

1 円玉はなぜ水に浮かぶのか

林 英子 稲場秀明

千葉大学・教育学部

Why one-yen coin float on water ?

Hideko HAYASHI Hideaki INABA
Faculty of Education, Chiba University, Japan

日常の疑問や自然の探究に関して、一般に広く説明されて分かっていると思われていることでも、本当には正しく説明されていない場合がある。本研究では1円玉が水に浮く理由について説明している書籍や、webサイトの記載について調べ、また、実際に実験を行い浮力と表面張力の寄与について考察を行った。その結果、1円玉は上向きに働く水の表面張力と、1円玉が水表面より低い位置にあることにより生じる浮力の両方の力により水面上に浮くことが分かった。

キーワード：表面張力 (Surface tension) 日常の疑問 (Chemistry of everyday life) 浮力 (Buoyancy) 水 (Water)

1. はじめに

1円玉や、縫い針、アメンボウが水面に浮いているのを、実際に、または写真等で見たことのある人は多くいるであろう。水の密度に対して、アルミニウムの密度は約2.7倍である。これが「何で浮いているのか？」と問われると、ちょっと理科の知識のある人は、「水の表面張力で」、「水の表面張力が支えてるから」、「水は、液体の中で表面張力が大きい物質だから」などと答えるのではないだろうか？では表面張力はどの様に、またどの程度、1円玉を浮かすことに対し働いているのであろうか？

身の回りで見ることができ、一般に広く説明されて分かっていると思われていることでも、本当には正しく説明されていない場合がみられる。本研究では1円玉が水に浮く理由について説明している書籍や、webサイトの記載について調べ、また、実際に実験を行い浮力と表面張力の寄与について考察を行った。

2. 既存の説についての調査

2-1 水に浮く1円玉についての説明

実際に1円玉が水に浮いているところを横から見た絵を描くとしたら、どの様に書くだろうか？ 1円玉が浮いている様子の予想される絵を、図1(a)から(e)に示した。普通に生徒に問うと、図1(a)から(c)を書くようである[1]。今回、本やインターネットのサイトを調べて見たところ、水より重い物の浮かび方の理解または説明の仕方は、ほぼ次の4つに分けられることが分かった。

A 水の上には表面張力で薄い膜が張っていて、この上に1円玉が載っているイメージによる説明[2-5]。これを図に書くと図1(a)または(b)で表される。

説明中に見られる記述で特徴的なのは、「水の表面

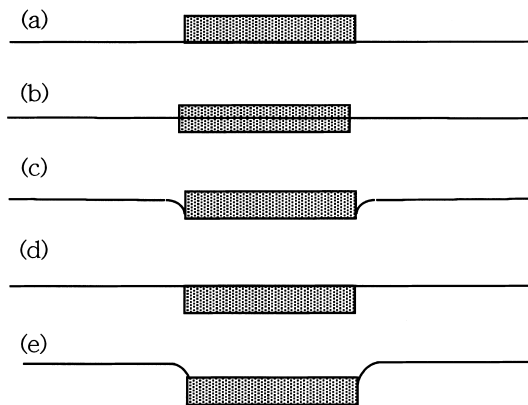


図1 水面に浮いている1円玉の予想図

には薄い膜が張っていて、それを突き破るのに力が要るのです。その力を表面張力といい、水は液体の中でもその力が大きく、1円玉を浮かせてしまうほどなのです。[4]であり、いわゆるシート上の膜が張っているような捉え方をしている。

B 上向きに働く表面張力が1円玉の重さを支えているという説明[6-11]。図に書くと図1(c)で表される。

特徴的な記述は「表面張力が固体の浮き沈みに及ぼす影響は固体の側面に水がどんな角度で接しているかによる。(中略)表面張力はいつでも浮くのに好都合に働くのではなく逆に沈める方向に働く場合もあることに注意しなければならない。そこで「表面張力が上向きの力を生じて浮く」と方向を言うべきである。」[11]であり、表面張力の働く方向の考え方についてはきちんと説明されている。

C 水面に置かれた物により変形した水が元に戻ろうとして浮かせているという説明[12-14]。図に書くと図1(c)または(e)で表される。

1円玉の周りに水が盛り上がっている事に着目しているが、「1円玉の重さでゆがんだ水面は元に戻ろう

連絡先筆者：

としていて、その力が一円玉の重さよりも大きく1円玉は沈まずに水面に浮いていられるんだ」[12]の記述に見られるように液面がゆがむと上向きの力が生じると言う、ゴム膜またはスポンジの上に物を置いているのに近い捉え方である。

