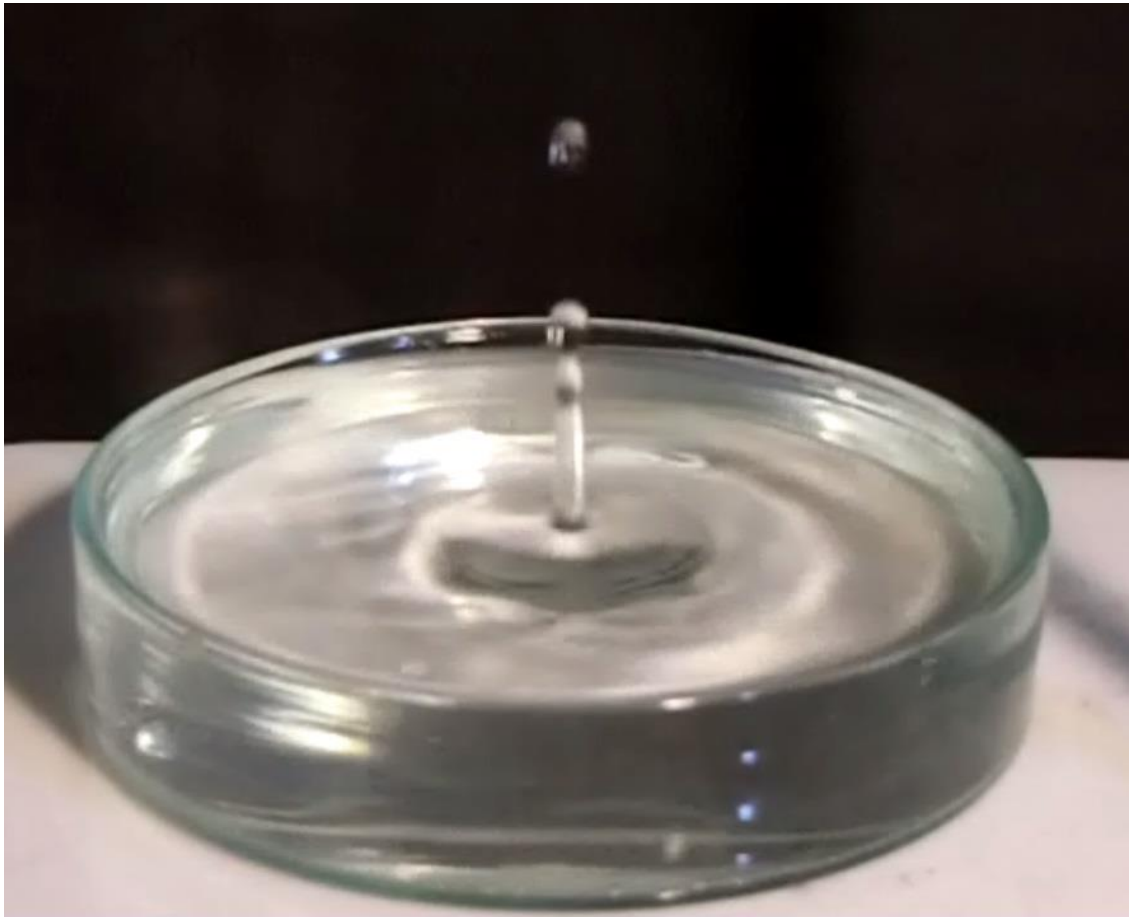


水滴が水面から大きくはね返るとき、何が影響するのか
—水滴の大きさと水面の形状に関する考察—



愛媛県立松山南高等学校 理数科3年
松山南SS物理 三代目水滴班

城戸 良祐
中本 太一
木村 凧

指導教諭 本藤 雅彦

1 研究の背景

台所のシンクに置いた洗い桶の上に蛇口から水滴が落ちる。

浴室のシャワーヘッドから浴槽に張った水（お湯）の上に水滴が落ちる。

空高くから降ってくる雨粒が水たまりに落ちる。

これらは日常生活でよく見かける光景である。このとき水滴が水面に当たった後には水滴がはね返るが、大きくはね返ったためにまわりが水で汚れてしまうケースもある。松山南高等学校課題研究水滴班では、この「水滴が水面ではね返る」という現象のメカニズムを解明したいと考え、継続的に研究を行ってきた。

