

石の水切り

多田 昌弘 國富 浩人

1 要旨, 概要

幼いころ、水辺でなめらかで平らな石を使ってよく石の水切りをしていた。私たちはその頃石が様々な跳ね方をしていたのを思い出した。そこで私たちは石の形状が異なると水面をどのような角度で跳ね、水面を跳ね返った後どのようなスピードに変化するのかを調査しようと思った。また Tadd Truscott ら(2014)によると水切りには反跳爆弾やおもちゃのワボバのような応用例があり、また様々な大きさ、形、重さ、材質のもので水切りをして水面を跳ねるときに物体が水を押し分けてできる空洞の大きさやその形の違いを述べていた。具体的には円柱型の石と円柱型の亚克力板は水面を跳ねるとき同じような大きさの空気の空洞を作る。また弾性質の球は石や亚克力板のときほど大きな空洞は作らない。そして非弾性質の球のときの空洞は石や亚克力板の時よりも大きく、奥行きもできた。最後に様々な物質を高角度で放つと深さはあるが奥行きのない空洞ができた。空洞は物体が水を押し分けてできるので揚力がかかることが分かる。つまり、物体が跳ねるか否かは物体の形だけでなく水中にできる空洞という面からも分かることを述べている。さらに本校の課題研究で斉藤ら(2015)が行った実験では直径 5cm、厚さ 1cm の円柱型の石を初速度 10~15m/s、射出角度 0~10°の条件下で石の水切りの実験をし、入水速度の水平方向の変化率の平均は 0.80(±0.2)、鉛直方向の平均の変化率は 0.67(±0.37)であり、n 回跳ね返らすためには n 回目の高さ石の半径よりも大きい必要であることを述べた。そこで私たちは先輩方が使っていた条件と石の形状を基にして、実験することにした。

2 問題提起, 研究目的

河原での石の水切りは様々な軌道で跳ね、跳ね方がいつも決まっているわけではない。そこで石の形状が異なると水面をどのような角度で跳ね、水面を跳ね返った後どのようなスピードに変化するのかを調査する。また先行研究より先輩が使っていた石とそれとは形状の異なる 2 種類の石を用いて実験を行い、入水速度と出水速度を求める。

3 研究方法

項目①石の製作

- 3 種類の石において厚さや形状が違うものを製作する。
- ②ピッチングマシンによる陸上での飛距離
3 種類の石は初速度 10~15m/s、射出角度 0~10°の条件下でどれほど跳ぶのか調べる。
- ③水上で跳ねる様子
入水・出水時の様子をハイスピードカメラで撮影し、速度の変化を求める。

実験内容

① 石の製作

直径 5 cm、厚さ 1 cm の円柱型の石を石 A と、直径 5 cm、厚さ 2 cm の円柱型の石を石 B とする。また、石 A をグラインダーを使って碁石型にしたものを石 C とする。このようにした理由は以下の通りである。

まず、碁石型は円柱型よりも水から受ける抵抗を軽減しやすく、そして円滑にはねると予想し、円柱型が水面を跳ねるときと比較するためである。それにより、石の質量や形状などの条件を変えて実験を行えるからである。円柱型の石である石 A は先輩の再現実験を行うために製作した。以上のことから私たちは石 A、B、C の 3 種類を作り、石 A を基準として実験することを決定した。



