

水面に浮く水滴の浮遊機構

佐藤 誠*

Mechanism of water droplet flotation on water surface

Makoto SATO

Structure of single bubble is classified into six types. Although bubbles are often seen in everyday life, a couple of types, a water droplet drifting on water surface and an anti-bubble, that is water droplet wrapped with air film, are regarded as unfamiliar phenomena. Mechanism of the air film stability is discussed in comparison with soap film stability. This paper presents a possible mechanism that sliding and rotation of a water droplet stabilize floating droplet and anti-bubble with preventing air films from losing their thickness. Transporting air by capillary wave on the droplet surface is also a candidate of the stabilization mechanism. Step-by-step decrease of diameter in collapse of a droplet is explained by the concept of capillary wave.

Key words: bubble, droplet, anti-bubble, surface tension, capillary wave, drift, collapse

1. はじめに

「ゆく河の流れは絶えずして、しかも、もとの水にあらず。よどみに浮かぶうたかたは、かつ消え、かつ結びて、久しくとどまりたる例なし」と方丈記にあるように泡(うたかた)は無常を表す代名詞である。泡は不安定なもので長時間その形状をとどめることのない、はかない存在であると認識されている。物理学の観点からは、泡は非平衡、ソフトマターの研究対象として比較的単純な系を我々に提供してくれる身近で安易な存在である。しかし、近年、泡の崩壊にともなう音響発光¹⁾、熱マランゴニ対流による濡れない液滴²⁾、気泡による船舶運航の摩擦低減³⁾、液体ズームレンズ⁴⁾など、泡あるいは泡現象の本質である界面張力に関連する興味深い現象に注目が集まっている。泡に関連した研究は、現象解明への興味だけでなく、実用上も多くの可能性を秘めていることは広く認められているところである。

著者は、マイクロなスケールでは一次元力である界面張力が、体積力である重力や電磁力、あるいは平面力である静電気力に比べ相対的に強い影響を及ぼすことに着目して、界面張力を駆動力とするマイクロマシンを提案してきた⁵⁾、⁶⁾。例えば、電解液中の水銀滴の界面張力は電圧で制御できる。これは水銀滴表面に電気二重層が形成され、印加電圧により単

位面積あたりに充電される電気エネルギーが変化することに起因する。電圧に勾配があるとそれが界面エネルギーの場所による勾配となり駆動力が発生し、水銀滴を電氣的に駆動することができる。また、気液界面の界面エネルギーはエートベッシュの実験式で表されるように温度の上昇とともに減少するため⁷⁾、温度勾配を与えることで液滴あるいは気泡を駆動することができる。縁日のおもちゃ、樟脳舟は船尾から水面に溶け広がる樟脳が船尾水面の界面張力を低下させ、その結果として前進する。「酒の涙」として知られる輸送現象は同じく水の界面張力がアルコール濃度に依存することに起因している。このように界面張力の勾配に起因する流体の輸送現象は、電界、温度、濃度などのパラメータで制御可能である。実用上は、これらのパラメータの操作で持続的、再現的に輸送現象を制御できるかが設

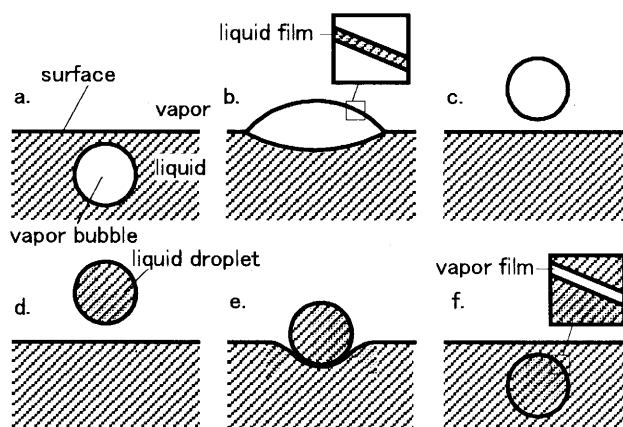


Fig. 1 Six types of single bubble

原稿受付 平成17年8月31日

* 一般科目 satom@tsuyama-ct.ac.jp

計の要点となる。

本稿では、液滴あるいは気泡の輸送現象の詳細を説明するにあたり、まず基本となる泡についての認識を整理する。次に、液滴の安定性について問題点を明らかにし、今後の研究方向について提案したい。論点を具体的にするため、「水面に浮く水滴」を考察対象として取り上げるが、以下の議論は液体の種類に関係なく一般的な液滴、液面に共通する問題である。