先行研究である松山南SS物理水滴班（2017）によると、水滴を滴下する高さが高くなるにつれて、はね返る水滴の高さは高くなったのち、ある程度の高さに収束することが分かっている（図1）。私たち三代目水滴班では、はね返った水滴の高さが最大になる現象に着目し、「はね返った水滴の高さが最大になるための滴下の高さ（以下、「最適の高さ」と呼ぶ）」の存在とその特徴を調べることを目的として、研究を行った。

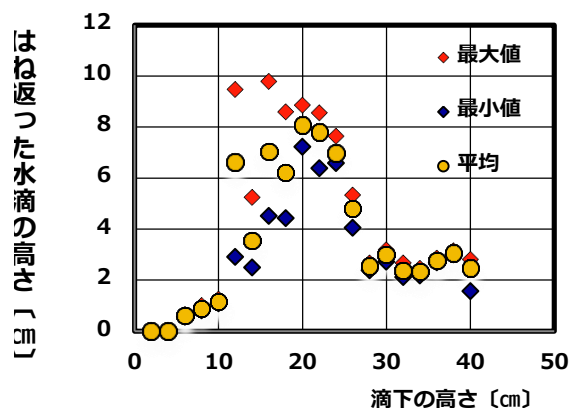


図1 水滴の滴下の高さとはいね返りの高さ

この研究により、水滴が大きくはね返るための条件から、その条件を回避することにより、水滴がはね返りにくくするための方策を提案することができると考えた。また、それを活用することで、前述の日常生活における水回りでの商品開発への手助けとなることが期待できると考えている

2 仮説

私たちは、水滴の大きさが異なると、最適の高さは異なり、最適の高さと水滴の質量の間には数学的関係があると考えた。本現象では、水滴が水面に「衝突」する現象であり、高等学校物理においては、衝突では「運動量（力積）」と「運動エネルギー」の2つの物理量が関与することから、次の仮説（仮説I）を立てた。

【仮説I】

最適の高さ h は、①水滴の質量 mm に反比例する。または

②水滴の質量の2乗 m^2 に反比例する。

①であれば、本現象ではエネルギーが大きく関与し、②であれば、本現象では運動量が大きく関与する。

根拠は次のとおりである。

①について

高さ h の地点から質量 m の水滴を落とした場合、

水滴が水面に当たる直前の速さは、自由落下の式より、 $v = \sqrt{2gh}$

水滴の運動エネルギーは、 $E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times m \times (\sqrt{2gh})^2 = mgh$

よって、 $h = \frac{E}{mg}$ となり、 h は m に反比例する。

②について

水滴の速さ $v = \sqrt{2gh}$ を用いて、水滴の運動量は、 $p = mv = m \times \sqrt{2gh}$

両辺を2乗して、 $p^2 = m^2 \times 2gh$

よって、 $h = \frac{p^2}{2m^2g}$ となり、 h は m^2 に反比例する。

また、水滴が水面に当たった後、水面には凹みが形成され(図2)、その後水面が元に戻る反動で水滴がはね上がる。そこで、私たちは、水面が大きく凹みことでたくわえられた大きなエネルギーが、水面を上にはね上げるエネルギーに変換されることで、水滴がはね上がる速さが速くなると考え、次の仮説(仮説Ⅱ)を立てた。

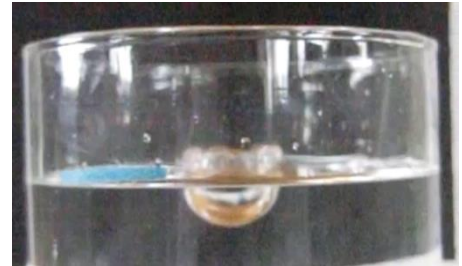


図2 水面に生じる凹み

【仮説Ⅱ】

水滴が大きくはね返るためには水面を大きく凹ませる必要がある。

3 研究の方法

(1) 器具及び装置

本研究で使用した器具は次のとおりである。

JMS 輸液セット JMS 注射針 (18~26G、内径0.45~1.2mm)、照明装置、ものさし、クリップ、ガラス容器 (内径7.0cm、深さ6.5cm)、ハイスピード撮影対応デジタルカメラ (CASIO HIGH SPEED EXILIM EZ-ZR850)

