

11. 水ロケットにおける発射方法の研究

静岡県立富岳館高等学校
環境科学研究部 1 年次生
石原 航希、鈴木 健、飯樋 礼菜

1. 研究の目的

私たちがこの研究に取り組むようになったのは、中学三年生の夏の学校説明会に参加したのがきっかけである。先輩方が研究の成果を発表していた。小学生の時に水ロケットを作ったことがあり、懐かしい気持ちで説明を聞き始めたが、先輩方はロケットの打ち上げを通して、速度や加速度、さらに当時の私たちにはまだ分からないような難しい内容の研究をまとめていた。そのとき私たちは水ロケットの奥深さや科学研究というものに興味を持つようになった。

入学後、「最高に飛ぶ、最高のロケットを作りたい」と決意し環境科学研究部に入部した。そこで今までの研究について学んだ。飛距離を伸ばすために機体の軽量化や羽根の形状の工夫を行い、理論的な考察も行っていた。

2. 昨年度までの研究

・運動量保存の法則を応用して、燃料（本実験の場合は水）を噴出し尽した時のロケットが得た獲得速度を導出した。

$$V = v \ln(M/m) \quad \dots (a)$$

ここで、 V …排出終了後獲得速度、 v …排出速度、 M …打ち上げ前全質量、 m …最終質量（ロケット本体質量）

・獲得速度の式を用いて、ロケットに入れる水の量の最適化を行い、実験結果と合わせて、入れる水の量を 550 mL と決めた。

・獲得速度の式からロケット本体の軽量化も有効であることがわかり、羽の材質や形状などを工夫してできる限りの軽量化を実施した。（従来型→約 180 g、改良型→約 130 g）

・軽量化した機体の打上げ時、水の噴出が終わろうとしている瞬間、水と空気が混ざり合った状態で噴出されているときがある。この一瞬にさらに機体が加速され、二段加速しているように見えた。この現象について詳細に観察を行った。その結果図 1 のようになった。打ち上げ直後の水のみを排出しているときの「一段目の加速」と比較して、水の排出が終わろうとしている瞬間の水と空気が混ざり合った状態の排出時の加速度「二段目の加速」の方が大きいことが分かった。我々はこれを水ロケットの「二段加速現象」と名付けた。

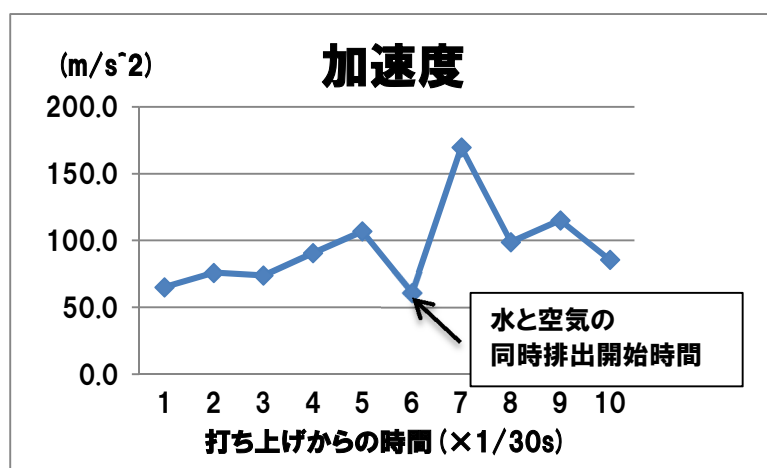


図 1

3. 今年度の研究

この 4 月に入部した私たちは、まず先輩たちの行ってきた研究を学ぶことから始めた。そして実際に自分たちのロケットで二段加速現象を確認し、先輩方が発見した二段加速現象をさらに発展させ応用した何かを研究したいと考えた。

第一に、私たちも先輩たちの考えと同様、やるからにはとにかく遠くまで飛ばしたい。という大きな目標を持って活動を始めた。過去の研究から、「二段目の加速時間を何とかして延ばすことができないか」という発想にたどり着いた。加速度の大きい二段目の加速時間を延ばすことができればそれだけ最終的な獲得速度が大きくなり、飛距離も大きくなるのでは、と考えた。

水と空気が同時に排出されている瞬間を意図的に作り出したい。私たちが考えた手段は、ロケット内に人工的に竜巻のようなものを作り出すことである（図2）。図2を見てわかるように、機体内部に竜巻のような空気の通り道ができている。この状態が作り出されれば、水と空気が同時に排出されることになり、二段目の加速時間が長くなるのではないかと考えた。



