

中西 秀（九州大学理学研究院）

市川 正敏（京都大学理学研究科）

熱いコーヒーを飲んでいると、その表面に白い膜のようなものが浮かんでいるのに気づくことがある。それは、ゆらゆら立ち昇る湯気の下で水面にぴったりと張り付き、そっと息を吹きかけても簡単には吹き飛んでゆかない。しばらく眺めていると、時折、ピシッとひびがはいるかのように膜に亀裂が生じ、奇妙なパターンが現れる。一体これは何だろう。素朴な疑問に引き寄せられて熱水の表面を顕微鏡で覗いてみたら、思いがけない現象が見えてきた [1]。

素朴な疑問 この現象は、寺田寅彦の有名な随筆「茶わんの湯」にも記述があり¹、興味を持った物理学者も多いに違いない [2]。白い膜は何なのか、なぜ湯気のように立ち昇らずに水面に張り付いているのか、一瞬のうちに亀裂のような割れ目が入るのはどうしてか、何をきっかけに亀裂が走るのかなど、疑問は尽きない。

お茶を飲みながらの簡単な観察から、以下のようことが分かる：(i) 湯気の膜はコーヒーに限らず、紅茶や緑茶、ただの熱水の表面でも見られる。(ii) 大きさは1cm程度で、お湯が熱い間は観察される。(iii) 湯気の薄膜は水面に非常に近く、おそらく0.1mm以内の距離にある。(iv) 薄膜は容器に蓋をするとより現れやすい。(v) そっと息を吹きかけても吹き飛ばされない。路面にうっすら積もった粉雪のように水面上を吹き流され、水面に張り付いたかのように見える。(vi) 亀裂が走る現象は数秒間に何度かの頻度で観察され、継続時間は0.1秒よりも短かく、また同時に複数の亀裂が走ることもある。(vii) 亀裂の幅は1mm、長さは1cm程度で、生じた後もしばらく残っている。

この現象について、1971年にSchaeferも短いエッセイを書いている [3]。彼によると、薄膜は微小

¹熱い茶わんの湯の表面を日光にすかして見ると、湯の面に虹の色のついた霧のようなものが一皮かぶさっており、それがちょうど亀裂のように縦横に破れて、そこだけが透明に見えます。（寺田寅彦著「茶碗の湯」より）



図 1: 熱いコーヒーの水面に張った白い膜。写真は町田・相模原ポータルサイト Vita(<http://vita.tc/>)、玉川珈琲倶楽部 提供

水滴からなり、それが熱水からの水蒸気流のために浮揚している。また、亀裂はベナール対流の下降流部分に現れ、亀裂が走るのは、上昇気流により生じた微小な渦が動いてゆくためと論じた。彼はいくつかの簡単な実験もしており、帯電した櫛を近づけると白い膜が消失することから、水滴は帯電していると推定した。また、放射線源によっても白膜は消失するとしているが、我々にはそれは再現できなかった。

最近になって、Fedorets が類似の現象を偶然発見した [4]。彼はエボナイトの上の水の膜をランプで加熱して表面を観察していたところ、半径10 μ m程度の微小水滴が3角格子状に並んだクラスターを見出した。さらに、クラスター内の水滴数百個がビデオの1コマ間隔0.04s以内に消失する現象も観察している。彼もまた、水面からの水蒸気流によって水滴が浮遊していると考察している。