実験装置の概略を図3、図4に示す。

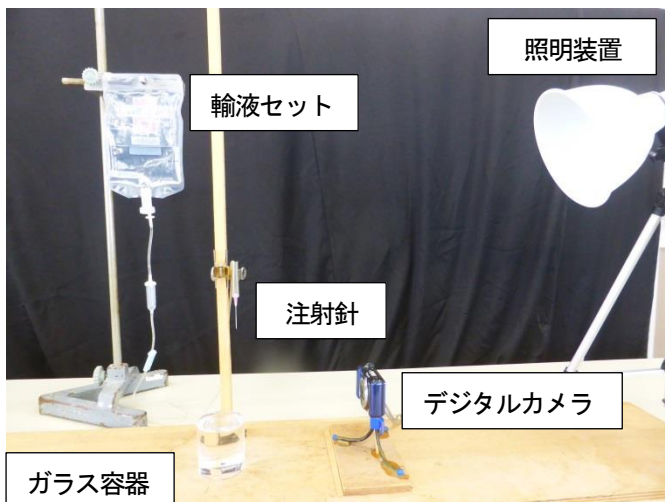


図3 実験装置

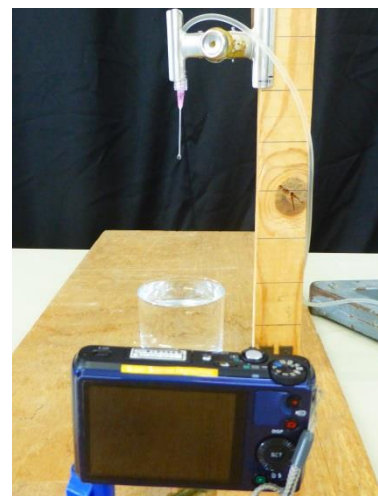


図4 カメラ側から見た場合

なお、後述の、水滴のはね返る高さの計算を効率よく行うために、画面内での水滴のはね返る部分において、画素数20ピクセルが1.0cmとなるように、カメラと容器の位置を決定した。

(2) 実験の手順

ア 水滴が水面ではね返る様子の撮影

- ① ガラス容器に上端まで水を注ぎ、水深を6.5cmにする。これにより、水滴を滴下されると、その分容器内の水量が増加し水深が変化するが、容器いっぱいに入っているため滴下による増加分の水は容器からこぼれるために、水深は一定になるようにした。
- ② 一名が輸液セットを操作し、注射針から水滴を一滴ずつ滴下する。
- ③ 別の者がデジタルカメラを操作し、水面の様子を動画撮影する。撮影レートは240fpsとした。
- ④ それぞれの高さで5滴ずつ水滴を滴下し、動画を撮影する。水滴を滴下後、水面が元の状態になったのを確認してから、次の水滴を滴下するようにした。

イ 動画の解析

- ① 動画をパソコンに取り込み、動画再生ソフト「Quick Time Player」で再生する。
- ② コマ送りで再生し、はね返った水滴が最高点に達した瞬間を静止画で保存する(図5)。
- ③ ②で保存した静止画をソフト「ペイント」で読み込み、「図形の選択」の操作で、水面から最高点までの画素数(ピクセル)を求める(図6)。
- ④ 画素数の比例計算により水滴のはね返った高さを計算する。図6の場合、水滴の高さは49ピクセルであるので、 $49 \div 20 = 2.45$ [cm] となる。