図 2

流れを制御するための実験

図2のような状態にするには、最初に水を回転させておいて排出すればいい。ペットボトルに水を500mL程度入れ、そのまま回転させずにひっくり返して水を排出しようとする、空気がボン、ボンと不連続で中に入ってくるため、水はスムーズに排出されない。一方実際の打ち上げ時は加圧された空気が一気に水を押し出すので、排出はスムーズである。そのため私たちは、スムーズに排出されているときを常に再現するため、ペットボトルを半分に切りそこに水を入れ排出させるという方法を使った。その時の水の流れを制御し、人工的に竜巻を作り出せないかと実験を行った。



図 3

図3や図4のような障害物を設置し、強制的に流れを作ろうと試みた。

図3よりも図4の方が排出された水の流れに方向をつけられた。さらに排出口に近い位置に障害物を設置した実験も行ったが、結果として、出口により近い位置に流れの制御板を置いた方が、排出後の水の流れに回転方向の変化をつけることができた。しかし、私たちの目的、機体内部に竜巻をつくるということに対しては大きな影響を与えることができなかった。竜巻ができるときとできないときがあり、その差は障害物があるかないかの違いより、流し始める時の水が、元々回転方向に流れがあるかどうかの方が強い影響を与えるという結論に達した。

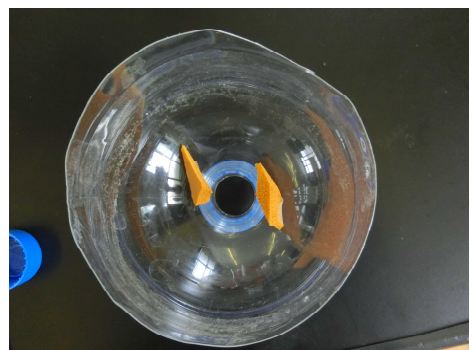


図 4

発射方法工夫実験

上記のような結果を受けて、私たちはやはり打ち上げ前の水に回転方向の流れを作っておくしかないと考えた。理想的には加圧後の打ち上げ直前に流れを作りたい。しかし、加圧した後の発射台に手を触れることは非常に危険である。私たちは JAXA 主催の APRSAF-22 水ロケット大会の国内2次予選に参加することができ、その際にも加圧後の発射台に手を加えてはいけないと話があり、またその危険性についても併せて説明がなされた。そのため発射台に手を触れずに、できるだけ近づかずにロケット内部の水に流れを作る方法考えた。そこで、発射台を板の上に乗せ、その板ごと回転させた（図5）。回転時の摩擦を減らすため、板と地面との間にテニスボールを挟んでいる。

実際に打ち上げ実験を行った。打ち上げ条件は昨年までのデータを引き継ぎ、打ち上げ角65度、

水の入れる量 550 mL、圧力は使用している空気入れ 40 回分とした。得られた飛距離は、回転させない場合とさせた場合双方ともに 90～100 m 程度で両者に大きな差を見つけることはできなかった。

わたしたちはこの結果に大きく落胆し、回転作用は飛距離に影響を与えないのかと思い始めた。

念のため飛距離を短くして同様の実験を行った。飛距離を短くした理由は、前述の APRSAF-22 の大会のルールが、50 m 程度先の目標物のできるだけ近くに着地させることを目的としており、そのときのノウ

ハウを生かして実験してみようと思ったからである。そこで得られた結果は、回転させず従来通り打ち上げた場合が約 50 m、回転させた場合は約 40 m というものであった。回転させた方が飛距離は落ちてしまった。(表 1)

	通常の発射方法	発射台回転
飛距離	約 50 m	約 40 m

表 1

しかしこの結果から、発射台を回転させたときロケット内部の水の動きが従来と違う動きをしており、更にその動きがロケットの飛距離に影響を与えていることが分かった。

- ・ 昨年までの 100 m 飛ぶ条件で打ち上げ実験をした結果、発射台を回転させていない場合とさせたときとでは飛距離に有意な差は見られなかった。
- ・ 50 m 飛ぶ条件での実験では、回転させていないときの方が飛距離は大きいという結果が得られた。このときの条件は、圧力は 100 m の時と比較して低く、水の量も少なくしている。

上記 2 つの結果を得て、次のことを考えた。「さらに飛距離を求めたとき、圧力をこれ以上高めることは危険なので避ける。では水の量を最適な量の 550 mL よりも増やしたときどうなるか。」ということである。水の量を増やせば、水と空気が同時に排出されているときの効果がより現れるのではないかと考えた。

