

# 一円玉を浮かべる表面張力のはたらき

静岡県立科学技術高等学校

自然科学部 2 年 竹澤凌生 米倉大貴

## 1 研究動機

水をあふれる寸前まで加えたコップでは 1 円玉がコップの縁に寄り、他の場合では、浮かべた 1 円玉が中央付近に動く現象を知り興味を持った。この現象が起こる理由をインターネットで調べると、表面張力が関わっているとわかったが、具体的にどのような仕組みで起こるのかまではわからなかった。そこで、この現象がなぜ起こるのかを明らかにしたいと思い、研究を始めた。

## 2 表面張力とは

表面張力は力として求められるのではなく、狭義には測定によって求められる物質固有の値を指した用語である。液体表面だけでなく固体表面にもはたらき、大きさは、分子同士の結合の強さが関係すると説明される。定義は、単位面積当たりの凝集エネルギーの損失 ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ )、表面を単位面積分増加させるのに必要なエネルギー ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ ) (図 1)、表面が増加する際の内部エネルギー・自由エネルギーの増加、単位長さ当たりの力 ( $\text{mN}/\text{m}$ ) (図 2) がある。

また、表面張力によって「ぬれ」(固体表面の液体の広がり) が起こり、液体と固体の接触角  $\theta$  が  $0^\circ$  に近いと「ぬれる」、 $180^\circ$  に近いと「ぬれない」といい、液体より固体の表面張力が大きいほど  $\theta$  が小さくなり、反対だと大きくなる。

## 3 予備実験

水に浮かべた 1 円玉が他の 1 円玉や、容器の縁にくっつく表面張力のはたらきについて調べるために、1 円玉を浮かべる液体の種類、水温、水量、浮かべる際の容器の大きさ、1 円玉を一度に浮かべる枚数、浮かべるアルミ板の形を変えて実験を行った。結果から、浮かべる液の種類で 1 円玉の沈む深さが変わる、1 円玉の浮かびやすさは水量よりも水温に関係する、多くの 1 円玉が集まる際の規則性はない、1 円玉やアルミ板の沈む深さが同じときにくっつく、アルミの厚さが同じとき大きさと深さと関係しないとわかった。実験結果からこの現象について考えるうちに、そもそもなぜ 1 円玉が水に浮くのかという疑問を持った。

## 4 目的

1 円玉が水に浮く理由について 1 円玉 1 枚の場合を考え探り、水に浮かべた複数の 1 円玉が自然にくっつく理由を解明する。

## 5 先行研究

1 円玉が浮く理由について調べると、山本(2002)、林ら(2005)の 2 つの先行研究があった。先行研究ではどちらも浮力を求める際に考える「物体が水を押しのけた体積」を、1 円玉の体積だけでなく沈み込んでできた空間の体積を含めて求めていた。しかし、どちらも水面のカーブ付近の体積は無視していた。山本は、アイソスタシーの理論式を用いて、1 円玉

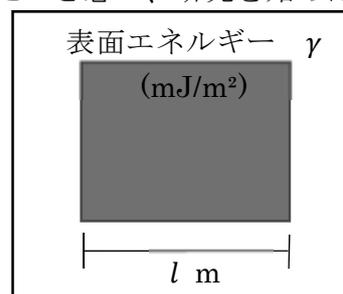


図 1 表面を単位面積当たり増加させるのに必要なエネルギー

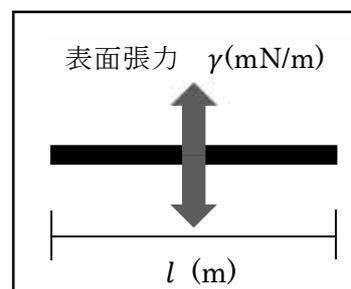


図 2 単位長さ当たりの力

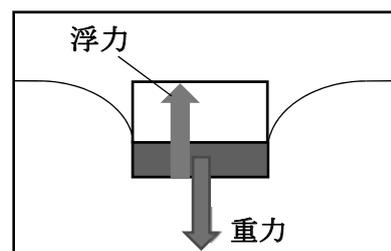


図 3 山本(2002)の結論

に働く重力は浮力によってのみ支えられており、表面張力は水の浸入を食い止めていると結論づけた(図3)。

林らは直径 20mm、厚さ 1.2mm、2.0mm のアルミ板を純水や台所用洗剤を滴下した液に浮かべた実験を行い、1 円玉に働く重力を浮力が 80%、表面張力の上向き成分による力が 20%で支えていると結論づけた(図4)。

