

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2016

課題番号：25610124

研究課題名(和文)水面上の微小水滴の生成・浮遊機構とその集団運動：コーヒーの湯気の物理学

研究課題名(英文)Micro-droplets levitated over hot water: Physics of coffee steam

研究代表者

中西 秀(Nakanishi, Hiizu)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：90155771

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：コーヒーの上に観察される白い膜状の湯気と、それに現れる亀裂の観察と理論的考察を行った。白い膜状の湯気は、空中で凝集した微小水滴が水面直上に浮遊しているもので、亀裂はその集団消滅であることが、顕微鏡による高速ビデオ観察で分かった。微小水滴の粒径はほぼそろっており、直径が $10\mu\text{m}$ から $30\mu\text{m}$ 程度で温度とともに大きくなり、 50°C 以上の熱水表面で観察される。集団消滅は、一つの水滴の消滅により誘発され、水の表面波を伴って伝播する。その伝播速度は $1\sim 2\text{m/s}$ で波長 1mm 程度の表面張力波の伝播速度程度である。この現象は、熱水の表面状態に対して敏感ではなく、界面活性剤を加えても大きな変化は見られなかった。

研究成果の概要(英文)：When drinking a cup of coffee under the morning sunshine, you may notice white membranes of steam floating on the surface of the hot water. They stay notably close to the surface and appear to almost stick to it. Although the membranes whiffle because of the air flow of rising steam, peculiarly fast splitting events occasionally occur. They resemble cracking to open slits approximately 1mm wide in the membranes, and leave curious patterns. We studied this phenomenon using a microscope with a high-speed video camera and found intriguing details: i) the white membranes consist of fairly monodispersed small droplets of the order of $10\mu\text{m}$; ii) they levitate above the water surface by $10\sim 100\mu\text{m}$; iii) the splitting events are a collective disappearance of the droplets, which propagates as a wave front of the surface wave with a speed of $1\sim 2\text{m/s}$; and iv) these events are triggered by a surface disturbance, which results from the disappearance of a single droplet.

研究分野：統計物理学

キーワード：微小水滴 凝集

1. 研究開始当初の背景

熱水の表面に張り付いた湯気の膜の現象は、1922年の寺田寅彦の有名なエッセー「茶碗の湯」にも記述があり、お茶やコーヒーなどを飲む際に気付いた人も多いだろう。熱いコーヒーなどの表面の単純な観察から以下のようなことが分かる。1) 白い湯気の膜が、熱水の表面に張り付いたように現れる。2) 時折、膜に亀裂のようなものが走る。3) 亀裂によって、膜に不規則なセルパターンができる。特に、亀裂の出現は、ゆらゆら揺れる湯気の運動と比較して非常に短時間に起こり、素朴な興味をそそられる。

しかし、薄膜の実体や亀裂パターンについての科学的な研究はほとんどなく、寺田寅彦以降、科学誌に公表された記事としては、Schaefer によるエッセー“Observations of an early morning cup of coffee” (American Scientist, 1971) 以外には見つけられなかった。Schaefer は直接観察と簡単ないくつかの実験に基づき、薄膜は熱水表面からの水蒸気流によって吹き上げられた微小水滴からなり、それに現れるセルパターンは熱水中の Benard セルに対応しているのではないかと推論した。

私がこのような現象に気づいて以来、その起源についておりに触れて研究者仲間と議論をしてきたが、誰も明確な説明をしてくれた人はいなかった。そもそも、このありふれた状況で生じる現象に気づいている人も多くはなかった。そのような議論を通じて明らかになったことは、なぜ湯気粒子が水面直上に張りつくのか、なぜその湯気粒子に他の拡散的運動とは比べものにならないほど速い時間スケールの協調運動が見られるのか等、この現象の際だった特徴は簡単には説明できない、