そこで水の量を 600 mL として打ち上げ実験を行った。発射台を回転させたときの飛距離は、昨年度までの研究で最適な水の量としていた 550 mL のときの飛距離 (約 100 m～110 m) と比較しても優れた結果を残すことができた (約 110 m～130 m)。今までには届かなかった建物の屋根に乗ってしまうようなこともあり、有意差を見ることができた (図 6, 表 2)。



図 5

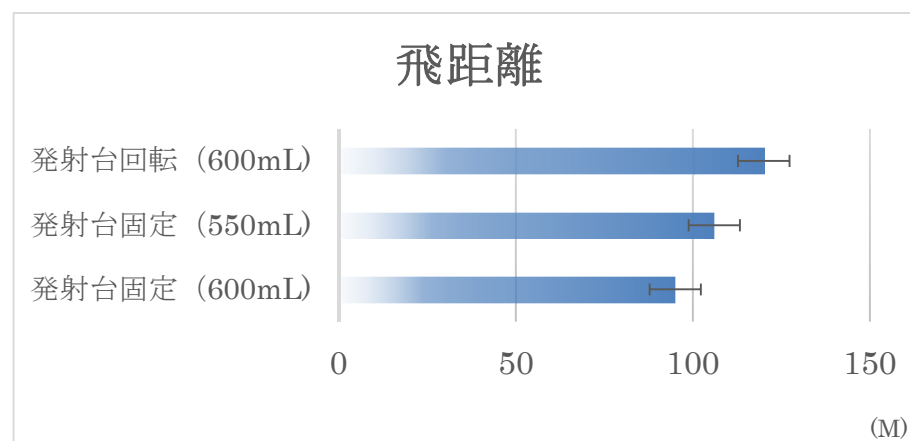


図 6

	発射台固定(600mL)	発射台固定(550mL)	発射台回転(600mL)
飛距離	約90～100m	約100～110m	約110～130m

表 2

30 分の 1 秒ごとにコマ送りした動画を用いてロケットの位置をプロットした。それを解析し、30

分の 1 秒ごとに加速度を求めプロットした(図 7)。比較のため、昨年得られた結果(図 1)のグラフと重ね合わせた。図 7 の青線が昨年度の結果、橙線が今回飛距離が最も得られた時のグラフである。

・昨年度(青線)は、入れる水の量 550 mL、台は回転させていない。

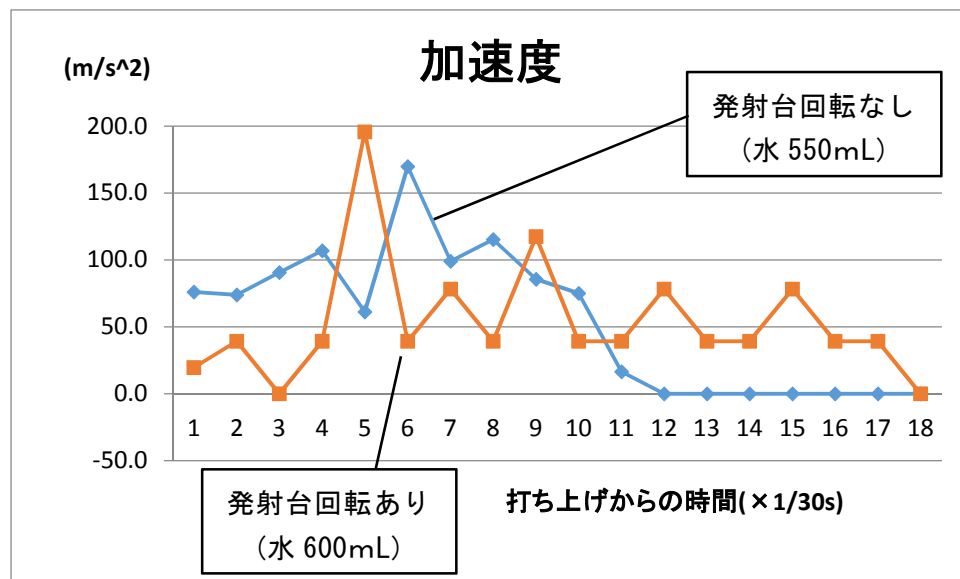


図 7

・今回(橙線)は入れる水の量を 600 mL、台を回転させている。

両者を比較して、考察を行った。

- ・まず 30 分の 4 秒までの加速度の値は青線の方が大きい値で推移している。これは入れる水の量が影響していると考えられる。今回の実験では水の量を多くしたため、動き出しの加速度は小さい値になると推測できる。
- ・橙線は 30 分の 5 秒で加速度が大きくなっており、ここでも二段加速現象が起こっていることが確認できた。
- ・橙線の方が加速している時間が長いことがわかる。青線のグラフが 30 分の 12 秒で加速が終わっているのに対して、橙線はその後にも加速を続けている。