顕微鏡観察 我々は、この現象をより詳しく観察するために、顕微鏡とビデオカメラでビーカーに入れた熱水の表面を覗いてみた。熱水としては、



図 2: 熱水表面の顕微鏡写真

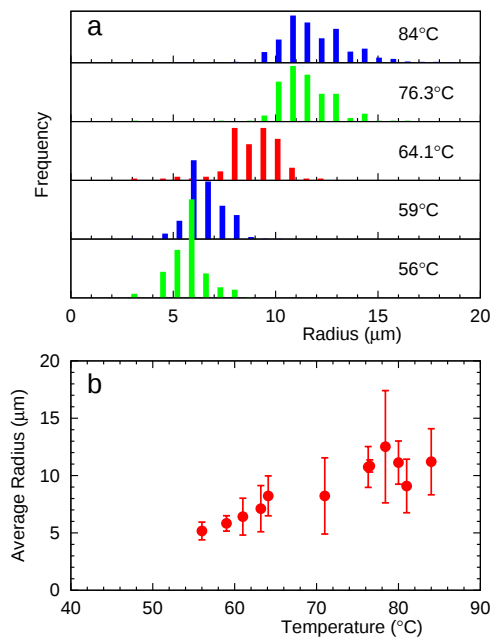


図 3: 微小水滴のサイズ分布と平均サイズの温度依存性

コーヒー以外に、紅茶や水道水、超純水、洗剤をたらした水なども観察した。

撮影した多くのビデオを根気よく眺めた結果、以下のようなことが分かった。(i) 白い膜は大きさ $10\mu\text{m}$ 程度の水滴の集まり。(ii) 水滴の大きさはほぼ揃っており、連続して観察できる 1 秒程度の間には大きさは変化しない²。(iii) 水滴は浮揚していて水面に接していない。(iv) 水滴が密集している所では、数十 μm 程度の間隔の三角格子状に並んでいる。(v) 時折、水滴が上から落下してきて他の水滴の間に収まって浮揚したり、浮揚している水滴が時折消滅したりする。(vi) 水滴が集団消滅することがあり、数百個以上の水滴が 30 fps のビデオのコマ間隔以内に同時消滅する。(vii) 同様の現象は、コーヒー、紅茶、水道水、純水、洗剤を垂らした水でも観察され、水の状態に敏感には依存しない。(viii) 浮揚水滴は 50°C 程度のぬるいお湯でも観察されるが、その数は少ない。

図 2 のような画像から水滴の輪郭を抽出し、一つ一つの水滴の位置や形、大きさを見積もることができる。そのデータからサイズ分布を取ったのが図 3 である。低温では水滴のサイズは小さくなり、単純に外挿すると 50°C ぐらいでなくなる。分布の幅は平均値の 20~30% 程度しかなく、水滴の大きさがほぼ揃っていることが分かる。

ビデオ観察から、個々の水滴は上空で成長した

² 水滴は気流によって絶えず移動しており、個々の水滴は 1 秒程度で顕微鏡の視野から外れてしまう。

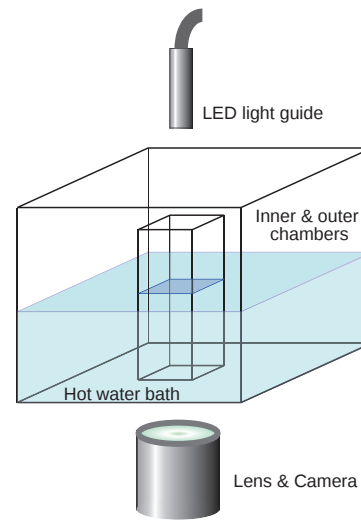


図 4: 実験装置

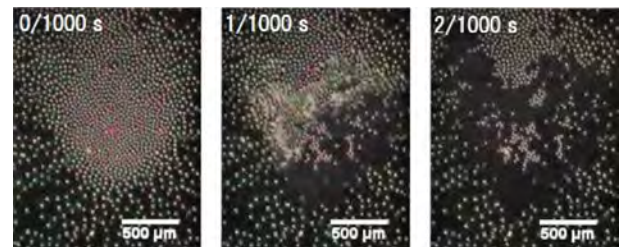


図 5: 集団消滅の連続画像

のち降下して、水面直上にしばらく滞在したのち、水面に落下し消滅すると推定した。水滴の消滅の仕方には、一つ一つ消滅する場合と、多数が一度に消滅する場合がある。直径 $10\mu\text{m}$ の水滴を浮揚させるには 5 pN 程度の力が必要で、単純に粘性係数 $\eta \approx 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ の水蒸気流によるのストークス抵抗として見積もると 5 mm/s 程度の流速に相当する。水滴の大きさ分布の温度依存性から、浮揚力は熱水の温度と共に大きくなっているはず。また、水滴の高さは揃っているようなので、浮揚力の水面からの距離依存性は大きいのだろう。