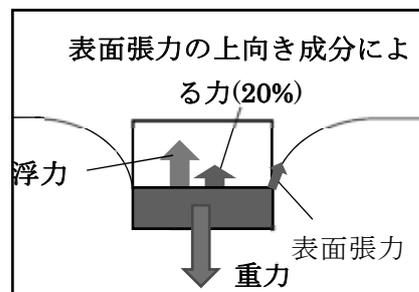


図4 林ら(2005)の結論

## 6 実験方法

### (1) アルミ試料の作成

直径 12、22mm のアルミ棒を用意し、薄切りにし、紙やすりを用いて手で削り、厚さを 0.1mm ごとに変えた(図5)。直径 20mm は 1 円玉を使用した。直径は購入時の円柱の直径とし、質量は電子てんびんで測定した。厚さは電子ノギスを用いて測定した。

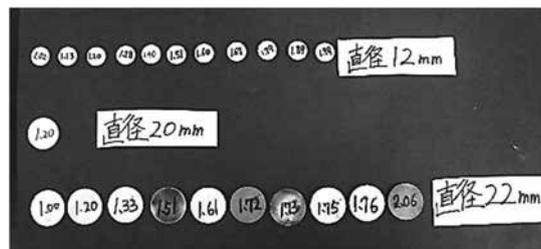


図5 作成した試料

### (2) 実験方法

1 辺が 7cm の立方体の容器に水道水を加え、ピンセットで試料を 1 枚静かに浮かべ写真を真上及び側面により撮影した。1 回撮影ごとに容器の水を入れ替え、容器と試料を洗剤で洗い、水ですすいだ。側面の写真は、試料が沈み込んでできた水面のカーブに注目して撮影した(図6)。上面の写真は、試料を浮かべることによってできた水面のカーブにより円状に曲げられる蛍光灯の光に注目して撮影した(図7)。



図6 側面の写真

### (3) データ処理

上面の写真からは、写真の試料の中心を求め、試料の中心から光の縁(外円と呼ぶ)までを電子ノギスで測定し、外円の直径とした。左右で幅が異なる際は両端の平均値を使った。試料の縁から外円までの距離を「歪み幅」と呼ぶ。歪み幅は写真上の大きさから実際の大きさに直して水面カーブの測定の際に終点として使用した。側面の写真からは、水面のカーブの写真上の座標、試料と水面の接触角  $\theta$  を測定した(図8)。

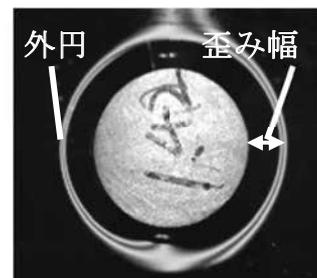


図7 上面の写真

座標測定では、写真に x 軸と y 軸をとり、水面のカーブをなぞり、x 軸方向 1mm ごとに垂線を引き、x 軸と垂線との接点から水面のカーブまでの距離を電子ノギスで測定した(図9)。接触角は、水面と試料との接点から水面のカーブに接線を引き、x 軸と接線とのなす角を分度器で測定した。

