

水はねの最高到達点の高さの法則

2608 大河内 巖 2503 石原 敦史 2525 長屋 憧 2634 古田 龍渉

要旨

本研究の目的は、水はねの最高到達点の高さの法則を実験式として導き、日常に起こる水はねによる不快感を軽減することである。物体を落とす高さとはねの高さは線型の相関があるという仮説を立て、実験を行った。100cmまでの高さから小鉄球を水槽に落とし、生じた水はねの高さを測定した。その結果、落とす高さとはねの高さは正の相関があるが線型とはいいがたく、水面の状態や衝突の条件で、水のはね方に違いが生じることが分かった。

1. 目的

物体を落とす高さとはねの高さの数学的な法則性や相関性を見つけ、実験式を導く。

トイレなどで臀部に水がはねることを不快に感じたため、快適に用を足すことができるようにする。

2. 背景

物体が落下した時に水はねが生じる要因は、物体が落下したことによって押し広げられた水が水圧や表面張力によってもとに戻ろうとするためである。

テーマに関する先行研究の調査として、松山南高校による「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」では、水滴のはね上がりの高さは、落下させる高さが高くなるにつれて大きくなるが、臨界値があることが報告されている。

その他の研究でも同様に、物体を落とす高さがある高さになると、そこからは水がはねる高さがほとんど変わらなくなるという結果が報告されていた。

しかし、それらの先行研究では、水がはねる高さの変化の仕方に大きな違いがあり、水のはねる高さに共通する法則は存在しないのかという疑問を持った。

3. 現象に関する要素の抽出

研究を行うにあたり、まず現象に関する要素を抽出した。水面の動きや水の仮想質量、落下時の着水角、室温や湿度などの状態量は測定や制御が難しいため、一定または影響が少ないものと仮定した。

その上で、落とす物体の形状や質量、リリース方法や水槽の水深や形状などを一定とし、小球を落とす高さを制御することとした。

4. 仮説

- I 物体を落とす高さ H を高くするほど水はねの高さ h は高くなる。
- II H と h には線形の相関がある。

5. 実験 1

5-1. 目的

物体を落とす高さを変え、水はねの高さを測定する。

5-2. 器具

- ・金属球：直径 1.1cm, 質量 8.4g, 鉄製
- ・水槽：半径 11.9cm, 水深 11.4cm, 体積 5069 cm^3
- ・定規：鉄製：100cm×1, 60cm×1
アルミ製：15cm×1
- ・棒磁石×2 ・力学スタンド×5
- ・カメラ（スマートフォン）×2



図1 実験の様子

5-3. 方法

- (1) 物体を高さ H から水を溜めた水槽に落とした。(H : 20cm~60cm, 5回ずつ測定)
- (2) はねた水滴をカメラで撮影し、はねた高さ h を測定した。
- (3) 鉄球のリリースには磁石を用い、間に磁化しないアルミ製の定規を挟むことで、磁石を離すことで鉄球が落下するようにした。