D 浮力と表面張力による上向きの力の2つの力により浮いていると言う説明 [1, 15-17]。図に書くと図1(e)で表される。

1円玉に働く重力と、表面張力による力の比較を行っている。また、浮いている1円玉の表面が水面よりも低い位置にあることに着目し、浮力が働くことについて考えている。

AからCは、表面張力が1円玉を浮かせていると言う考えである。一度1円玉が水に沈んでしまうと、自分から浮き上がることはないこと、1円玉を水面に縦におくと沈んでしまうことから、表面張力が働いているから浮かんでいることは確かである。しかし、2-2で述べるように、簡単な計算で1円玉に働く表面張力よりも1円玉に働く重力の方が大きい事が分かり、表面張力で浮いていると言う説明では正しいとは言えない。

2-2 浮いている1円玉に働く力

実際に1円玉が浮かんでいるところを観察すると、1円玉表面は水面よりも低い位置にあり、横から見ると図1(e)の様になっている。これをもう少し詳しく図2に示した。1円玉の縁には表面張力 γ が角度 θ の向きに働いている。 γ の垂直成分である $\gamma\cos\theta$ が上向きに働く表面張力である。

1円玉の半径を r とすると、円周上に働く上向きの力の大きさは $|\gamma\cos\theta \times 2\pi r|$ である。表面張力による上向きの力の最大値は $\cos\theta = 1$ として、水の表面張力 γ は25℃において $72\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ [18]、1円玉の半径 r は10mmであるので 4.5mN となる。一方、1円玉に働く重力は g を重力加速度として1円玉の質量 m が1gであるので $mg = 9.8\text{mN}$ である。表面張力による力は最大値でも、重力の半分以下であるので、1円玉は表面張力のみでは浮かないことが分かる。

表面張力の他に働く力を考えると、1円玉は水面から深さ h の位置にあるので、水圧による浮力が1円玉を押し上げる向きに働いていると考えられる。図3に示すように、1円玉に働く浮力の大きさは、点線で示すような1円玉を底面とする円筒の体積($\pi r^2 \times h$)の水に掛かる重力に相当する。浮力の大きさは、水の密度を ρ で表して $g\pi r^2 h\rho$ である。これらの力の釣り合いを考えると

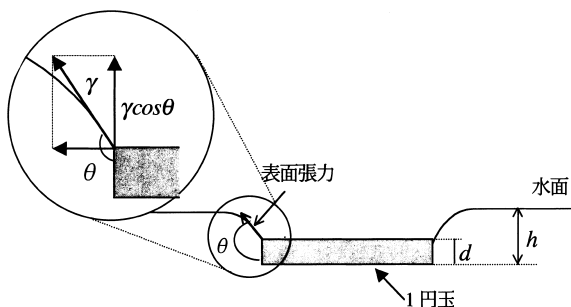


図2 水面に浮いている1円玉の模式図

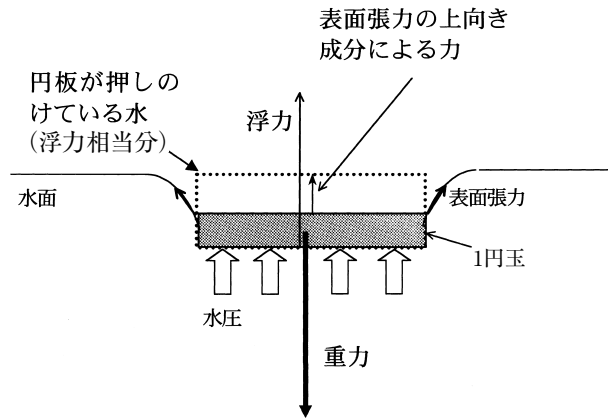


図3 水面に浮いている1円玉に働いている力

1円玉が浮いているときには、

$$mg = |\gamma\cos\theta \times 2\pi r| + g\pi r^2 h\rho \quad (1)$$

が成り立っている。上向きの力に占める表面張力による力と浮力の割合は、 θ と h の大きさを測れば決めることができる。

2-1のAからCの説明の場合は、水の表面張力が大きいことのみ注目してしまい、 mg と $|\gamma\cos\theta \times 2\pi r|$ を比較することなく、重力よりも表面張力が大きいとしてしまったところに問題がある。

