

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
2年 船津遥紀 山本孝也 海野瑛太 山田太洋

1 研究動機

私たちは図 1 のように輪ゴムを手にかけて飛ばしているときに、輪ゴムの軌道がそりあがっていることに気づいた。これはインターネット上ではホップアップと呼ばれており、これについて「輪ゴムはマグナス効果による揚力を得ることで上昇するが、輪ゴムは前回転をしている」と考察されている。私たちは図 2 のように人差し指に竹串を立てて発射し、竹串に巻き付く輪ゴムの回転を観察するといった方法をとるなどして、輪ゴムの回転を調べたが、輪ゴムは前回転をしていた。しかし、これでは輪ゴムに下向きの揚力が生じることになり、上昇することに矛盾する。ホップアップの原理を探ることで、この矛盾を解明したいと思い、研究を始めた。

2 マグナス効果

マグナス効果とは、回転しながら流体中を運動する物体の軌道が曲げられる現象である。後ろ回転をしながら空气中を運動する物体の上部、下部の流速は物体の回転により変動し、上部では流速が大きくなり、下部では流速が小さくなる。ベルヌーイの定理より、上部では低圧、下部では高圧となり、この圧力差から上向きの揚力が生まれ、軌道が曲げられる。

3 目的

ホップアップが起こりやすい条件を探りつつ、輪ゴムの軌道を解析し、軌道の特徴をつかむことでホップアップの原理を解明する。

4 予備実験

人差し指の上側のゴムの張力を、下側の張力よりも大きくするとホップアップが起きやすいということを前提にして、張力を決める変数となりうる要素を探すために、手で輪ゴム飛ばしを繰り返した。この試行の結果、人差し指に輪ゴムを掛ける際に、ある程度輪ゴムを延長してから輪ゴムをかけるという動作に気づいた。この長さを変えることで上側と下側のゴムの張力差を決めることにした。このとき人差し指を超えて延長する長さを L とする (図 3)。また、輪ゴムの発射装置を製作し、試し打ちをする中で、小指と親指の間の張力も関係すると考え、小指から引き伸ばす長さを AD として (図 4)、変数とした。



図 1 ホップアップが起こるときに輪ゴムのかけ方

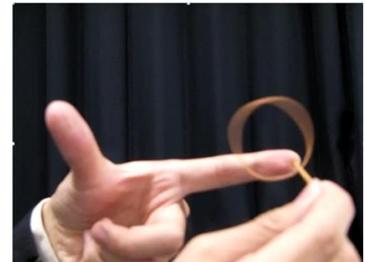


図 2 輪ゴムの回転を確認する実験



図 3 人差し指から延長して伸ばす長さ L

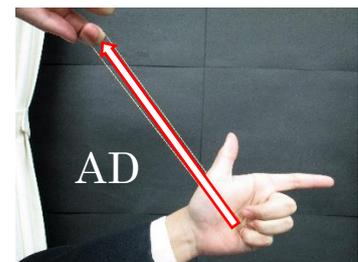


図 4 親指から引き伸ばす長さ AD

5 実験方法

(1) 実験装置の製作

図5にあるような実験装置を製作した。材料は、木材、2本の定規、3個のゴム栓、2台のスタンド、養生テープ、竹串、両面テープである。2本の木材を組んで手の形にし、3個のゴム栓でそれぞれの張力を固定する。輪ゴムは No. 18 の規格のもので、常に新しいものを使った。

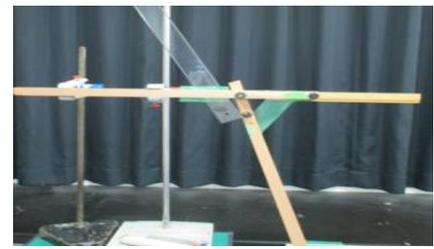


図5 実験装置(実物)

(2) 実験方法

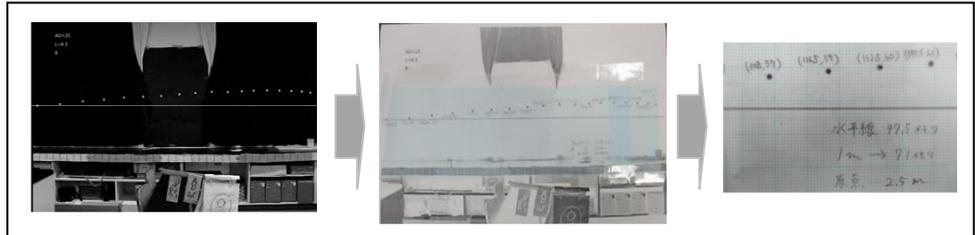
ハイスピードカメラ 300fps を用いて、発射装置からの距離 2.5 から 6.0m の間を飛ぶ輪ゴムの軌道を撮影し、これと同時に目視による観察も行った(図6)。Lは5.5cmから9.0cmまで0.5cmずつ変え、ADは15cmから30cmまで5cmずつ変えて実験し、1条件につき10回発射をした。