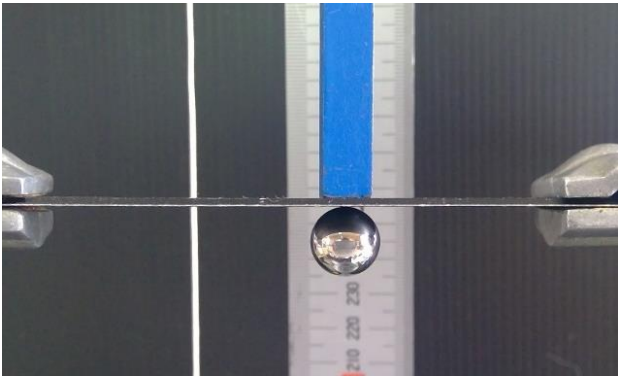


図2 磁石によるリリース

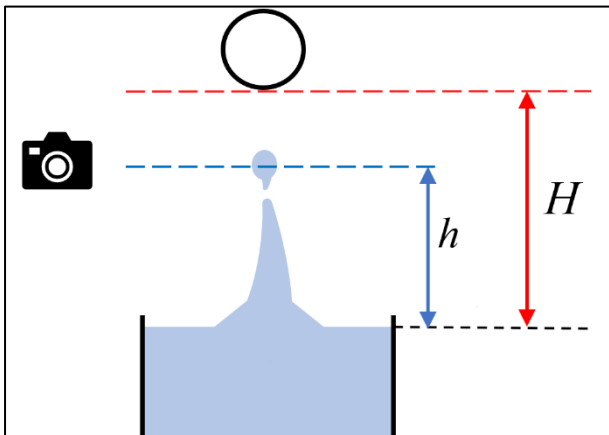


図3 水はねの高さの測定

5-4. 結果

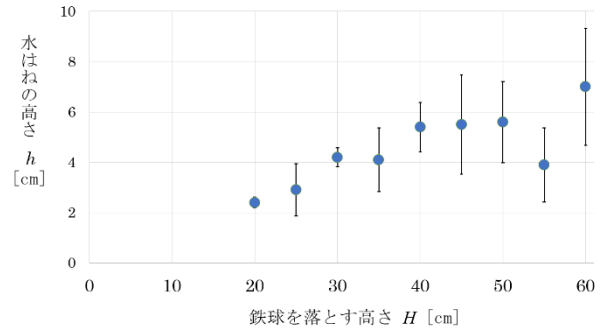


図4 鉄球を落とす高さ和水はねの高さの関係

仮説通り、落とす高さ H を高くすると、水はねの高さ h が高くなった。

しかし、この実験では、同じ高さから落とした場合でも、水はねの高さには大きなばらつきがあり、落とす高さ H が高くなるほどばらつきは大きくなった。

鉄球を落とす高さとして、測定値の標準偏差の関係を調べたところ、落とす高さによってばらつきの違いがあることが確認できた。(図5)

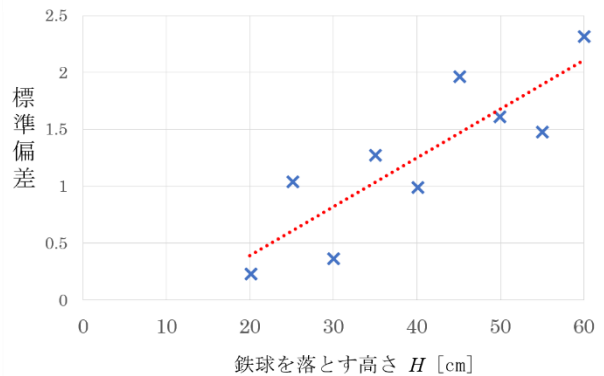


図5 鉄球を落とす高さと標準偏差の関係

また、結果をもとに作成したグラフで近似曲線を描くと、図6~8のように、線形以外にも2次関数や対数関数とも考えられる相関を示しており、求める法則性の候補が複数存在することが分かった。

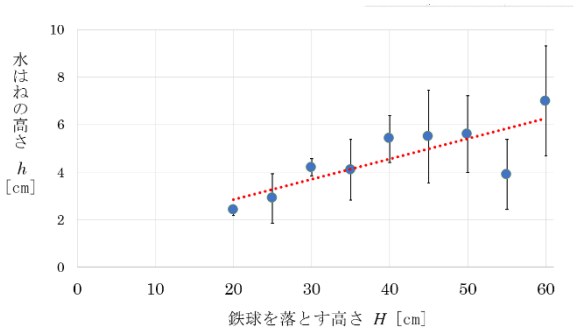


図 6 $y = 0.086x + 1.14$ (線形)

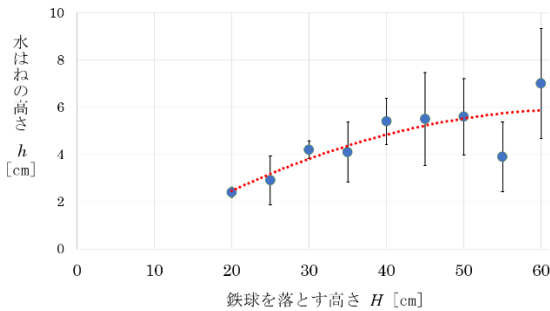


図 7 $y = -0.0017x^2 + 0.22x - 1.27$ (2次関数)

