

『宇宙ピペット』実用化のための有用性検証

兵庫県立加古川東高等学校

自然科学部物理班

2年生 中本那央, 野村駿介, 横林美祝

1年生 牛久保友基, 大西桂太郎, 新谷琢人

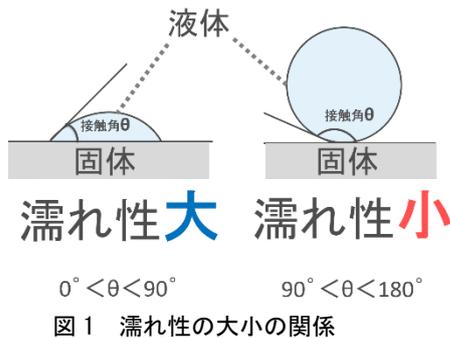
1. 動機と目的

ISSなどの微小重力下では、固体と液体が相互に引きつけあう性質である濡れ性が水の挙動に影響し、一般的なピペットが使用できない。そこで本研究では、濡れ性を逆にうまく利用することで、微小重力下でも使用可能な『宇宙ピペット』の開発と実用化を目指した。

2. キーワード

濡れ性：固体面と液体面が引き付け合う性質

接触角：固体面と液体面のなす角度



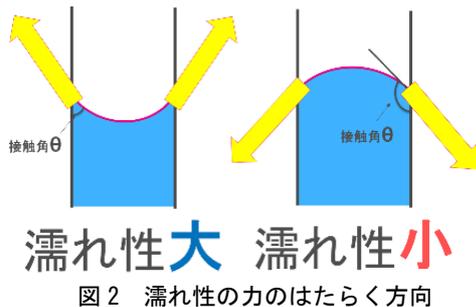
接触角が90°未満のとき濡れ性が大きい、90°より大きいとき濡れ性が小さいという(図1)。

3. 自由落下型実験

濡れ性によって管内流が制御できるのかを確認するためにおこなった。

濡れ性の力がはたらく方向から、水面の挙動を予測した。

管内において、濡れ性の大きい面では濡れ性の力は上向きに、濡れ性の小さい面では濡れ性の力は下向きにはたらく(図2)。



微小重力下では濡れ性の力が顕在化するため、

水は濡れ性の大きい面で上昇、小さい面では下降すると考えた。さらに、濡れ性の大小の境界を作ると、その境界で水は減衰振動し、やがて静止するという仮説を立てた。

自由落下型実験は、自作したロケット型の実験装置を校舎の4階から自由落下させて装置内を微小重力状態にしておこなう。落下実験装置内部には、水溜め槽につないだ濡れ性の大きい管Aと濡れ性の大小の境界がある管Bを入れ、その境界を定量線として水面の挙動を観察する実験をおこなった(図3)。管はアクリル製で、濡れ性の大きい面の接触角は63°、濡れ性の小さい面には、市販の撥水剤であるウルトラエバードライを塗布しており、その接触角は137°である。

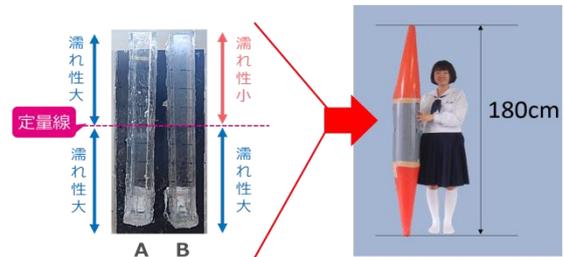


図3 自由落下型実験装置

管Aでの結果を図4、管Bでの結果を図5に示す。

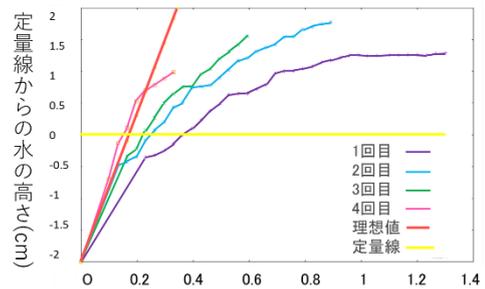


図4 微小重力下での濡れ性の大きい管Aでの水の挙動

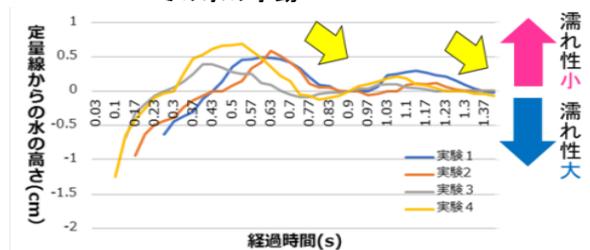


図5 微小重力下での濡れ性の大小の境界がある管Bでの水の挙動

微小重力下で水は濡れ性の大きい面を上昇し、濡れ性の小さい面では下降することを確認した。さらに、水は濡れ性の大小の境界(定量線)で減衰振動をし、振動は実験中に観測できないほど小さくなった。