図6 実験風景

(3) データ処理

動画編集ソフト AviUtl を用いて撮影した映像をコマ送りし、



0.02s 毎の輪ゴムの位置に印をつける。その画面をスクリーンショットして印刷し、方眼のトレーシングペーパーを重ね、つけた印の位置を座標で表す(図7)。座標を表計算ソフトに入力して、座標データとする。

図7 データ処理の概況

(4) 張力の計算

AD, L によって求まる張力をそれぞれ T_1, T_2, T_3 とし、これらはフックの法則 $F=kx$ を用いて算出した(図8)。フックの法則におけるばね定数について、本研究ではこれに代わるゴム定数を定義し、ゴム定数は、輪ゴムに重りを吊るして伸びを確かめる実験によって、ゴムの伸びと弾性力との関係から近似的に求めた(図9)。5回の実験の平均より、ゴム定数は 13.7N/m となった。なお、輪ゴムはゴム栓 A 及び C で止まっており、そこを基点とする一本分で考えることにするため、ゴム定数には $1/2$ をかけている。

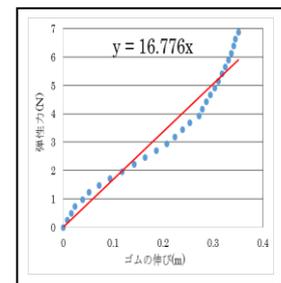


図9 ゴム定数の測定
縦軸:弾性力(N)
横軸:ゴムの伸び(m)

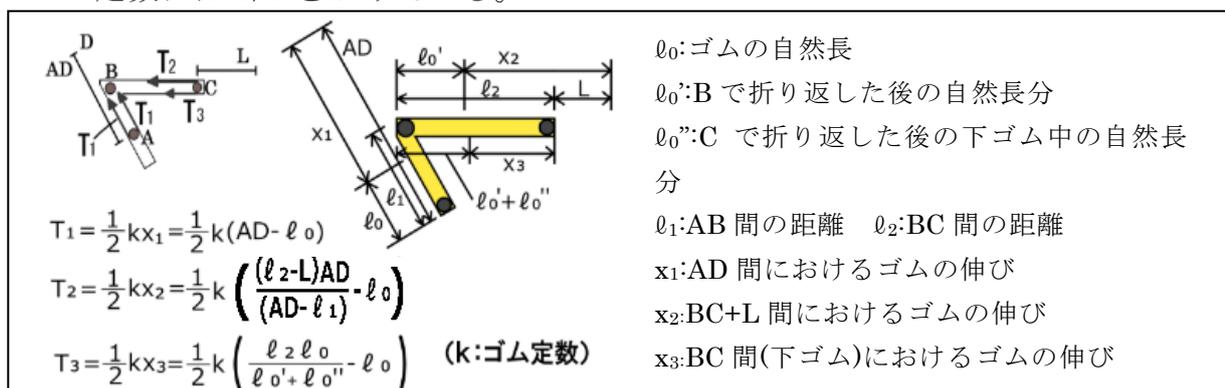


図8 各部位の張力の式

6 結果

(1) 輪ゴムの張りの強さと飛距離の関係

Lの長さを変化させて飛ばしたときの飛距離（落下点を観測により計測）を調べた。ADの長さを25cmで固定し、Lを0cmから7cmまでの間で1cmずつ変え、輪ゴムを10回ずつ飛ばす。

条件ごとの飛距離を0.5m毎に区分して表1に記載した。Lの長さを大きくする、つまり上ゴムの張りを強くするほどばらつきは大きくなるが、平均して飛距離は増加する傾向がみられる。