図5 動画の静止画

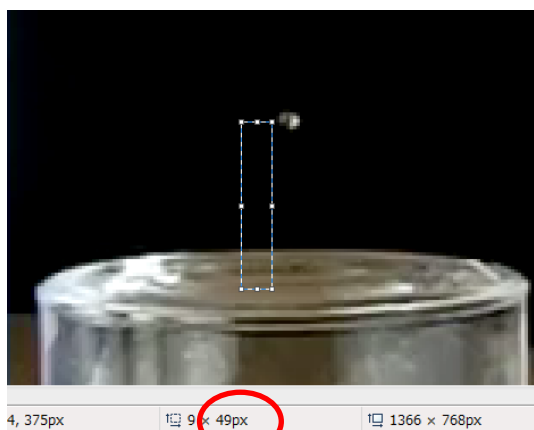


図6 「ペイント」上での操作

ウ 滴下する水滴の質量の算出

注射針の規格は、製品には外径のみが、また規格では外径・内径が表記されており、針から滴下される水滴の質量や体積については詳細が不明である。

輸液セットには「20滴 \div 1 mL」との表記があるため、一般的には、点滴筒内の水滴の滴下数と注射針からの滴下数の比(図7)から1滴当たりの体積を計算し、水の比重が1であることから、1 mLイコール1 gとして水滴の質量を算出するケースが多い。

しかし、私たちはより正確に測定するために、注射針から水滴を滴下し、50滴滴下するごとに、容器内の水の質量を電子ばかりで測定し、その差から1滴当たりの質量を算出した。その結果、表のように各サイズでの水滴の質量を求めることができた。

表 注射針のサイズと内径・水滴の質量



図7 点滴筒内の水滴（左）と注射針からの滴下（右）

注射針のサイズ	内径 [mm]	水滴の質量 [g]
18 G (ゲージ)	0.82±0.03	0.01790
20G	0.59±0.03	0.01275
22G	0.41±0.03	0.00960
24G	0.30±0.03	0.00870
26G	0.26±0.03	0.00535

(内径：株式会社伊藤製作所 HP より引用)

エ グラフ化

次のグラフから、それぞれの関係について考察を行った。

- (ア) 水滴を滴下する高さとはね返った水滴の最高点の高さの関係
- (イ) 滴下する水滴の質量と滴下の最適の高さの関係

(3) 先行研究からの改良点（本研究のオリジナリティ）

本研究における先行研究からの改良点は次のとおりである。

- ①先行研究においてはビュレットを用いて水滴の滴下を行ったが、水滴の形状を安定化させるために、注射針を用いることとした。
- ②内径の異なる注射針を5種類用いて、滴下する水滴の大きさを変えた。使用した注射針の大きさは、18G、20G、22G、24G、26Gである。G(ゲージ)は、針の内径を示すもので、1インチの何分の一であることを示し、G(ゲージ)数が小さいほど、内径が大きい。
- ③先行研究ではビュレット台を用いていたため高さが40cm程度までしか測定できなかったため、本研究では1m近くまで測定できるような装置を自作した。

4 実験の結果

(1) 水滴を滴下する高さとはね返りの高さの関係

結果は図8のようになった。

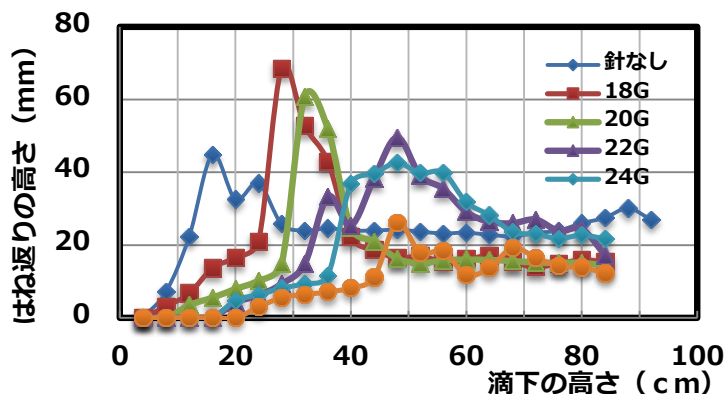


図8 滴下の高さとはね返りの高さ

どの大きさの水滴についても、大きくはね返るための滴下の高さが存在することが確認できた。また、ピークが複数見られるものもあるため、その場合は第1ピーク、つまり初めて大きくはね返ったときの滴下の高さを「最適の高さ」として扱うことにした。

最適の高さと滴下した水滴の質量の関係は図9のようになった。また、最適の高さと水滴の質量の両対数グラフを作成すると図10のように、傾きが-0.47の直線関係になった。