このことから、微小重力下で濡れ性を用いて水を制御することができたといえる。

#### 4. 『宇宙ピペット』の提案

以上の結果を利用し、微小重力下で使用可能な『宇宙ピペット』のデザインを考案した(図6)。

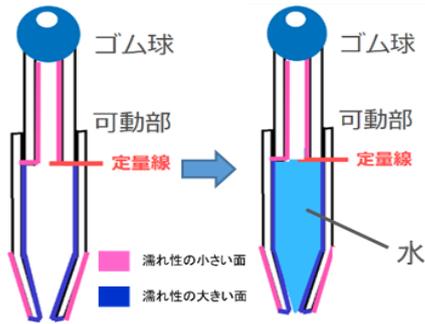


図6 宇宙ピペットのデザイン

管内の下面を濡れ性の大きい面に、上面を濡れ性の小さい面に加工することにより、濡れ性の大小の境界を作る。この『宇宙ピペット』を水面に浸けると、管内の濡れ性の大きい面を水が上昇し、濡れ性の大小の境界である定量線に達して静止する。このことにより、水を定量的にはかり取ることができるというものである。

水を取りだすときは、管内の濡れ性が小さい上部の管を、管内の濡れ性の大きい管に挿しこんでいくことで定量線の位置を下げ、水を押しだす。さらに、ゴム球の穴を指でふさぎ、一般的なピペットと同様、ゴム球をつぶすことで先端に残った水を取りだすことができると考える。

#### 5. 地上実験

『宇宙ピペット』モデルの有用性検証には、実験中に操作を加えられる環境と、より長い実験時間が必要なため、重力の影響を最小限にした地上実験を考案した。なお、地上実験で自由落下型実験と同様の現象が起こることはすでに確認した。

地上実験では、『宇宙ピペット』で定量線の位置を変更しても水をはかり取れることを確認する実験Ⅰ(図7)と、はかり取った水を、濡れ性の大きい管に濡れ性の小さい管を差しこんでいくこととゴム球をつぶすことで取りだせるかどうかを確認する実験Ⅱ(図8)をおこなった。



図7 実験Ⅰ装置

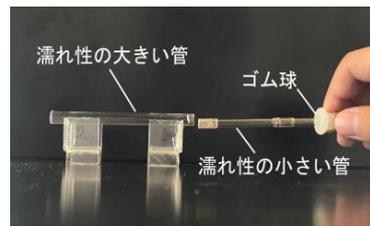


図8 実験Ⅱ装置

実験Ⅰでの水面の挙動をニュートンの運動方程式を用いて理論的に予測したグラフが図9である。今回は、管を地面に対して平行に設置している

ことにより水圧が水面の挙動に影響を与えるため、水圧の項を追加した。

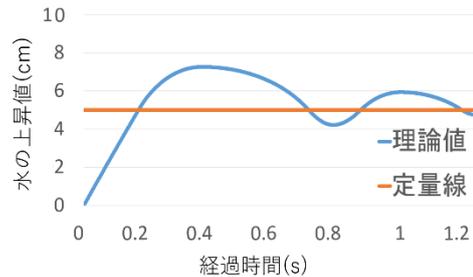


図9 地上実験 濡れ性の大小の境界がある管での水の挙動の理論値

実験Ⅰの結果を図10に示す。図10より、水面からの定量線の位置を1cmから6cmまで変更しても水は定量線で静止していることがわかる。

自由落下型実験の結果と異なり、減衰振動が見られなかった理由は、管径が小さいために水の運動エネルギーが小さく、摩擦力などにより、水が振動するときのエネルギーが不足したことが考えられる。

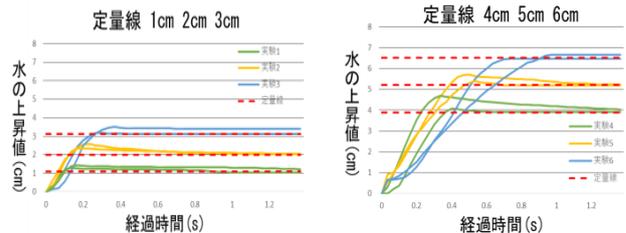


図10 実験Ⅰ 水面からの定量線の位置と管内の水の挙動

また、実験Ⅱでは、実際に濡れ性の大きい管に濡れ性の小さい管を差しこんでいくこととゴム球をつぶすことで、はかり取った水を全て取りだすことに成功した。

実験Ⅰ、Ⅱの結果から、定量線の位置を変更しても水をはかり取れることと、はかり取った水を取りだせることが確認でき、『宇宙ピペット』モデルの有用性を検証できた。

#### 7. 今後の課題と展望

『宇宙ピペット』の実用化に向けてより詳細なピペットモデルを作成することと、濡れ性の小さい面の加工方法について、従来のように撥水剤を塗布するのではなく、物理的な加工方法を確立することである。さらに、高校生などのアイデアをISSで実験する「アジア・トライ・ゼロG」の次回募集に『宇宙ピペット』を応募することが挙げられる。

