

表面張力の違いによる流れ落ちる水のふるまい

Behavior of water flowing down due to differences in surface tension

Abstract

As water leaves the tube, it separates somewhere below. We realized that surface tension was responsible for why water separates. We clarified this by changing the surface tension using ethanol and examining how the position of the separation changes. The results were consistent with our assumption: the higher the surface tension, the faster the separation.

1. はじめに

図1のように水道の蛇口やガラス管などから水を細く流し落とすと、はじめのうちは一つに繋がっているが、しばらく落ちたある位置でちぎれる様子が観察できる。昨年度の研究の中で、この水がちぎれる現象には表面張力が関係しているのではないかという仮説が生じていたので、今回はこの仮説を検証するための研究を行った。具体的には、水の表面張力の大きさを変化させたときに、流れ落ちる水がちぎれる位置はどのように変化するかを調べることで、水がちぎれる現象に表面張力が関係しているのかを明らかにする、というのが今回の研究の目的である。水がちぎれる原因は表面張力がはたらくことにあると仮定すると、表面張力が変化すれば水がちぎれる位置も変化すると考えられる。流れ落ちる水は重力によって加速させられるため、下方ほど速く落下し、細くなる。図2の左側のように、表面張力が大きいと、流れはじめの太い上方の位置であっても水を引き込みちぎれることができ、表面張力が小さいと、細い下方でなければ水を引き込むことができず、ちぎれないという仮説を立てた。

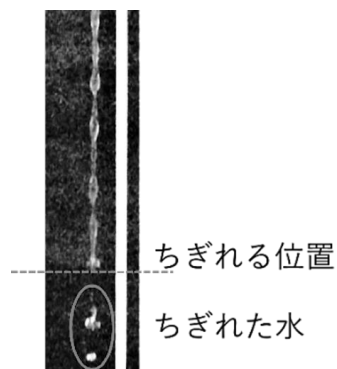


図1

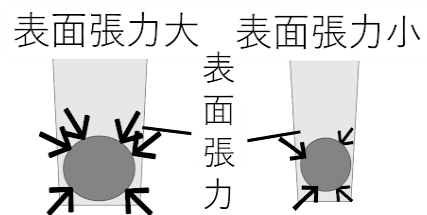


図2

2. 研究方法

準備：表面張力の異なる水の調製と表面張力の測定

流し落とす水は、水道水に様々な濃度でエタノールを混ぜることで、その表面張力の大きさを变化させた。エタノールの濃度は、質量パーセント濃度で0%、10%、15%、20%、25%、30%と变化させた。また、これらの水の表面張力の大きさを液滴法(図3)を用いて計測し、エタノールの濃度と表面張力の大きさの関係をグラフにした。

実験1：水がちぎれる位置の測定

実験1で調製した水を、容器内の水位が変わっても水圧を一定にできるマリオットの瓶(図4)

を用いて一定の速さで流し落とし、ハイスピードカメラでその様子を2分間記録した(図5)。その後、撮影した映像を2sごとの静止画にし、流れ落ちる水と平行に置いたメジャーの目盛りを読み取ることで、ちぎれる位置(ガラス管の終端からの距離)を測定した。ただし、図5の実験器具によって安定した値が得られるかを確認するため、はじめにエタノール濃度0%の水(エタノールを混ぜない水)を9回流し落とし、値のばらつきを調べた。次に、エタノールの質量パーセント濃度を、0%、10%、15%、20%、25%、30%と変化させ、各濃度3回ずつ実験を行った。水のちぎれる位置と流した水の表面張力の大きさの関係をグラフにした。

実験3 風の影響を調べるための測定

実験装置の周囲の風が水のちぎれる位置に与える影響を調べるために、流れ落ちる水全体を直径5.3cmの長いアクリルの筒で覆って実験2と同様の測定を行った。また、エタノール100%でも実験を行った。