ということである。

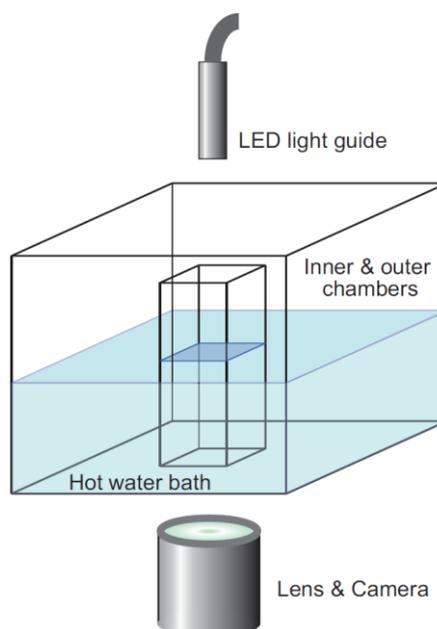
近年になって、まったく別の文脈ではあるが、Fedorets らがランプで加熱されたエボナイトの表面の水の薄膜を観察している際に、偶然、直径 $10\mu\text{m}$ 程度の水滴のクラスターが出現することを見出し、用いたビデオのフレーム間隔(0.04s)以内の短い時間に多数の水滴が消滅する現象も観察している。これらは、以下に述べるように、我々が熱水表面で観察した現象ときわめて類似している。

2. 研究の目的

ふとした日常的な生活の中に、自然科学を専門とするものにとっても容易に説明できそうにない、不思議な現象に出くわすことがある。私にとって、そんな現象の一つが、熱いコーヒーの水面上に張りついた湯気の膜とその運動である。人を幻惑するような不思議な運動に気づいたのは大学院生の頃で、それ以来、ソフトマターの物理学の研究者として一人立ちした現在でも、私にとって依然として謎であり続けている。そんな日常的現象に対して、現代的・科学的手法に基づいて、実験的および理論的検討を加えるのが、本課題の目的である。

3. 研究の方法

図のような自作の実験系を作成し、顕微鏡と高速ビデオを用いた直接観察および画像処理による解析、モデルに基づく理論解析を行った。



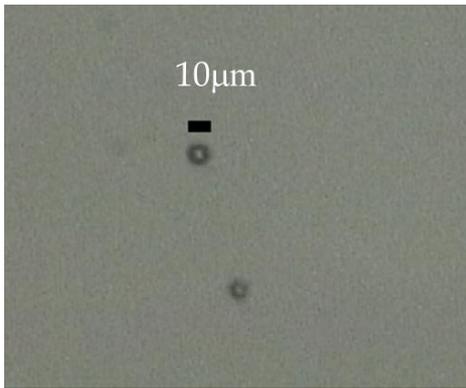


図 1 : 浮遊水滴の顕微鏡観察像

4. 研究成果

顕微鏡観察から以下のような結果を得た。
 i) 白い膜は大きさ $10\ \mu\text{m}$ 程度の微小水滴からなる (図 1)。
 ii) 水滴の大きさ分布はかなり均一。
 iii) 焦点深度を調節することにより、水滴は水面から $10\sim 100\ \mu\text{m}$ の高さに浮遊していると推定。
 iv) 水滴は、ひとつずつ上から降ってきて、時々個別に消える。
 v) 亀裂が走るように見えたのは、水滴の集団消滅。
 vi) 水滴が密集しているところでは三角格子状に並んでいることから、水滴は長距離の斥力相互作用をしていると推定。

次に、高速ビデオ観察から以下のようなことが明らかになった。
 i) **水滴の大きさは温度とともに大きくなる** : 図 2 にいくつかの温度での水滴画像を示す。その画像の解析から水滴の大きさの分布を求めたのが図 3 である。大きさの分布の幅は比較的狭く、平均値は温度とともに増大していることが分かる。また、大きさを低温側に外挿すると $50\ \text{C}$ 程度でゼロになるが、温度が低いところでは水滴の数は減り観察がむづかしい。

ii) **水滴の集団消滅は表面波を伴い伝播してゆき、その伝播速度は $1\sim 2\text{m/s}$** : 図 4 に $1/8000\ \text{s}$ ごとのビデオのコマを示す。その間に約 $100\ \mu\text{m}$ 程度波面が伝播しているので、伝播速度は $1\sim 2\ \text{m/s}$ 程度であることが分かる。これは、波長 1mm 程度の水の表面張力波の速度とほぼ一致する。

iii) **集団消滅は一つの水滴の消滅によって誘発される** : 図 5 に集団消滅が始まる瞬間のビデオ画像を示す。1 コマ目の矢印で示した水滴が 2 コマ目で消滅しており、それが作る波面が伝播してゆく様子が分かる。

iv) **集団消滅の前線はすべての水滴を消滅させない** : 図 6 に集団消滅の前後と途中の画像を示す。消滅の前線が通り過ぎた後にも水滴のクラスターがいくつも残っている。どの

