

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14431

研究課題名（和文）重力下における擬二次元泡沫滴の動的挙動とメカニズム解明：ミクロとマクロな視点から

研究課題名（英文）Dynamics and mechanism of quasi-two-dimensional foam droplets under gravity from microscopic and macroscopic perspective

研究代表者

谷 茉莉 (Tani, Marie)

東京都立大学・理学研究科・助教

研究者番号：10822950

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：液体内部に気泡が多数押し込められたものを泡沫（foam）と呼ぶ。泡沫は液体と気体両方の性質を持つため高い機能性を実現し、それを利用した様々な製品が我々の日常生活に多くみられる。しかし、泡沫のマクロな動的挙動は、泡沫内のミクロな構造変化とカップリングしており、泡沫の物理的理解には至っていないのが現状であった。本研究課題では、ミクロとマクロな視点から、泡沫の滴の重力下での動的挙動を調べた。その結果、泡沫中で排水された液体がちぎれる「ピンチオフモード」と「非ピンチオフモード」を発見し、その境界は実験と理論から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々は日常生活で泡沫を利用した製品を多く使用している一方で、泡沫のマクロな挙動に関して、学術的には未解明なことが多くある。また、本研究課題により、滴状の泡沫から液滴がちぎれる条件が明らかになったことは、壁や窓、シンクの洗浄などのために鉛直壁に泡沫を吹き付ける際に溶液の流出を防ぐ方策につながり、産業的にも、環境問題の観点からも、意義のある成果だと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Liquid foam is a state where air bubbles are confined in a liquid. We use foam in our daily life, taking advantage of its unique and high functional properties, which differs from the pure liquid or the pure gas state. However, macroscopic deformation of foam is usually coupled with the microscopic rearrangement of air bubbles, which significantly increases the difficulty of the problem. Therefore, the dynamic and the mechanism of the macroscopic deformation of foam have not been clarified yet.

Here, we focused on the dynamics of the macroscopic behavior of a foam droplet under gravity. We found "pinch-off mode" where liquid draining from the foam pinches off, and "no pinch-off mode". In addition, the mode boundary was explained experimentally and theoretically.

研究分野：ソフトマター

キーワード：ソフトマター 泡沫 ピンチオフ

1. 研究開始当初の背景

液体内部に気泡が多数押し込められたものを泡沫（フォーム）と呼ぶ。泡沫は液体と気体両方の性質を持つため高い機能性を実現し、それを利用した様々な製品が我々の日常生活に多くみられる。例えば、洗顔フォームや洗剤は少ない液量での高拡散性、高粘弾性、高吸着性を利用したものであり、消火泡は外気の高遮蔽性を利用したものである。このような機能を最大限に活かすためには、泡沫の用途に合わせた流動性の実現が必要である。

特に、重力下における泡沫の動的挙動のメカニズム理解と制御は産業応用面からも重要な課題の一つである。しかし、重力下における泡沫のマクロな挙動に関する物理的研究は、現象の複雑さと制御した実験の困難さから、これまであまり行われてこなかった。泡沫内で液体は気泡間の小空間に局在し、その位置や体積、形状が変化し得る。したがって、泡沫内のミクロな液体挙動を流体力学で厳密に扱うことは困難である。また、内部構造が変化するために、泡沫を一様な連続体として扱うことも難しい。また、そもそも泡沫はパラメーターを制御した実験や定量的評価が難しく、重力下での泡沫滴の動的挙動とそのメカニズムの系統的理解に至っていない。

したがって、我々が日常生活の中で目にしている泡沫のマクロな現象、例えば、風呂場の壁など鉛直壁に吹き付けられた泡沫の滴（泡沫滴）の振る舞いの動力学やメカニズムの解明にも至っていないのである。それらを解明するためには、既述のように重力下での泡沫滴の挙動（マクロ）と、泡沫内に局在する液体の流れ（ミクロ）を同時に考える必要がある。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、ミクロとマクロな視点から泡沫の滴の重力下での動的挙動とそのメカニズム解明を目的とした。具体的には、この現象をシンプルにモデル化し、擬二次元セルに泡沫滴を閉じ込め、重力による泡沫滴の下降モードとその条件、下降メカニズムの解明を目指した。