#### 8. 参考文献

石岡憲明. "第39号". ISAS メールマガジン 2005-0531. <http://www.isas.jaxa.jp/j/mai/maga/backnumber/2005/back039.shtml>, (参照 2018-08-28) ほか

物理

高高度モデルロケットの開発

—淡路島で一番宇宙に近い場所を目指して—

兵庫県立洲本高等学校 科学技術部  
2年毛笠 友瑛, 工藤 拓巳, 柳 諒典  
1年中野 祐輝, 小濱 駿希

1. 動機及び目的

私達は今年度4月よりロケットを研究テーマとし、水ロケットの作成や缶サット甲子園などに取り組んできた。メインのテーマは自作ロケットによる高高度からの地上の景色の撮影である。そのため高高度へ到達可能な自作モデルロケットの開発に力を注いできた。まず、目指すべき高度を検討したが洲本高校がある淡路島の最高峰、諭鶴羽(ゆずるは)山の標高が608mであるため、具体的な高度としては700mと設定した。

モデルロケットは紙や木材など非金属で本体を作成することになっている。またエンジンは黒色火薬で作られた既製品を用いる事になっているため材料は限られたものから選択し、設計を開始した。

2. ロケットの設計

2-1 エンジンの選択

モデルロケットのエンジンは自作することは出来ないため市販品を用いることになる。また国内で入手しやすいのはエステス社のエンジンであるので、同社の製品群より選択することにした。エステス社のエンジンは総力積量 I (Ns) をもとに、(表1)のような分類がなされている。

型	総力積 (N, S)	燃焼時間 (秒)	推進薬量 (g)
A	2.5	0.73	3.3
B	4.9	0.86	5.6
C	9.0	1.86	10.8
D	17.0	1.65	21.1
E	25.0	2.8	36.9
F	47.5	3.0	60.0

【表1】 エステス社エンジン一覧

1列目のようにアルファベットで型が分類されている。各型の中で細かい分類があるが表中の数字は代表的なものを示した。

エンジンの総力積量 I, エンジン燃焼時間  $t_b$  (m/s) が予め定められている。そこで次のようにしてエンジンを選定した。

エンジン燃焼終了時におけるロケットの速度を  $v_b$  とする。燃焼終了時間  $t_b$  における重力加速度損失が  $gt_b$ , また空気抵抗も  $gt_b$  で近似できるので

$$v_b = \frac{I}{m_a} - 2gt_b \dots \textcircled{1}$$

ここで  $m_a$  は機体の平均質量 (kg),  $g$  は重力加速度を示す。

また、機体の平均質量は次により求めた。

$$m_a = m_b + m_i - \frac{1}{2}m_p \dots \textcircled{2}$$

ここで  $m_b$  はエンジンを除く機体質量,  $m_i$  はエンジン初期質量, および  $m_p$  は推進薬質量を示す。さらにエンジン燃焼終了後、慣性飛行に入り速度が0になるまでの時間を  $t_c$  とする。①式同様に空気抵抗による効果は  $gt_c$  であるので

$$t_c = \frac{v_b}{2g} \dots \textcircled{3}$$

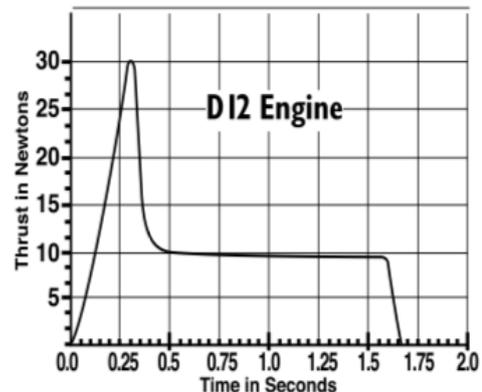
これらより到達高度  $h$  (m) は次の式で求められる。

$$h = \frac{1}{2}v_b(t_b + t_c) \dots \textcircled{4}$$

これを元に見積もり計算をする。機体の質量は未定なので手に入る D 型エンジンの最大力積 17Ns,  $t_b=1.65$ s と、私たちの目標とする高度 700m では  $v_b \approx 150$ m/s が必要となる。①より機体平均質量の条件を求めると 93g 以下に抑える必要がある。機体は紙やバルサ材等で作成する予定だが、その他高度計やカメラ、回収用のブザーなど必要な機器の重量を考慮すると現実的ではない。そこで、多段式のロケットを作成することにした。またエステス社から図1のように各型のエンジンの特性曲線が公表されているので、これを用い細かい飛行状態は数値計算で再現できる。図1のデータを用いて計算した結果 D12-0 を 2 段, D12-7 を 1 段の 3 段式ロケットとした(図2)。

