

固体物を水面に落とした時の水のはね上がりに関する研究

愛媛県立松山南高等学校 水滴班 2020

高城和佳 竹田夏菜 西尾怜愛

指導教諭 大西大輔

1 課題設定の理由

雨の日、台所、トイレなど、日常生活の中で、水がはね返る光景はよくみられる。ときには、この水のはね返りで、服や顔に水が飛び散り濡れてしまうこともある。

本校の水滴班では、この水がはね返るという現象に興味を持ちその原理や性質を解明することができれば、水が飛び散る現象を防ぐなどの改善ができるのではないかと考え、研究方法を変えながら継続して取り組んでいる。

先行研究では、**図1**のように、径の異なる注射針を用いて複数の大きさの水滴を滴下し、水面ではね返る様子を撮影した動画を再生し、水滴が最高点に達した瞬間の静止面の画素数から、はね返った高さを求めた。その結果、水滴を水面に滴下する高さを大きくすると、はね返る水滴の高さは一度大きくなった後に収束することが明らかになった。また、水滴の質量が大きいほど、はね上がりの高さを示すグラフが左へシフトする傾向にあることが分かっている (**図2**)。

しかし、この水滴のはね返りは非常に複雑な現象であるだけでなく、液体に液体を滴下するので、水面付近での挙動が分かりにくいという課題があった。

そこで、本研究では、水面付近の挙動を明らかにするため、固体物である金属球を落下させ、着水後にはね上がる水について調べることで、水のはね上りを明らかにすることができると考え研究を行った。



図1 水滴を滴下する実験装置

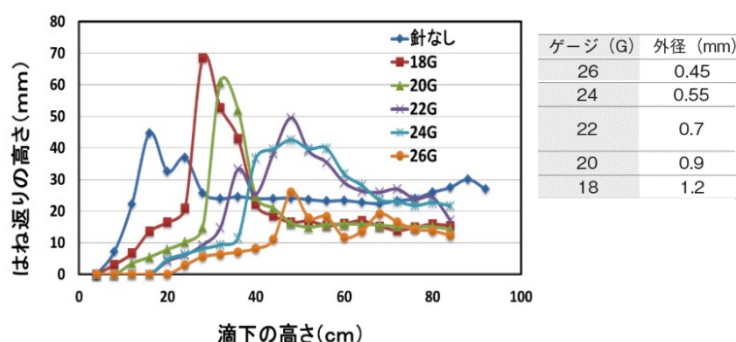


図2 水滴の滴下の高さとはいね返りの高さとの関係

2 仮説

先に示した先行研究を踏まえて、私たちは、このような水がはね上がる現象では落下物の持つエネルギーや運動量といった物理量が、水滴のはね上がる高さに関係すると考えた。そこで、本研究において、固体物である金属球を落下させる場合、水滴の場合に比べて大きな物理量をもつ金属球が液体と衝突することから、次のような仮説を立てた。

【仮説】 水面に固体物である金属球を落下させる場合、はね上がりの高さは水滴を落とす場合よりも大きな増加を見せる。しかし、ある程度の高さで頭打ちになる。

3 実験方法

(1) 実験装置の検討

本研究では、固体物を落下させ、着水後の水面付近の挙動を明らかにするため、落下させる固体物として、直径 11 mm の金属球（鉄球）を用いた。

まず、金属球を素手で落とすことを検討した。その際、個人差が出る上に重心のずれ等の問題が起きるため、正確かつ毎回同じ条件で落下させるには、専用の落下装置を製作する必要があることが分かった。

次に、専用の落下装置として、**図 3** のように、木の板で金属球をはさみ、ばねで固定し取り付け棒を引くことで金属球を落下させる方法を試みた。しかし、棒を引いた際、金属球に回転がかかり、金属球が真下へ落下しないという問題が生じた。

そこで、**図 4** のように、電磁石をスイッチで操作して、金属球を落下させる装置を製作した。

金属球の落下の様子を撮影して確認したが、金属球は落下時に回転していないこと、水槽の下に敷いた目印の場所（紙で作成）に同様に落下することを確認でき、実験の再現性を高めることができた。

その他の実験器具は次のとおりである。

金属球落下装置、水槽、実験台、ものさし、照明器具、反射板、ハイスピード撮影対応デジタルカメラ (CASIO HIGH SPEED EXILIM EZ-ZR850)、(Panasonic DC-TZ90)、磁石、暗幕