3. 研究の方法

擬二次元セルに泡沫滴を閉じ込め、重力下での泡沫滴の動的挙動を調べた（図1）。擬二次元セルとは、ある一辺（ここでは厚み D ）が他の2辺に対して短いセルのことであり、気泡が一層になるように泡沫を閉じ込めることで実験観察がしやすくなるため、これを用いることにした。安定した泡沫を得るために、界面活性剤溶液には市販の食器洗い用洗剤を純水で希釈して、20 wt%溶液としたものを用いた。この溶液に、注射針を取り付けたシリンジで空気を送り込むことで、泡沫を作成した。空気注入速度はシリンジポンプを用いてコントロールし、ほぼ一定のサイズの気泡を得ることができた。擬二次元セルは、アクリル板2枚の間に厚み D ($D=1.6, 0.8, 0.5$ mm) のスペーサーを挟んで固定した自作のセルを用いた。また、セルを設置する傾き角 α ($\alpha=30, 45, 90^\circ$) が可変の装置を作成し、傾き角 α を変えることで実効的な重力 $g \sin \alpha$ (g : 重力加速度) を変化させた。

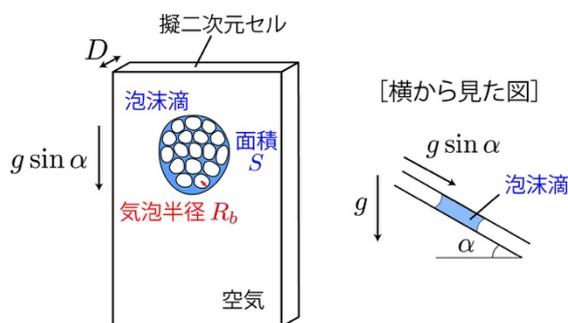


図1: 実験セットアップ. 厚み D の擬二次元セルに少量の泡沫を閉じ込め、重力下での泡沫滴の挙動を観察した。

現象はデジタルカメラを用いて、インターバル撮影ないしは動画撮影で記録した。また、実験終了後に、泡沫およびセル表面に残った液体を拭き取り、液体の質量 m を記録した。この質量 m と、撮影した泡沫滴の面積 S 、セルの厚み D から泡沫滴の液体分率 $\phi = m / (\rho S D)$ (ρ : 液体の密度) を計算した。

また、現象の普遍性を確かめるために、市販の泡生成用ポンプを用いて気泡サイズが小さな泡沫を作成し、厚み方向に複数の気泡がある系での実験も行った。また、元々の興味があった3次元状での泡沫の振る舞いを調べるために、一枚のアクリル板に泡沫滴を付着させた系でも実験を行った。

4. 研究成果

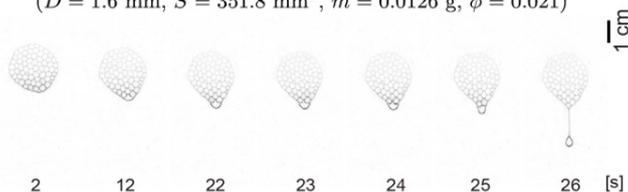
擬二次元セル内に閉じ込められた泡沫滴の重力下での挙動を観察したところ、(a) 泡沫中で排水された液体が泡沫滴下端に溜まった後にちぎれる「ピンチオフモード」と、(b) 液体はちぎれずに泡沫滴が一体となって下降する「非ピンチオフモード」があることがわかった（図2）。

(a) 「ピンチオフモード」が起こる理由として、泡沫内での液体排水が効いていると考えられ

る。泡沫内の内部構造に着目すると、図3のように、泡沫内に押し込められた気泡同士が液膜で隔てられ、この液膜が交わった場所に三角柱状の綾（プラトー境界）が形成されている。液体はこのプラトー境界に局在している。プラトー境界は泡沫の端から端までネットワーク状に張り巡らされているため、重力下において、液体はこのネットワークを通じて泡沫の上部から下部へと排水され、時間経過と共に泡沫下部に液体が溜まることになる。擬二次元セル中においてもプラトー境界のネットワークは形成されているため、重力下では時間経過とともに泡沫下部に液体が溜まっていく。実際に、図2に示した我々の実験においても、(a)ピンチオフモード(b)非ピンチオフモード共に泡沫滴下部で気泡間の黒線が太くなっており、泡沫滴下部でプラトー境界が太くなっている、すなわち、液体量が増えていることがわかる。また、図2(a)においては、泡沫滴の下部に液体のみの領域が形成され、これが徐々に大きくなり、液体ピンチオフが起きることが観察される。