2-2 機体の設計

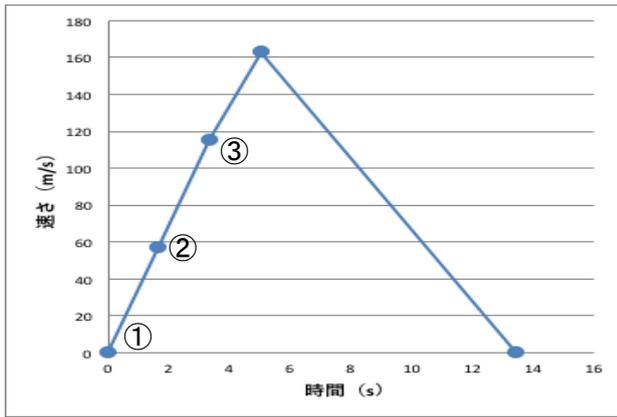
図2に示すように3段式ロケットでは最高速度が160m/sに達するためロケット本体(ボディチューブ)は強度のある紙筒を用いることにした。また先端部(ノーズコーン)については紙ではなくプラスチック製のものを用いた。風洞実験は行えないので、機体の設計にはロケット設計ソフト「Open Rocket」を用いた。安定した飛行を得るためには機体の重力重心(CG)の位置と圧力重心(CP)の位置との距離がロケットの最大直径程度となるのが理想である。Open Rocket により確かめた上で、さらにスイングテストを行い、機体の安定性を確認した。



【図1】 エンジンの特性曲線

私達を用いた D 型エンジンの特性曲線。横軸が燃焼時間 (s), 縦軸が出力 (N) を示す。特性曲線と横軸で囲まれた部分の面積が総力積 (Ns) でありこの D12 型エンジンは 17Ns である。

(図はエステス社ホームページより引用)



【図2】 3段式ロケットv-t図  
D型エンジンを用いた3段式ロケットのv-t図。丸数字は①1段目、②2段目、③3段目の噴射を示す。

また、フィンバルサ材を用いて作成し、少しでも空気抵抗を少なくするよう、断面が流線型になるよう研磨した。

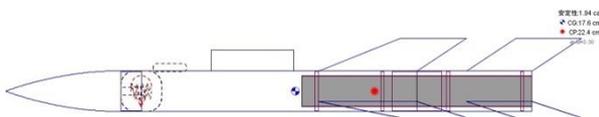
機体の回収には安全と、風に流されないことを考慮し、1段目、2段目にはストリーマー（リボン状の抵抗体）を3段目には減速を要するのでパラシュートを取り付けた。パラシュートは通常の半球形ではなく、横方向に流される風の影響を受けないように十字型のパラシュートを取り付けることにした。

### 2-3 計測機器等

ロケットの高度測定には気圧の変化を利用し高度を計測する高度計を用いることにした。また、回収時にロケットの所在がわかりやすいように防犯ブザーを用意した。地上の景色を撮影するためにUSBスティックメモリー型のカメラを取り付けた。

### 3. 試射実験

250m以上の高度に到達するモデルロケットを打ち上げるためには航空法により国土交通省大阪航空事務所に届け出る必要がある。また、20g以上の火薬を含むD型エンジンの購入、消費には兵庫県の許可を得る必要がある。このような法的な面と、さ



【図3】 試射に用いた2段式ロケット  
校内のグラウンドで打ち上げることを考慮し一回り小さな機体を作成した。エンジンは一段目B6-0、2段目A8-5を用いた。機体の長さは450mm、外径24.8mm、重量（エンジン込）100g、到達予定高度は160m。この設計図はOpen Rocketで作図した。

らに費用的な面で最終目標の機体より小さいサイズの機体とエンジンで作ったロケットで試作と試射を行った（図3）。高度についても3段式にすると250mを超える怖れがあるため2段式とした。

### 4. 結果

打ち上げの概要は次の通りである。

日時 9月28日午後12時10分  
場所 洲本市上物部2-8-5 洲本高校校内  
天候 快晴 風速 東の風3m  
以上の環境で打ち上げ結果は次の通りであった。  
(ア) 到達高度 109m  
(イ) 飛行時間 19秒

### 5. 考察

#### 5-1 打ち上げ高度について

Open Rocketによる設計では到達高度が160mであったが、実際は109mであった。飛行中の姿勢がぶれていたため機体のバランスが崩れていた可能性が高い。原因としてはカメラを機体にくくりつける形式にしたため、空気抵抗が大きくなりバランスが悪くなっていた、またはCG、CPの位置が計測のミスでずれていたことが考えられる。