作製した実験装置を **図 4** に示す。

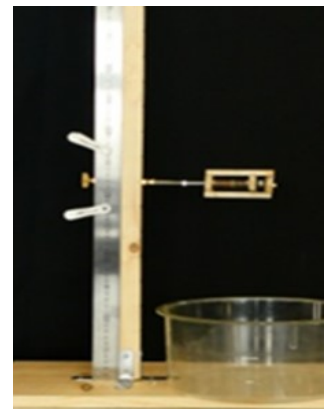


図 3 金属球を木の板ではさんだ落下装置

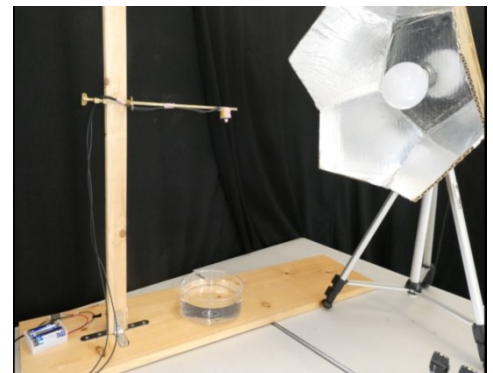


図 4 電磁石で金属を落下させる装置

(2) 実験方法

① 金属球(直径 11mm)を水面(水深 35mm)に落下させ、水滴がはね上がる様子を動画で撮影する。落下させる位置の水面からの高さは 24cm から 4cm 刻みで変え、86cm までそれぞれの高さで 20 回行う。

② PC の動画再生ソフトでコマ送り再生する。

③ それぞれ求めたい瞬間の静止画を用いて、画像上の画素数からはね返りの高さを求める。はね上がる水滴の高さの測定は、はね上がった水滴が複数ある場合は、最も高くはね上がったものを測定の対象とする。

(3) 動画の解析

撮影した動画をパソコンの動画再生ソフト (Quick time Player) で再生する。コマ送り再生で求めたい瞬間の静止画を保存する。実際に扱った動画データより、水滴が飛び出ている様子を **図 5** に示す。

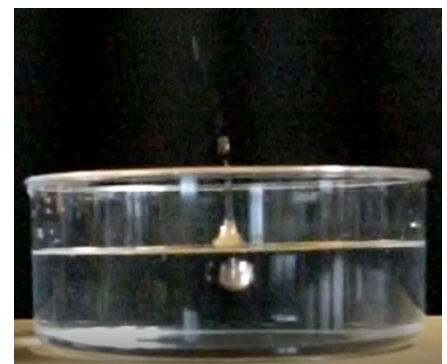


図 5 水面から水滴が飛び出ている様子

4 実験結果

それぞれの高さで 20 回行った実験結果をもとに作成した、金属球を落とす高さとはね上がった水滴の高さの関係を図 6 に示す。

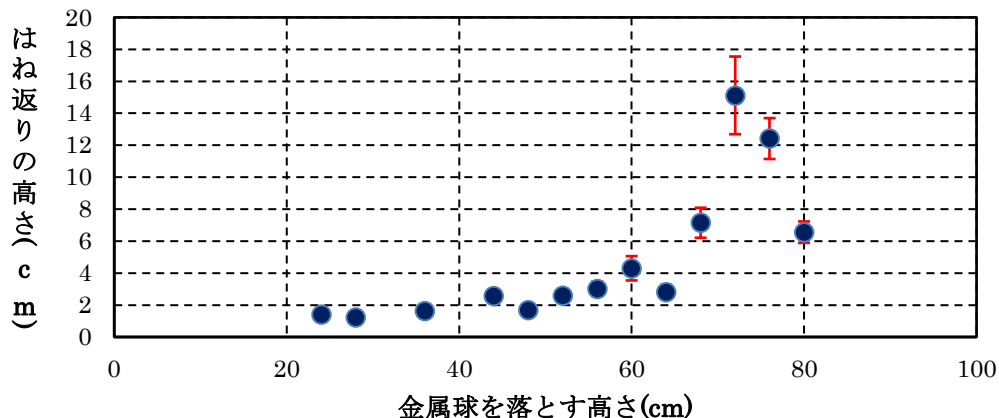


図 6 金属球を落とす高さとはね上がった水滴の高さの関係

図 6 より、64cm～72cm にかけてはね上がりの高さが急増することが分かった。

また、仮説では、ある程度の高さでは頭打ちになると予想したが、72cm～80cm においては、急減するという結果になった。この付近でははね上がりの高さに大きなばらつきが見られた。

