

水面に浮く水滴の安定性

佐藤誠*

Stability of water droplets floating on water surface

Makoto SATO

Collapse of water droplets floating on water surface and anti-bubbles is analyzed with a high speed video camera. Stability of the air film suspending the water droplet from water surface is discussed with a concept of surface energy. A micro hole in the air film will shrink and vanish spontaneously if the diameter of the hole is less than the film thickness, and the energy barrier of the bubble collapse is a function of square of film thickness. The air film that suspends the water droplet may be unexpectedly stable.

Key words : Surface tension, anti-bubble, air film, stability

1. はじめに

ドリッパーでコーヒーを淹れるとき、抽出されて滴るコーヒーの滴がサーバーに溜まったコーヒーの液表面上に留まって漂うのを見ることができる。同じ種類の液体が互いに接しているにもかかわらず一体化することなく分離したまましばらく液面を滴が漂うのは実に不思議である。水滴がきらきらと光って見た目も美しいこの現象は昔から多くの物理学者の興味を引いてきた¹⁾。しかし、身近で取るに足りない現象にすぎないためか、現象の詳細な解明は未だに行われていない状況にある。

互いに混ざり合わない流体が接している界面には6種類の泡が存在する²⁾。空気と水を例にとれば、水面から離れた水中の空気の泡、水面に漂う泡、水面から離れ空気中に浮かんだ泡、すなわちシャボン玉。残りの3種類は、水と空気を交換した構造で、空中の水滴、水面に接して漂う水滴、水中に沈んだ薄い空気膜で覆われた水滴である(図1)。後者から2番目が本稿で主に扱う水面に浮く水滴である。また、最後の形態は逆シャボン玉と呼ばれるもので、近年子供向けの科学実験などで注目を集めている³⁾。

筆者は先の報告で、水面に浮く水滴、および逆シャボン玉は薄い空気の膜で水面、あるいは周囲の水から隔離された水滴であることを説明し、空気膜の厚さ維持機構について考察を行った⁴⁾。具体的には、静的な粘性、動的な空気膜の引きずり、表面張力波によるポンピングの可能性を示唆した。これらの機構が実際に働いていることの実証には至ってい

ないが、高速度カメラを用いた水滴や逆シャボン玉の崩壊の観察から、水滴を隔離している膜の安定性について知見が得られたので報告する。

2. オイル膜による水滴

水面に振動を与えたり、水滴が水面を走っていたりするときは水滴の寿命は長い、静的な状態では寿命は極めて短い。これは、静的な状態では新たな空気の供給が無く空気膜が薄くなるのを粘性抵抗で寿命を延ばしているだけになるからである。空気の粘性は低いのでしたがって寿命も短い。

空気の代わりに粘性の高い液体を用いれば静的な状態でも水滴の寿命を延ばし観察がしやすくなると期待された。そこで、シリコーンオイル(PDMS)を水面と水滴の隔離膜とすることを試みた。水面にシリコーンオイルを滴下すると、水よりわずかに密度が低い($\rho = 0.99\text{g/cm}^3$)ので水面に浮いて円形の凸レンズ状の島を作る。このオイル滴の中央にバランスを取りながら水滴を滴下すると、図2に示すようなオイル膜で隔離された水滴を作ることができ

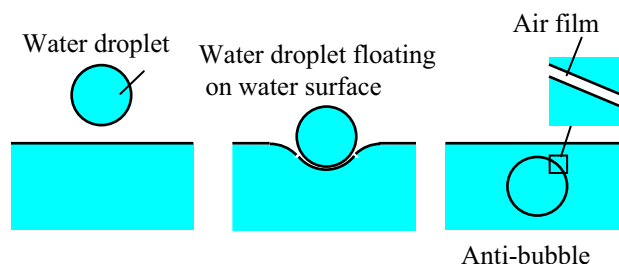


Fig. 1 Three types of water droplet (anti-bubble).