#### 5-2 機体の構造

大きな損傷もなく、エンジンの分離も上手くいったので機体の工作に問題はなかった。またパラシュートの降下速度は6m/sで設計値5m/sに近かった。

#### 5-3 高度の計測

高度についてはデジタルの高度計と、目視により分度器を用いた計測を行った。2つの機器でほぼ同等の結果が出ているので信用は出来ると考えられる。しかし、気圧と同時に測るなどしながら計測器の精度を確認したい。

### 6. まとめと課題

高高度700mを目指すモデルロケットの設計と試射を行った。一回り小型のロケットを試写した結果、次の1)~3)が分かった。

- 1) 工作精度の問題で設計上の高度より低くなる可能性が高いので、余裕を持った設計をする。
- 2) 抵抗を少なくするカメラの取り付け方法を研究する必要がある。
- 3) 高度計の精度を確認する。

本稿執筆時点で、兵庫県及び大阪航空事務所の許可は得た。今後1)-3)の課題を解決し、10月には到達高度700mを目指す本実験を行い、口頭発表でその結果を報告する。

### 参考文献

- 1) 日本モデルロケット協会編、手作りロケット入門、誠文堂新光社(2013)
- 2) エステス社ホームページ  
<https://www.estesrockets.com>

## 物理

### 運動の微小変化に着目した最速降下線の研究

兵庫県立西宮高等学校 自然科学部  
2年 川村崇 山下昂輝 若林直弥  
1年 関誠人 西原宏騎 山根史也

#### 1. 動機および目的

最速降下線の問題は 1696 年ヨハン・ベルヌーイ (1667-1708) によって提起された歴史的に有名な問題であり、「質点がある点 A からスタートして滑らかな斜面を転がり落ちるとき、最短時間で別の点 B までたどり着くには斜面をどのような形にしたら良いか。」というものである (図 1)。

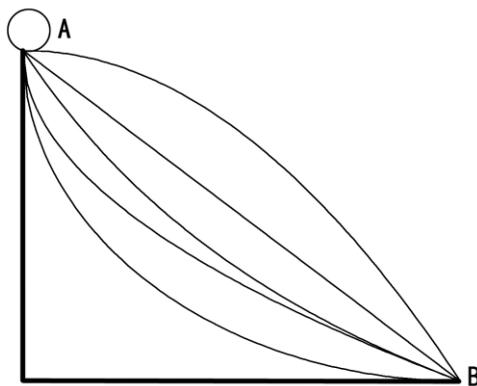


図 1

この問題に対して、当時ニュートン、ライプニッツを初め、多くの研究者が解答に取り組み、数学 (特に微積分を改良した変分法) の発展に大きな貢献をした。

わたしたちはこの問題に興味を持ち、高校の範囲で学習する数学と表計算ソフトを使って、小球が最も短時間で運動するための条件について検討した。

一般に、理想的な最速降下線としてはサイクロイドが知られているが、その物理的な意味を理解すると同時に、実際の運動に対して摩擦力がどのような影響を及ぼすのかについて考察した。

#### 2. 方法

##### (1) 理論計算

いくつかの曲線 (直線、2 次関数、無理関数、3 次関数、サイクロイド) を想定し、小球が曲線を滑り降りる時間を理論的に求める。これを解析的に解くためには直線以外は大変難解な積分計算を行わなければならない。そこで、曲線全体を微小区間に分割し、微小区間を小球が通過する時間

を足し合わせることにした (図 2)。

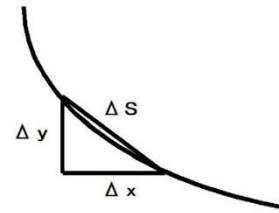


図 2

微小区間  $\Delta x$  は固定しておき、曲線を表す式と三平方の定理から  $\Delta s$  を求める。一方、この微小区間を通過する小球の速さ  $v$  は力学的エネルギー保存則から求めた。全移動時間  $T$  は

$$T = \int \frac{\Delta S}{v}$$

となるが、表計算ソフトを用いて、これを足し合わせた。  $\Delta x$  を十分に小さく取ることによって、真の積分値に近づくと考えられる。この方法が妥当であることを確認するため、直線軌道の場合を力学の公式を使って求め、値を比較したところ誤差は 2% 程度であり、有効な方法であると判断した。

またこの方法により、曲線上の任意の時刻における小球の位置、速度、加速度などを計算することが可能となった。

なお、今回使用した曲線の形を表す関数は以下の通りである。

直線	$y = 0.62x$
無理関数 1	$y = 0.28 - 0.41\sqrt{x}$
無理関数 2	$y = 0.41\sqrt{x}$
2 次関数	$y = 1.38x^2$
3 次関数	$y = 82.0x^3$
サイクロイド	$x = 0.143(\theta - \sin \theta)$ $y = 0.143(1 - \cos \theta)$