水滴を落下させる先行研究において、はね上がりの高さがピークに達した 20cm 付近では、水滴に比べてエネルギー量が大きくなるにもかかわらず、はね上がりの高さは水滴を落とした場合の約 20%の高さとなり、予想外の結果となった。

6 考察

固体の落下ではね上がった水滴の高さに関する図 6 の実験結果と、水滴の落下ではね上がった水滴の高さに関する図 1 の先行研究のグラフの形状が類似していることから、「水滴のはね上がりの高さは、いったん増加したのちに収束する」という現象は、落下させる物質が液体、固体のどちらにおいても起こることが分かった。

では、なぜこのようなはね上がりの高さの変化が起こったのだろうか。図 6 の 64cm 以降のはね上がりの高さの増減に焦点を当てて考察することにした。

(1) はね上がりの高さの増加の考察

まず、はね上がりの高さ 64～72cm にかけて、はね上がりの急増が見られる。中でも大きな増加が見られたのが 68～72cm の区間で、金属球を落とす高さは 1.06 倍の増加に対し、はね上がりの高さの平均は 2.17 倍増加している。

これに比べ、先行研究の図 1 のグラフでは、18G の 24～28cm の区間で最も大きな増加が見られ、水滴を落とす高さは 1.17 倍の増加に対し、はね上がりの高さは 3.29 倍の増加を見せている。このことより、水滴の場合の方が、固体物よりも大きな増加が見られることから、仮説の「水面に固体物を落とす場合、はね上がりの高さは水滴を落とす場合よりも大きな増加を見せる。」は、否定された。

(2) はね上がりの高さの減少の考察

次に、**図6**で見られたはね上がりの高さの減少について考察する。72cm以降において金属球の持つ運動エネルギーは増加するにも関わらず、はね上がりの高さが減少していることから、そのエネルギーが別のものに変換されていると考え、水面の挙動について調べることにした。

(3) はね上がりの速さについて

本校の水滴班による先行研究(2019)では、はね上がりの速さははね上がりの高さに関係することが報告されていた。

このことから、固体物の場合も水中から飛び出す水滴の速さが、はね上がりの高さの減少に関係しているのではないかと考えた。そして、はね上がりの速さが減少することで、高さが減少したのではないかと予想した。検証の結果を**図7**に示す。

はね上がりの高さの急減が起きた72cm以降において、はね上がりの速さは増加するといった結果になった。よって、はね上がりの速さが低下することで高さの減少が起こるという考えは否定された。

また、金属球の水面に衝突する速さと水滴のはね上がりの速さの関係を**図8**に示す。これを見ると、衝突の速さとのはね上がりの速さは比例関係にあることが分かる。

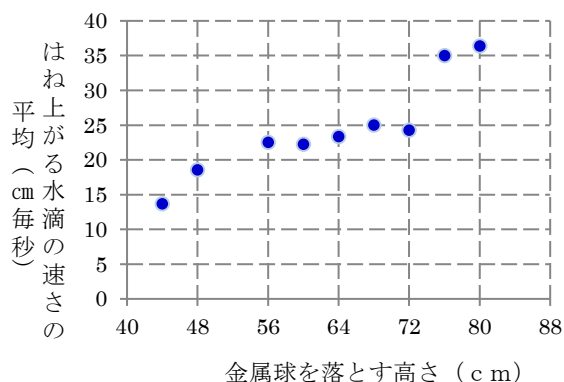


図7 金属球を落とす高さとはね上がった水滴の速さの関係

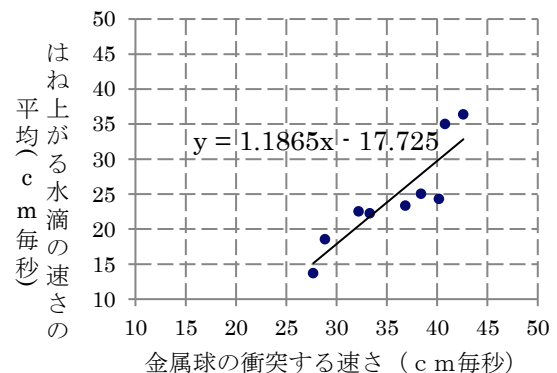


図8 金属球の衝突する速さとはね上がった水滴の速さの関係

(4) はね上がりの角度について

引き続きはね上がりの高さが減少する原因を探るべく、動画の再生を繰り返し確認したところ、はね上がる水滴は必ずしも鉛直上向きではなく、斜め上方に飛び出し、水滴が放物線を描くことに気がついた(**図9**)。