2. 泡の分類

日本語では単一の泡と集合体の泡の両方を泡という単語で表すが、英語ではbubbleとformで区別する。後者は、シェービングフォームのように形を維持したり弾力性を持つなど、流動性の気体と液体で構成されているが、本稿では単一の泡、bubbleを取り扱う。

泡あるいはシャボン玉の液膜が形成されるのに表面張力が関係することは周知のことだが、それは、シャボン玉を丸くすることに主に関係するだけで、表面張力の値と液膜の安定が直接関わりを持っている訳ではない。純水では泡は発生してもすぐに消えるが、洗剤を加えると泡の寿命は長くなる。洗剤を加えると表面張力が増すと勘違いしている人が多いが、実は表面張力は水の場合の数分の一に減少する。表面張力の大小がシャボン玉の寿命を決めている訳ではないことを理解してほしい。

一般に泡というと、グラスに注いだシャンパンに立ち上る気泡、水面に漂う気泡を意味する(Fig.1a, b)。この気泡が水面から離れるとシャボン玉となる。つまり、液体の膜に囲まれた気体である(Fig.1c)。これら三様の泡の形態は、日常的に頻繁に目にするため通常あまり不思議には思われていない。

雨粒のように空中に浮いている水滴を考えると、こ

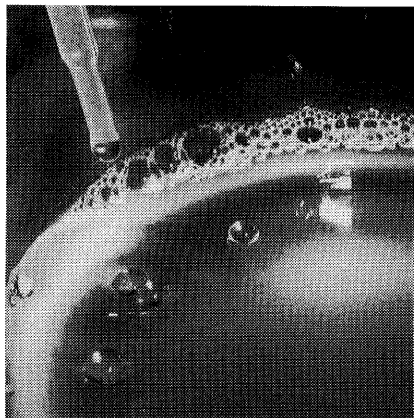


Fig. 2 Floating droplets on water surface

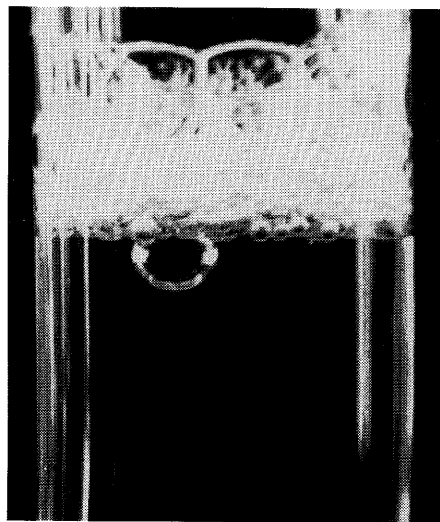


Fig. 3 An anti-bubble (a water droplet wrapped with air film)

れは、空気の中の水の泡とみなすことができる(Fig.1d)。つまり、水中の気泡の逆の形態とみなせる。それでは、この水滴あるいは水の泡が水面に接するとどうなるかを考えよう。

水滴が水面に接すれば水面と一体化して水滴は消えんことを考えるのが自然であろう。しかし、水中の気泡が水面に達すると、即座に空中に消えてしまうかという、そうではなくしばらく上半分がシャボン玉状態で水面に漂うことが多い。この現象を気体と液体を入れ替えてみると、水滴が水面に漂うことが期待される(Fig.1e)。実際この現象はコーヒードリッパーや濾過式浄水器などでよく観察される現象である。おそらく多くの方が水滴が水面を転がる様子を見て不思議に感じたことがあると思う。Fig.2は、水面に浮かんでいる水滴の写真である。水には洗剤を混入してあり、スポイトで水滴を水面に滴下することで発生させた。滴下する高さが適当な条件で発生確率が高くなる。界面活性剤の水への添加は発生確率を高めるが必要不可欠という訳ではない。純水であっても同様の現象は起きる。