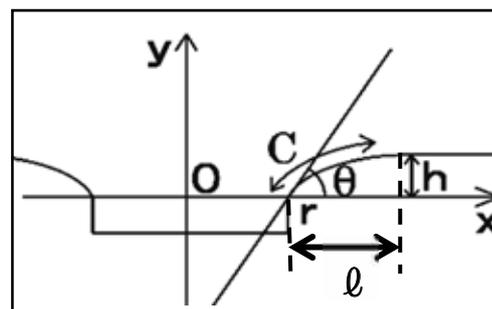


図8 測定写真模式図

### (4) 空間の体積計算

カーブの座標を excel に入力し、y-x グラフに表し(図10)、グラフの形から、 $y = \sqrt{ax}$  ( $a$ :傾き)と考えた。そこで、 $y^2-x$  グラフに表し(図11)、 $a$ を求めた。試料の中心を原点と考えると、 $y = \sqrt{a(x-r)}$  ( $r$ :試料半径)と表せ、水面のカーブの回転体が試料上部にできる空間の体積

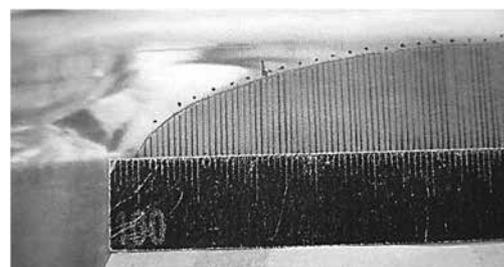


図9 側面測定写真(カーブ付近拡大)

になると考え、積分した式  $V = \frac{\pi}{a^2} \left( \frac{y^5}{5} + \frac{2y^3 r}{3} + r^2 y \right)$  ( $y$ :沈

んだ深さ)に代入して求めた。この方法によって、先行研究では無視していた水面のカーブ付近の体積も含めて求めた。求めた体積に測定した試料の体積を足し、重力加速度と水の密度をかけて浮力を求めた。

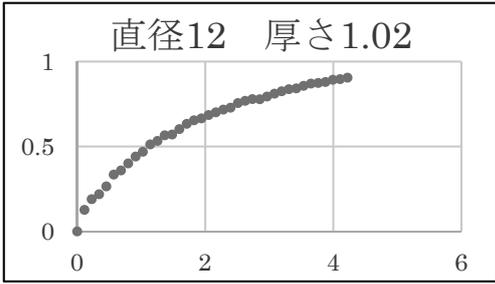


図 10 カーブ座標のグラフ  
(直径 12mm 厚さ 1.02mm)

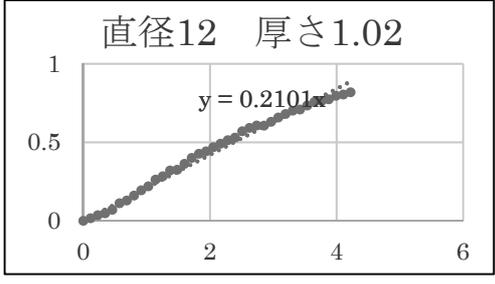


図 11  $y^2-x$  グラフ  
(直径 12mm 厚さ 1.02mm)

7 結果

(1) アルミ円板の厚さと深さの関係

図 12 は、アルミ円板の厚さと深さの関係を示したものである。グラフから、アルミ円板の厚さが厚くなるほど沈む深さが大きくなるのがわかる。また、直径が違って厚さが同じならば、沈む深さは変わらないこともこのグラフからわかる。

(2) 重力と浮力の関係

図 13 は、重力と浮力の関係を示したものである。重力が大きくなるほど浮力も大きくなるのがわかり、グラフの傾きが 0.93 であることから、重力と浮力はほぼ等しいことがわかる。また、直径ごとにとったグラフの傾きは、直径 12 mm では 0.98、直径 22 mm では 0.93 となった。

(3) 重力と表面張力による力の鉛直成分の関係

図 14 は、重力と表面張力による力の鉛直成分の関係を示したものである。このグラフから、重力が大きくなるほど表面張力による力の鉛直成分は大きくなるのがわかる。それに対して図 15 の重力と表面張力による力の鉛直成分による力の重力に対する比率の関係は直径が大きくなると比率が下がっていくことがわかる。直径 12 mm では約 40%、直径 22 mm では約 20%しかない。