そこで、私たちは水滴がはね上がる角度が関係するのではないかと考えた。私たちは、当初はカメラ1台で正面から撮影をしていたが、水滴の放物運動は三次元的な動きをするため、2台のカメラを用いて二方向から同時に撮影することで、角度を割り出せるように改善した。

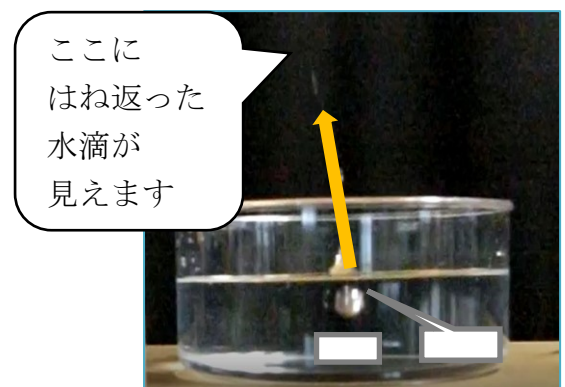


図9 斜め上方に飛び出した水滴が放物線を描いている様子

結果を図 10 に示す。金属球を 72cm より低い位置から落とした場合は、はね上がりの角度はどれも約 80 度となり、高さ 72cm 以降においては角度の減少が見られた。このことから、はね上がりの高さが減少する原因は、水滴のはね上がる角度が小さくなるためであると考えられる。

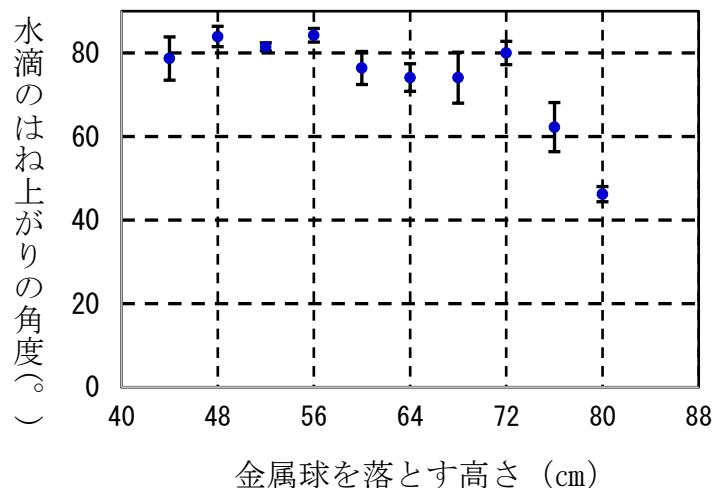


図 10 金属球を落とす高さ と水滴のはね上がりの角度の関係

(5) はね上がりの角度に関する考察

これまで主に、72~80cm のはね上がりの高さの減少に着目し、その原因について考えた。しかし、72cm を境とする角度の減少がなぜ起こるのだろうかという新たな疑問が生まれたため、さらに詳しく解析を行うことにした。

図 11 は、先ほど示したはね上がりの角度を表す図 10 を点グラフ化したものである。80° 付近と 45° 付近にそれぞれデータの集まりが存在することが分かる。

このことから、はね上がる水滴の多くは、鉛直上方近くに、はね上がるものと、約 45 度ではね上がるものに分けられることが分かる。

したがって、変曲点である 72cm を境に水滴のはね上がり方そのものが変化しているのではないかと考えた。

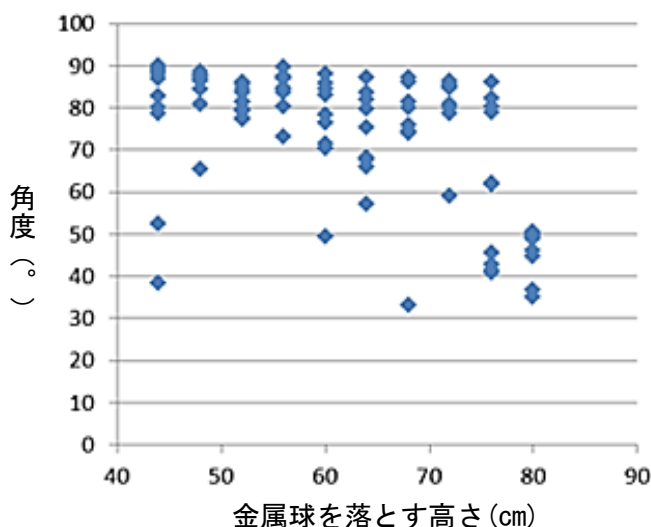


図 11 金属球を落とす高さ と水滴のはね上がりの角度の関係 (点グラフ化)

