

水切りと水の粘性の関係性について

北海道札幌啓成高等学校 理数科（2021年入学）2班
豊田 航樹 相澤 慶吾 松永 悠里

Have you ever skipped stones on the water as a child or now? Have you ever thought about its principle? We paid attention to such a principle and further studied the conditions under which stones fly, from the unprecedented perspective of changing the conditions of the liquid that makes them fly. This time, we decided to study the viscosity of liquids. We conducted an experiment to convert viscosity into data and succeeded in quantifying viscosity. Therefore, we built a device to send stones flying evenly. Using the device, we sent stones flying on water of different viscousness, examined the behavior of the stones and the height of the water, and created a graph. As a result, we were able to predict the relationship between the way stones fly and the viscosity of the water, which we report here.

1. はじめに

1.1 研究の背景

「水切り」とは水面に向かって小石を回転させて投げ、石が水面を飛び跳ねて進むのを楽しむ遊びのことを指す。水切りは世界共通の遊びであるが、その原理や条件についてはまだ解明されていないことも多い。

水切りで石が跳ねるのは垂直抗力の作用によるため、石の入射角、速度、質量等のパラメーターが重要であると言われている。

水切りに関する先行研究では、石の条件とその投げ方と跳ねる回数の関係性が示された^(2022、武生高校)。また、石の形状や回転数、質量と、石の跳ねやすさとの関連性も示されている^(2017、洛北高校)。

しかし、水切りの現象には川の水も影響するはずである。水に注目した水切りの先行研究は1つも確認できなかった。そこで、私達はこの「水切り」と「水」の性質の関係性について、特に水の粘度に焦点をあてて調べることにした。

1.2 研究の目的・意義

私達の研究の目的は水の粘性が変われば、水切りにどのような影響を及ぼすか解明することである。私達は、粘度を上げれば上げるほど、垂直抗力も大きくなり、垂直抗力が大きくなると水切りの石も飛びやすくなるのではないかと考えた。このような考えを根拠に「水の粘性を上げれば上げるほど水上を跳ねる回数・距離も上がるのではないか」という仮説を立て、検証することにした。

2. 予備実験

2.1 水の粘度の数値化

実験の定量化のため、次のように粘度を数値化した。

物体を液体中に落とした時、物体の落下速度は終端へ向かう。運動方程式で捉えるとその時 $ma=mg-kv$ において、加速度が0となる。この時の k の値（抵抗値）を粘度の指標とできるのではないかと考え、予備実験を行った。

$$ma=mg-kv$$



$a=0$ として v という形に移項すると

$$v=mg/k$$

m =質量
 g =重力加速度
 k =抵抗値
 a =加速度
 v =速度
※(ただし加速度が0の時の速度を終端速度という)

図1 抵抗を求める運動方程式

2.2 予備実験方法

水道水を粘度がない液体とし、水を張ったシンクに粘度を上げる材料（トロミナル、株式会社ファイン）を加えて粘度を調節した。粘度の大きさは、水道水<粘度1<粘度2とし、粘度1はシンクにたまった水道水にトロメイクを水道水に500g加えたもの、粘度2は水道水にトロメイクを2000g加えたものである。

粘度を測定するために、ペットボトルを連結させてつくった60~70cmの円柱型の容器に水道水、粘度1、粘度2の液体をそれぞれ入れた。上から円柱型の物体を落とし、その終端速度を測定した。その後、終端速度をもとにした液体の粘度の指標を算出した。

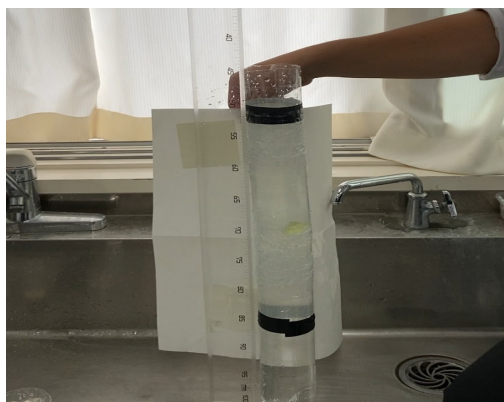


図2 実験の様子

1.2.3 予備実験結果

それぞれの液体の中で物体が落ちる様子について、図3の結果を得た。それによって、粘度が大きければ大きいほど、物体の落下速度が遅くなることがわかった。また、実験で得たデータをもとに終端速度と抵抗力を求めると、表1のようになった。水と粘度1では値の大きさの違いは少ないが、水と粘度2を比べると違いが十分に大きいことがわかった。よって粘度が大きいくほど終端速度は遅くなり、これによって得られた抵抗を粘度の尺度として用いることにした。