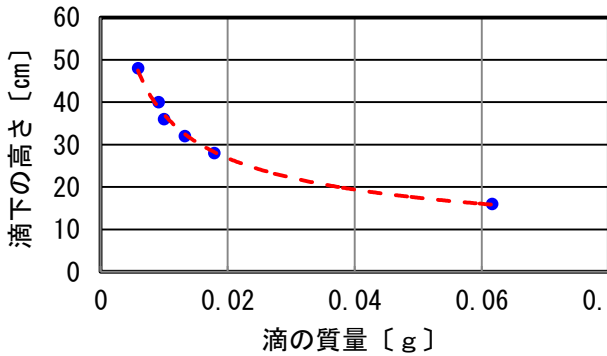


図9 最適の高さと滴下した水滴の質量

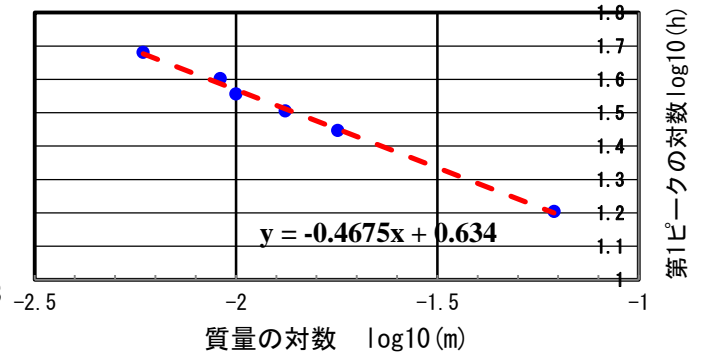


図10 最適の高さと水滴の質量の両対数グラフ

(2) 水滴を滴下する高さ、水面に形成される凹みの大きさの関係について

本現象における特徴を明らかにするために、滴下する水滴が最も大きい18Gを用いた場合について検証を行った。水面に形成される凹みの大きさについて、①凹みの体積、②凹みの最深部の深さ、③凹みの横幅(直径)について、それぞれ水滴を滴下した高さとの関係をグラフ示すと、図11~13のとおりになった。

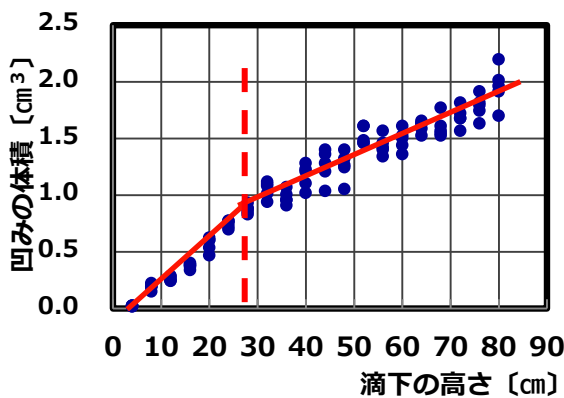


図11 滴下の高さと凹みの体積

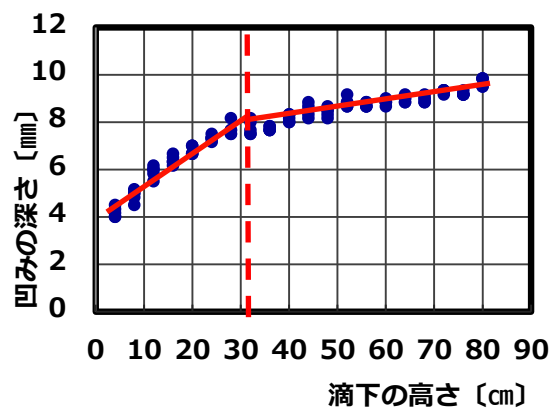


図12 滴下の高さと凹みの深さ

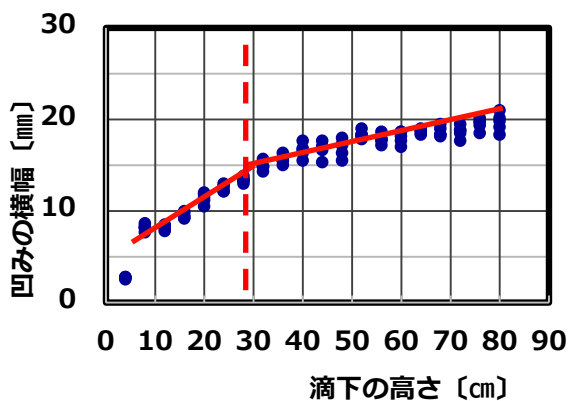


図13 滴下の高さと凹みの横幅

図11~13より、凹みの体積、深さ、横幅は、滴下の高さを高くすると、どれも大きくなっており、最適の高さ(18Gの場合は28cm)で、凹みの大きさは最大にはならないことが分かった。また、どのグラフも、滴下の高さが30cm付近で折れ曲がっていることが分かった。