詳細な原理

① 液滴法

液滴法は、図3のように管から流れ落ちる水1滴にはたらく力を考え、力のつりあいの式を立てて表面張力を求める方法である。水1滴の質量を m [g]、重力加速度の大きさを g [m/s²]、管の半径を r [m]、表面張力の大きさを γ [mN/m] とすると、

$$mg - 2\pi r\gamma = 0$$

という力のつりあいの式が立てられる。今回の実験では、水1滴の質量は電子天秤を用いて計測した。各濃度に対して水1滴の質量を5回計測し、その平均値を用いて表面張力の大きさを計算した。

② マリオットの瓶

今回の実験では、1.5L炭酸飲料用ペットボトルを用いた。側面下部に穴をあけ、上部注ぎ口と側面穴にガラス管付きゴム栓を取り付けた。水が流れ出ると、ペットボトル内の空気がいくらか減圧されるが、パイプ下端での水圧大気圧に等しくなる(パイプ下端での水圧=ボトル内の空気圧+パイプ下端より上の水による水圧=大気圧)。さらに水が流れ出て水位が下がっても、パイプ下端の水圧が下がり大気圧に押されて外から空気が入り込むため、パイプ下端の水圧は自動的に大気圧 p_0 に等しくなる。

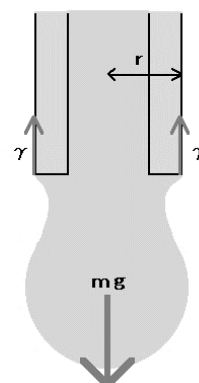


図3 液滴法

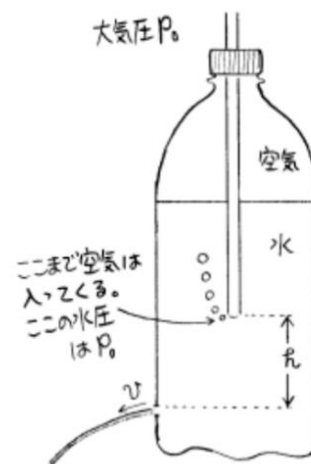


図4 マリオットの瓶

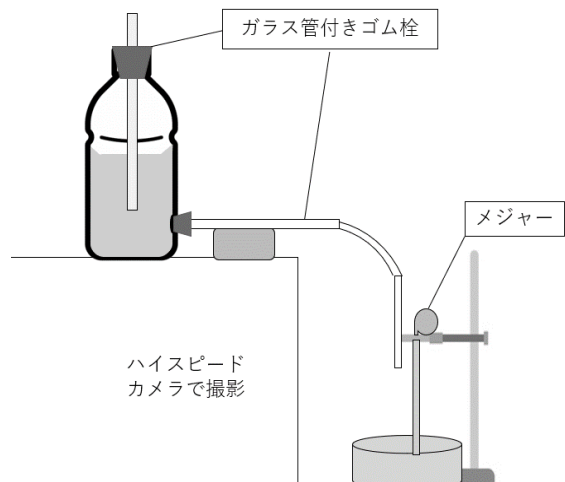


図5 実験装置

3. 実験結果

① エタノールの濃度と表面張力の大きさの関係

図6は、エタノールの濃度と表面張力の大きさの関係を表したグラフである。エタノールの濃度が大きいほど、表面張力が小さいことが分かった。図7は、実験1でエタノール濃度0%の水を用いて9回流し落としたときの、各回における水がちぎれる位置のばらつきを表したグラフである。エラーバーは短く、また標準偏差は1.06と小さかったことから、この実験器具で安定して信用できる値を得られること確かめられた。