表1 Lの長さと飛距離の関係

Lの値 (cm)	輪ゴムの飛距離(m)								
	~4.5	4.6~ 5.0	5.1~ 5.5	5.6~ 6.0	6.1~ 6.5	6.6~ 7.0	7.1~ 7.5	7.6~ 8.0	8.1~
L=0	0	0	8	2	0	0	0	0	0
L=1	0	1	3	6	0	0	0	0	0
L=2	0	0	5	2	3	0	0	0	0
L=3	0	0	5	2	2	1	0	0	0
L=4	1	1	0	4	2	1	1	0	0
L=5	1	0	0	0	2	4	1	2	0
L=6	0	0	1	1	2	3	3	0	0
L=7	0	0	0	0	2	3	1	3	1

(2) 輪ゴムの軌跡の分析

データ処理によって得られた軌跡を条件ごとにまとめたものが図10のようなグラフになる。こうして得られた軌跡を特徴ごとに分類すると4種類に分けられることがわかった（図11）。発射後下がっていく「下がる型」（i型）、高度を維持する「ストレート型」（ii型）、下がってから上昇に転じる「下がって上がる型」（iii型）、下がらずに上がっていく「下がらない型」（iv型）である。ここでiii型とiv型をホップアップしたものとして1ポイント、ii型は、上昇はしていないが、揚力が働いていると考えられるので0.5ポイントとして合計を10回の試行回数で割った値をホップアップ率とした。

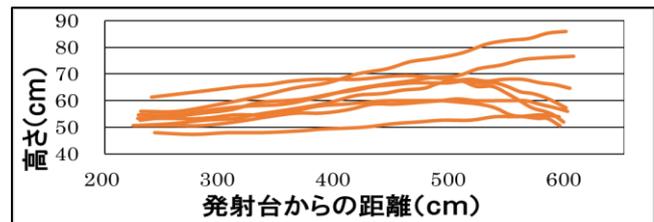


図10 軌跡の一例
(AD=20,L=8.5の条件での実験)

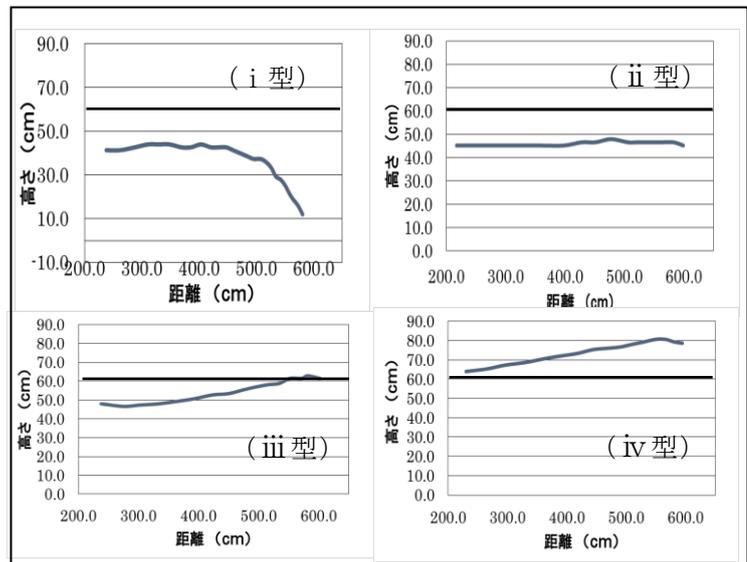


図11 4種類の軌跡（発射台の高さ62cm）

(3) 基本軌道について

ホップアップしたものの中でそれぞれがどのくらいの割合なのかを調べたところ、ii型が35%、iii型が55%、iv型が10%となった。iii型の割合が圧倒的に多い。

ホップアップしたデータの最下点の高さをグラフにすると図12になる。ほとんどのデータが発射台の高さよりも下がっている。さらに、10cm以上下がるものもある。以上の結果から考えると、ホップアップの基本軌道は、「下がってから上がる」（図13）ということになる。

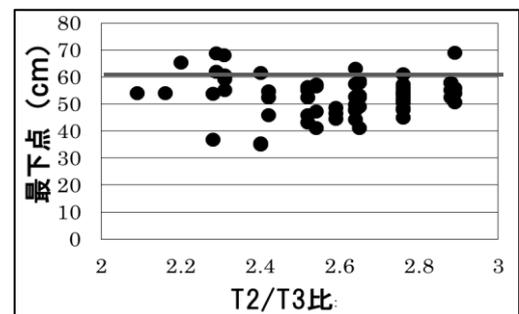


図12 T₂/T₃比と最下点高度との関係

(4) 張力比とホップアップ率

T_1 、 T_2 の比 (T_2/T_1)、 T_2 、 T_3 の比 (T_2/T_3) を求めてホップアップ率との関係を見た。 T_2/T_1 比との関係を見ると (図 14) 一定の張力比であってもホップアップ率に大きな差があることから、あまり相関がないといえる。