5 考察

(1) 水滴を滴下する高さとはね返りの高さの関係について

図8より、水滴の質量が小さいほど滴下の最適の高さが大きくなることが確認できた。また、図10のグラフの傾きがおよそ-0.5であることは、最適の高さ h が水滴の質量の平方根 \sqrt{m} に反比例することを示唆しており、これは私たちの仮説とは異なる結果となった。

これについて、私たちは仮説を立てる際に水滴の速さを自由落下より求めており、ここに問題があると考え、実際は空気抵抗を受けており、空気抵抗を考慮した落下の速さを考える必要があると考えた。

そこで、動画のコマ送り画面から求めた速さの実測値と空気抵抗を受ける場合の理論値について、比較を行うことにした。

水滴が水面に達する直前の速さについて、
①動画からの実測値、3つの理論値(②空気抵抗なし、③速さに比例する空気抵抗を受ける場合、④速さの2乗に比例する空気抵抗を受ける場合)を計算し、その値を比較したグラフが、図14である。

3つの理論値(②③④)はほとんど同じで、実測値は理論値より小さいことが分かった。このことから、私たちの行った実験系では、理論的には、落下距離が小さいために空気抵抗の影響をほとんど受けないが、実際には空気抵抗の影響を受けていると考えた。また、空気抵抗の大きさは、私たちの既知のもの(理論値③④)とは異なるものであると考えた。

したがって、実際の速さを数式化することができれば、「 h が \sqrt{m} に反比例する」ことを説明できるのではないかと考えている。

(2) 水面に形成される凹みについて

図11~13が示すように、最適の高さ付近で凹みの大きさが最大となっておらず、私たちの仮説とは異なる結果となった。しかし、滴下の高さ30cm付近(最適の高さは28cm)でグラフが折れ曲がっており、このことから最適の高さ前後で水滴側と水面側の関係が変化するのはないかと考えた。

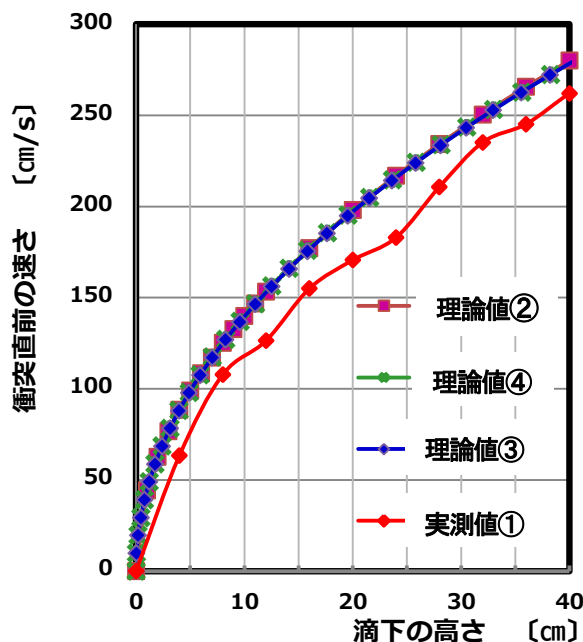


図14 水滴の落下速度の比較

ア 水面に形成される凹みの形状に関する考察

最適の高さの前後では何が異なるのか疑問に思ったので、水滴が水面に当たる瞬間の動画を再度確認することにした。すると、最適の高さとその前後では、水面にできる凹み部の形状の違いがあり、**図15**が示すように大きく3種類に分類できることが分かった。



図15 水面の凹み部の形状

そこで、凹みの形状とはね返りの高さの関係についてさらに詳しく調べるために、同一の条件（注射針18G、滴下の高さ28.0cm）下で水滴を100回滴下し、凹みの種類を分類することにした。すると、**図16**が示すように、（円柱+半球型）：（半球型） = 97：3 となり、ほとんどが（円柱+半球型）であった。