##### (2) 実測

① (1) で想定した曲線をポリスチレン性のボードで作成する。その際、全ての曲線でコースの始点と終点の座標を一致させた。2 次関数、無理関数、3 次関数はパソコンで作成したグラフに沿って曲線を切り出し、サイクロイドは木製の円板を製作し、円周上の一転の動きを利用して曲線を描いた (図 3)。

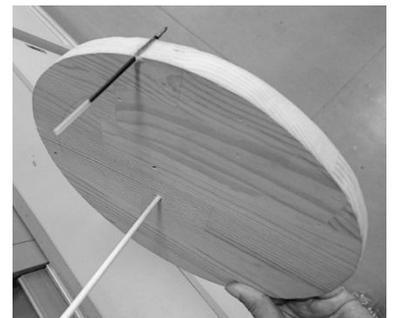


図 3

② スチレンボードの厚みをルールに見立て、小球を初速度0で転がして、最下点までの到達時間をストップウォッチで測定した(図4)。測定はそれぞれ100回程度行い誤差が小さくなるように工夫した。

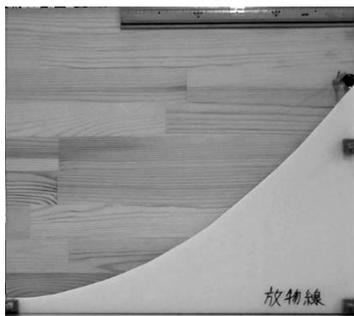


図4

- ③ 摩擦力によるエネルギーの減少を調べるため、小球が最下点を通過するときの速度をビースピ(簡易速度計測器)で測定した。
- ④ 運動の速度変化、加速度変化を調べるため、小球の運動をビデオ(30フレーム/秒)で撮影し、1フレームごとの静止画を解析することで、微小時間における小球の移動距離を測定した。

### 3. 結果と考察

(1) 表計算ソフトを使った理論計算による解析の結果、以下のことが分かった。

① 到達時間はサイクロイドが最も短い(図5)。

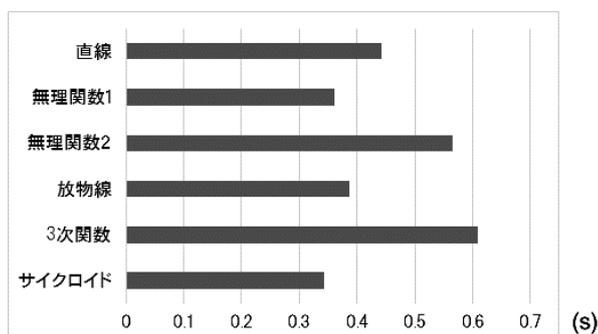


図5 最下点までの到達時間(理論値)

② 加速度の時間変化のグラフを解析することで、到達時間の短い曲線ほど、早い段階で加速度が大きくなっていることが分かった(図6)。

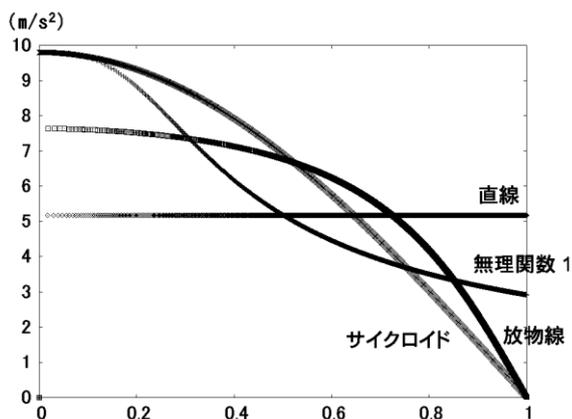


図6

(2) 実測結果より以下のことが分かった。

① 実測値の到達時間は、理論計算と比べて1.8%~17%の誤差があり、この主な原因は摩擦力ではないかと考えた。そこで曲線毎に力学的エネルギーの減少量を比較し、摩擦力による影響の違いを比較した。

② ①を補足するために、実測値(移動距離の時間変化)のデータを数式処理ソフトでフィッティングし、 $x-t$ グラフを導き出した(図7)。この式と理論式の加速度を比較し、軌道面と小球の間の摩擦力を0.0166 Nと求めた。

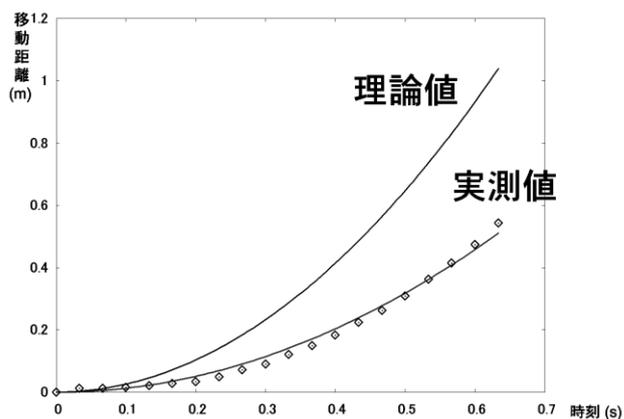


図7  $x-t$ グラフの比較(直線軌道)