さらに、この水滴が水中に入り込むことを考えると、通常のシャボン玉の液体と気体の入れ替わった構造物が存在しうること気付く。つまり、空気の膜に囲まれた水滴である(Fig.1f)。これも実は日常的に頻繁に発生している現象であるが、存在に気付く人は稀である。この現象は逆シャボン玉とか反シャボン玉と呼べるようなものである⁸⁾。Fig.3は、試験管の中に洗剤を添加した水を入れスポイトで水滴を滴下し発生させた逆シャボン玉の写真である。水面に通常の気泡が浮かんでいるのが白く見え、その下に泡が一つ沈んでいるのがわかる。これが気体で囲まれた水滴の泡である。一見するとFig.1aの水

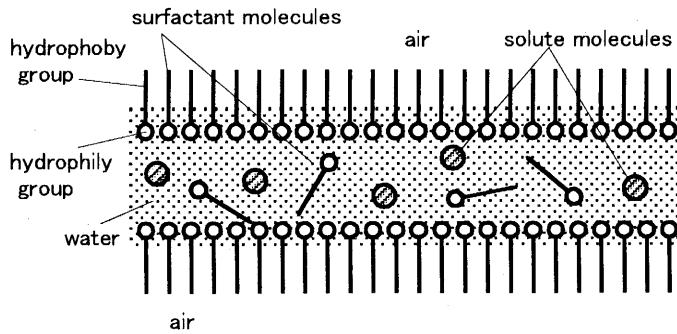


Fig. 4 Structure of soap film

中の気泡のように見えるが、もしそうだとすると水面に浮く泡の下にこの大きさで留まることはできない。さらにちょうどシャボン玉のようにこの逆シャボン玉も表面が干渉色を示し、取り囲む空気は膜厚がマイクロオーダーの薄さであることがわかる。このようなことは水中の気泡には観察されない。

逆シャボン玉は通常のシャボン玉と同じくしばらくのあいだその形態を保つことができる。多くは数秒ともたないが稀に数分間安定なこともある。通常のシャボン玉は蒸発や重力による液の下方への移動などで石鹸膜が薄くなり最終的に膜に穴が開くと膜の表面張力で穴が拡大して破損する。比較的寿命が長いのは、石鹸膜の膜厚を維持する機構が存在するからである。

3. 石鹸膜の安定機構

石鹸膜の安定機構には、粘性、浸透圧、表面張力が関わる。シャボン玉の膜はFig.4に示すように、内外面を界面活性剤分子が隙間なく覆った構造である。もちろん力学的な強度は無視できるほど小さいが、膜内部の液体が流動する際、この狭い流路は大きな抵抗の原因となる。一般に膜状の流路の厚さを t 、液体の粘性率を μ 、圧力勾配を dP/dx とすると、膜断面の単位奥行き当たりの流量 S は、

$$S = \frac{t^2}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

となり、膜厚の自乗に比例するため、薄くなると急激に流動性が阻害される。したがって、シャボン玉の場合、重力により膜内の液体は下方へ流動する圧力を受け、上部の膜厚は薄くなるのであるが、薄くなるにしたがい液の流動は抑制され、その結果、膜が破損するほどの薄さに達するまでに時間がかかることになる。石鹸液にPVAなどの粘性を上げる液体を混入するとシャボン玉の寿命が増大するのはこの