2-3 1円玉の浮いている水面に洗剤を滴下したときの現象について

1円玉が水の表面張力によって浮いていると説明している2-1のAからCの説明の場合、洗剤を水面に滴下することにより1円玉を沈ませる実験を同時に行うことができ多く見られる [2-4, 7-9, 12]。このとき、洗剤により水の表面張力が低下したため、1円玉を支えられなくなったと言う説明がされている [3, 4, 7, 8, 12]。これは、表面張力が1円玉を浮かせていると説明している場合には、 $mg = |\gamma\cos\theta \times 2\pi r|$ と考えているので、ここで洗剤を加え γ が小さくなることで

$$mg > |\gamma\cos\theta \times 2\pi r|$$

となり沈むと言う説明である。または、洗剤により1円玉を水が濡らすようになり $\theta < 90^\circ$ になるため表面張力が下向きに働くようになり沈むという説明もある [9]。

実際に1円玉の浮いている水面に洗剤を滴下する場合、水で薄めた洗剤を注意深く静かに滴下した場合は、1円玉沈まない。だんだんと滴下する洗剤の濃度を上げていけば、最後には、市販の台所洗剤をそのままを滴下しても大丈夫である。

洗剤を加え表面張力が小さくなった水面上に1円玉が浮いているときには、力のバランスはどうなっているのだろうか。実際に沈んでいる深さ h 、水との角度 θ 、表面張力の値 γ を測定し、調べてみることにした。実際に実験を行うにあたっては、1円玉は縁が厚い形状をしているので、浮力の評価等に不都合が生じる。代わりに1円玉と同じ直径20mmのアルミニウムの円板を用いた。

3. 実験

アルミニウム円板に働いている浮力と表面張力の割合

を確かめる

3-1 実験方法

純水および台所用洗剤を滴下した水にアルミニウム円板を浮かべ、深さ h 、水面の角度 θ 、同じ溶液の表面張力 γ の測定を行い、(1)式に代入し表面張力、浮力の寄与を求めた。

a. 試料

直径20mmのアルミニウム円板の厚さは、1.2mmと2mmの2種類で、それぞれの質量は1.0gと1.7gであった。この円板は撥水性にするためにロウを薄く塗ってから使用した。水はミリポア社製超純水製造装置milli-Q2による純水を用いた。界面活性剤としては台所用洗剤co-op Kソフト（界面活性剤濃度21%）を200倍または100倍に水で希釈したものを用意し、これを水槽中の300cm³の水に滴下した。

b. 表面張力の測定

デュヌイの表面張力測定装置により吊り輪法で行った。まず純水の表面張力と温度を測定し、その温度に於ける表面張力の文献値を用いて、他の溶液の表面張力を相対的に求めた。

c. 水深、水面の角度の測定

アルミニウム円板の水深 h は、浮いているアルミニウム円板を横からマクロ撮影し、写真上の水深 h と円板の厚さ d を測り、実測の円板の厚さ d を基準として、比例計算で求めた。水面の角度 θ については画像から直接読みとった。

3-2 結果および考察

図4(a), (b), (c)に溶液の表面張力 γ 、水面の角度 θ 、アルミニウム円板の水深 h を洗剤の濃度に対してプロットした。洗剤濃度が増えると図4(a)に見られるように表面張力は低くなった。これにともない円板の水面の角度、水深は大きくなる傾向が見られた。1.0gと1.7gの円板では1.7gの方が水深、水面の角度は大きい。質量1.7gの円板は洗剤濃度が0.7ppmより高い濃度では浮かべることができなくなってしまった。洗剤濃度に対する水深や水面の角度の変化は、表面張力の低下を浮力と表面張力の垂直成分の割合を増加させることで補っているためと考えられる。質量1.7gの円板の濃度0.7ppmでは、角度 θ が163°で表面張力の約96%が上向きに働いている。

図4(a), (b), (c)のデータから計算した表面張力の上向き成分 $|2\pi r\gamma\cos\theta|$ と浮力 $g\rho\pi r^2 h\rho$ 、およびその合計を図5に示す。また、比較のために下向きの力である重力 mg の大きさを、それぞれの円板について図中に点線で示した。実際に測った上向きの力の計と重力はそれぞれの円板において釣り合っていることが分かる。上向きの力の2つの成分の変化の傾向から、表面張力成分が小さくなったことを、浮力の増加で補っているということが分かる。表面張力の垂直成分は、質量が1.7gの方が大きかった。円板の円周が同じであるなら質量（厚さ）は異なっても表面張力の大きさは同じであるが、水面との角度が変われば垂直成分の値は変化する。図4(b)に示すように質量1.7gの円板の方が、大きい θ になっているため表面張力の垂直成分は大きくなっている。