(3) 以上の観点から、早い段階で加速度が大きく、摩擦力が小さい曲線が最速降下の必須条件と考えられた。そのような条件を満たす曲線を探した結果、以下の式で表されるカタナリー曲線を候補の一つとして考えた。

$$y = 1.47(e^x + e^{-x}) - 2.94$$

さらに、この曲線を反時計回りに $31.89^\circ$ 回転させたものを作製し、到達時間を測定したところ、0.303sとサイクロイド(0.299s)に近いものとなり、最速降下曲線としてはかなり有力なものとなった。

### 4. 反省と課題

重力のみによるシンプルな運動でありながら最速降下問題は大変奥が深く、完全には解明できていないが、今回の研究を通して運動を解析する方法を学べた。サイクロイドやカタナリー曲線が最速となる理由について、さらに追求していくことが、今後の課題である。

#### 参考文献

一石賢 著「道具としての物理数学」  
日本実業出版社(2002)

## 「物理」

### 缶サット搭載ロケットの飛行について

兵庫県立芦屋国際中等教育学校科学部

5年 速水 陸生、陳 強、イェンセン 樹杏

嘉数 民生、箸尾 浩一、春名 海里

4年 居田 海亜、山崎 大楓

#### 1. 研究の動機

今まで水ロケットとモデルロケットの研究を行ってきたが、どのように飛び出すのか疑問に思った。そのため、各ロケットにかかる加速度を測定し、飛び出す瞬間のメカニズムを解明しようと思ったので、このテーマで研究を行った。

#### 2. 目的

- (1) パラシュート付き水ロケットとモデルロケットの飛行と加速度・角速度との関係を調べ、動きの違いについて調べる。
- (2) ロケットから分離した缶サットのカメラで空撮を行う。

#### 3. ロケットと缶サットについて

(1) パラシュート付き水ロケット  
水と空気で飛ばすペットボトルロケットに、パラシュートをつけて降下速度を下げて安全に回収できるようにしたもの。(220g 右図)



(2) モデルロケット  
工作用紙で作ったロケットで、火薬を使って飛ばすもの。(130g 右図)



(3) 缶サットとは  
空き缶サイズの模擬人工衛星。中に PocketLab とカメラを積んでおり、加速度・角速度・気圧・高度のデータを取ることができる(50g 右図)。



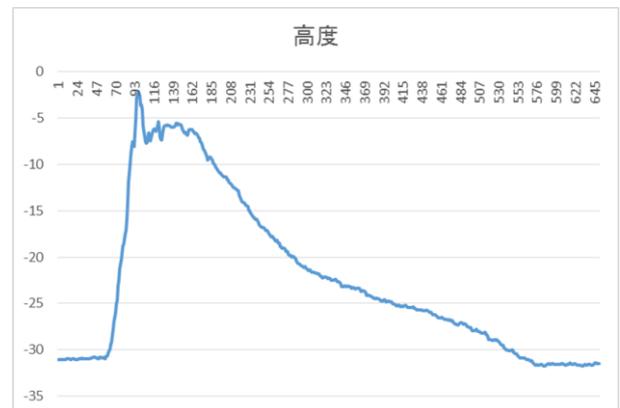
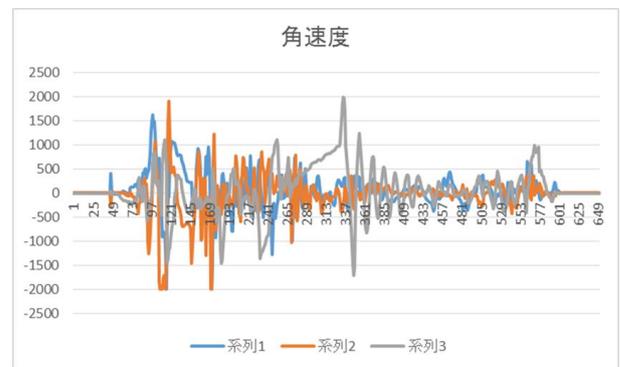
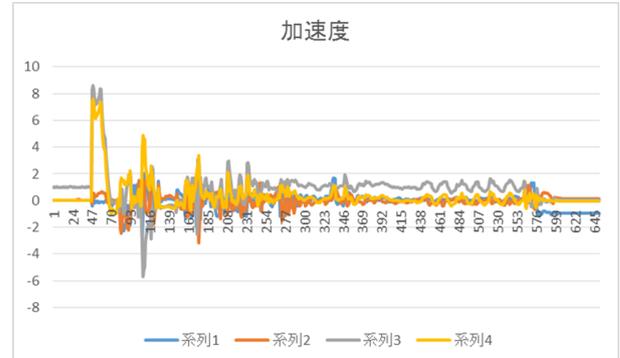
#### 4. 実験方法と結果