(a) **ピンチオフモード**

($D = 1.6 \text{ mm}$, $S = 351.8 \text{ mm}^2$, $m = 0.0126 \text{ g}$, $\phi = 0.021$)



(b) **非ピンチオフモード**

($D = 1.6 \text{ mm}$, $S = 302.1 \text{ mm}^2$, $m = 0.0071 \text{ g}$, $\phi = 0.014$)

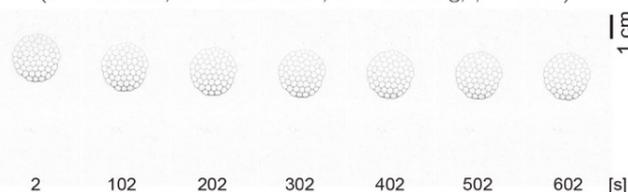


図2: 擬二次元セル中に閉じ込められた泡沫滴の挙動:(a)泡沫中で排水された液体が泡沫滴下端に溜まった後にちぎれる「ピンチオフモード」と、(b)液体はちぎれずに泡沫滴が一体となって下降する「非ピンチオフモード」。



図3: 泡沫の内部構造. 気泡間を隔てている液膜が交わってできた綾（プラトー境界）のネットワークが形成されている。このプラトー境界のネットワークを通じて、重力下では泡沫の上部から下部に液体が排水される。

次に、(a)ピンチオフモードと(b)非ピンチオフモードの2つのモードの境界を実験と理論から明らかにすることを目指した。3次元の場合に知られているピンチオフの条件式[1]を拡張して、擬二次元での液体ピンチオフの条件式を理論的に求めた。すなわち、泡沫下端に溜まった液体の重さが、それを支える毛管力（液体の表面張力と幾何形状で決まる力）[2,3]よりも大きくなった時にちぎれるという条件から、泡沫滴下端に溜まった液体質量 m_l に対して、液体ピンチオフが起きる閾値 $m_l^* = 2D\gamma / (g \sin \alpha)$ (D :セルの厚み, α :セルの傾き角, γ :液体の表面張力, g :重力加速度)を得た。これを実験結果と比較するため、一連の実験写真に対して、フリーの画像解析ソフト ImageJ や自作の画像解析プログラムを用いて、液体部分の面積を計測し、泡沫下端に溜まった液体量が最大となる時刻の液体面積と、セルの厚み D 、液体の質量密度 ρ から、この部分の液体質量 m_l を算出した。実験で得られたピンチオフ・非ピンチオフのデータを、横軸：泡沫下端に溜まった液体質量 m_l 、縦軸：撮影した写真から得られる泡沫滴の面積としてプロットしたところ、図4のように、泡沫下端に溜まった液体質量 m_l が大きい場合に、ピンチオフが起きることがわかった。さらに、理論的に求めたピンチオフの下端閾値 m_l^* (図4の実線)が、実験結果を非常によく説明していることがわかった。また、この結果から、ピンチオフの有無を決める上で最も重要なパラメータは泡沫下端に溜まった液体質量 m_l であり、泡沫の液