T_2/T_3 比とホップアップ率の関係を見ると (図 15)、 T_2/T_3 比が大きくなるにつれてホップアップ率は増加しているが、 T_2/T_3 比が 2.8 を越すと減少する傾向にある。このことから、 $2.4 \leq T_2/T_3 \leq 2.8$ が適正值と考えられる。ホップアップの起こりやすさは、上ゴムと下ゴムの張力比に依存していると考えられる。

(5) 張力比と高度差

図 16 に T_2/T_3 比と高度差の関係を示した。高度差とは最高点と最下点の差を意味する。図 16 の ■ は T_2/T_3 比を 2.2 から 3.0 の間で 0.1 ずつの平均値を示し、● はその範囲内の最高値を示している。図 16 から、 T_2/T_3 比の増加に伴って、高度差の平均値が大きくなっていることが分かる。また、 T_2/T_3 比が 2.5 以上の範囲では高度差の最高値が急激に大きくなっている。

(6) 速度

図 17、18 に $v-t$ グラフの例を示した。グラフの傾きは加速度になることを踏まえ、水平方向の速度グラフを見ると傾きは負で、尚かつ値も大きいことから輪ゴムは発射直後水平方向に大きく減速する力を受けていることが分かる。一方、鉛直方向のグラフを見ると、速度変化があまりない。さらに、速度は全て正の値をとっている。このことから、飛行中の輪ゴムにはほぼ一定で重力と釣り合う程度の上向きの揚力が働き、上昇していると考えられる。

