

# ペットボトルキャップ飛ばしについての研究

静岡県立科学技術高等学校 自然科学部

2年 高林りずむ 加藤葉涼太 望月大智

## 1. 研究動機

ペットボトルキャップを中指と親指で挟みデコピンをするような感覚で弾いて飛ばすペットボトルキャップ飛ばしにおいて、野球のストレートのように真っすぐ飛ばせることを知った。弾いて飛ばすことでキャップは水平な状態で回転しながら飛んでいく。流体中を回転しながら運動する物体にはマグヌス効果が働いているのになぜ真っすぐ飛ぶのか、疑問に思い研究を行うことにした。

## 2. ペットボトルキャップ飛ばしについて

キャップを中指と親指で挟み（図1）キャップを傾けたり、裏返しにしたりして弾くことで、ストレートやカーブなど様々なコースで飛ばすことができる。



図1 キャップの持ち方

## 3. マグヌス効果

一様流体中にある球や円柱が流れと垂直な軸まわりに回転しているとき、一様流と回転軸の双方に垂直な方向から力（揚力）を受ける現象をマグヌス効果という（図2）。

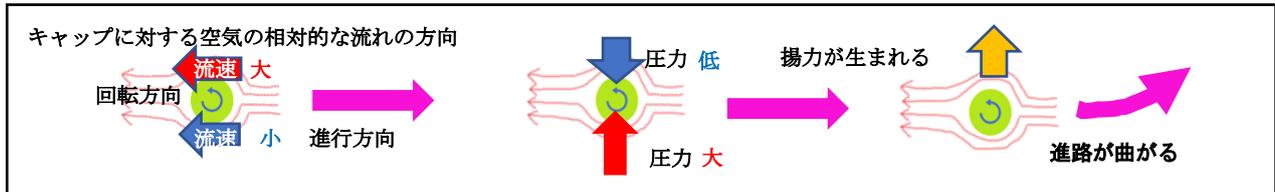


図2 マグヌス効果模式図

## 4. 予備実験

- (1) 目的：キャップを水平に飛ばす際に必要な条件に関係がありそうな要素を探す
- (2) 条件を探す際の着眼点：キャップを真っすぐに飛ばすために必要なことは、インターネットの情報からキャップを水平にして飛ばすだけであった。そこでそれ以外の条件の検討をつけるために、自分たちの手で飛ばし、真っすぐ飛んだときにはキャップはどのようなになっているのか観察する。
- (3) 実験方法：キャップを投げた時に、キャップを放すところから軌道が山なりにならないくらいのところ（約7メートル）に標的物を置き、そこに向かって真っすぐ投げる。
- (4) 結果と考察：キャップが真っすぐに飛び標的物に当たることは少なく、多くが途中で回転方向に曲がるが多かった。そこで、投げたほとんどのキャップが水平になっていないのではないかという思いが強くなった。投げ続ける中で、人によって投げ方に違いがあり、手で投げる中で水平に飛ばす以外の条件を見つけるのは難しいと考えた。さらに、投げ出されたキャップは山なりに飛んでいるように見えるため、水平に飛ばしているつもりでも斜方投射になっているのではないかと考えた。水平を意識したうえで軌道が山なりになったときの投射角度は、飛ばす際の動画から7度程度とわかった。そのため7度角の斜方投射でも実験を行うことにした。また、予備実験を通して条件を揃えるためには装置を作る必要があること、装置で水平を確保したうえで、諸条件を変えてストレートを実現することで条件が探れるとの考えが生まれた。

(5) 仮説：真つすぐキャップが飛んでいるときにはマグヌス効果は働いていないか、打ち消す効果が働くのではないか。また水平にするだけでなく、キャップの初速度や回転数の影響もあり、水平に飛ばすために必要な数値条件があると考えた。

## 5. 実験装置の製作

キャップを飛ばす際、力のかけ方を一定にし、キャップの上面が水平になるように安定的に発射するために装置を製作した。まずはインターネット上で公開されているダンボール製のキャップ投げ装置の設計図を参考にして、机に固定できるように改良した(図3)。この装置はキャップを押し出すピストンを用いてゴム動力によってキャップを回転させながら発射する。段ボールの耐久力が弱く、ピストンの代わりに発射口の右側にモーターで回転するタイヤをつけたり(図4)、木を使って装置を作ったり(図5)と工夫を重ね、最終的には木製の装置で実験を行った。