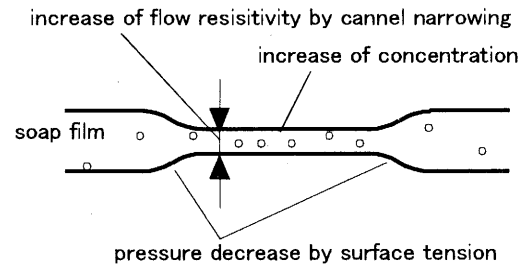


Fig. 5 Mechanism of soap film stability

原理による。

2つ目の機構は液の蒸発による濃度勾配が引き起こす液の流動である。これは浸透圧とみなすことができる。液の蒸発で膜厚が薄くなった箇所の液の濃度は増すので周囲の濃度の低い液体から液が流動する。つまり、膜厚を維持する機構となる。浸透圧の近似式(ファント・ホッフの式)より、濃度勾配 dc/dx のとき圧力勾配 dP/dx は、

$$\frac{dP}{dx} = -RT \frac{dc}{dx} \quad (2)$$

と表せる。ここで R は気体定数、 T は温度、 c は溶質のモル濃度である。半透膜のように溶質分子の移動が禁止されるわけではないので、浸透圧と全く同じ扱いはできないが、濃度勾配により溶媒分子が濃度の高い箇所、この場合膜が薄くなった箇所に流動することは理解できる。シャボン玉の干渉模様を美しくする目的で砂糖を添加することが行われるが、これは、膜が薄くなった際の膜厚の斑をこの浸透圧による機構で抑制しているのである。

さらに、ある箇所で膜厚が薄くなると、Fig.5に示すようにその箇所の圧力が膜の変形により表面張力を介して減じる。そのため周囲から液が流動し、膜厚が回復する。このように通常の石鹸膜では、膜厚の維持機構が働き、比較的長い泡の寿命が実現され

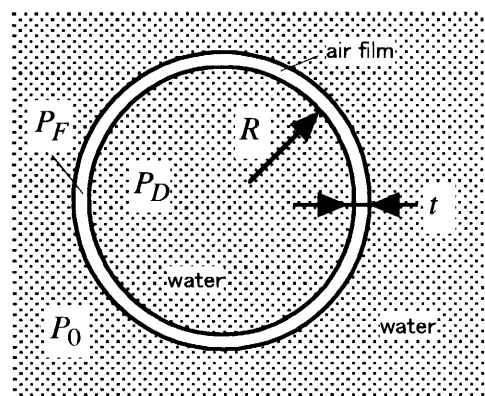


Fig. 6 Structure of anti-bubble

る。

4. 逆シャボン玉の安定機構

翻って、本稿で扱う水面に浮く水滴 (Fig.1e) および逆シャボン玉 (Fig.1f) の空気の膜は、その安定機構が不明である。Fig.6に逆シャボン玉の構造を示す。気液界面の表面張力を γ とすると、内部液滴の圧力 P_D は、外部液体の圧力を P_0 として、

$$P_D - P_0 = 4\gamma / R, \quad (3)$$

空気膜の圧力 P_F は、

$$P_F - P_0 = 2\gamma / (R + t) \quad (4)$$

となる。通常のシャボン玉に見られる3つの機構のうち粘性による膜厚の減少の抑制効果は存在するが、液体と気体では粘性率が極度に異なるので、液膜からなる石鹸膜のような膜厚が薄くなったときの流動に対する大きな抵抗は期待できない。したがって、シャボン玉と同じような時間スケールでの寿命は説明できない。

逆シャボン玉では空気の泡の中に水滴が入っている状態なので、重力で中の水滴が空気の泡の底面に接触して破損することになる。したがって、下部の空気の膜が薄くなることが何らかの理由で抑制されていることになる。

5. 水面に浮く水滴の寿命

水面に浮く水滴を観察すると水滴が水面を走ると寿命が長いことに気付く。また、水面に振動を与えると水面の波に漂うようにして比較的一所に留まって水面に浮き続けることができる。うまく調整すると数分間に渡り直径1cm程度の水滴 (寿命が長いので複数の水滴が集合して大きな水滴に成長する) を2分間近く維持することができる。おそらく、空気の膜厚を維持する方法を解明すれば、定在波による液滴の浮遊位置制御と組み合わせて半永久的に水滴を維持することも可能ではないかと思われる。これが実現すれば、 μ TASや微量流体制御に望まれる液滴輸送の新たな方法となりうる。