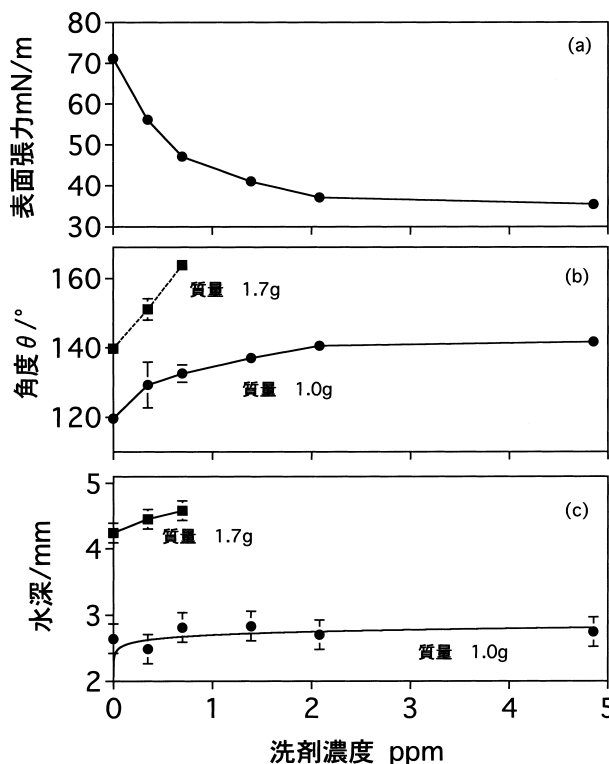


図4 洗剤濃度に対する(a)表面張力, (b)アルミニウム円板と水の角度, (c)水面からアルミニウム円板底面までの深さ(水深)

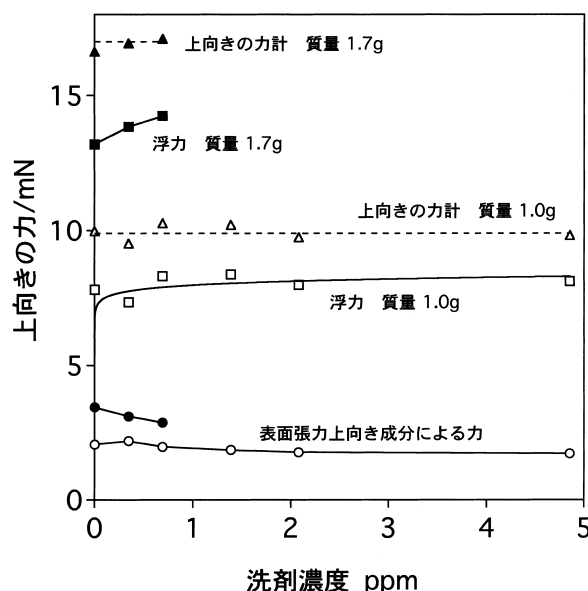


図5 洗剤濃度に対する水面に浮いているアルミニウム円板に働いている力

白抜きのは質量1.0gのアルミニウム円板、黒点は質量1.7gのアルミニウム円板についてのもの。上向きの力計における点線は、それぞれの円板に働く重力(下向きの力)の大きさをを比較のために示している。

上向きの力に占める表面張力成分の割合を図6に示す。質量が大きい方が、浮力の寄与が大きく、また、洗剤濃度に対して変化があるが、約20%が表面張力によるものであることが分かった。洗剤濃度が増加した場合、表面張力の値そのものは水の値に対して約半分になっているが、上向きの力に占める割合はそれほど大きく変化しなかった。また、今回は行わなかったが、円板の面積を大きくした場合、面積に対する円周の割合が小さくなるため、上向きの力に占める表面張力成分の割合は更に小さくになると考えられる。

3-3 実験のまとめ

直径20mmのアルミニウム円板を水面に浮かせているのは浮力が約80%で、表面張力の寄与は20%であった。洗剤を滴下しても、その割合は大きくは変わらなかった。表面張力が $35\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ であっても、アルミニウム円板は浮くことが確かめられた。