## 6. 実験方法

(1) 実験準備：机二個を装置の土台として設置し、机の上と床にメジャーを一直線に張り付ける。机の上には装置または手をメジャーの線に沿って置き、キャップの発射口の上面、高さ34センチメートルの位置にスローモーションカメラを設置した(図6)。

(2) 実験方法：撮影はカメラ(Nicon1 デジタルカメラ)を使い、1200fps、3秒間の設定で行った。カメラでの撮影を開始した直後にキャップを発射し、落下点を目視して、マスキングテープを落下点がテープの中心となるように貼る(図7)。飛距離をメジャーで、ずれ幅を物差しで測った。ゴムの本数を1本から4本まで変えて同様の実験を行った。又、手での発射測定は、机の上に手を乗せ、固定した状態でキャップを飛ばした。初速度を上げる実験として装置後方からひじの屈折を使って勢いをつけて飛ばした。データはカメラ真下を通り、メジャーの上に落ちたもののみ採用した。手での投射はわずかに上を向くため、台を傾斜させ、装置でも7度の斜方投射における測定を行った。

(3) データの処理：①データの下処理：動画編集ソフト AviUtl を用いて、撮影した映像をキャップがピストンの先端から離れた瞬間から一定のコマごとにコマ送りし(図8)、それぞれスクリーンショットを行った後、印刷をした。

②初速度の算出：図9に測定図を模式化したものを示した。印刷した用紙に基準線を決め、キャップの先端から基準線までの距離と10mmの距離をデジタルノギスを使って測り、その2つを比で計算して、実際の距離を測定する。用いた式を以下に示す。

$$L : (10 \text{ mm}) = X : Y$$

L…実際の距離  
X…基準線からキャップの先端までの距離  
Y…画像上の10mmの距離

コマ送りした写真ごとに実際の距離、縦と横の長さ、飛

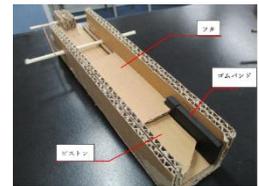


図3 段ボールを使った装置



図4 モーターを使った装置



図5 木を使った装置

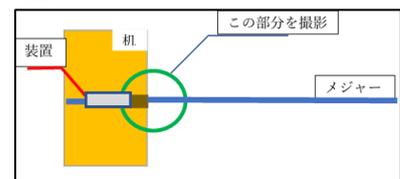


図6 測定の模式図(上からの図)



図7 実験風景の写真

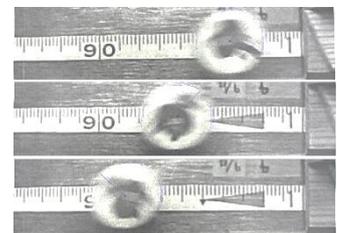


図8 コマ撮り画像



図9 印刷したデータ処理の模式図

距離、ずれ幅、コマ送りした時間を Excel に記録し、横軸に時間、縦軸に進んだ距離の x-t グラフ、縦軸にキャップの速度をとった v-t グラフを作成した。x-t グラフの傾きからキャップの初速度を求めた。

- ③回転数の算出：トレーシングペーパーで、キャップの形状とキャップの中心から引いた線を記録し、最後の写真と最初の写真の中心を結んだ中心線に対する角度を測定する。印と中心を結んだ線をノギスを使って 20 mm の長さで印をつけ、中心線にかけて下した垂線の長さを測った。そして、逆三角関数によって角度を算出し、回転角を算出した。横軸に時間、縦軸に回転角のグラフを作成し、傾きから角速度を求め、次式より回転数を求めた。

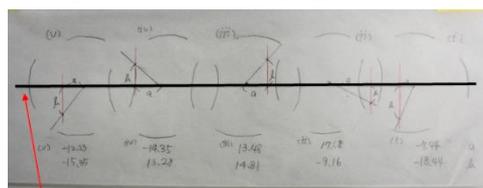


図 10 印刷したデータ処理の模式

$$\text{回転数(1/s)} = \text{角速度}(\text{°/mms}) \times 360^\circ \times 1000(\text{mms})$$