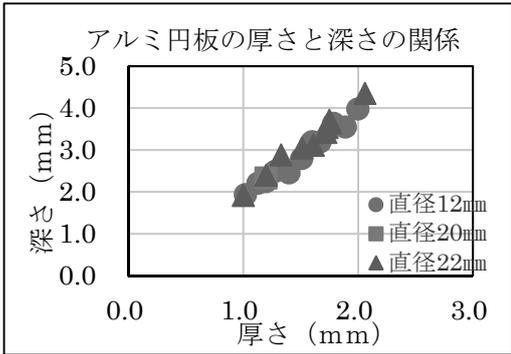


図 12 アルミ円板の厚さと深さの関係

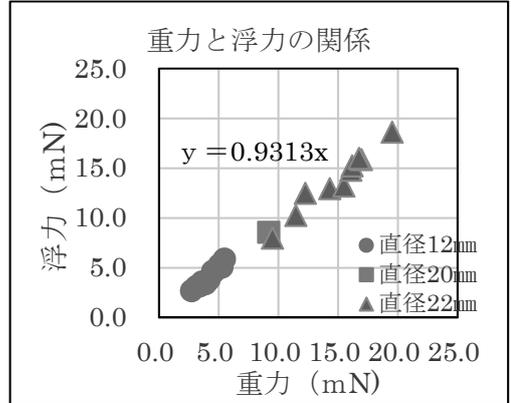


図 13 重力と浮力の関係

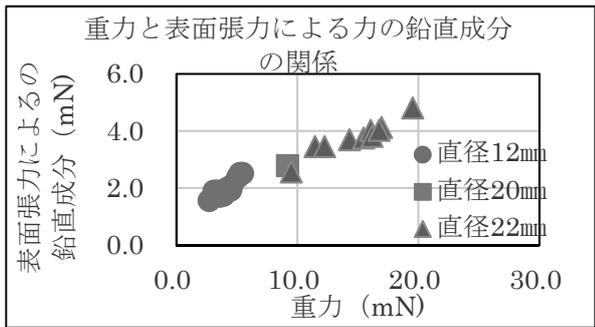


図 14 重力と表面張力による力の鉛直成分の関係

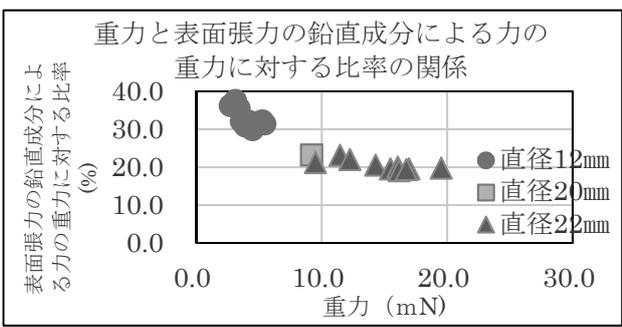


図 15 重力と表面張力による力の鉛直成分による力の重力に対する比率の関係

#### (4) 外円歪み幅と深さの関係

図 16 は深さと接触角  $\theta$  の関係の示したものである。グラフから、深くなるほど接触角  $\theta$  が大きくなることがわかる。また、沈んでいる深さが同じならば、直径によらず接触角  $\theta$  の大きさは変わらないこともわかる。それに対して図 17 の深さと外円歪み幅の関係は、アルミ円板の沈む深さが大きくなっても外円歪み幅はほとんど変わらない。さらに、円板の直径が変わっても外円歪み幅はほとんど変わらない。グラフに線を引き深さ 0 のところまで持っていくと外円歪み幅は約 3 mm となりわずかにでもアルミが沈んでいれば外円歪み幅は 3 mm はあることになる。