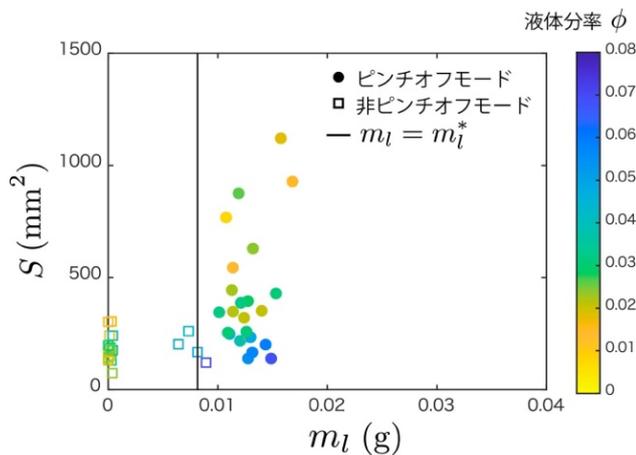


図4: 2つのモードの状態図. ピンチオフモードと非ピンチオフモードの境界が理論的に説明できた。

体分率 ϕ や泡沫の面積 S や体積は泡沫下端に溜まった液体質量 m_l を介して間接的に関係はするものの、二つのモードの境界を直接的に説明することができないことも明らかになった。なお、泡沫の液体分率 ϕ や泡沫滴の面積 S と泡沫下端に溜まった液体質量 m_l の関係やその時間経過は、泡沫内での液体の流れや、泡沫内での気泡の再配置、それによって生じる泡沫のマクロな形状の変化などが、複雑に絡み合っていて関係している可能性があり、これを理論的に明らかにすることは現時点では困難であった。また、実験的にも、液体分率が大きい、もしくは、泡沫滴の面積が大きいほど、 m_l が大きくなるのが定性的に確認はできているが、同じ理由から定量的な評価には至っていない。しかし、少なくとも、実験的に求めた泡沫下端の液体質量 m_l を用いて、ピンチオフ・非ピンチオフモードを説明することができた点は、大きな成果であると考えられる。

そこで、我々はさらに、セルの厚み D やセルの傾き角 α を変えて実験を行った。この場合にも、ピンチオフ・非ピンチオフモードの境界が全て、それぞれの場合に求めた閾値 m_l^* で説明できることがわかった (図5; 横軸を m_l/m_l^* でプロットしているため、横軸の値が1のところはピンチオフの閾値である)。また、気泡のサイズを小さくして、セルの厚み方向に多層の場合に対しても、同じ条件式でモードが決まることわかった (図5の☆シンボル)。

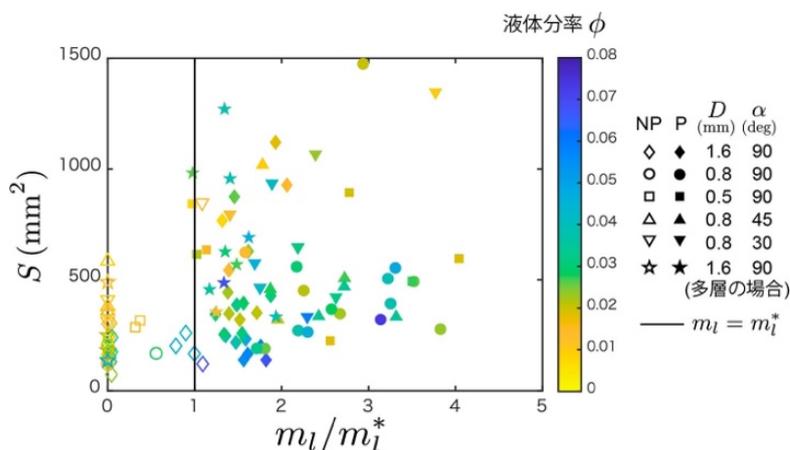


図5: 2つのモードの状態図. セルの厚み D やセルの傾き角 α への依存性も同様の条件式で説明できることがわかった。また、多層の場合も同様の条件式で説明できることがわかった。

加えて、我々が元々興味があった3次元の場合、すなわち、鉛直壁に泡沫滴を付着させた場合に対しても、実験を行った。また、理論的にも擬二次元の場合と同様に、ピンチオフの閾値 m_{3D}^* を求めることに成功した。3次元の場合には泡沫下端に溜まった液体質量を実験画像から算出することは難しいが、実験後に泡沫およびセルに残った液体を拭き取ることで、泡沫内部に存在する全液体質量 m を調べ、少なくともその質量 m が閾値 m_{3D}^* を超えない限り、ピンチオフモードは起こらないことを明らかにした (図6)。なお、擬二次元の場合には縦軸は面積 S としていたが、3次元の場合には縦軸は泡沫滴の全体積 Ω とした。この泡沫滴の全体積 Ω は、実験後泡沫やセルに残った液体を拭き取る前に、泡沫滴を一度擬二次元セルに閉じ込めて写真を撮影し、画像から得られる泡沫滴の面積とセルの厚み D から算出したものを使用した。