実際に、水面の様子を撮影して検証したところ、二つのはね上がり方を観測することができた。それぞれをA、Bとし、実際に得られたデータの連続写真と落下の高さとはね上がり方の関係を以下に示す。

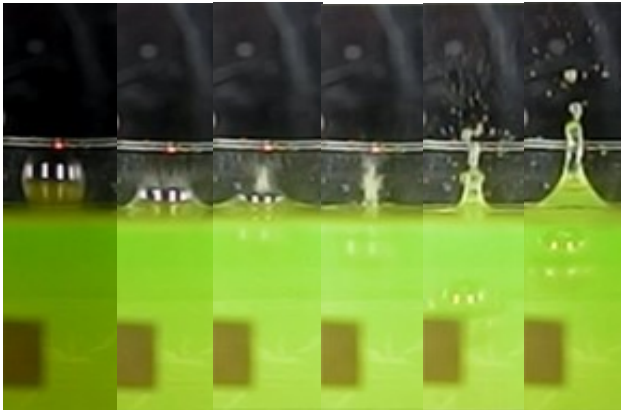


図 12 はね上がり方 A

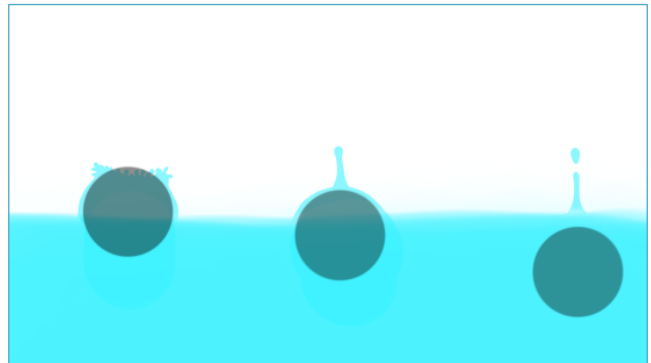


図 13 はね上がり方 A のイメージ図

図 12 の連続写真 A では、金属球が水面に接触した後、周囲の水が金属球の表面を伝うように上がっていき、金属球が水中に入りきる直前に、上部でまとまる様子が見られる。その後、水柱が形成されることが分かる。すなわち、形成された水柱の先端から水滴が発生し、飛び出していることから、Aにおけるはね上がりの水滴は水柱に由来することが分かった (図 13)。

Aのはね上がりの他に、図 14 のように水滴が水面に衝突した時に周囲の水が横へはねのけられるようにはね上がる場合もあった。

コマ送りで詳しく観察してみたところ、Bのはね上がり方には、Aで見られた水柱の形成は見られず、金属球の表面を覆う水も確認できなかった。

一見すると、これらのはね上がり方の違いが 72cm 以降のはね上がりの角度の減少を引き起こしたのではないかと考えられる。表 1 に、金属球を落下させる高さで 2 つのはね上がり方の回数を示す。



図 14 はね上がり方 B

表 1 金属球を落とす高さ、はね上がり A、B がみられた回数

物体を落とす高さ(cm)	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80
はね上がりA	8	10	10	10	10	9	9	10	10	9
はね上がりB	2	0	0	0	0	1	1	0	0	1

ほとんどの水滴が A のはね上がり方であったこと、B のはね上がり方は落下の高さに関わらず不定期に見られたことから、これらの違いが図 10 における角度の減少を引き起こす要因とは言い切れないことが分かる。