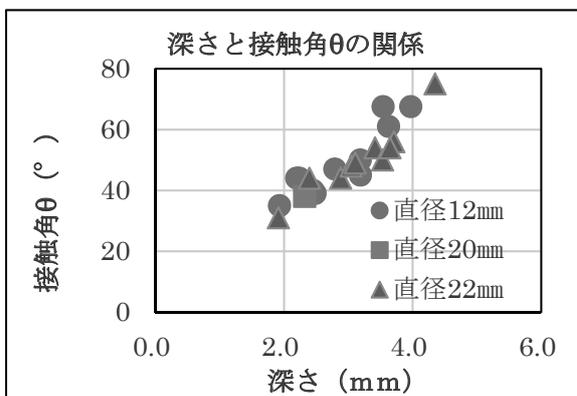


図 16 深さと接触角  $\theta$  の関係

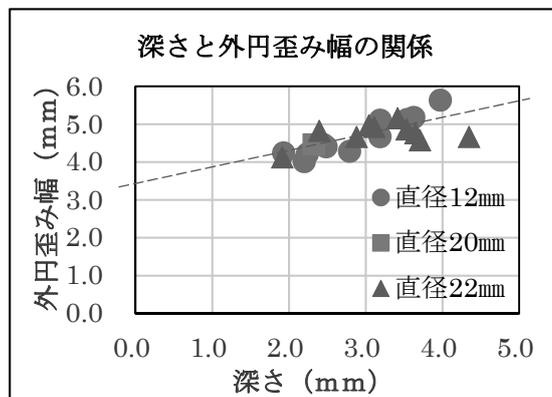


図 17 深さと外円歪み幅の関係

#### (5) 表面張力の異なる水と油の関係

表面張力の異なる水と油に 1 円玉を浮かべたとき (図 18、19) の関係を表 1 にまとめた。油の密度は、メスシリンダーとデジタルはかりを使って測定をした上で求めた値  $0.878\text{g/cm}^3$  を使用した。この表から、表面張力が小さいと 1 円玉の沈む深さが大きくなり、接触角  $\theta$  も大きくなる。外円歪み幅は水よりも小さくなる。油については円板のふちに乗り上げている様子が見られた (図 19)。

表 1 水と油の関係

	水	油
表面張力 $\gamma$ (mN/m)	72	約 40
深さ (mm)	2.68	3.3
歪み幅 (mm)	4.26	4.14
接触角 $\theta$	$42^\circ$	$56^\circ$
浮力 (mN)	9.8	9.6
重力 (mN)	9.8	9.8

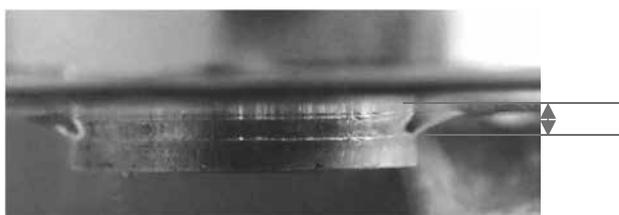


図 18 1 円玉を水に浮かべた写真



図 19 1 円玉を油に浮かべた写真

## 8 考察

### (1) 重力を支える力

今回の研究でアルミ板を浮かせている力は浮力だということがわかった。重力と浮力の関係がほぼ 1 対 1 であることから、重力が大きくなるのに応じてアルミ板上部の空間の体積を重力と同量の浮力になるまで増やしていると考えられる。それに対して重力と表面張力による力の鉛直成分の関係は重力が大きくなるほど表面張力の鉛直成分の比率は小さくなっていき常に一定の比率ではないため、重力を支えている力とは考えにくい。

## (2) 表面張力の役割

ではなぜ表面張力の鉛直成分による力が一定の比率ではないのか。その理由は表面張力の算出方法にあると考えられる。例えばアルミの厚さ 1 mm の質量は直径 12 mm では 0.28 g、直径 22 mm では 0.92 g となり約 4 倍になっている。しかし、表面張力による力は(円周  $m$ ) $\times$ (表面張力;水では 72mN/m)で求めるため約 2 倍にしかならない。そして、接触角  $\theta$  の値、はアルミ円板の厚さが同じだとほとんど変わらない。これらの関係を踏まえると、表面張力と重力の値は計算方法から重力では質量に、表面張力の鉛直成分による力では円周の長さに依存してしまい、直径が大きくなればなるほど両者の差が大きくなってしまうので、表面張力の鉛直成分の重力に対する比率は常に一定にはならないと考えられる。