上記の水面に浮く水滴の観察から推測できることは、空気の泡とは異なり、水滴の場合、本体に大きな質量が存在することである。そのため、水滴は水面を転がるができる。水面に浮く空気の泡が慣性による運動をすることがないのは、その質量が液膜の粘性抵抗に比べて圧倒的に小さいためである。逆に水滴の場合、空気の粘性による抵抗は慣性力

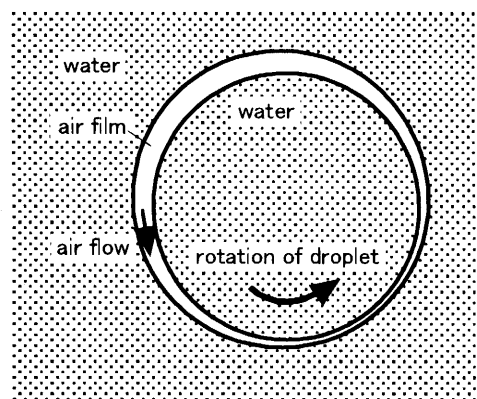


Fig. 7 A possible mechanism of air film stability

に比して無視できる。すなわち、水滴は水面を空気のベアリングで滑走しているのである。このように考えると、水滴を水面から隔離している空気の膜厚を維持する機構は水滴の運動が関係していると推察される。水面を水滴が滑走すると常に前方から新たな空気の膜が供給され、膜厚が維持されると考えられる。

さらに、水滴が滑走する場合、空気膜の抵抗で液滴が進行方向に回転することも考えられ、これは空気の膜を常に新しく供給することになるので膜厚の維持機構として機能している可能性が高い。水面に振動を与えた場合も水滴がゆらゆらと水面を漂い、同様のことが発生しているものと思われる。

逆シャボン玉の場合は、滑走ということはないので、考えられる機構は、水滴の回転である。すなわちFig.7に示すように、空気の泡の中で水滴が回転して、これが底部の空気の膜厚を維持していると推測される。この機構に従うと内部液滴の回転方向が寿命に関係することが予想される。この説明は水面に浮く水滴の場合と同じく推測の域を出ないが、水滴内部の流動を可視化して観察すれば確認することができる。これは今後の課題である。

6. 表面張力波による維持機構の可能性

最後に、空気膜厚の維持機構としてもう一つの可能性があることを指摘したい。水面に浮く水滴は崩壊する際に数回に分けて段階的に小さくなることがある。これを水滴の多段崩壊と呼んでいる。水滴の崩壊では、水滴底部の空気膜が薄くなり水面に接触すると水滴の内部圧力のため接触した水面に内部の水が排出され径が小さくなり、最終的には消滅する。この多段崩壊の場合は、おそらく液滴が小さくなると液排出の繋がりが断たれる機構が存在すると

考えられる。

その有力な候補は液滴表面の表面張力波である。水面の波には復元力として重力が主たる原因となる重力波と表面張力が主たる原因となる表面張力波が存在するが、波長が1.8cm付近で両者の影響が拮抗する。水滴の径は高々数mmに過ぎず、その表面に存在できる波を考える際に重力は全く無視して構わないので表面張力波のみを考慮すればよい。表面張力波の分散式は、速度 v 、波長 λ とすると、