(1) 水ロケットによる実験  
方法

グラウンドでパラシュート付き水ロケットを10回発射して、加速度・角速度・気圧・高度のデータをとれるか、また空撮ができるのかを調べた。

## 結果

- ① 10回とも缶サットを放出でき缶サットと水ロケットのパラシュートも開いた。
- ② Pocket Lab で加速度・角速度・気圧・高度のデータをとることができた(下図)
- ③ 空撮にも成功した(下図)



※データの横軸は時間 (0.02s)

縦軸は加速度 (G=重力加速度)

高度 (m)、角速度 (度/s)

この後のグラフも同様



空撮

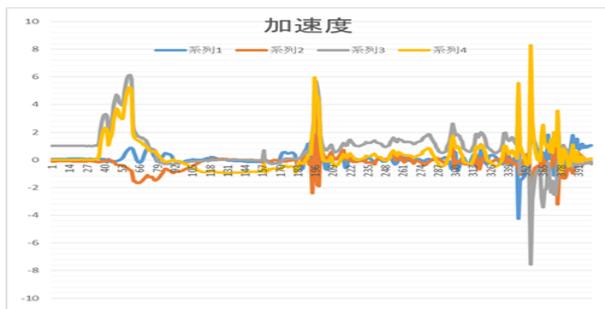
## (2) モデルロケットによる実験

### 方法 1

本校のグラウンドでモデルロケットを2回発射して、加速度・角速度・気圧・高度のデータをとれるか、また空撮ができるのかを調べた。

### 結果

- ① 2回とも缶サットを放出でき缶サットとロケットのパラシュートも開いた。
- ② Pocket Lab で加速度・角速度・高度のデータをとることができた(下図)
- ③ 空撮にも成功した。

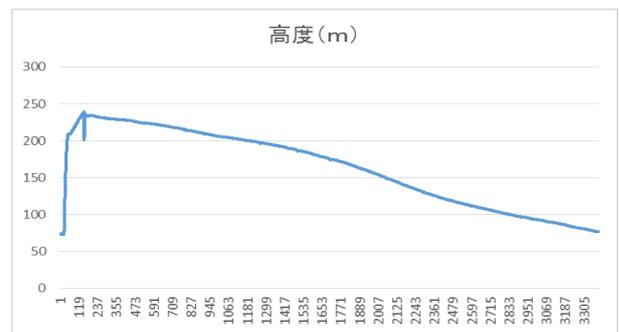
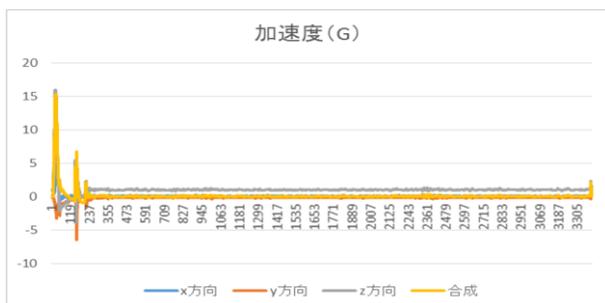


### 方法 2

和歌山県にあるコスモパーク加太で、より強力なエンジンでモデルロケットを3回発射して、加速度・角速度・気圧・高度のデータをとれるか、また空撮ができるのかを調べた。

### 結果

- ① 3回とも缶サットを放出でき缶サットとロケットのパラシュートも開いた。
- ② Pocket Lab で加速度・角速度・高度のデータを1回だけとることができた(下図・右上図)
- ③ 空撮に成功した(右上図)



## 5. 考察

どのロケットも重心が先端部分にあったことにより、途中で回転することなく垂直に飛ばすことができた。またロケットの下部が上部に食い込まないように、ストッパーをつけた。すると確実に缶サットを放出して、パラシュートを開くことができた。

水ロケットの加速度はいつも図のようにピークが2点あるグラフになった。水ロケットは発射台から離れたときに一番加速度が大きくなり、その後は水が全て抜けたときに加速度が再び大きくなると考えられる。

モデルロケットはエンジンに点火されるたびに加速度が大きくなる。校内のロケットは直列、コスモパーク加太のロケットは並列につないでいるので、このような結果になった。

コスモパーク加太でデータを1回だけしか取れなかったのは、Pocket Lab が16Gまでしか耐えられなかったからだと考えられる。

モデルロケットの実験から、缶サットのパラシュートの回転を少なくするために、パラシュートに穴を開け、糸を二束にして長くした。すると回転が少なくなった。

## 6. 今後の展望

ドローンなどよりも安価で安全に空撮を行うことができる。そのため教育現場や災害時に活用できる可能性がある。

## 7. 参考文献 物理の教科書(数研出版)