石 C をグラインダーで削り出す様子



石 A



石 B



石 C

製作した石は次のようになった。

石A；厚さ 1cm，直径 5cm の円柱型 5 個 平均 64.86g ±5g

石B；厚さ 2cm，直径 5cm の円柱型 7 個 平均 107.5g ±1.36g

石C；厚さ 1cm，直径 5cm の基石型 6 個 平均 42.89g ±4g となった。

この時、片面のみカーブを描くように削ったものを作ろうとしたが加工中に割れてしまい、危険であったのでこの石の製作は中止した。

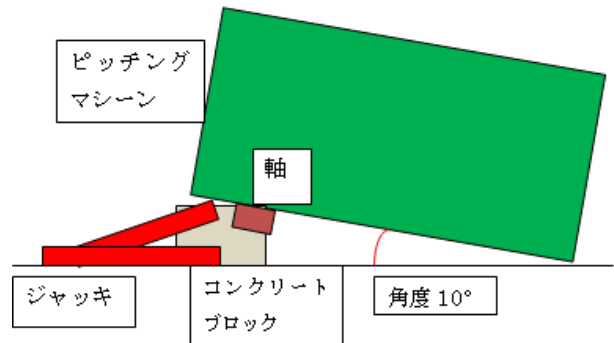
②ピッチングマシンによる陸上での飛距離

目的：物体は斜方投射運動をしているので鉛直方向成分と水平方向成分より（飛距離 $L = 2v_0^2 \sin\theta \cos\theta / g$ ）が求められ、 $\theta = 45^\circ$ のとき最大の飛距離となることが分かった。また、水切り実験は幅 3m，長さ 23m の校内の堀で行うためには、先輩方の先行研究より初速度 10~15m/s，射出角度 0~10°にすればよいことも分かっていたので、それらをどれくらいの大きさにすれば最適であるのかを知る必要があった。そこで私たちはまずピッチングマシンのタイヤの目盛りと回転数または電圧と回転数を調べ、その次に 1 回目に跳ねる位置がどのあたりに来るのかを陸上で調べることにした。

方法：私たちが使用するピッチングマシンの左タイヤは目盛りを右タイヤは抵抗器を調整するようになっている。実は先輩方が先行研究をするにあたってこの右タイヤの壊れている目盛りを抵抗器で調整できるようにして実験をしていたことが分かった。それを踏まえて私たちはまず左タイヤの目盛りと回転数の関係を 10 目盛りごとに計測して調べた。0~20 の目盛りではタイヤは動かなかった。しかし、それ以降目盛りを上げていくと尻上がりに回転数は大きくなった。しかし残念なことに 80 目盛りを超えるとタイヤのゴムが剥がれ再び修復しても同様の結果となり 90，100 目盛りは計測が不可能だった。また同じ目盛りで複数回測らず、0~80 目盛りで 1 通り行くことを 5 回繰り返したためグラフにしたときバラつきが大きくなってしまった。次に右タイヤの電圧を 0.5 ボルトずつ上げて回転数を計測した。今回は同じ電圧で複数回測ったため、グラフにしたときバラつきが小さくなった。



続いてピッチングマシンによる陸上での各石の飛距離を調べた。ピッチングマシンの軸が当たらないようにコンクリートブロックで浮かせた。またジャッキを使い、ピッチングマシンの前部を持ち上げ、クリノメーターでピッチングマシンの角度を 10°に設定した。このとき初速度を 10~15m/s にするために上記のグラフを用いて目盛りと電圧を調整した。ただし石の体勢を安定させるために必要なジャイロ効果を維持するため、石が回転している状態で初速度が 10~15m/s となる目盛りと電圧を見つける。そして射出するとき石A，石B，石Cを陸上ではじめて着地したときの飛距離をメジャーで測り、実験回数はそれぞれ 15 回行うこととした。



結果：右のグラフより，初速度 10~15m/s，射出角度 10°のとき

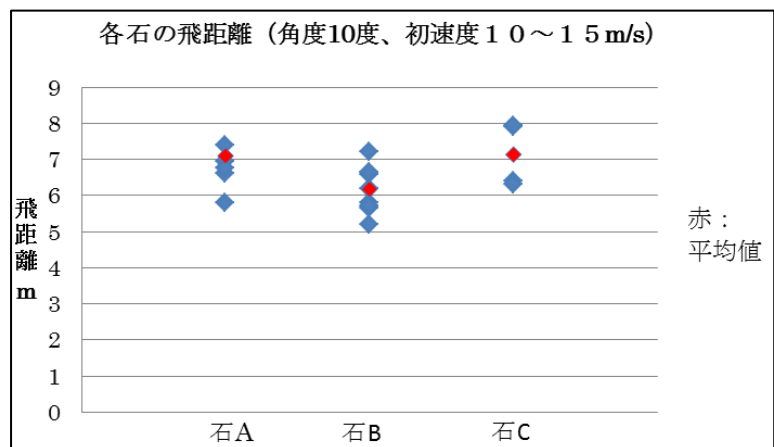
石Aは 5.8~7.4m

石Bは 5.2~7.2m

石Cは 6.3~8.0m

跳ぶことが分かった。

考察：質量が小さい石ほど遠くへ飛ぶことが分かった。ブロックの上にピッチングマシンを置くとピッチングマシンの振動が石を支える方の手に伝わり、石をのせる土台が安定しなかった。そこでピッチングマシンとブロックの間にダンボールをはさみ、振動による影響を小さくすることで、データをより確実なものとした。