4. 浮かんでいる1円玉への洗剤の滴下についての考察

今回の実験で1円玉の代わりに同じ直径のアルミニウム円板を用いたが、洗剤の滴下に対して、1円玉と比べて非常に敏感で沈みやすかった。

実際1円玉で行った場合の表面張力、水深および角度の結果を図7に示す。アルミニウム円板では洗剤濃度5ppmまでしか行うことができなかったが、1円玉では350ppmでもまだ浮かんでいた。最初に水に洗剤を滴下するときには、100倍に薄めたものを少しずつ均等に滴下したが、350ppmではさらに洗剤の原液を滴下しても1円玉は安定して浮いていた。

図8に濃度70ppm以上の洗剤溶液上に1円玉が浮いている状態の写真と、そのモデル図を示す。図に示すように1円玉では縁に厚い部分があるため、洗剤濃度が高くなり1円玉表面に水が進入してきたときに、この縁の部

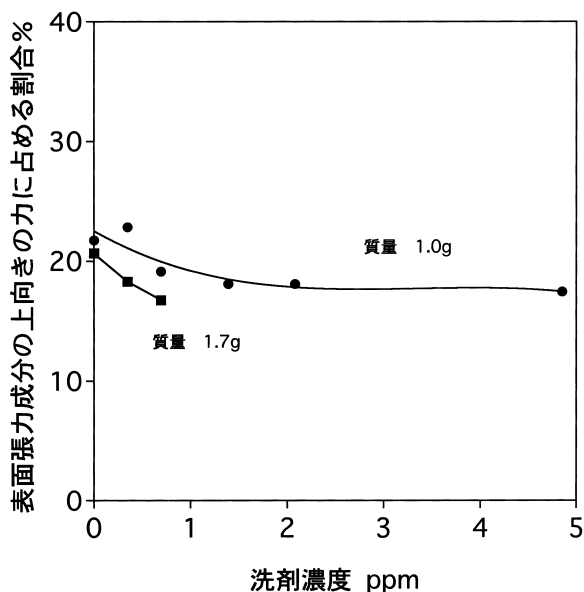


図6 上向きの力に対して表面張力による力の占める割合

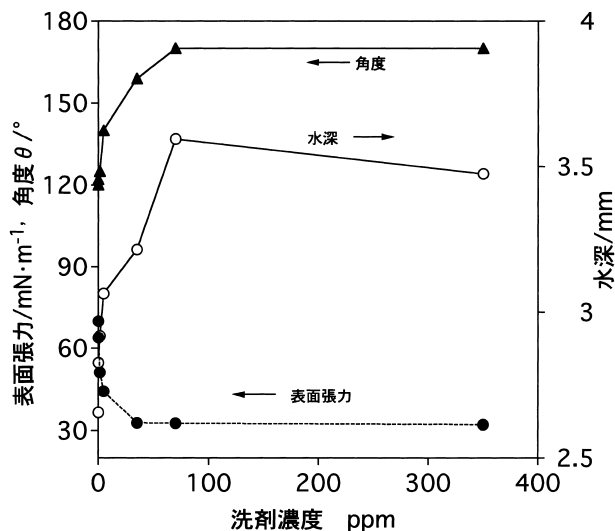


図7 水面に1円玉を浮べたときの、洗剤濃度に対する水面の表面張力、1円玉と水の角度、および水面から底面までの深さ(水深)

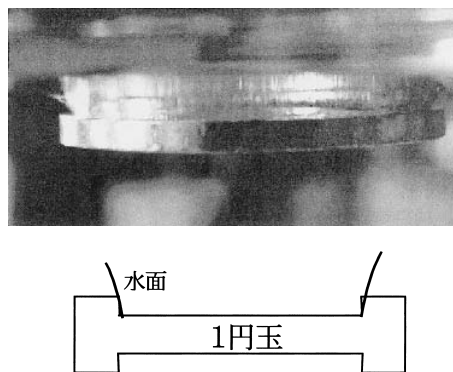


図8 洗剤濃度が70ppm以上の時の浮かんでいる1円玉の写真、および、水面と1円玉の模式図。水面が一円玉の縁の内側部分まで入り込み、1円玉の段差により支えられている様子が観察される。