高速ビデオによる観察 通常のビデオ観察では集団消滅現象をとらえられなかったので、図 4 のような実験系を組んで、高速ビデオで観察することにした。外からの気流などの攪乱を防ぐために 2 重壁の水槽を作成し、上から照明の下、水槽の下から水面上に浮かぶ水滴を観察した。適度な視野で 8000fps の撮影ができる高速度カメラ (Keyence VW-9000) を用いた。

超スローモーションで見ると、微小水滴が上空から落ちてきて水面上に滞在したり、水面上にいる水滴が個々に消滅したりする様子がはっきり観察される。集団消滅する瞬間の連続コマ画像の例

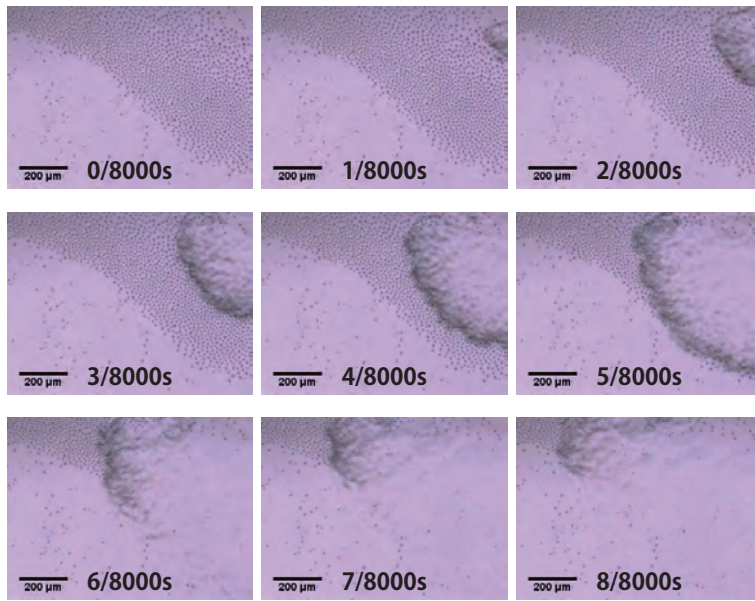


図 6: 集団消滅の波面の伝播

を図5に示す。1000 fps の連続する3コマで、2コマ目に中央部分の微小水滴が消失しつつあるのが見える。白い雲がかかったように見えるのが何かは分かっていない。1 ms 程度の時間に1 mm 程度の大きさの領域の水滴が消滅しているが、集団消滅した領域にも、後に消えずに残った水滴がいくつもあるのが観察される。

更に速い8000 fpsで見ると、集団消滅は水滴が一斉に消失しているのではなく、波の伝播のように消失前線が進行している様子が分かる(図6)。前線の伝播速度は1~2 m/s 程度である。図ではよく見えないが、ビデオでは消失前線とともに水面に表面波が起こっているのがはっきり観察される。このスケールの表面波は表面張力波で、 σ を表面張力、 ρ を密度とすると、分散式は

$$\omega = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} k^3 \quad (1)$$

と表される。この式で波長0.1~1 mm 程度を仮定すると、観察した集団消滅の前線の伝播速度程度になる。

多数のビデオをコマ送りで見ると、集団消滅の始まりが見つかった。図7をみると、一コマ目と二コマ目の間で矢印で示した1つの水滴が消失し、それに引き続いて周りの水滴が次々と消失してゆく様子がとらえられている。この例では端の水滴が最初に消失しているが、クラスター内部の水滴がまず消失し周りに伝播している例もあった。数百個以上の多数の水滴が消失するイベントが、たった一個の水滴の消失によって引き起こさ