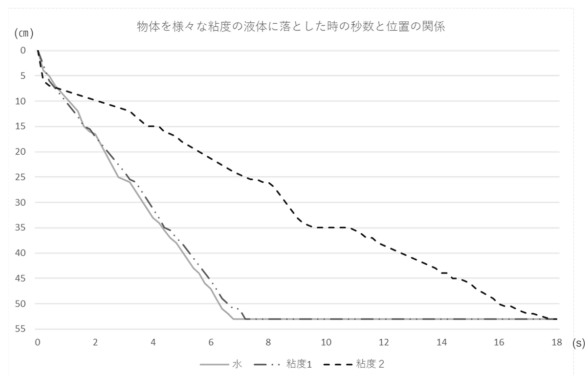


図3 物体を様々な粘度の液体に落とした時の様子

表1 粘度と終端速度、抵抗の値

粘度	終端速度 [cm/s]	抵抗 [kg・s/cm]
水	7.5	0.83
粘度 1 (500g)	6.8	0.92
粘度 2 (2000g)	2.9	2.13

3. 本実験

3.1 実験器具

先行研究^(2017、洛北高校)を参考に、モーター、磁石、木材、ゴム、石、電源装置を用意し図4のような実験器具を作成した。飛ばす石はペットボトルキャップの内側に磁石を入れ、ガムテープで蓋をしたものを使用した。石の重さは12gとした。

また、水切りをする水槽には、生物室のシンクを使用した。実際に水切りをする際には、ペットボトルを敷きつめ、使う水と粘性をつける材料の量を減らせるようにした。



図4 実験装置の模式図

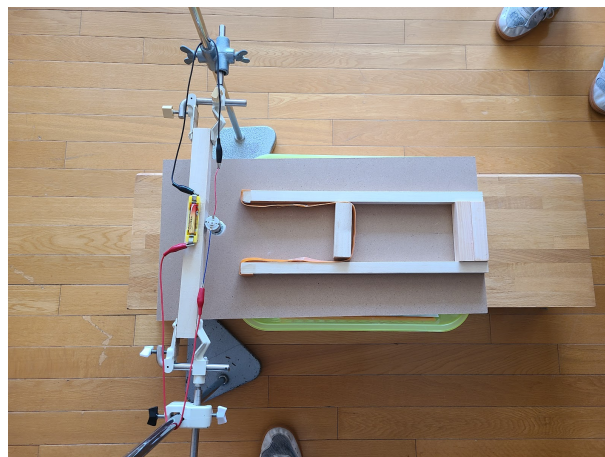


図5 実験装置の写真



図6 実験に使用した石の画像

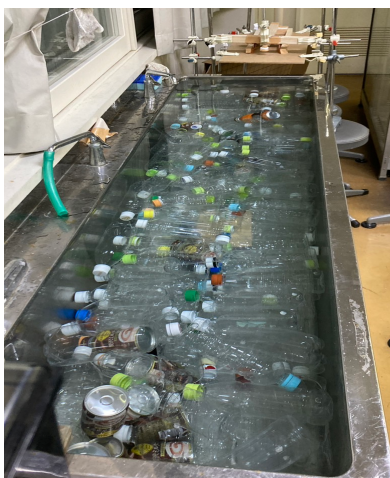


図7 実験に使用したシンクの様子

3.2 本実験方法

シンクに水を張り、そこに $k=0.83$ の液体(水)で40回、 $k=0.92$ の液体(粘度1)で40回、 $k=2.13$ の液体(粘度2)で46回石を射出する実験を行った。

しかし、実験装置の精度が不十分で、正確に毎回前に跳ばない、水槽の長さが足りない、シンクの中に石が入らないという問題があったことから、採用するデータはシンクの範囲に入ったもののみとした。よって、 $k=0.83$ の液体で10回、 $k=0.92$ の液体で11回、 $k=2.13$ の液体で16回の試行データを採用した。そのような実験装置の状況から、跳ねる回数、成功率を計測することが出来なかった。また、カメラの性能不足によって、石の軌道や石の速度が求められなかった。そのため、この実験では石が水面を跳ねるときに上がる水の高さと、石が発射位置から、初めに着水する地点までの距離という間接的なデータと、石がはねたかどうかという結果を比較していくことにした。

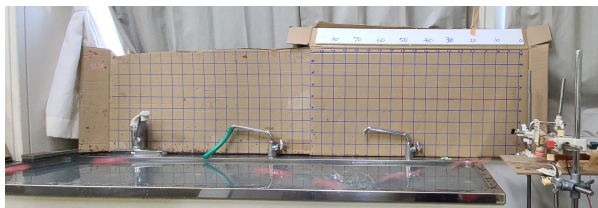


図8 実験の様子

3.3 本実験結果

図9、図10に本実験の結果を示した。

図9は石の着水時に上がった水の高さを示したものである。石を射出し、最初に水面に着いた時に上がる水しぶきの高さを撮影した写真から測った。そのデータを各抵抗毎に成功と失敗を分けてそれぞれ箱ひげ図にした。

図10は初めに石が着水した地点を示したものである。石を射出した地点から最初に水面に着いた地点までの距離を撮影した写真から測った。そのデータを各抵抗毎に成功と失敗を分けてそれぞれ箱ひげ図にした。