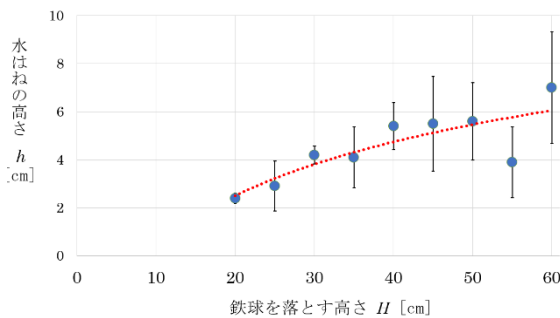


図 8 $y = 3.2 \ln(x) - 7.2$ (対数関数)

5-5. 考察

(1) 落とす高さとおはねの高さには正の相関があり仮説 I は概ね検証された。

これは、落とす高さが増すと物体の着水時の速さが大きくなり、水面に与えるエネルギーが大きくなるからだと考えられる。

(2) おはねの高さの法則には候補が複数あり、仮説 II は検証できなかった。

これは測定範囲が狭かったため、法則を見つけるためのデータが足りなかったからだと考えられる。

(3) データがばらつき、落とす高さが高い程ばらつきが大きい。

これは、鉄球のリリース時に僅かな初速

度(微小な揺れによる投射の状態)を与えてしまうこと、落下中の空気抵抗、風の影響が考えられる。

5-6. 空気抵抗の影響に関する考察

ここで我々は一旦、各高さから鉄球を落とした際の着水時の速さを測定し、理論値と比較した。その結果、下図(図9)のように測定値と理論値の差はいずれも5%以内に収まり、このことから、空気抵抗はデータのばらつきに影響しないと考えた。

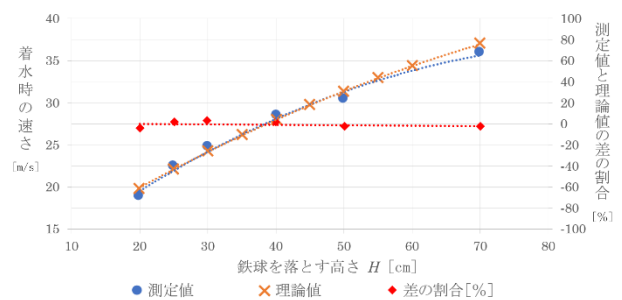


図 9 落とす高さ H と着水時の速さ

6. 実験 2 リリース方法の改良

6-1. 目的

鉄球の初速度(微小な揺れによる投射の状態)を限りなく 0 とする。

6-2. 方法

リリース方法を改良し、実験 1 の対照実験を行った。磁石の代わりにシリンジとシリコンチューブを用い、空気圧の変化を用いた。

これによりリリース時に小球に与えられる微小な初速度を抑制できると考えた。(図 10)

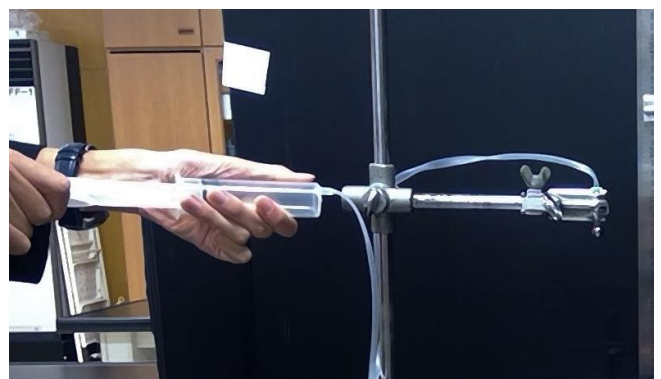


図 10 シリンジによるリリース

同時に風防を作成し、風の影響を排除した。



図 11 風の影響への対策

6-3. 結果

改良前と改良後の比較は図 12 のようになった。データのばらつきが減り、仮説Ⅱの通り、線形に並ぶように見える。

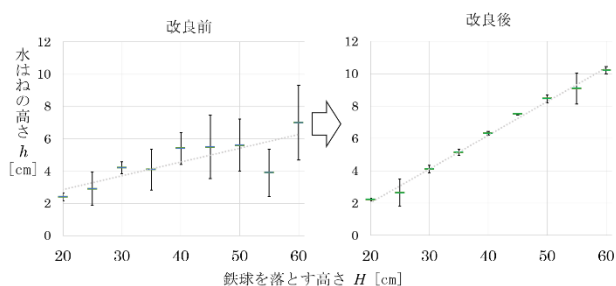


図 12 改良後の結果

また、改良後のデータの標準偏差は値が小さく、ほぼ一定であり、特に高い高さから落とした際のばらつきを抑制できた。(図 13)