③水上で跳ねる様子

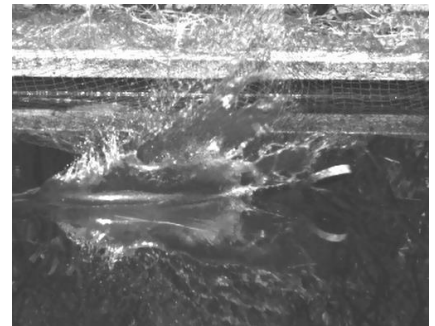
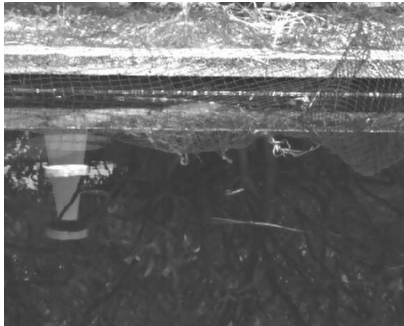
目的：角度 10° でどれくらい飛ぶのかが分かったので、その前後の速度の変化や石の様子などを計測する。しかし角度 10° の時、石 C が 1 回跳ねた後、堀に設置していた石を受け止めるためのネットを超えて堀の中に落ち、紛失した。他にも堀の外へ出たこともあり人に当たる危険もあることから角度 10° は不適と判断し、角度 5° に変更した。よって角度 10° で水面を跳ねるときの前後の速度の変化や石の様子などを計測する。

方法：ピッチングマシーンをジャッキとクリノメーターを用いて 5° にする。この時、ピッチングマシーンの電源の部分に欠陥があったことから抵抗器は使わず直流電源装置を代わりにつなげてタイヤの回転数を調節するようにした。また石を紛失しないよう校内の堀を覆うことができるようなネットを準備して、上記のようなことが起きないように、対策として反しの部分もネットで作っておく。飛ばした石の飛距離にも多少の誤差があるので、大体どのあたりに石が水面を跳ねるのかをいくつか試し打ちをしてどのあたりで着水するのかある程度の範囲を把握しておく。そして適切な場所にハイスピードカメラを設置する。準備が整ったら石を打ち始める。ただしその時の条件は初速度 $10 \sim 15\text{m/s}$ 、射出角度は 5° にする。また水上で行う実験の最適なデータとしての条件はハイスピードカメラの視野の中に入っており、さらに石の体勢がしっかりと安定しているものを最適なデータとして扱い、それを各石につき最低 10 個のデータは得るものとする。

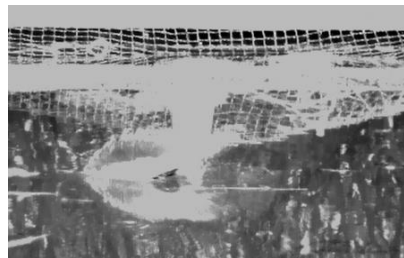
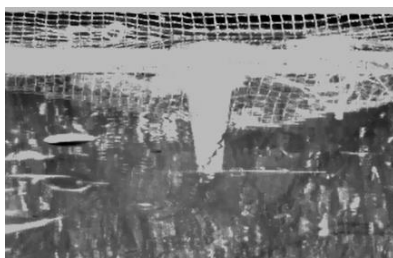
次にデータを取り終えたらハイスピードカメラで解析をする。ハイスピードカメラ (PhotronMC2.1) を使い、石の入水時と反射時の速度の x 成分を $x-t$ グラフで、 y 成分を $y-t$ グラフで表し、解析ソフト (Photron FASTCAM Viewer for High Speed Digital Imaging) を使って求め、計算で入水速度、反射速度を求める。



石 A の跳ねている様子



石 C の跳ねている様子



仮説：石 C は丸みを帯びた形状をしているので入水直前の速度と反射直後の速度の減少率が小さくなり、その次に石 A、石 B と速度の減少率は大きくなっていくと考える。

結果：上記の実験をしたとき射出角度 5° では石 B は跳ねなかった。その後、射出角度が 10° になるまで跳ねることはなかった。射出角度を 10° に戻そうと思ったが石 C が人に当たる危険性があるため、今回の実験から石 B を除外することに決定した。よって石 A と石 C の 2 つを用いて形状による違いを比較することにした。結果を算出すると以下の通りになった。