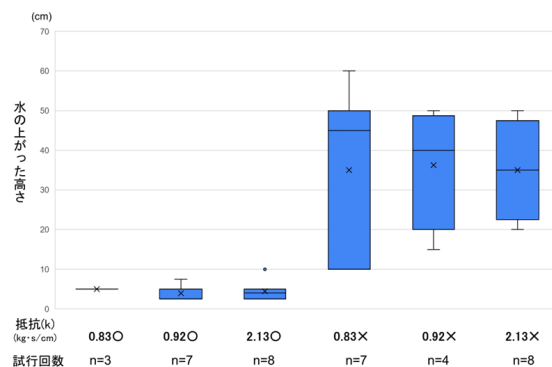


図9 石の着水時に上がった水の高さ

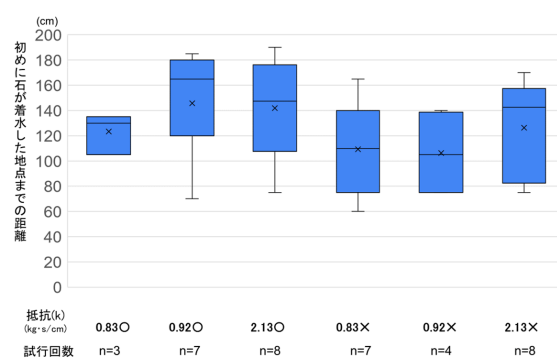


図10 初めに石が着水した地点

4. 考察

私達はこの結果から3つの考察を得た。

1つ目は石が水面に入る入射角が小さいほど跳ねやすいということである。これは図10のデータからどの粘度の場合も成功時の方が着水地点が遠いことからわかる。この考察に関しては先行研究と同様であった。

2つ目は成功時は失敗時に比べて、水面でエネルギーを吸収されていないということである。図9のデータから成功時の方が失敗時より着水時の上がった水の高さが低いという結果が得られた。そのため、最初に石に与えられるエネルギーは等しいと考え、石は着水時に水にエネルギーを吸収されて、水は高くあがり、石は跳ぶエネルギーがないのではないかと考えた。上記2つの考察はいずれも粘度が違っても違いが見られなかった。

そして3つ目は着水時に石が水に吸収されるエネルギーは水より粘度が高い方が大きいということである。図9の成功時の結果から、成功時に石が着水した時に上がる水の高さは、粘度

が高い液体は粘度が高ければ高いほど質量は大きくなっていく。そして液体を同じ高さまで上げるにも質量が大きければ大きいほど、消費するエネルギーは大きくなるだろうと考えられる。つまり、各粘度で石の着水時に上がる水の高さが変わらないということは、粘度が低い液体よりも粘度が高い液体の方が水に吸収されるエネルギーが大きいということである。石の消費するエネルギーが大きければ大きいほど、石の前に進んでいく力は小さくなっていくと考えられる。このことから、粘度が大きければ大きいほど、跳ぶ距離は短くなる可能性があると考えられる。

5. 結論

本実験の研究の結果、私達の仮説である「水の粘性を上げれば上げるほど水上を跳ねる回数・距離も上がるのではないか」という仮説に対して、粘度を大きくすると、石の持つエネルギーは水に吸収され、進む距離は短くなる可能性が示された。しかし、先述した通りこれは間接的なデータから得られたものであり、実際に跳ねる回数や進む距離を測定することはできなかった。

6. 今後の展望

今回の実験では時間、場所、技術が制限されており、自分達が理想とした実験を満足のいく回数行うことができなかった。そのため、また新たな環境で多くの実験を行えば異なる結果が出てくる可能性もあるため、更に実験を続けていく。

他の水の条件として液体の表面張力による影響も考えられる。表面張力を変えた時の水切りへの変化についても検証していきたい。

7. 謝辞

本実験を遂行するにあたって、北海道立教育研究所の高田 将寛 先生、北海道札幌琴似工業高等学校の青木 岳則先生、北海道札幌啓成高等学校の先生方、その他多くの皆様に多大なご助言、ご協力をいただきました。

ここに深謝の意を表します。

8. 参考文献

- (1)滋賀県立膳所高等学校 理数科令和二年度『石の回転が水切りに及ぼす影響』
[SSH]令和3年度2年理数科課題研究テーマ。

「9班」。

http://www.zeze-h.shiga-ec.ed.jp/cms_zeze-h/wp-content/uploads/ssh/9_buturi.mp4,
(最終閲覧日 2023年7月21日)

- (2)福井県武生高等学校探究進学科 令和四年『水切りにおいて水上をはねる回数が多くなる石の条件とその投げ方』
課題研究テーマ一覧（第3期）。

<https://www.takefu-h.ed.jp/wp-content/uploads/2022/12/水切りにおいて水上を跳ねる回数が多くなる石の条件とその投げ方.pdf>,
(最終閲覧日 2023年7月21日)

- (3)みやぎ総文2017京都府立洛北高校-「みらいぶ」高校生サイト。

<https://www.milive.jp/live/2017sobun/ph216/>,
(最終閲覧日 2023年07月21日)

- (4)SSH年度別活動実績 令和2年度実績/福岡県立明善高等学校.「要旨④」。
https://meizen.fku.ed.jp/static/SSH/up_68621GB3%E8%A6%81%E6%97%A8%E2%91%A3.pdf,
(最終閲覧日 2023年07月21日)