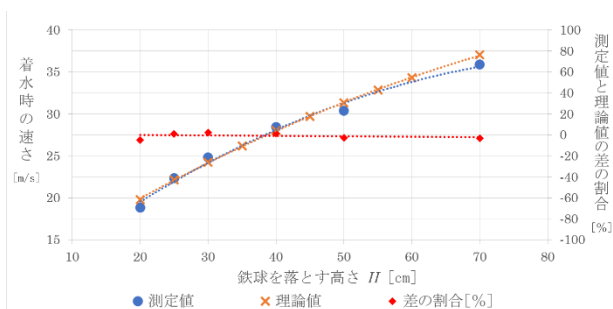


図 13 改良後の標準偏差

以上から、改良の効果が認められると考え、この装置で再度、実験 1 と同様の測定を行うこととした。

7. 実験 3

7-1. 目的

落とす高さの範囲を拡大し、多くのデータを取得することで法則性を確認する。

7-2. 器具

実験 1 と同じ。ただし磁石を実験 2 のシリンジに変更した。

7-3. 方法

落とす高さ H の範囲を $0\text{cm} \sim 100\text{cm}$ と拡大し、水はねの高さを測定した。

7-4. 結果

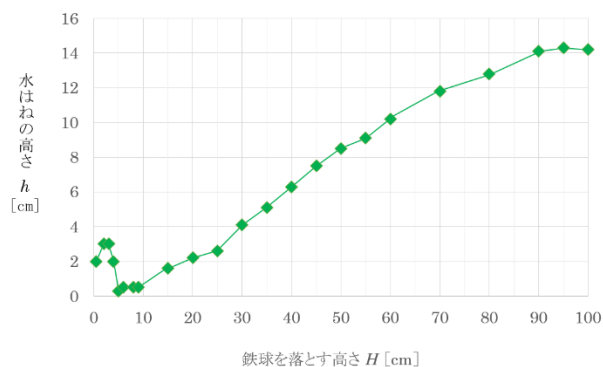


図 14 小球を落とす高さ和水はねの高さ

7-5. 考察

線形と言えないこともないが、測定結果を詳しく見ることで、小球を H と水はねの高さ h の間に、いくつかの相関を見つけることができた。(図 15)