## 7. 実験結果と考察

- (1) 図 11 は装置で飛ばした場合のゴム本数と飛距離の関係を示したグラフである。図 11 よりゴムの本数を増やすと飛距離が増えていくということがわかる。斜方投射の方が飛距離が大きく、ゴム本数を増やすことでも飛距離は大きくなる。

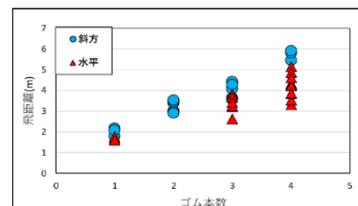


図 11 ゴム本数と飛距離の関係

- (2) 図 12 に初速度と回転数の関係を示す。モーターを使った装置に関しては、三回の実験での初速度の平均は 1.16m/s と非常に遅く、回転数の平均は 21.3/s であった。木の装置で飛ばしたデータでは、初速度が上がるにつれて回転数も増加する傾向が見られる。このことは、ゴム本数の増加に伴い初速度、回転数が上がっていくためと考えられる。一方手で飛ばしたデータを見ると、初速度が上がっても、回転数はあまり増加していない。手で飛ばす際は、キャップの弾き方は変化しないため、回転数はほぼ一定となり、初速度は腕の振りの程度によって変化するため、初速度が上がっても回転数は変化しないのではないかと考えられる。これらのことからまっすぐ飛ばす条件は、初速度を上げて回転数が上がらないようにすることではないかと考えた。

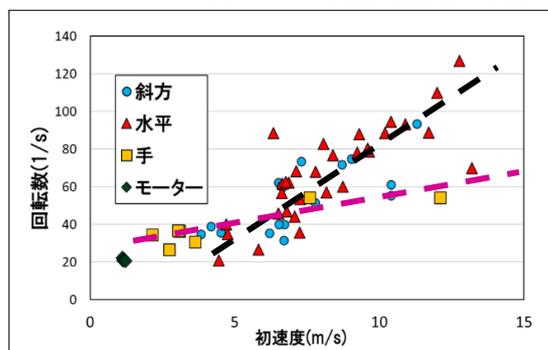


図 12 初速度と回転数の関係

- (3) 図 13 に飛距離と真っすぐからのずれ幅の関係を示す。図 13 より、装置の場合、斜方投射、水平投射、いずれも飛距離が増えるにつれてずれ幅も増える傾向が見られる。また、斜方投射も水平投射も飛距離が 3m を超えるとずれ幅が急激に大きくなる傾向がある。

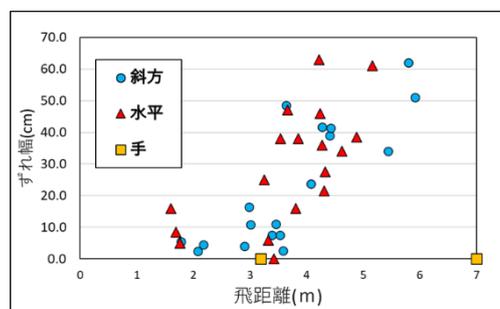


図 13 飛距離とずれ幅の関係

- (4) 図 14 には回転数とずれ幅の関係を示す。図 14 より、装置で飛ばした場合、回転数約 60/s を超えるとずれ幅が急激に大きくなる傾向がある。また、斜方投射の方が水平投射より回転数が低い状態からずれ幅が大きくなるように見える。これら

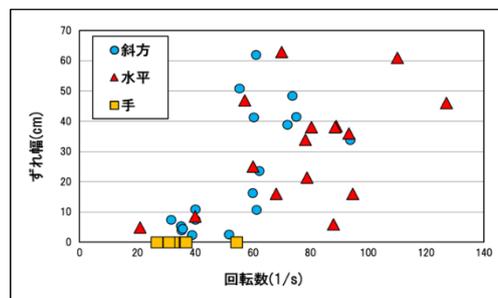


図 14 回転数とずれ幅の関係

のことから、回転数を 60/s 以内に抑える必要があると考えた。

## 8. 全体考察

表 1 キャップを投げたときの条件比較

### (1) キャップを投げた時の条件比較

キャップを真っすぐ飛ばすための条件を明確にするため、表 1 に条件をまとめ比較した。表 1 より手で真っすぐ飛んだ条件で、装置では 70cm もずれ、回転数が大きく違うことがわかる。装置では回転数の増加に伴いずれ幅が大きくなることから、マグヌス効果の影響がキャップに働いていると判断できる。そこで回転数が小さくなるとマグヌス効果も小さくなるのではないかと考えた。すなわちキャップに掛かる回転数を抑制して回転数を小さくしつつも初速度を維持できれば、ずれ幅は減少するのではないかと考えた。