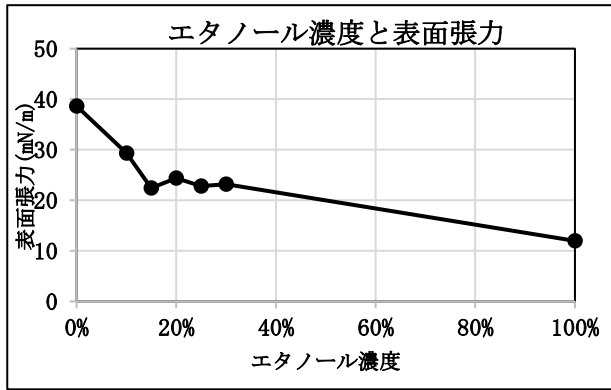


図6

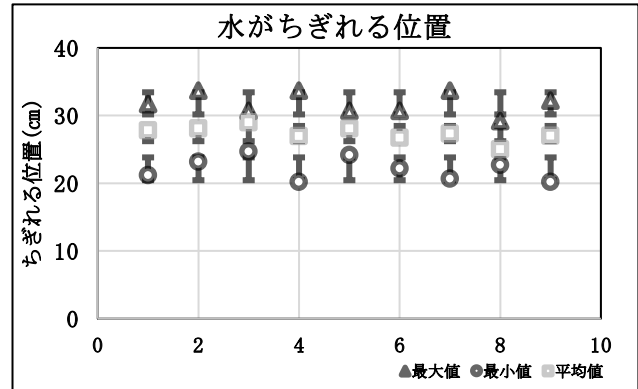


図7

② 表面張力の大きさと水がちぎれる位置の関係

図8、図9はそれぞれ、実験1、実験2でエタノール濃度を様々に変えて流し落としたときの、水がちぎれる位置と流した水の表面張力の大きさの関係を表したグラフである。まず、実験1についても実験2についても、表面張力が大きいほうが水は高い位置で早くちぎれることが確かめられた。

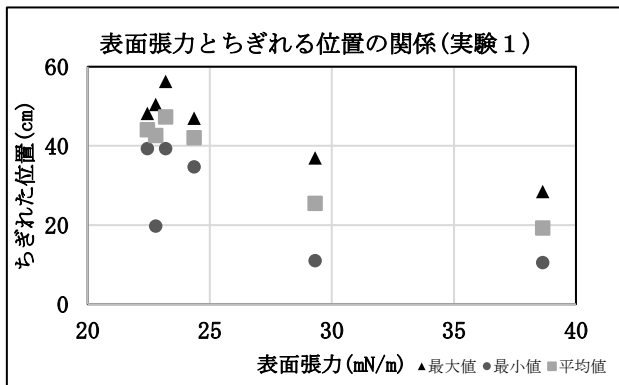


図8

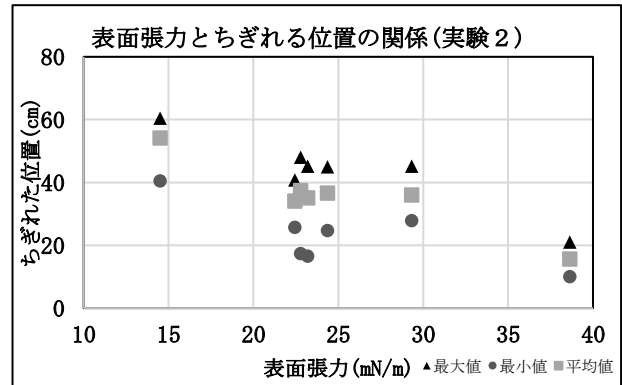


図9

③ 筒の有無

図8、図9より、実験1の筒がないときのほうが、ちぎれる位置の最大値と最小値の差が大きいうことが分かった。また、筒がないときのほうが、表面張力が小さいほど最大値と最小値の差が大きくなっていた。図10は、図8と図9の平均値を重ねて比較したものである。表面張力の大きさが30 mN/m付近のときには筒があるほうが下方でちぎれるが、20 mN/m付近の小さいときと、40 mN/m付近の大きいときには、筒があるほうが下方でちぎれることが分かった。