右のグラフより

石 A

入水直前 $v1 = 14.2 \sim 15.9 \text{m/s}$

跳ねた直後 $v2 = 12.8 \sim 14.3 \text{m/s}$

石 C

入水直前 $v1 = 11.7 \sim 17.2 \text{m/s}$

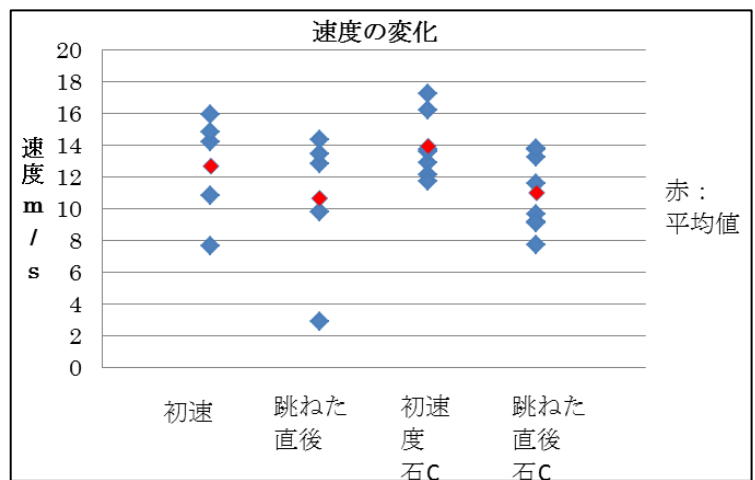
跳ねた直後 $v2 = 9.6 \sim 13.8 \text{m/s}$

であることが分かった。

また上記の結果より石 A の入水直前の速度と反射直後の速度の減少率の平均は 29.8% であり、石 C の入水直前の速度と反射直後の速度の減少率の平均は 14.8% であると分かった。

考察：石 A, 石 B, 石 C の水しぶきの様子

を比較すると、石 C が最も水量が少なかった。ゆえにエネルギーの損失は石 C が最も少ないと考えられ、その次に石 A, 石 B となっている。さらにハイスピードカメラで石の運動の様子を調べると石 C は射出後、ほぼ平行に飛んでいたが、入水後、ほぼ垂直に体勢が変わったことから水を受け流しているのではないかと考える。また、結果から石 C の速度のばらつきが大きいのは射出するとき石がピッチングマシンの振動で揺れ、うまくタイヤに噛み合わなかったためだと考えられる。



4 結果

石 A と石 C の速度について

グラフ②より

石 A

入水直前 $v1 = 14.2 \sim 15.9 \text{m/s}$

跳ねた直後 $v2 = 12.8 \sim 14.3 \text{m/s}$

石 C

入水直前 $v1 = 11.7 \sim 17.2 \text{m/s}$

跳ねた直後 $v2 = 9.6 \sim 13.8 \text{m/s}$

5 考察

三種類の石 A, B, C を作成するときかなり時間を使ってしまった。その原因は石の切断時、岩石切断機の振動や摩擦などで石がずれうまく切断できなかつたことだと考える。よって何か固定具をつければより効率は上がるのではないかと考える。また、石 C を作る時できるだけ理想の形に近づけようとしたが、上手くグラインダーを使いこなすことができず、石を支えていた万力にいくつも傷をつけてしまった。このことを反省して、もう少し工夫を凝らして道具を大切に使用したい。

また私たちは石が初めて着水する部分のみ注目することから陸上で初速度 $10 \sim 15 \text{m/s}$ 、射出角度 10° の条件下で飛ばすとどれくらい跳ぶのかを調べた。しかしその時よくピッチングマシンのタイヤのゴムが剥がれてしまって実験の中断が多々あった。そこで修理は自分の思っている以上に丁寧になければならないと思った。

さらに、本実験で直径 5 cm 厚さ 2 cm の石 B を打つことはできなかつた。今思えば、もう少しネットを大きくして反しの部分も大きくできていたら射出角度を 10° にしていても石 C を安全に飛ばすことができ、石 A, B, C すべてのデータが取れたように思う。

最後に、各実験においてデータの値の幅が大きいものがあった。それはピッチングマシンの振動が石に伝わってピッチングマシンのタイヤにしっかりかみ合わなかつたためであると考えられる。

6 結論 (課題)

本実験において、石のデータのばらつき大きかつたことからいくつか改善点がある。

まずは射出機として使ったピッチングマシンである。現時点では調子よく動いているが、振動が伝わったりいつタイヤのゴムが外れたりするかもしれないのもう一度確認する必要があると思った。

次に石の入水角度を調べるとよいかもわからない。初速度や入水直前の速度は同じでも入水角度の違いによつ

て入水直前とその後の速度のばらつき関係が分かるかもしれないからだ。

最後に石の回転数に焦点を当ててみるのもよいと思った。回転数もパラメータの一つに加えることで新たな関係性が発見できるかもしれないと思った。

7 参考文献

- 1) Tadd Truscott, Jesse Belden, Randy Hurd and others. “Water-skipping stones and spheres”. *Physics Today*. 2014.
- 2) 斎藤健輔, 金子貴大, 坂本航平, 成瀬祐愛. “石の水切り”. 高松第一高等学校 *Advanced Science 課題研究論文集 vol.3*. 2015.

8 謝辞

この研究を行うにあたりご指導していただいた、佐藤先生をはじめ研究に協力して下さった皆さんありがとうございました。