このことから、水滴が大きくはね返るためには、「円柱+半球型の凹みを形成する必要がある」と考えた。しかし、はね返りの高さにはばらつきがみられ、この形状を形成すれば必ずしも大きくはね返るとは限らないと考えた。

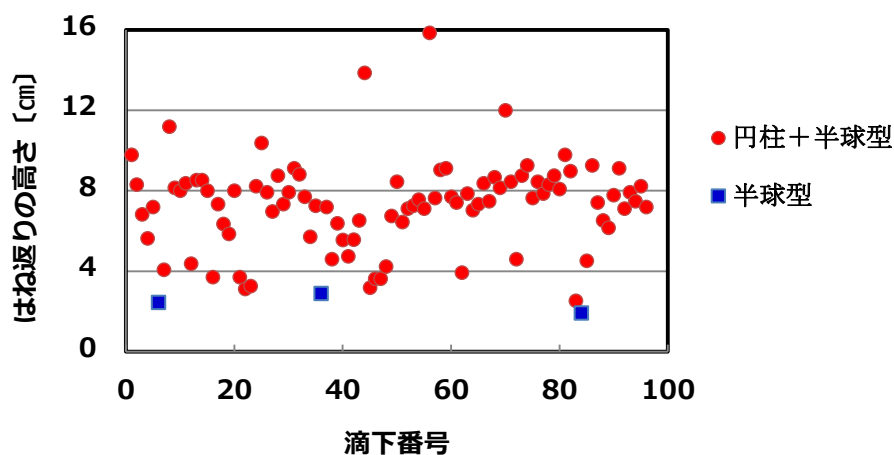


図16 18G 最適の高さ時の凹みの形とはね返りの高さ

イ 水滴がはね上がる速さについての考察

次に、水滴が水面からはね上がる速さはどのようになるのかについて疑問が生じたので、動画からの測定を試みた。

はね返る水滴は、水面が盛り上がり形成された水柱の上部から形成されるため、凹んだ水面が盛り上がりいくときの速さをはね上がりの速さとした。

水滴が水面に達する直前の速さと水滴がはね上がる速さの関係は**図17**のようになった。

はね上がりの速さは線形的に上昇し、一度ピークを迎えたのち、収束する。

私たちは図17が図1とよく似た傾向を示すと考えた。すなわち、凹んだ水面が元に戻った後に鉛直上方にはね上がる速さが、水滴のはね上がりに大きく関係すると思った。つまり、はね上がりの速さが最大るとき、水滴のはね返る高さが最大となり、はね上がりの速さが収束すると水滴のはね返る高さも収束することを意味する。

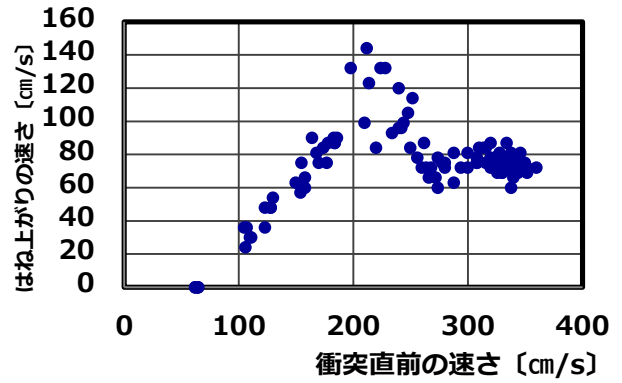


図17 水滴の速さ、水面のはね上がりの速さ

ウ はね返った水滴の大きさに関する考察

松山南SS物理水滴班 (2017) によると、はね返る水滴の体積が小さいときに水滴が大きくはね返ることが示されており、その確認のためにはね返った水滴の体積について調べると、図18のようになった。