では表面張力はどのような役割を果たしているのか。それは液体表面をできるだけ増やさないようにする力であり、その力は液体の内側へと働く力ではないかと考えられる。

1 円玉を液体に浮かばせると 1 円玉は下に沈んでいく(図 20)。このとき液体は液体表面と空気に接している部分を減らすためにカーブをつくる。しかし、表面張力の小さい油は、液体を内側へと引き込む力が弱く、カーブがきつくなってしまう。カーブがきついとカーブ部分の体積が小さくなってしまうので、表面張力の大きい水よりもより深い位置に行くことで体積を得ていると考えられる。これらの考察から表面張力の役割は、液体表面をできるだけ増やさないようにする力であり、その力は液体の内側へと働く力ではないかと考えられる。

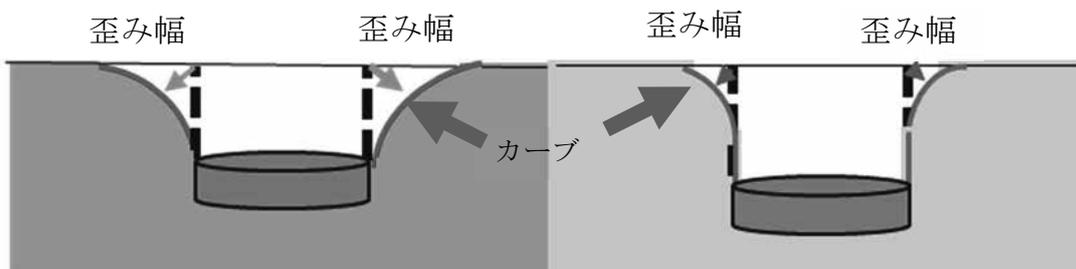


図 20 1 円玉を水と油に浮かべたときの模式図

## 9 今後の課題

今回の研究で 1 円玉を浮かべている力については分かったが、二枚の 1 円玉がくっつく理由についてはわからなかった。今後、二枚の 1 円玉がくっつく理由解明するために、1 円玉がくっつくまでの時間を調べたり、接触角  $\theta$ 、浮力などの関係を調べくっついている場合とそうでない場合で何か違いはないかを調べることで今後この課題を明らかにしていきたい。また、アルミ円板がある程度の厚さになると沈んでしまう理由についても今後明らかにしていきたい。

## 10 参考文献

- 1 山本明利, YPC ニュース, 231 (2002) ,<http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/labo/1yen.pdf>
- 2 林英子, 稲葉秀明, 千葉大学教育学部研究紀要, 第 53 巻, 354-349(2005)
- 3 渡辺 正, The Chemical Society of Japan, 47 巻 9 号, (1999),  
[http://www.jstage.jst.go.jp/article/kakyoshi/47/9/47\\_kjoooo3521008/\\_pdf](http://www.jstage.jst.go.jp/article/kakyoshi/47/9/47_kjoooo3521008/_pdf)
- 4 協和界面科学株式会社, [http://www.face-kyouwa.co.jp/science/theory/what\\_surface\\_tention/](http://www.face-kyouwa.co.jp/science/theory/what_surface_tention/)
- 5 村川享男, 金属表面と水,[http://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj1970/25/6/25\\_6\\_258/\\_pdf](http://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj1970/25/6/25_6_258/_pdf)
- 6 ドウジェンヌ, プロシヤール - ヴィアール, ケレ, 奥村剛 (訳), 「表面張力の物理学 - しずく、あわ、みずたま、さざなみの世界 -」, 吉岡書店, (2003)