原稿受付 平成18年8月31日

*一般科目 satom@tsuyama-ct.ac.jp

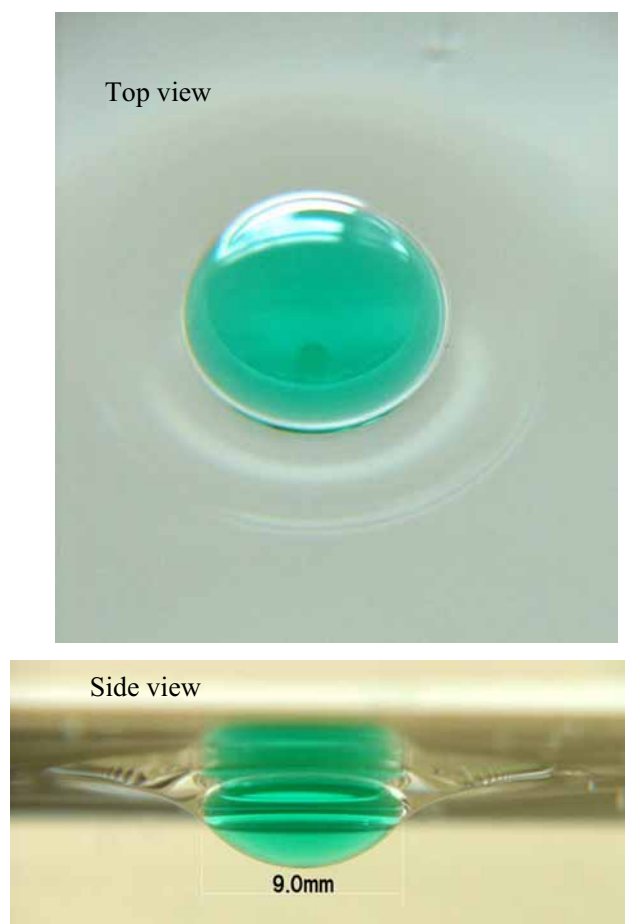


Fig. 2 A floating water droplet wrapped with oil film.

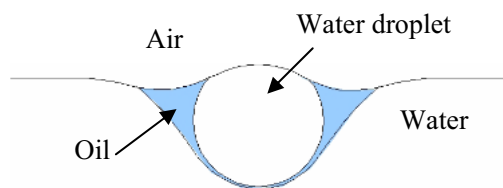


Fig. 3 Cross sectional structure of the floating water droplet wrapped with oil film.

る。水滴の形を判りやすくするため水滴の水は着色してある。水滴の断面構造は図3に示すとおりである。

予想したとおり水滴の寿命は大幅に延び、数分から数時間に増加した。また、水滴の大きさも通常の空気膜による隔離では達成できない直径数cmのサイズを容易に実現できることがわかった。

図4は水滴の崩壊の様子を高速度カメラで撮影する系を示したものである。アクリルで作製した矩形

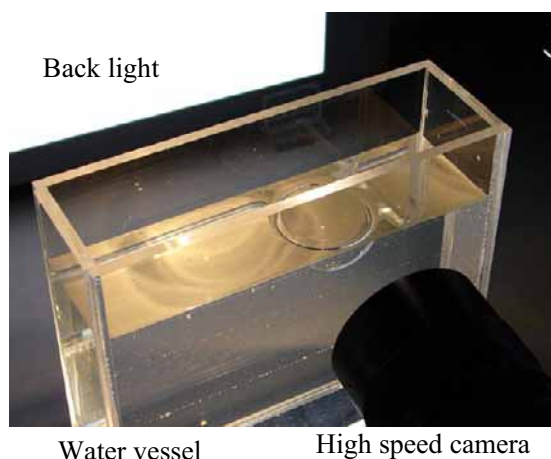


Fig. 4 Set-up for taking a high-speed video movie.

の水槽の後方に面状の光源を置き、影絵のようにコントラストをつけて撮影した。撮影は1/1000秒間隔で行った。図5に隔離膜が破壊するときの様子を時系列的にピックアップして示す。各画像間の時間間隔は10msである。重力の関係で最も膜が薄くなる箇所は最下点であるが、この最下点から破壊が開始されることは稀である。図5の例のように最下点から少し上方にずれた辺りから壊れることが一般的である。一旦、膜のどこかに穴が開くと、膜はもともとの形を維持したまま穴が拡大するように縮んで最終的に液面に達することがわかる。しかし、残念ながら現時点では崩壊までの寿命を決定している要因を抽出できていない。なお、シリコンオイルの粘性を50cSt, 100cSt, 500cStと変えて観察してみたが寿命に明瞭な差は見られなかった。これは予想に反する結果である。オイルの密度が水に近く浮力を受けないこと、また、薄い膜になったときの内部でのオイルの流れが非常に緩やかであるため粘性の依存が明瞭でなくなるのかもしれない。この点に関してはさらに考察が必要と思われる。