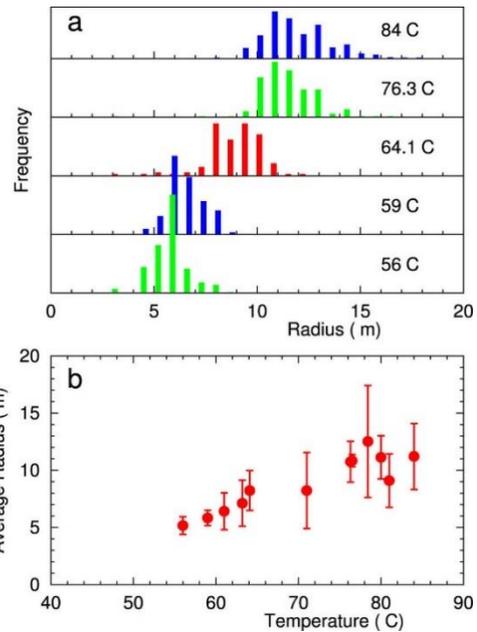


図 3 : 各温度における水滴のサイズ分布とその温度依存性

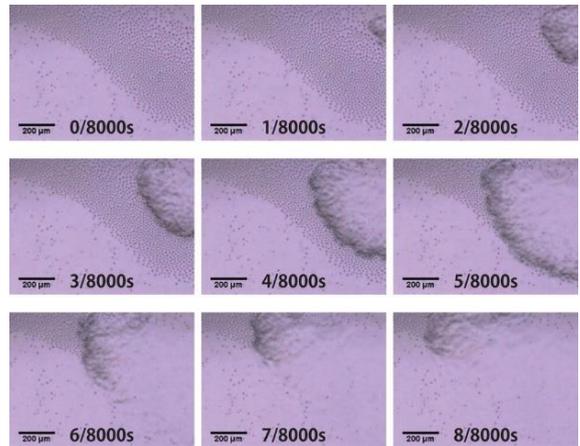


図 4 : 集団消滅の前線の伝播

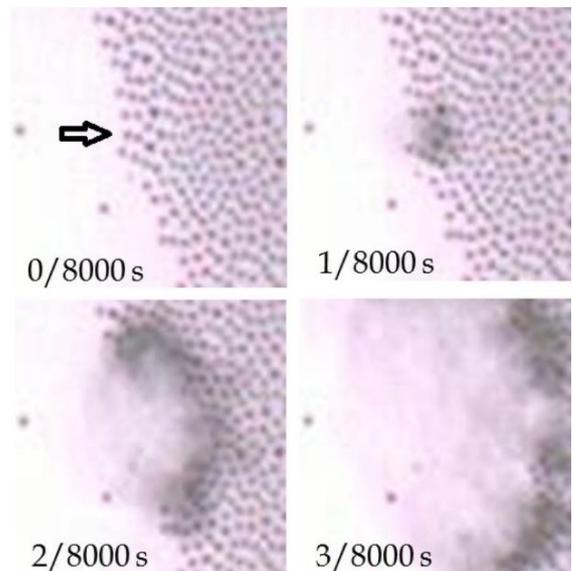


図 5 : 集団消滅の開始

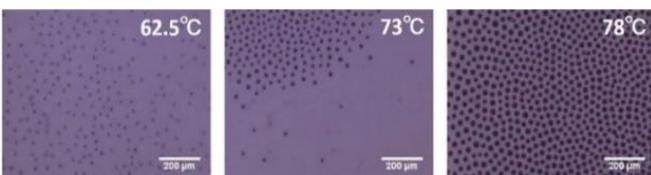


図 2 : 各温度における水滴の顕微鏡画像

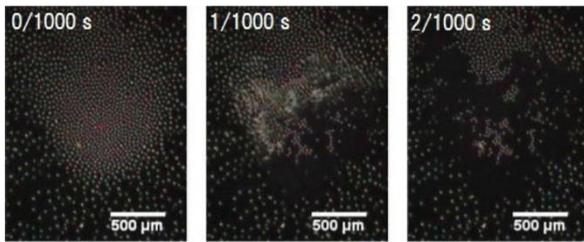


図6：集団消滅前、途中、後のビデオ画像

ような水滴が残るのか、消滅した水滴と残った水滴との差異は明らかではない。

v)現象は水面の状態によらない：同様の現象は、コーヒーだけでなくお茶でも、純水でも、界面活性剤を加えても観察される。顕微鏡観察でも、水面の状態による明確な変化は認められなかった。

理論的考察：水滴によって誘起された表面張力波が、水面直上に浮遊している水滴のみこんで集団消滅を引き起こすとして、消滅前線の定常伝播の振幅を見積もった。観察されている水滴の単位面積当たりの個数で、水滴消滅によって供給されるエネルギーと、粘性による散逸のつり合いから振幅を見積もると、水滴の直径の30倍程度となり、集団消滅を引き起こすのに矛盾のない振幅が得られた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

1.中西秀、市川正敏、日本物理学会誌, vol.71, No.7 (2016) 480-483.「コーヒーの湯気：水面に浮遊する微小水滴のダイナミクス」、査読あり

2.Takahiro Umeki, Masahiko Ohata, Hiizu Nakanishi, and Masatoshi Ichikawa, Scientific Reports 5 (2015) 8046. “Dynamics of microdroplets over the surface of hot water”、査読あり

[学会発表] (計8件)

1.Hiizu Nakanishi and Masatoshi Ichikawa, EMN meeting on Droplets 2016, 2016/5/9~13, San Sebastian, Spain. "Dynamics of microdroplets over the surface of hot water"