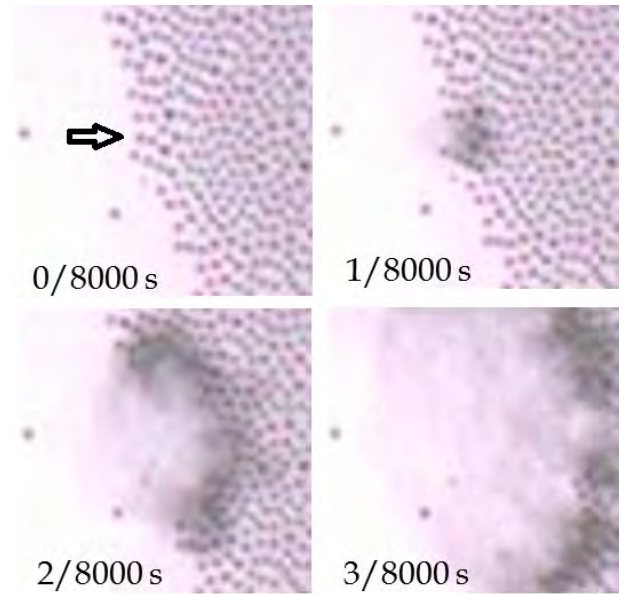


図 7: 集団消滅の始まり

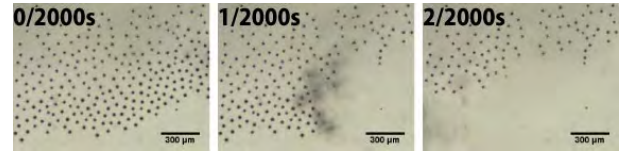


図 8: 界面活性剤 Triton X-100 を濃度0.3mM で分散させた場合。

れていることが、高速ビデオでははっきりと観察された。

図8は界面活性剤(Triton X-100)を加えた場合の例である。濃度は0.3 mM で、この場合でも、定性的には同様な現象が観察される。ただ、同じ温度で界面活性剤なしの場合に比べて、水滴の数密度やサイズが小さい。その原因として、界面活性剤分子の水和や水面の被覆によって蒸散が抑制されていることが考えられる。しかし、視野に入っているのは水面のごく一部なので、界面活性剤の効果を確認するためには系統的な観察が必要である。

以上の高速ビデオ観察結果をまとめると、以下のようなことが言えるだろう。(i) 微小水滴は上空から落ちてきて、水面直上にしばらく滞在し、更に水面に落下して消失する。(ii) 水滴の集団消滅は一つの水滴の消失によって引き起こされ、1~2 m/s で伝播する。(iii) 集団消滅によりその領域の全ての水滴が消失するわけではなく、波面の通過後にも水滴のクラスターや孤立した水滴が残っている。(iv) 界面活性剤を加えても現象の定性的な様子は変わらない。

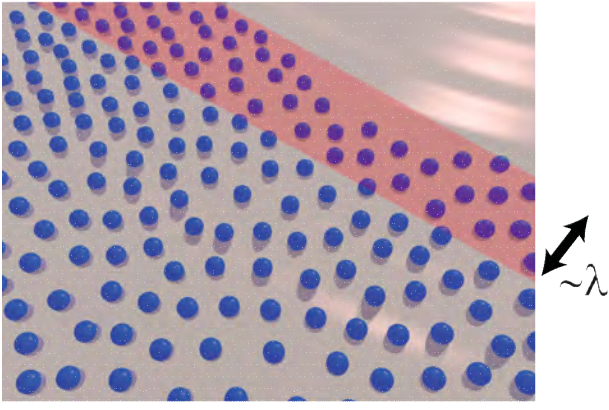


図 9: 伝播する表面波の概念図

表面波の伝播 水滴の消滅と表面波が相伴って伝播していることから、水滴の消滅によって引き起こされた表面波が、更に周りの水滴をのみこんで、集団消滅を引き起こしていると推定した。図9のような波長 λ 程度の幅の一次元的な孤立表面波を仮定して、水滴の消滅が十分な振幅の表面波を引き起こすことができるのか、見積もってみよう。