このことについて考察を行った。

橙線は発射台を回転させた結果、打ち上げ時に内部の水に竜巻状の空気の通り道ができていると推測される。この竜巻の、水の排出時間に対する影響を検証した。ペットボトルを半分に切り、図 2 のようにノズル側に水を入れ、排出させた。その際にペットボトルを回転させずにそのまま水を排出させたときと、回転させ竜巻を作った時の排出時間を測定した(表 3)。

	竜巻なし	竜巻あり
排出時間 (s)	7.5	13.8

表 3

(いずれも水 600 mL)

表 3 のように、竜巻を発生させたときの排出時間は発生させないときに比べて長い時間がかかっていることがわかる。この現象が打ち上げ時にも同様に起こっていると考えられる。

竜巻状の空気の通り道ができることにより水の排出時間が延びることが確認できた。次にこの現象がロケットの飛距離にどのような影響を与えるかを考えた。

加速度を積分すると速度が得られるので、図 8 のグラフを積分するとロケットが得た獲得速度を求められると考えた。そこで、プロットした点を 30 分の 1 秒ごとの棒グラフと見立てて、青線と橙線の面積を求めた(表 4)。

	発射台回転なし	発射台回転あり
獲得速度 (m/s)	32.3	34.6

表 4

まず表 4 で得られた値を、昨年先輩方がプロットしたグラフから直接求めた排出後の速度と比較する。直接求めた速度の値は約 39.4(m/s)であった。今回積分して得られた値(表 4)に対して、オーダーが等しく全く見当はずれの数値ではないと確認できた。

改めて表 4 を見てみると発射台を回転させたときの獲得速度の方が大きい値を得ている。この差が、今回得られた飛距離の差になっている可能性は高い。

橙線の方は打ち上げ回数が少なく十分信頼できる数値とは言いきれない点を考慮する必要がある。今後も引き続き実験を行い、データ量を増やしていきたい。

結果

二段目の加速が起こっているときは、水と空気が同時に排出されている瞬間である。この大きな加速度が得られている時間をさらに伸ばすことができないかと考えた。そこで我々は機体内部の水の中に竜巻状の渦を作り出すことを考えた。竜巻ができたときは空気の通り道ができるので、このときは水と空気が同時に排出される状況を作り出すことができると想像した。

- ・まずペットボトル内部に障害物を設置し水の流れを制御し、竜巻を発生させようとした。しかし障害物の影響よりも、水が元々回転していたのかそうでないのかという条件の方が、竜巻の発生に大きな影響を与えているという結論に達した。

- ・そのため発射台を回転させことにより水に回転方向の流れを与え、打ち上げることで飛距離の変化を調べた。

- ・昨年までの 100 m 程飛ぶ条件での打ち上げでは、発射台を回転させた時とさせないときとは大きな差は見られなかった。

- ・そのため、二段目の加速の時間をより延ばすことを目的に、入れる水の量を増やして実験を行ったところ、回転させたときの方が大きな飛距離を得るに至った。

- ・打ち上げデータを解析したところ、台を回転させたときは加速時間が長かった。加速度を積分してロケットの獲得速度を求めたところ、台を回転させ水を多く入れたときの方が大きな値を得られた。この結果が飛距離の伸びに関係していると考えられる。

最後に

二段加速現象を応用し、二段目の大きな加速度をもった加速時間を延ばしたいという意図で、発射台を回転させ機体内部の水に竜巻状の空気の通り道をつくろうとした。その結果水を多く入れて台を回転させたときに大きな飛距離を得ることができた。この打ち上げデータを解析すると、大きな値をもった二段目の加速が長くなったというよりは、それほど大きくない加速度が長い時間持続しているという結果を得た。ねらい通り飛距離を伸ばすことができたが、その現象は我々が想像していなかったものであった。

答えの见えない問題に対して、自分達の考えを信じて取り組むことができた。結果が出るまではとても不安で、実験が失敗するたびに本当にこれを続けて良いのか、と自問自答する日々であった。しかし失敗しても次のアイデアを考え、それを実行しようとするときの緊張と興奮は、今振り返るととても楽しく感じる。最終的に水ロケットの飛距離を伸ばすことができた。今まで届かなかった場所に初めて着地したときの喜びは言葉に表せない。今までの苦労が一気に報われた気がした。

科学研究の苦労と醍醐味的一端を味わうことができ、とてもよい経験になった。今後も詳細な解析を引き続き行っていきたい。

※ 参考文献

- ・アマチュア・ロケットィアのための手作りロケット完全マニュアル

誠文堂新光社 出版 久下洋一 著