2.中西秀、2015年7月17日、慶応義塾大学物理学科談話会、“Coffee Physics: 熱水面の上の微小水滴のダイナミクス”

3.市川正敏、2015.04.18、第14回光科学若手研究会、「非平衡界面のダイナミクス: コーヒーの湯気から細胞まで」京都大学吉田キャンパス

4.中西秀、梅木崇浩、市川正敏: 第4回ソフトマター研究会, 2015年1月6日~8日, 於: 名古屋大学, 「コーヒーカップの中の嵐: 熱水上に浮かぶ微小水滴とそのダイナミクス」

5.梅木崇浩, 中西秀, 市川正敏: 熱水上に浮遊する微小水滴とその集団消滅現象、日本物理学会 2014年秋季大会、2014年9月7日~10日、於: 中部大学

6.市川正敏, 梅木崇浩, 大畑真彦, 中西秀「コーヒーの湯気 ~浮遊する微小水滴とその集団消滅~」日本物理学会 第69回年次大会、於: 東海大学, 2014年3月27日~30日

7.Hiizu Nakanishi, Biocomplex seminar at NBI, University of Copenhagen, 2013/9/11, “Storm in a Teacup: dynamics of microdroplets on hot water surface”

8.Mahito Ohata, Masatoshi Ichikawa and Hiizu Nakanishi, International Soft Matter Conference 2013, September 15-19, 2013 at Rome, Italy, “Storm in a Teacup: dynamics of micro-droplets on hot water surface”

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)
○取得状況 (計0件)

[その他]

1.市民講演会: 市川正敏、2017.03.04、静岡県立大学、一般公開市民勉強会、「生命と自然 - 科学と技術の最前線-お茶とコーヒーの科学」静岡県立大学市民講義

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中西 秀 (NAKANISHI, Hiizu)
九州大学・理学研究院・教授
研究者番号: 90155771

(2) 研究分担者

市川 正敏 (ICHIKAWA, Masatoshi)
京都大学・理学研究科・講師
研究者番号: 40403919

(3) 連携研究者

坂上 貴洋 (SAKAUE, Takahiro)
九州大学・理学研究院・助教
研究者番号: 30512959

(4) 研究協力者: なし