条件比較	手	装置
キャップの水平性	可	可
初速度	最大 12m/s	最大 12m/s
ずれ幅	0cm	70 cm
回転数	50(1/s)	100(1/s)
飛距離	最大 7m	最大 7m

### (2) 追加実験

回転数を抑制して初速度を維持するために装置の発射口に付ける摩擦用のゴムを工夫し実験した。ゴムは 4 本で実験を行った。改良のための工夫は以下の 3 点である。結果として、キャップの回転と軌道が安定していたスポンジゴム②の 4.9cm を取り付けた。ア. 装着する板ゴムの長さを小さくする (4.9 cm, 2.4 cm, 1.2 cm) (図 15)、イ. 付ける位置を変える (図 16)、ウ. ゴムの種類を変える (図 17) 変えたゴムの種類：左から順に、生ゴム、スポンジゴム①、スポンジゴム②



図 15 板ゴムの長さ変え



図 16 付ける位置を変える



図 17 種類を変える

### (3) 追加実験結果

#### ① 回転数と初速度について

追加実験の全結果を図 18 に示す。改良途中で得られたデータは◇、板ゴム最良条件でのデータを◆で示す。追加実験では初速度を大きくしたまま回転数を小さくしたデータを取ることができた。また、板ゴム最良条件で得られたデータは、手での条件に近似していた。

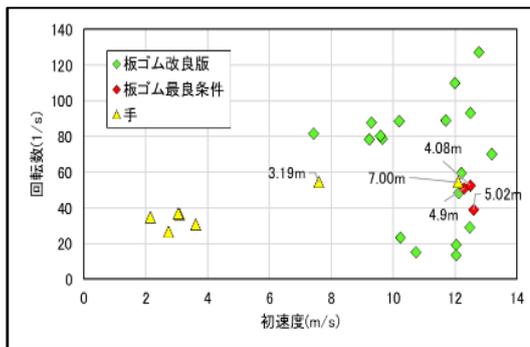


図 18 初速度と回転数の関係

#### ② ずれ幅と回転数について

図 19 は改良後のずれ幅と回転数を示したグラフである。また、図 20 はキャップの落下地点を測定した写真である。図中の印がついていない点は、装置改良中での着地位置を示している。図 19 と図 14 と比較すると、回転数が約 35(1/s) より小さい時ずれ幅は大きくなっている。これは装置改良前では動力のゴム本数が 1 本もしくは 2 本で飛距離が小さいためである。改良後は回転数を下げた発射によって姿勢を崩して飛んでいたためストレートには分類されない。また、どちらも回転数が 55(1/s) より

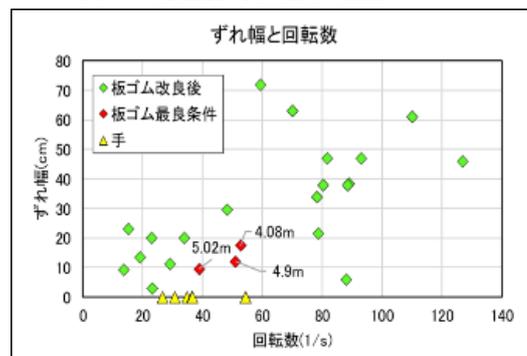


図 19 ずれ幅と回転数の関係

大きくなるとずれ幅は大きくなった。

(5) マグナス効果に影響する要素

回転数が 35 (1/s) より小さいとキャップの姿勢が不安定になったことは、ジャイロ効果の低下で姿勢が崩れたと考えた。また回転数が 55 (1/s) より大きくなるとジャイロ効果で姿勢は安定するが、マグナス効果の影響も同時に大きくなりずれ幅が大きくなったと考えられる。以上から、ジャイロ効果が効きつつ、マグナス効果が効かなくなる回転数の適正範囲は 35~55 (1/s) であると考えられる。