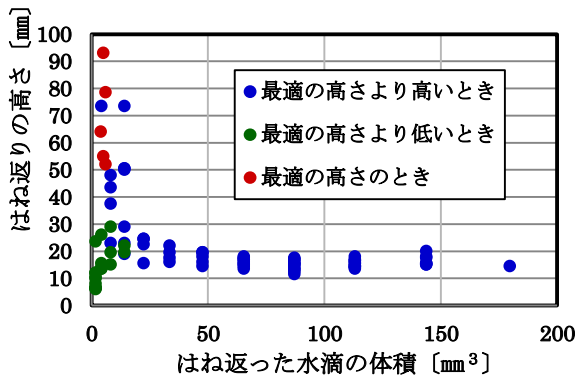


図18 はね返った水滴の体積と高さ

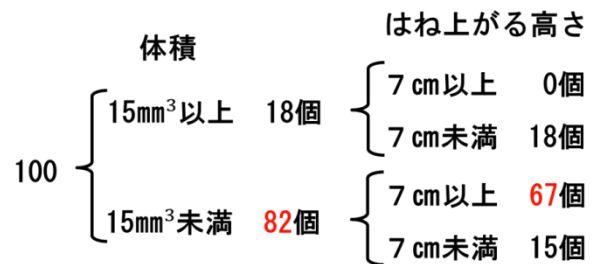


図19 水滴の大きさよる比較

そこで、前述の考察アで使用した100回の滴下の動画を用いて、はね返った水滴の体積で分類を行ったところ、図19のようになり、体積が15mm³以上の水滴には7 cm以上はね返るものがなく、体積が15mm³未満の水滴82個のうち、およそ81.7%に相当する67個が7 cm以上はね返っている。このことから、大きくはね返るためには、水滴の大きさが小さくなる必要があると考えた。

6 結論

以上の実験結果・考察により、本研究で次のことが明らかになった。

- ① 水滴を水面に滴下したのち水滴がはね返る現象では、はね返る水滴の高さは、滴下の高さが高くなるにつれて高くなったのち、ある程度の高さに収束する。このとき、最適の高さ(はね返った水滴の高さが最大となるための滴下の高さ)は滴下する水滴の質量の平方根に反比例する。

② 水滴が大きくはね返るためには少なくとも次の3つの条件が必要だと考える。

『円柱+半球型の凹みをつくる』

『水面がはね上がる鉛直上向きの速さが大きい』

『はね返る水滴の大きさが小さい』

7 今後の展望

今回、私たちは、実験で用いた5種類の注射針のうち、水滴の大きさが最大になる18Gのものについて考察を行った。他の大きさの注射針においても共通の特徴が見られるのではないかと考えており、その確認をする必要がある。

また、今回の研究では、大きくはね返るための3つの条件を発見したが、それら以外の条件が存在するかどうかを追求し、明らかにしていきたいと考えている。また、水温による影響や、表面張力、粘性についても数値化して比較や解析を進めていく必要がある。

そして、最終的には、最適の高さから水滴を滴下しても水滴が大きくはね返らなくするための条件を明らかにし、日常生活や商品開発に応用を図っていきたいと考えている。

8 おわりに

本研究は、本校の先輩方の継続研究ということで、先輩方の研究をベースにより深く、発展的に探究活動を行ってきた。水滴が水面ではね返るという現象は、身近な場面で数多く見られるが、研究を進めれば進めるほど様々な要素が複雑に絡み合った現象で、非常に難解であると感じる一方で、その複雑さゆえにさらに興味深い現象であることを実感することができた。今後も継続して研究を行うことで、この現象のメカニズムの解明に近づくことができるのではないかと考えている。

9 謝辞

私たちの研究は、ほとんどすべて学校内で進めてきました。研究を進めるにあたり、数多くの助言をいただきました。愛媛県立松山南高等学校の本藤雅彦先生、露口猛先生、重松聖二教頭先生をはじめ、協力をしていただいた理科教室のすべての先生方、また、本校メンターの愛媛大学大学院理学研究科の成田博貴さんに、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

10 参考文献

○愛媛県立松山南高等学校 S S 物理水滴班(2015)「水面に形成される水柱に関する研究」

○愛媛県立松山南高等学校 S S 物理水滴班(2017)「水面からはね返る水滴に関する研究」

○長谷川誠、川原宗貴、俵谷邦仁朗、花森壮介、平澤梓(2012)

「ハイスピードカメラによる動画集の公開とミルククラウン現象の観察」

○久保田浪之介(2007)

「今日からモノ知りシリーズ トコトンやさしい流体力学の本」日本工業新聞社