作成が中心であった。今年度は校内で課題研究を行い、生徒が試行錯誤して数多くの実験を行うことができた。この点では改善されたといえる。しかし、生徒自身による仮説の設定や考察などが必ずしも十分であったとはいえなかった。仮説・実験・検証という探究の過程を重視するとともに、好奇心や探究心を引き出しながら、さらに生徒主体の課題研究にしていくことが来年度の課題である。



図7 水量の変化を調べる実験

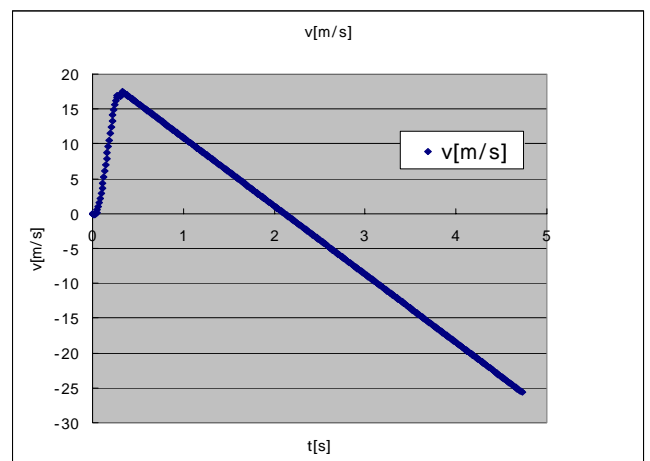


図8 シミュレーション結果