3. 逆シャボン玉の崩壊

逆シャボン玉は静的な状態でも数分間の寿命を持つ。図1に説明したように逆シャボン玉は、水面に浮く水滴が水中に沈んだもので、基本的には同じものであると認識されるが、水面に浮く水滴に比べて寿命が桁違いに長いというのは奇妙なことである。内部の水滴が回転している可能性を指摘したが⁴⁾、破壊の様子を観察した結果からは、単純に粘性抵抗による空気膜の厚さ減少の遅れと推測される。内部液滴が回転しているとすれば、球形からずれた形になると期待されるが、少なくとも形成直後の振動が収まった後は、変形はみとめられない。また、回転しているとすれば、膜厚が最も薄くなる箇所は最下

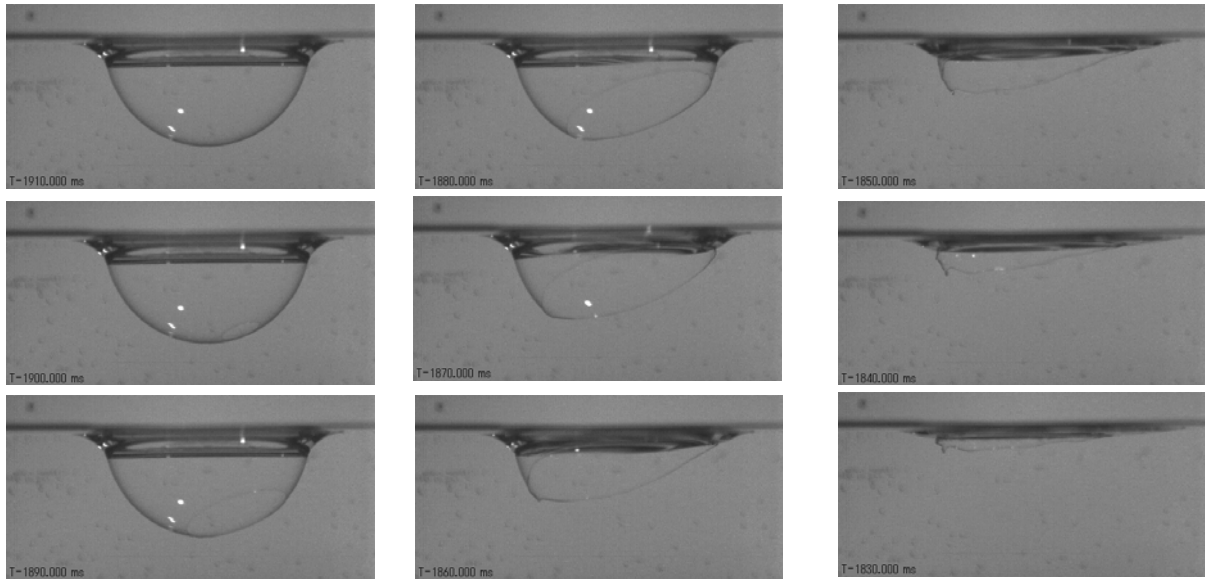


Fig. 5 Series of video frame of the collapse of water droplet wrapped with oil film (frame rate: 10ms)

点からずれた位置になるはずであるが、逆シャボン玉の崩壊は必ず最下点の穴から始まる。干渉縞の観察から時間の経過とともに上部の空気膜が厚く、下部が薄くなる様子が観察され、水平のどの方向からみても干渉縞は左右対称に見える。したがって、液滴が内部で回転しているとは考えにくい。