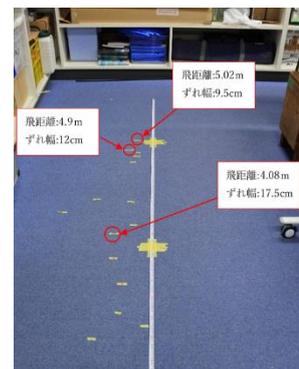


図 20 落下地点の様子

次に、マグナス効果と回転数の関係を考える。丸山 (2004) では、マグナス効果の揚力の大きさに依存する要素として、「レイノルズ数・回転速度比・物体表面の粗さ」が多くの実験で確認されていると述べている。丸山自身はマグナス効果を「剥離点の非対称により流れの向きが曲がる」と説明し、負のマグナス効果について議論している。レイノルズ数とは、乱流の生じる条件を表す物理量である。また、回転速度比とは「球表面の回転速度と、球を基準とした一様流の速度の比 (丸山 2004 より)」であり、物体表面の粗さについては、「ボールの回転に伴う縫い目の位置の変化により、揚力係数は変動」などと紹介されている。これら 3 つの条件と負のマグナス効果との関係を高見ほか (2009) が調べており、SP (回転速度比) は次式で表される。

$$SP = \frac{2\pi r f}{v_0}$$

f : 回転数 [Hz]  
 SP : 回転速度比  
 v<sub>0</sub> : キャップの初速度 [m/s] ,  
 r : キャップの半径 [m]

図 21 は、SP (回転速度比) が 0.12, 0.23, 0.35 に固定したときのレイノルズ数と抗力係数、揚力係数の関係 (高見ほか (2009) より引用) を示している。SP が小さいとき、レイノルズ数のある範囲において揚力係数が 0 に近づく範囲が存在している。これはマグナス効果が物体に影響を及ぼさない範囲が存在することを示唆している。さらにキャップがまっすぐ飛んだときの条件に当てはまる数値 (f=50/s, v<sub>0</sub>=12m/s, r=0.015m, π=3.14) を代入し、計算すると、SP=0.3925 となる。また、回転数が 45 (1/s) では SP=0.35325 となる。SP=0.35 のとき揚力係数がゼロに近づいている範囲が存在することから、回転数がキャップをまっすぐ飛ばすことに関係があると考えられ、初速度と回転数の組み合わせがストレートの条件と考えた我々の考察と矛盾しない。今後はさらに正確な回転数の範囲やレイノルズ数、キャップの種類を変えたことによる回転数と軌道の変化について検討していきたい。

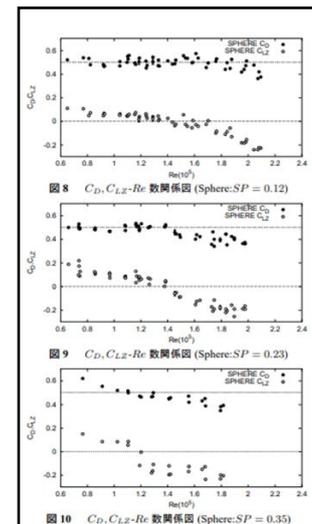


図 21 レイノルズ数と揚力係数

9. 参考文献

- ・船津ほか (2017) 「輪ゴム飛ばしにおけるホップアップの研究」 静岡県立科学技術高等学校自然科学部
- ・藤川重雄, 武田靖, 矢野猛, 村井祐一共著 「工学の基礎 流体力学」・石錦良三 根本光正著 「流れの不思議」 日本機械学会編
- ・久保田浪之介 「とことん優しい流体力学の本」
- ・「AviUt1」 動画編集ソフト
- ・「つくるさん」 <http://www.youtube.com/watch?v=z0-KjKSNhVM>
- ・竹内淳 「高校数学でわかる流体力学」
- ・丸山祐一 (2009), 「マグナス効果の物理的メカニズムについて」 日本航空宇宙学会論文集, Vol 57, No 667, pp. 309-316
- ・高見ほか (2009) 「バックスピンする球体に働く負のマグナス力～飛翔実験による測定～」 ながれ 28, pp347-366