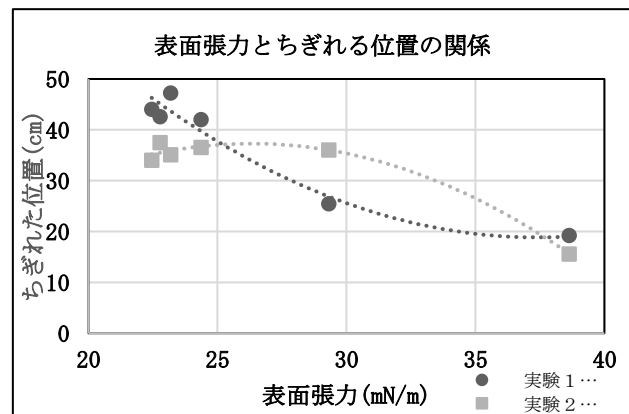


図10

4. 考察

3. 実験結果の②のとおり、表面張力が大きいほど流れ落ちる水が高い位置で早くちぎれるのではないかという仮説は正しかった。

③については、流れ落ちる水に周囲から風が当たると水流の乱れや揺らぎが起き、表面張力の大きさに偏りが生じて水がちぎれるきっかけとなるため、筒がないときにちぎれる位置のばらつきが大きくなったのではないと考えた。また、表面張力が小さいほど水の形状が不安定で、風の影響を大きく受けやすくばらつきが大きくなったのではないと推察した。

しかしながら、図 10 で表面張力が 20 mN/m 付近の小さいときはこの推察とは逆に、筒がある方がちぎれる位置が高い（ちぎれやすい）という結果となった。これは、筒があると筒に制限を受けて空気の運動性が低下し空気抵抗が大きくなることと、表面張力が小さいと流れ落ちる水の先端が丸まりにくく平らに近くなり空気抵抗を大きく受けることが合わさり、空気抵抗が原因でちぎれやすくなったのではないかと推察した。

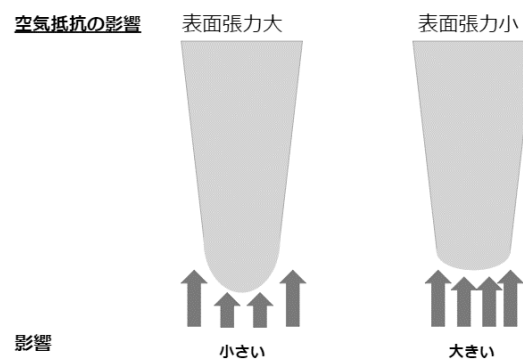


図 11

5. 今後の課題

実験 2 で風の影響を調べるために直径 5.3cm のアクリルの筒を用いたが、筒の直径が小さく空気抵抗が大きくなったのではないかという新たな要素を考慮しなければいけなくなり、検証しきれなくなってしまった。筒ではなく適当な形状の仕切りを利用するなどし、完全な対照実験をしたい。また、図 10 で見られた実験 1 と実験 2 のグラフの傾きの差は誤差であるのか意味を持つのかということや、表面張力の大きさと水がちぎれる位置の関係の式はどのようなことになるかということも検証したい。

6. 参考文献・URL

- ・「水の力～表面張力～」 秦健悟 大阪教育大学種村研究室 1988 年度卒業研究
2021/04/18 閲覧 <https://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~masako/exp/jolly/jolly.htm>
- ・「かんたん工作マリオットの瓶」 村田憲治 2021/04/02 閲覧
<http://physics.atnifty.com/pdf/001207-2.pdf>
- ・「1.5 表面張力を測る」 矢野陽子 2021/04/16 閲覧
<https://www.phys.kindai.ac.jp/laboratory/yano/page1/%E5%AE%9F%E9%A8%93%E5%8C%96%E5%AD%A6%E8%AC%9B%E5%BA%A7.pdf>
- ・「水-エタノール混合溶媒中の水素結合性に及ぼす溶存成分の役割」 北條正司、能勢晶 2008
https://www.jstage.jst.go.jp/article/bunsekikagaku/57/3/57_3_171/_article/-char/ja

7. 謝辞

本研究を進めるにあたって適切なお指導を賜り、終始温かく見守っていただきました指導教員の山口先生、並びにご助言いただきました先生方に厚く御礼申し上げます、感謝の意を表します。本当にありがとうございました。