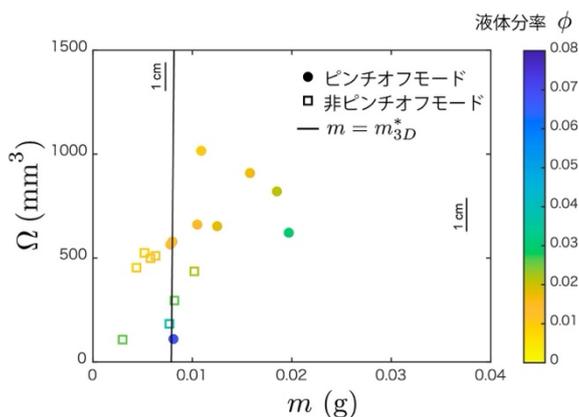


図6: 3次元の場合のモード状態図. 泡沫に含まれる全液体質量 m が閾値を超えない限り、ピンチオフモードは起こらないことがわかった。

以上のことから、重力下での泡沫滴の動的挙動には、(a) 泡沫中で排水された液体が泡沫滴下端に溜まった後にちぎれる「ピンチオフモード」と、(b) 液体はちぎれず泡沫滴が一体となって下降する「非ピンチオフモード」があり、2つのモードの境界は、泡沫滴下端に溜まった液体の重さと毛管力で決まることが、実験と理論から明らかになった[4]。一方で、泡沫滴下端に溜まる液体量やその時間経過は、泡沫内での液体の流れや、気泡の再配置、それによって生じる泡沫の

マクロな形状変化等が複雑に絡み合っていることが予想され、理論的にこれを求めることは、将来の課題であると考えられる。

参考文献

- [1] T. Tate Esq., *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **27**, 176 (1864) .
- [2] J. Bico and D. Quéré, *J. Fluid Mech.* **467**, 101 (2002) .
- [3] M. Tani, R. Kawano, K. Kamiya, and K. Okumura, *Sci. Rep.* **5**, 1 (2015) .
- [4] M. Tani and R. Kurita, *Soft Matter* **18**, 2137 (2022) .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Yanagisawa Naoya, Tani Marie, Kurita Rei	4. 巻 17
2. 論文標題 Dynamics and mechanism of liquid film collapse in a foam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 1738 ~ 1745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0SM02153A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tani Marie, Fujio Honoka, Kurita Rei	4. 巻 90
2. 論文標題 Transition Behavior in Silicone-coated Sand Mixtures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 033801 ~ 033801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.033801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tani Atusi, Tani Marie	4. 巻 504
2. 論文標題 Classical solvability to the initial boundary value problem for a forced foam drainage equation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Analysis and Applications	6. 最初と最後の頁 125573 ~ 125573
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmaa.2021.125573	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tamura Yuto, Tani Marie, Kurita Rei	4. 巻 12
2. 論文標題 Origin of nonlinear force distributions in a composite system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-04693-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tani Marie, Kurita Rei	4. 巻 18
2. 論文標題 Pinch-off from a foam droplet in a Hele-Shaw cell	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 2137 ~ 2142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1SM01268A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 谷 茉莉
2. 発表標題 壁に吹き付けられた泡沫からの液体ピンチオフ
3. 学会等名 ソフトマター研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷 茉莉, 栗田 玲
2. 発表標題 擬2次元泡沫滴における液体ピンチオフ
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoya Yanagisawa, Marie Tani and Rei Kurita
2. 発表標題 The mechanism of collective bubble collapse in a foam
3. 学会等名 11th Liquid Matter Conference 2020/2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Marie Tani and Rei Kurita
2. 発表標題 Liquid pinch-off from a foam droplet confined in a Hele-Shaw cell
3. 学会等名 11th Liquid Matter Conference 2020/2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Marie Tani, Rei Kurita
2. 発表標題 Foam droplet falling in a Hele-Shaw cell
3. 学会等名 EUFoam 2020 conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷茉莉, 栗田玲
2. 発表標題 Hele-Shawセル中の泡沫滴の下降
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷茉莉, 栗田玲
2. 発表標題 擬2次元泡沫滴のpinch off
3. 学会等名 第19回 関東ソフトマター研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷茉莉, 栗田玲
2. 発表標題 Hele-Shawセル中の泡沫滴のpinch-off
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------