$$v = \sqrt{\frac{2\pi\gamma}{\lambda\rho}}, \quad (5)$$

となる。ここで、 γ は表面張力、 ρ は水の密度である。表面張力波の振動数 f は、 $f = v/\lambda$ より、

$$\lambda = \left(\frac{2\pi\gamma}{\rho}\right)^{1/3} f^{-2/3}, \quad (6)$$

である。これより、例えば、10kHzの振動数では波長は、0.17mmと算出され、100kHzでは37 μ mとなる。この様な振動数と波長の波が水滴の表面、あるいは、水面に存在している可能性は高い。水滴が水面に接触して体積を失うと、それに伴って表面積が減じるが、振動の全エネルギーが保存されるとすると、単位面積当たりの波のエネルギーは水滴径の縮小に伴って増大することになる。水滴の表面積は水滴径の自乗に比例し、波の振幅の自乗が波のエネルギーに比例するので、結局、水滴の径に反比例する形で波の振幅が径の縮小とともに増大することになる。この表面張力波が、対向する水面となす空隙に振動に伴って狭い箇所、広い箇所を作り、空気膜を輸送している可能性がある。そのため、水滴が縮小すると薄くなった空気の膜を再生するするだけの振幅になり、水排出の接続が断たれ、しばらくまたその水滴の大きさを保つのではないと思われる。なお、振動が水滴の固有振動に一致すると振動は定在波となるので、空気膜の輸送は期待できないように思われる。著者は進行波によるポンピングが空気膜を維持すると考えているが、水面の振動と水滴表面の振動が不整合の場合、すなわち、波長や振動数が異なると、部分的には空気膜の輸送が行われる可能性もある。球形の水滴表面の振動は球面調和振動として扱えるが、どのような振動モードが関係しているかは現時点では全く不明である。これも推測の域を出ないのであるが、水面に振動を与えると水面に浮く水滴の寿命が延びる経験からも、水面の表面張力波が空気層の維持に何らかの役割を果たしているこ

とが推測される。液滴表面や水面の振動解析が望まれるが、レーザービームの散乱分光による計測が有効ではないかと考えている。このような測定も今後の課題である。

水滴表面や水面の振動が空気膜の維持に関係している現象が確認できれば、水滴の回転といった表層空気の引きずりによる空気層の供給とは別に、水面の波が引き起こす空気のポンピング輸送が水滴の浮遊に一役買っていることになり、水滴を水面に静止した状態で浮遊させ続けることを可能にする技術につながることを期待される。

7. おわりに

以上、説明してきたように、水面に浮く水滴の浮遊機構に関しては、観察から推測されるいくつかのメカニズムを提案できるものの、未だ明確には説明できる状況にない。通常のシャボン玉の石鹸膜に見られるような膜厚の安定機構は、空気の膜には期待できないことを説明した。それに代わって、水滴の滑走、回転による水面表層空気の引きずりによる隔離空気層の維持の可能性について論じた。また、水滴の多段崩壊の観察より、水面の表面張力波が空気をポンピングして、隔離空気層を維持する可能性についても言及した。

今後、ここで考察した浮遊機構を検証するため、時間分解能を高めた観察、水面への振動の付与と周波数や強度と液滴寿命の関係、さらに表面張力の値をパラメータとした測定を行う予定である。さらに、振動の効果が明らかになった場合、表面張力波の振幅や振動数、波長といった測定、液滴表面での振動モードなどを実験的に明らかにし、空気層のポンピングによる供給機構を確認したい。

参考文献

- 1) M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse: Rev. Mod. Phys. 74 (2002) 425
- 2) P. Dell'Aversana and G. P. Neitzel: Physics Today, Jan., 51 (1998) 38-41
- 3) URL: http://www.nmri.go.jp/index_e.html, 例えば, Y. Kodama: Seawater98, July, 1998
- 4) URL: <http://www.extra.research.philips.com/pressmedia/pictures/fluidfocus.html>, March 3, 2004 (Royal Philips Electronics)
- 5) M. Makihara, M. Sato, F. Shimokawa and Y. Nishida: J. Lightwave Technol., 17, 1 (1999) 14-18
- 6) M. Sato: IEICE Trans. Commun., E77-B (1994) 197-203
- 7) 小野周: 表面張力, 共立出版, (1980) 64
- 8) S. Dorbolo, H. Caps and N. Vandewalle: New J. Phys. 5 (2003) 161