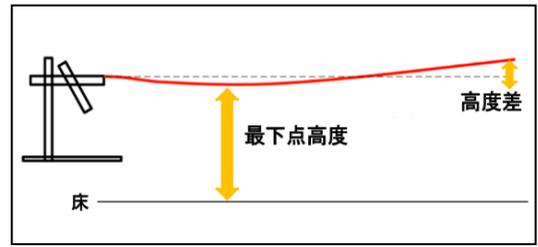


図 13 ホップアップの基本軌道

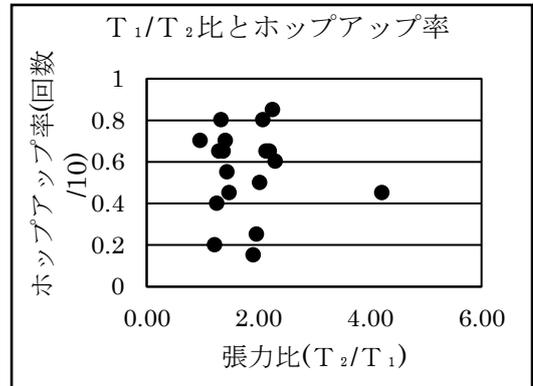


図 14 T_2/T_1 比と高度差との関係

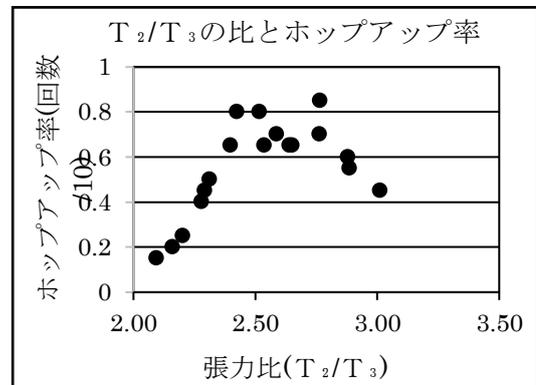


図 15 T_2/T_3 比とホップアップ率の関係

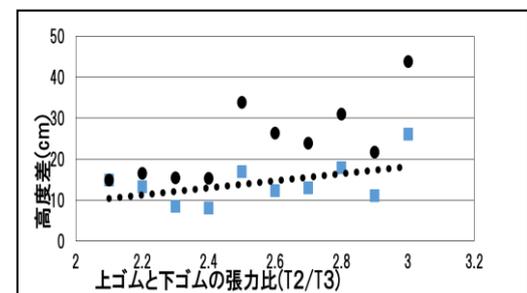


図 16 T_2/T_3 比と高度差との関係

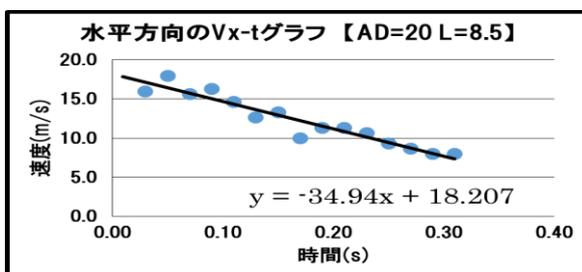


図 17 V_x-t グラフ

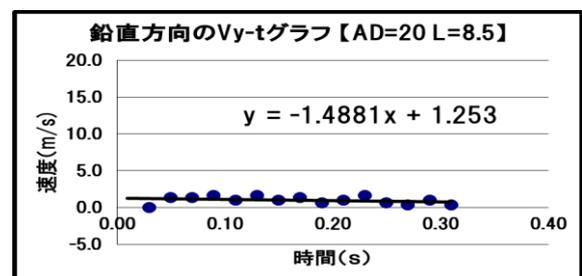


図 18 V_y-t グラフ

7 考察

(1) ホップアップの起こりやすい条件について

実験結果よりホップアップの基本的な軌道は「下がってから上がる」ということがわかった。また、ホップアップ率が高い $2.4 \leq T_2/T_3 \leq 2.8$ の範囲に着目すると、高度差の値も大きくなることから、この範囲はホップアップが起こりやすい条件を示していると結論づけた。また、この時の AD と L の具体的な値は、AD=20 のとき $L=7.0 \sim 8.5$ 、AD=25 のとき $L=7.0 \sim 8.0$ 、AD=30 のとき $L=7.0$ である。AD が大きくなるにつれて L の値の範囲が狭くなることが分かる。これは、 T_1 が大きくなることで張力 T_2, T_3 に差が生じにくくなるからだと考えた。故に、 T_2 と T_3 の張力の比でホップアップの起こりやすさは決まると考えられる。

(2) ホップアップの原理について

「下がってから上昇する」という基本軌道の「下がる」は何故起きるのか、水平投射での落差と比較するために、水平投射時の落差を計算で求めた。水平投射時の初速度は発射直後を撮影して求めた平均値 24.6m/s を使った。発射台から 2.5m のときの落差を計算では約 5cm になった。このため、ホップアップ時の方が落差は大きいことになる。このことより、重力以外の力が働いて落ちていると考え「発射直後は前回転で下向きの揚力を得て下がるが、その後輪ゴムの上下がひっくり返り後ろ回転になることで上向きの揚力が生じ、輪ゴムが上昇する(原理 1)」というモデルを考えたと考えた。しかし、実験を見直すと、輪ゴムの反転は見られなかった。このため、原理 1 の可能性は低いと判断した。また、v-t グラフから、輪ゴムに働く揚力が一定であると考えられるが、マグナス効果でないとするならば、別の原理で揚力が生じることになる。輪ゴムの運動を装置から見ると、ホップアップ時に鉛直面より傾いていることがよく見られた。これらから、「輪ゴムが傾くことによってマグナス効果とは異なる原理による揚力が生じている(原理 2)」という可能性が挙げられる。一方で基本軌道以外にも下がらずに上昇する結果が多いことも無視できない。そのことは「スタート時より後ろ回転である(原理 3)」可能性を示唆している。しかし、発射直前は前回転であることが確認されている。そこで、「発射時は前回転であるが、飛び出す直後に後ろ回転に変わる(原理 4)」という可能性が強くなってくる。以上 4 つの原理が挙げられたが、原理 1 はあまりに現実性が低いため、原理 2, 3, 4 の中のいずれかが妥当ではないかと考えられる。

8 今後の課題

現状として 4 種類のホップアップの原理を挙げているが、どの原理が有力なのかは、まだはっきりしていない。ホップアップには輪ゴムの回転が大きく関わると考えられるので、飛行中の輪ゴムの回転の向きを確認する方法を考え、ホップアップの原理をさらに追求していきたい。

9 参考文献

- (1) 相良製作所 <http://sagara-works.jp/#>
- (2) 「流れのふしぎ」日本機械学会編 石綿良三 根本光正著 講談社
- (3) 「高校数学でわかる流体力学」竹内淳著 講談社
- (4) 画像編集ソフトは「AviUtl」を用いた。