図6に逆シャボン玉の干渉縞の様子を示す。白色光の下ではシャボン玉と同様に虹色に見えるが、図のように緑色のフィルターにより単色光で観察すると明線、暗線が明瞭になる。膜厚が一樣であればこの透過光による干渉縞は同心円状に見えるはず（球形のため周辺ほど見かけの膜厚が増すため）であるが、上方は縞の間隔が狭く、下方で広く、かつ縞の中心が上方にずれていることから、下方に行くほど膜厚が薄くなっていることがわかる。時間の経過とともに干渉縞は上記の傾向を増す方向で変化し、最終的に最下点に発生した穴が拡大する形で崩壊する。図7に高速度カメラで撮影した逆シャボン玉の崩壊の様子を示す。各画像間の時間間隔は2msである。図5で示したオイル膜と違い空気膜の場合は縮む際に微小な気泡が残留し、崩壊直後には取り残された微小な気泡でもともとあった逆シャボン玉の輪郭を見ることができる。

4. 水滴の大きさと寿命

水面に浮く水滴を観察していて静的な状態では小さな水滴は寿命が短く、大きな水滴は比較的寿命が長い印象を受けていた。これは統計的な印象で個々の水滴について寿命はまちまちである。これを確認する目的で、水面に定量の水（わずかに界面活性剤

を混入）を滴下して水面に浮く水滴が発生した場合のその寿命を高速度カメラで記録しながら多数例の統計をとることを試みた。

図8はその結果である。プロット点は寿命の平均値を表す。寿命のエラーバーは計測された最大値と最小値を示す。水の量は、平均 35mm^3 から 110mm^3 までの5段階である。小体積では液滴はほぼ球形であるが、体積が大きな水滴では扁平な形状となる。最小体積の液滴はスポイトからの滴下で形成したもので体積の誤差は少ない。残りは透明なスチロールパイプにマーキングして液柱の長さを一定にすることで液量を調整した。そのため、液量の誤差はどれも $\pm 10\text{mm}^3$ 程度である。液滴が大きくなると寿命が延びる傾向があることがこの測定からわかる。ただし、液滴が大きくなって球形を維持できないほど不安定になると静的な状態を維持して計測することが

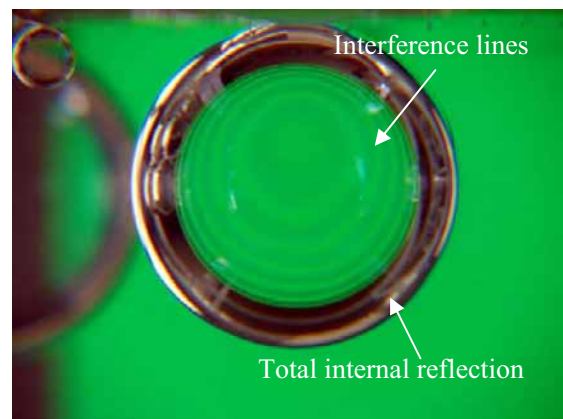


Fig. 6 Anti-bubble

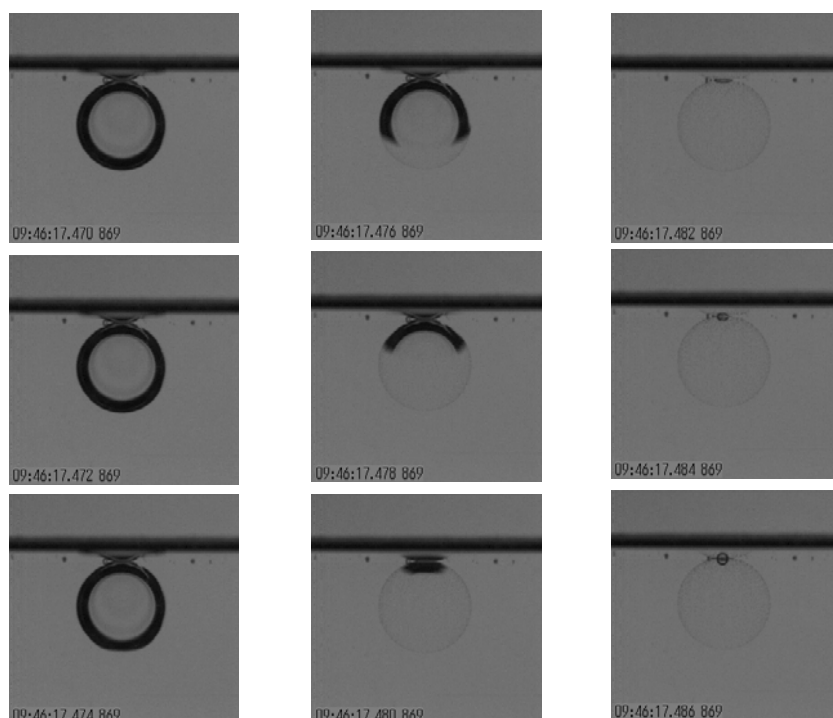


Fig. 7 Series of video frame of anti-bubble collapse (frame rate: 2ms)