水滴が消滅する際に解放されるエネルギーによって表面波が引き起こされ、表面波は水の粘性で減衰してゆく。このエネルギー収支を考えよう。供給されるエネルギーの殆どが微小水滴の表面張力エネルギーで、位置エネルギーは無視できる。水滴の大きさを d 、単位面積あたりの水滴数密度を n 、表面波の伝播速度を v とすると、消滅する水滴は単位時間・波面の単位長さあたり vn 個なので、水滴からのエネルギー供給 ϵ_{input} は、

$$\epsilon_{\text{input}} \sim vn \times \sigma d^2$$

程度と見積もれる。一方、波高 h 、波長 λ の波による流体のひずみ速度は、波の周期を τ とすると、 $h/(\tau\lambda)$ 程度なので、表面波の中と侵入長ともに λ とすると、散逸 ϵ_{diss} は単位長さ・単位時間あたり

$$\epsilon_{\text{diss}} \sim \eta \left(\frac{h}{\tau\lambda} \right)^2 \times \lambda^2$$

程度だろう。但し、 η は水の粘性。この2つが釣り合う条件から、表面波の波高を見積もると、

$$h \sim \left(\sqrt{\frac{1}{\eta} \tau^2 v n \sigma} \right) \times d$$

となる。これは、

$$\lambda \sim 100 \mu\text{m}, \quad v \sim 1 \text{ m/s}, \quad n \sim 1/(30 \mu\text{m})^2$$

として、水の粘性と表面張力の値

$$\eta \sim 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}, \quad \sigma \sim 7 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

を入れると、

$$h \sim 30 \times d$$

となる。計算上、観察されている高さの水滴をのみこむのに十分な波高を与えそうだ。

残った疑問 高速ビデオ観察から、何が起きているかについては多くのことが分かった。しかし、その背景にある物理プロセスに関しては、依然として幾つもの疑問が残る：そもそも水滴の浮揚力の起源は何であろうか？ 水滴のサイズがほぼ揃っているのはどうしてか？ 集団消滅のきっかけになる最初的水滴はどうして消滅するのか？ 集団消滅の波はどのように伝わっているのか？、これら疑問、特に、浮揚力の起源を探るために、いろいろな条件の下での水滴の浮揚高を知りたい。そのための実験には工夫が必要だ。

一方、理論的な考察も欠かせない。浮揚力としては、蒸散流による吹上以外に、マランゴニ効果による水滴のスピンの影響、静電気力などの可能性が指摘されている [5]。それらを確認するには、それぞれメカニズムを仮定して浮揚力を見積もり、条件による変化などを実験と比較しなければならない。

ゆらゆらと立ち上るコーヒーの湯気の下を顕微鏡でのぞいてみたら、思いのほかダイナミックな現象が見えてきた。世界が注目するビッグサイエンスの華やかさとは無縁の、日常的に目にする風景の中にも、単純な説明がむづかしい不思議な現象があふれている。そのような“謎”を一つ解き明かした時のささやかな喜びを、科学する心の原点として忘れないでいたい。

この研究は、日本学術振興会より科研費・挑戦的萌芽研究 (25610124)、及び先端研究拠点事業「ソフトマターの非平衡ダイナミクスに関する国際研究ネットワーク」の補助を受けています。

参考文献

- [1] Takahiro Umeki, Masahiko Ohhata, Hiizu Nakanishi, and Masatoshi Ichikawa. Dynamics of microdroplets over the surface of hot water. *Scientific Reports*, Vol. 5, p. 8046, 2015.
- [2] 寺田寅彦. 茶碗の湯. 寺田寅彦全集, 第二巻, pp. 3-9. 岩波書店, 1997. (「赤い鳥」1922年).

- [3] Vincent J. Schaefer. Observations of an early morning cup of coffee. *American Scientist*, Vol. 59, pp. 534–535, 1971.
- [4] A.A. Fedorets. Droplet cluster. *JETP Lett.*, Vol. 79, pp. 372–374, 2004.
- [5] A.A. Fedorets. On the mechanism of noncoalescence in a droplet cluster. *JETP Lett.*, Vol. 81, pp. 437–441, 2005.