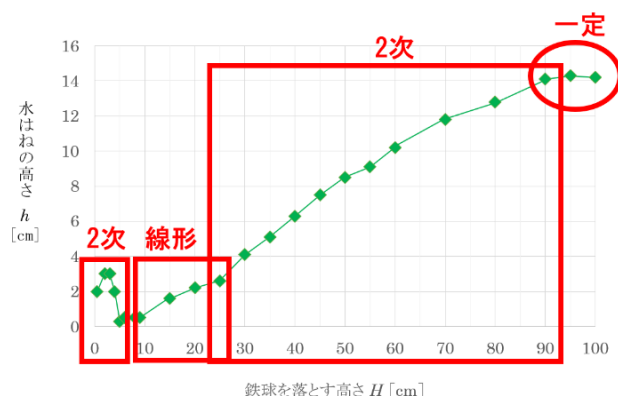


図 15 測定結果の考察

まず、 $H = 90\text{cm}$ 以上では変化が頭打ちとなっている。

さらに次に挙げるア、イ、ウの 3 つの区間で、得られたデータがいくつかの異なる関数

に近似できることが分かった。

- ア 5cm まで：2 次関数（図 16）
- イ 5cm から 25cm まで：線形（図 17）
- ウ 25cm 以降：2 次関数（図 18）

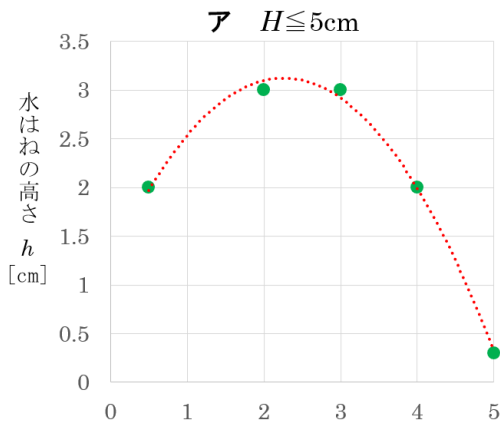


図 16 2 次関数

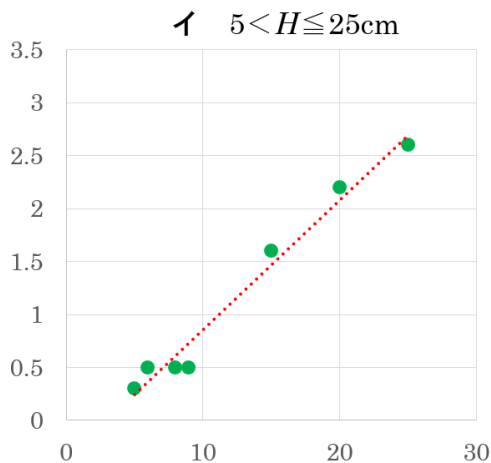


図 17 線形

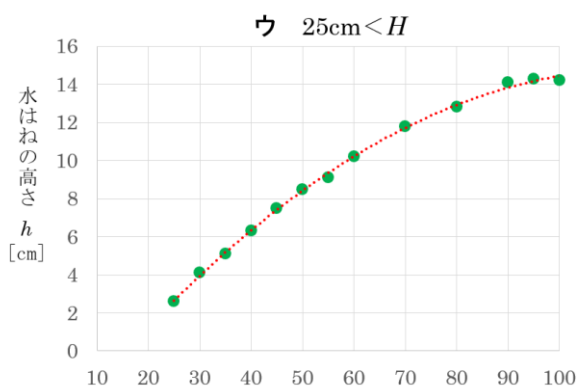


図 18 2 次関数

以上より、落とす高さとおはねの高さには、概ね正の相関があるが統一的な法則では表すことができないといえる。これは、水面の物理的性質によると考えられる。

水面を表面張力による膜と仮定すると、復元力は線形となるはずである。

しかし、小球の着水時の速さに応じて水面の復元力が変化し、やがて膜が破れて頭打ちになるとも考えられる。（図 15）

しかし、落とす高さ 5cm 以下でおはねが生じ、2 次関数に近似できる理由は分からない。これから解決したい課題の 1 つである。

8. 結論

・仮説 I について

正の相関があり、着水時の鉄球の速さにより、おはねの法則が変わる。これは水面の物理的性質によるものである。

・仮説 II について

統一的な線形とはならず、線形や 2 次関数、一定の関係が見られた。

9. 展望

新たな問いを明らかにすべく、以下の 3 つに取り組む。

- ① 現在の装置と方法でより多くのデータを集める。
- ② 水への衝突の直前・直後に、水面や鉄球に起きていることを調べる。
- ③ 落とす物体を変えて対照実験を行う。

水面への衝突を、エネルギーだけでなく、運動量や水面の性質からも考察していく。

10. 謝辞

本研究を行うにあたり、御助言・御指導いただいた物理科の佐々木俊哉先生に厚く御礼申し上げます。

11. 参考文献

- ・大科学実験「実験 77」水しぶきの階段

NHK for School. https://www2.nhk.or.jp/school/movie/bangumi.cgi?das_id=D0005110363_00000. (2022年10月最終閲覧)

- 「水滴が水面で大きくはね返る条件を探る」
中本太一. 城戸良祐.
愛媛県立松山南高等学校. (2019)
- 「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」
城和佳. 竹田夏菜. 西尾怜愛.
愛媛県立松山南高等学校. (2020)
- 「固体に作用する水面衝撃力. Water Impact Load of Rigid Body」
大同淳之. 立命館大学理工学部.
第23回水理講演会論文集. (1979. 2月)
- 着水衝撃について. Hydrodynamic Impact
平野陽一.
日本航空宇宙学会誌. 第19巻. 第214号.
(1971. 11月)
- The impact on seaplane float during landing. NACA TN 321.
VON KARMAN, T. (1929).