困難になるので、体積の大きな水滴の寿命は長めに計測されている可能性はある。

小さな液滴に対して大きな液滴の寿命が長い理由として、水面と液滴が接している（正確には空気膜で隔てられている）箇所の面積が小さな水滴に比べ大きな水滴では広く、空気が排除されるのにより大きな粘性抵抗を受けることが考えられる。小さな水滴では、重力も小さく、水面は水平で液滴は球に近いので接する部分の空気は容易に周辺へ逃げることができる。大きな液滴では液滴は扁平で水平に広がり、支える水面も液滴の下面に沿う形で変形する。そのため上下の水面で挟まれた空間は薄く広くなり、空気が抜けるのに大きな粘性抵抗を受けることになると考えられる。

5. 膜の安定性

水面に浮く水滴と逆シャボン玉の崩壊は、隔離膜に開いた穴が拡大する形で起こることが高速度カメラの観察からわかる。膜に穴が開くとその穴の面積分の界面が消失するので系のエネルギーが低下し、自発的に穴が拡大すると理解できる。しかし、膜には厚さがあるため穴によって消失する界面の面積より穴の側面の面積が大きい場合、穴は自発的に消滅するはずである。したがって、膜厚に対してある程度の大きな穴が発生しないかぎり膜は安定であるといえる。この考えにしたがい、穴径に対する余分な

表面エネルギーを求めると図9のようになる⁵⁾。計算を簡単にするため穴は円柱状であると仮定している。グラフの穴径は膜厚で規格化してある。この計算からわかることは、穴径が膜厚を超えないかぎり膜は壊れることはないということである。また、穴が自発的に拡大するための径を得るために必要なエネルギーは、 $\pi \gamma r^2/2$ と計算される。膜が重力の影響などで薄くなっていくと穴が開くために必要なエネルギー障壁は厚さの自乗で減少していく。膜破壊の直接的な原因を熱的な揺らぎと仮定すると、熱揺らぎを $k_B T$ の程度として室温($T=300\text{K}$)で破壊に至る膜厚は、 0.4nm と推定される。この値は常識的な感覚からは薄すぎるように思える。上記の安定性の考えはシャボン膜でも同様に成立し、界面活性剤の2分子膜が最少の膜厚と考えられ、界面活性剤分子の長さが数nm以上あることを考慮すると不自然に思われる。しかしながら界面活性剤の2分子膜が安定である可能性もあり⁶⁾、膜という構造は意外に安定なものなのかもしれない。膜が薄くなった際の膜の破壊のきっかけは熱揺らぎとは異なる要因に求めた方が良さそうである。

6. まとめ

水面に浮く水滴の寿命を決める要因を調べることを目的に、分離膜としてシリコンオイルを用いる方法を新たに考案した。この手法により長時間、安

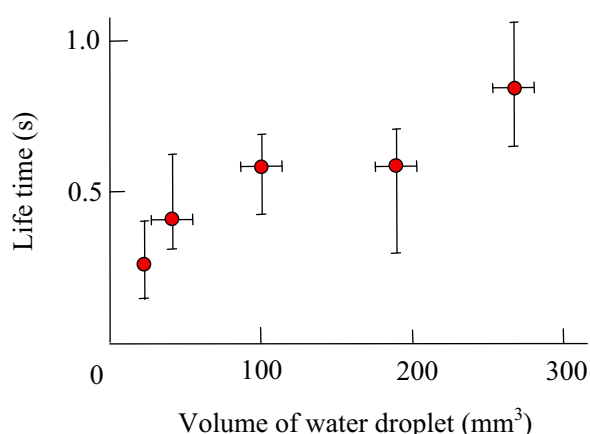


Fig. 8 Volume dependence of the life time of water droplets.