分の段差で更なる水が進入がくい止められている。また、この段差において水面の角度も大きな値になり、表面張力の垂直成分を大きなものにしてしている。このため、1円玉の場合はその形状のために、水に対して浮きやすい状態であると言えるであろう。

2-3で1円玉の浮いている水面に洗剤を滴下したときの現象について、本やWEBサイトで言われている内容について少し言及したが、洗剤を滴下すると水の表面張力が小さくなるため、浮いている1円玉が沈むという説明には誤りがあると思われる。1円玉が浮いている水面に普通に洗剤を滴下した場合、次のようなことが起こるために沈むことが観察された。

1. 洗剤を垂らすと、その瞬間は垂らした位置の水の表面張力が下がる。
2. 垂らした場所とそうでない場所で、表面張力のアンバランスが生じる。
3. 1円玉が洗剤を垂らした位置と反対側に素早く動くことにより、水が1円玉の上に乗上げる。
4. 1円玉は傾き、そして沈む。

1円玉が洗剤の滴下で沈むのは動的な効果によるところが大きい。

水面上の1円玉のバランスを崩さないように洗剤を加えれば、1円玉は沈まない。しかしながら、洗剤が滴下してある状態では、徐々に1円玉を洗剤溶液が濡らすようになり、長時間経過後には沈んでしまう。

5. まとめ

山本 [17] は厚さと面積を変えたアルミニウム板について、水に浮かぶことができるかを確認、この時の水深の測定からアルミニウム板を支えているのは水圧（浮力）で、水の進入をくい止めるのが表面張力であると報告している。これにより、水の密度より大きいものが水面上に浮くことについて、鉄の船が浮力で水に浮かぶのと同様であり、水の表面張力は船の舷側の壁に相当する部分を形作っていると結論している。今回実際に実験を行い、表面張力は山本の言うように船の側面に相当する部分の役割を果たしていることが確認された。しかし、船の舷側のように単に水の進入をくい止めているだけではなく、上向きに引き上げる役割としても働いていることが確かめられた。

1円玉がなぜ水に浮いているのかと問われた場合、上向きに働く表面張力と浮力により、浮いていると答えるべきである。

参考文献

- 1) 金山廣吉, 理科実験の盲点研究, 東洋館出版社 (2000) p 55.
- 2) さいたま川の博物館HP, <http://www.river-museum.jp/school/taikennkyousitu/5hyoumenncyouryoku/5hyoumenncyouryoku.htm>
- 3) インパクかながわ館HP, <http://www.pref.kanagawa.jp/osirase/kagaku/inpaku/kanagawa/experiment/gikken67.html>
- 4) 岩手子ども環境研究所HP, http://www5.biglobe.ne.jp/~morikaze/kiroku/2003/kodomo_od/0412/1yen.html
- 5) 藤丸卓哉, 科学の handmade 41 ふしぎな大実験, 青春出版社 (1999).
- 6) 吉本市, 新物理実験図鑑, 講談社 (1973) p 47.
- 7) 化学同人HP, <http://www.kagakudojin.co.jp/kagaku/literacy/index01.html>
- 8) 宮田光男編著, 見せる! 魅せる!! 科学の実験, 裳華房 (2000) p 41.
- 9) 協和界面科学株式会社HP, <http://www.face-kyowa.co.jp/inter/inter.htm>
- 10) 日本化学会編, 身近な現象の化学, 培風館 (1978) p 143.
- 11) 鈴木智恵子, 身近な現象の物理と化学, 東海大学出版会 (1990) p 39.
- 12) 松原静郎監修, 水のすがたをおいかけよう (なんでも実験ためして発見2), フレーベル館(1999), p 34.
- 13) 板倉聖宣, 湯沢光男, 原子と原子が出会うとき (サイエンスシアターシリーズ 原子分子編③), 仮説社 (2001) p 32.
- 14) 尾崎邦宏, ポピュラーサイエンス キッチンで体験 レオロジー 裳華房 (1996), p 94.
- 15) 小川格, 学研教育情報資料センター 資料番号816. http://kids.gakken.co.jp/campus/parents/faxbox/s_naze/buturi/X1120009.pdfより入手可能.
- 16) 小野周, 考える理科10話 (岩波ジュニア新書23), 岩波書店 (1980).
- 17) 山本明利, YPCニュース, 231 (2002). <http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/labo/1yen.pdf>より入手可能.
- 18) 国立天文台編, 理科年表, 丸善 (1993).