また、金属球の衝突速度の増加に伴って、A のはね上がり方における水柱と、そこからの水滴の生成にある傾向が見られる事に気付いた。

図 15 に、衝突速度の大小による水のはね上がり方の違いのイメージ図を示す。

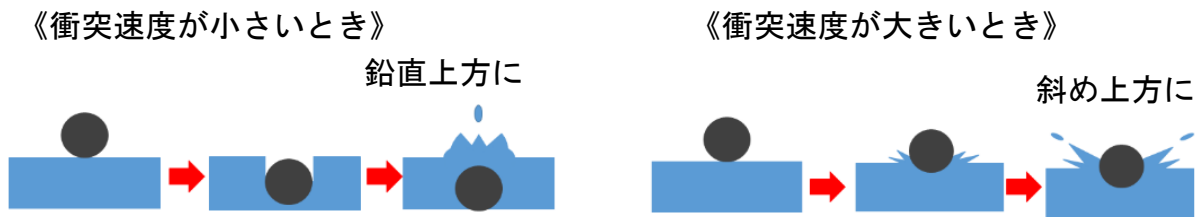


図 15 衝突速度の大小による水のはね上がり方の違いのイメージ図

図 16 は、金属球を落とす高さが 76cm の時に形成された水柱と水滴である。このように、金属球を落とす高さが高い程、衝突時のエネルギーの増加によって水柱の形成が不安定になる傾向が見られた。

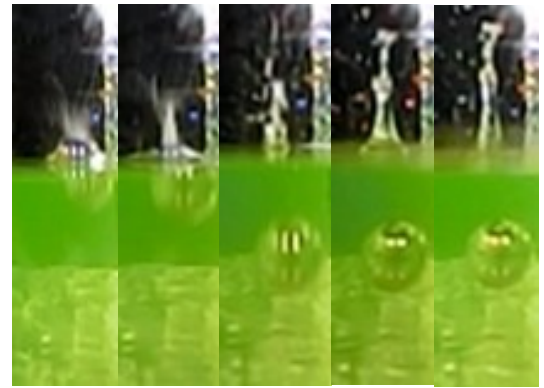


図 16 金属球を落とす高さが 76cm のときに形成された水柱と水滴

この時、水柱の形成がより素早くなり、先端から分裂した複数の水滴が様々な方向へ飛ばされる様子が見られた事から、はね上がりの角度の減少に関係していると考えられる。

以下に、ハイスピードカメラで撮影した動画から作成した静止画を示す。モノクロ写真のためはね上がる水の様子を写真に朱書し比較した。図 17 の写真 1~4 は金属球が水面に着水した直後の水面の挙動を表している。金属球を落下させる高さが 72cm を超えると写真 4 のように、左右方向に水が飛び散る確率が高くなる。また、図 18 の写真 5~8 は金属球が水に沈む時の様子である。写真 8 は写真 4 の着水時のものであり、空気を巻き込みながら沈んでいく様子が確認できる。このように、水面の挙動は、金属球を落下させる高さが 72cm を超えると大きく変化することが分かった。

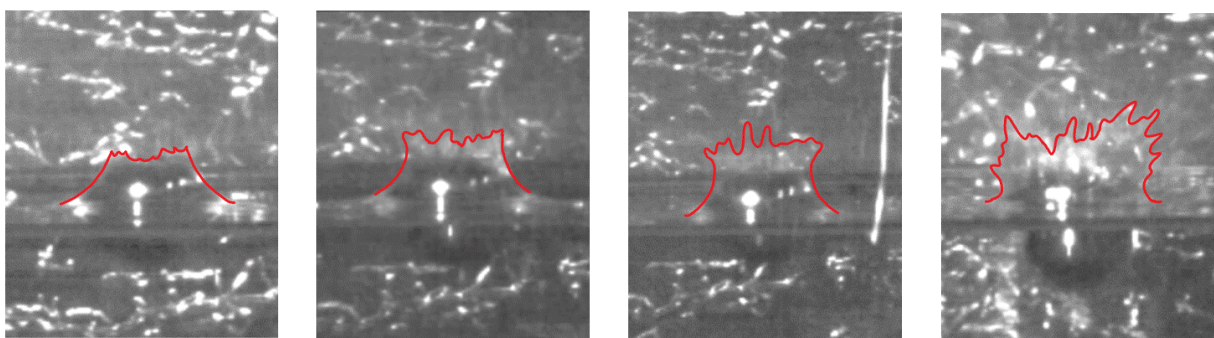


写真 1 (高さ 40cm)

写真 2 (高さ 60cm)

写真 3 (高さ 80cm)

写真 4 (高さ 80cm)