定に数cmの径を持つ水滴を静的に維持できた。高速カメラを用いて水滴と逆シャボン玉の崩壊の様子を観察し、隔離膜に開いた穴が拡大することで崩壊することがわかった。また、水滴の大きさと寿命に相関があることを確認した。この現象も隔離膜の膜厚維持から説明できる。膜に開いた穴の径と表面エネルギーの増加から、ある厚さ以下になるまでは穴が自発的に拡大するためには相対的に高いエネルギーが必要であることがわかった。したがって、隔離膜は厚い間は比較的安定なものであることがわかる。シャボン膜も液を供給し続けることで膜厚が薄くなることを防ぐといつまでも割れることなく維持することができると思われる。実際、数mの幅と高さを持つシャボン膜を展示することができるようである⁷⁾。しかし、穴が形成される原因として熱揺らぎを想定し、これに相当する膜厚を算出すると意味の無い小さな値になる。計算に用いた仮定が間違っており、穴の発生についてはさらに考察が必要である。

膜の安定性と壊れ方について観察と理論的考察の両面から検討してきたが、水滴の寿命については未だ確たる知見を得られた状況にはない。今後膜厚の時間変化、振動や滑走を伴う動的な状態での水滴の寿命について実験を重ねる予定である。

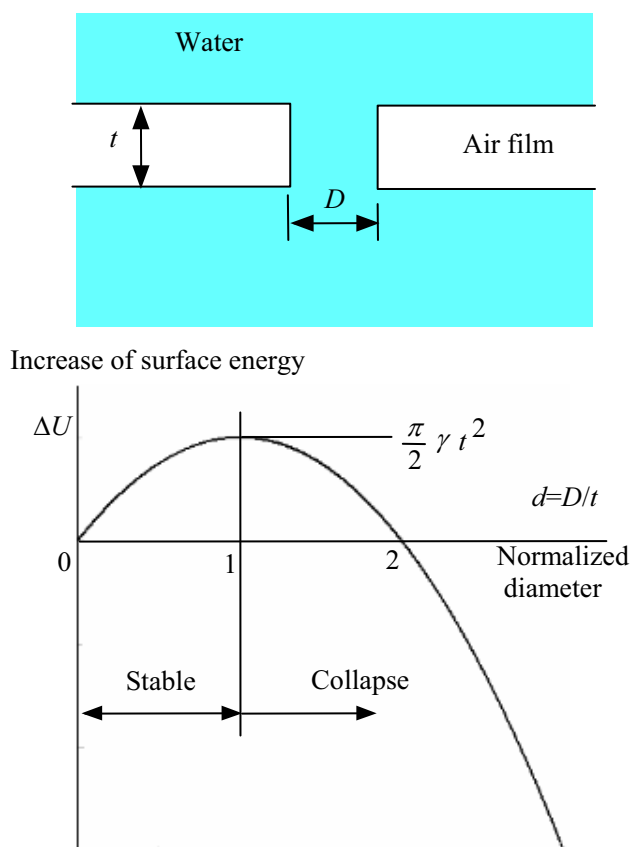


Fig. 9 Stability of the air film.

参考文献

- 1) P. Dell'Aversana and G. P. Neitzel: Physics Today, Jan., **51** (1998) 38-41
- 2) 佐藤誠：パリティ, **6** (1991) 76-77
- 3) URL: <http://www.cs.kyoto-wu.ac.jp/~konami/phys/antibubble.html>, http://www.denjiro.co.jp/01_index.html (逆シャボン玉の作り方の紹介)
- 4) 佐藤誠：津山高専紀要, **47** (2005) 83-87
- 5) 佐藤誠：第53回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 2006年春 武蔵工業大学, 第1分冊, p. 446, 22p-A-5
- 6) URL: <http://www.nims.go.jp/jpn/news/press/press121.html> (界面活性剤2分子の厚さに相当する安定な乾燥泡膜の発見の報告)
- 7) URL: http://www-lsp.ujf-grenoble.fr/vie_scientifique/annee_mondiale_de_la_physique/film_savon/ (巨大シャボン玉のデモンストラーション)