図 17 金属球が水面に着水した直後の水面の挙動

〔 金属球が着水した直後の水がはね上がる様子を写真に朱書している。 〕

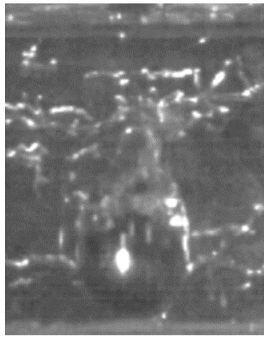


写真5 (高さ 40cm)

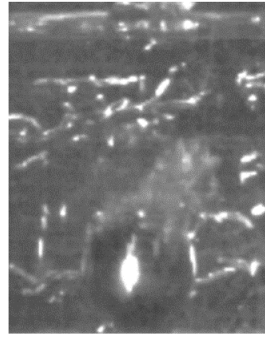


写真6 (高さ 60cm)



写真7 (高さ 80cm)



写真8 (高さ 80cm)

図18 金属球が水に沈んでいく時の様子

(6) 落下する金属球の回転の有無について

私たちは、これまでに図6で見られた、はね上がりの高さの増加と減少に注目し、その原因について考察しようと試みた。しかし、校外の研究発表で「金属球が落下中に回転し、それが水滴のはね上がりの高さや角度の変化を引き起こしているのではないか」という指摘を何度か受けたため、再度、落下する金属球の運動を調べることにした。

落とす金属球の半面を油性ペンで着色し、落下する様子をハイスピードカメラ(2000fps)で撮影したところ、落下する金属球に回転は見られず、どれも水面に対して垂直に衝突していることが改めて分かった。

7 結論

以上の実験並びに考察で明らかになったことは次の3つである。

- ① 金属球を水面に落下させた時に水面から水滴がはね上がる現象では、先行研究の水滴を落とした場合同様、水滴がはね上がる高さは落下させる高さが高くなるにつれ大きくなるが、ある高さを境に減少する。
- ② はね上がりの高さの減少は水滴がはね上がる角度の減少によるものである。これは、Aのはね上がり方において、金属球の衝突時のエネルギーが大きくなることで水柱の形成が不安定になり、複数の水滴が様々な方向へと飛び出るためである。
- ③ 金属球を水面に落下させた時の水滴のはね上がり方は2種類存在する。

8 今後の課題

現時点までに、はね上がる水滴の高さの減少が角度の減少によるものということが明らかになっている。この角度の変化を引き起こすと考えられるのはね上がり方Aについて、水柱や水の膜などについてより詳しく解析を行いたい。

また、2種類の異なるのはね上がり方が存在するということが確認できたが、図14のようなのはね上がり方はほとんどみられなかった。こののはね上がり方Bは、どのような条件下で出現するのかについても調べたい。

落下物の大きさや形、密度などを変えた場合にどのような違いが表れるか、対照実験を行うことでこの現象のメカニズムを解明することができれば、日常生活の改善に応用することもできるだろう。

9 おわりに

私たちの研究では、日常生活に即して先行研究とは異なる固体物を落として実験を行った。そのこともあり初期から実験道具の製作や、実験効率など様々な困難があった。しかし、研究を進めていくほど、日常の中にある何気ない現象が、いかに多くの要素が絡み合った複雑な現象であるかを感じ、さらに興味が深まった。

今回の研究では、様々な現象の数値化を行ったが、それを公式化することが出来なかったことが残念である。

今後、水滴が跳ね上がる際の水の膜・柱の形成のメカニズムや、落下させる物体の形状による影響等についてさらに追及することで、日常生活における問題解決策としての応用も可能になるだろう。この研究が以降の研究に役立ち、さらなる現象の解明へと繋がっていくことを願っている。

10 謝辞

本研究を行うにあたり、愛媛大学工学部機械工学科の向笠忍準教授にハイスピードカメラでの撮影について御指導御助言をいただきました。また、数多くの助言を頂きました愛媛県立東温高等学校の本藤雅彦先生、愛媛県立松山南高等学校の露口猛先生、参河厚史先生、大西大輔先生をはじめ、本研究にご協力頂いたすべての方々にこの場をお借りして厚くお礼申し上げます。

11 参考文献

- 千葉県立船橋高等学校(2014)「ミルククラウンの発生条件」
- 学校法人奈良学園 奈良学園高等学校(2013)「水中を落下する球状物体に働く抵抗力」
- 滋賀県立膳所高等学校(2017)「球体の落下運動」
- 愛媛県立松山南高校 SSH 水滴班(2016)「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」
- 愛媛県立松山南高等学校 三代目水滴班(2019)「水滴が水面から大きくはね返る条件を探る」