

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01874

研究課題名(和文) 泡沫の動的性質の機構解明

研究課題名(英文) Study of dynamical properties of foams

研究代表者

栗田 玲 (Kurita, Rei)

東京都立大学・理学研究科・教授

研究者番号：20579908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：泡沫に少量の水を加えたときの内部構造が変化する様子(構造緩和)を観察し、気泡の大きさのばらつきによって、構造緩和の仕方が大きく変わることを発見しました。このような緩和過程は、泡沫の力学物性に深く関わっています。シェービングクリームなどの泡沫の塗り広げやメレンゲなどの食感といった日常的な応用だけでなく、消火剤の噴出といった災害関連分野まで広い範囲にわたって応用されることが期待されます。一方で、この緩和過程はジャミングと呼ばれるガラスの分野にも深く関わっています。今回の研究成果は、泡沫の応用を広げるだけでなくガラス分野の研究発展にもつながる重要な発見であるといえます。

研究成果の学術的意義や社会的意義

泡沫は、食料品や化粧品、洗剤、断熱材といった日常的によく見かけることができる状態です。また、泡沫は断熱性といった気体の性質と拡散という液体的な性質、構造を支える固体的な性質をあわせ持ち、産業的にも重要です。本研究成果により、泡沫の力学特性に対する理解が産業への応用につながる期待できるものと考えています。また、泡沫だけでなくガラス分野にとっても重要な成果が得られ、ガラス分野の研究発展にもつながることが期待されます。

研究成果の概要(英文)：We observed how the internal structure of foams changes when a small amount of water is added to them (structural relaxation) and found that the way the structure relaxes varies greatly depending on the variation in bubble size. This relaxation process is deeply related to the mechanical properties of foams. It is expected to be applied not only to everyday applications such as the spreading of foams in shaving cream and the texture of meringues, but also to a wide range of disaster-related fields such as the jetting of fire extinguishing agents. In addition, this relaxation process is also closely related to the field of glass, known as jamming. The results of this research are an important findings that will not only broaden the application of foams, but also lead to the development of research in the field of glass.

研究分野：ソフトマター

キーワード：ソフトマター 泡沫 非平衡 動的性質

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

泡沫とは液体中に気泡が内包されている状態のことをいい、構成成分は液体と気体という流体だけであるにも関わらず、弾性的な性質を持ち形状を保つことができる[1]。このような系をジャミング系という。ジャミング系は泡沫以外にもエマルジョンや粉体、高分子ゲルなどが含まれ、食品や洗剤、化粧品、消化剤、製造過程から生体細胞内まで様々な場面でみることができる。その中でも泡沫は液体分率に依存して多彩な性質を有する[2]。液体分率が小さい時は強い吸水性や吸油性を示し、液体分率が大きくなると流動性を示すようになる。これまで泡沫の安定性に関わる研究がなされてきた。しかしながら、界面活性剤や粘性を変えるといった化学・工学的な観点がほとんどであり、物理的なメカニズムにせまる研究はほとんどない。また、泡沫は塗布や噴射といった外力が加えられる場合も多くあるが、マイクロな内部構造変化がマクロの変形や弾性に影響する複雑な現象のため、泡沫の動的性質もよくわかっていない。このように泡沫の有用性にも関わらず、多くの現象の物理的起源は未解明なままである。

これまで液体分率が小さい時を dry 泡沫、大きい時を wet 泡沫と経験的によばれてきたが、近年では泡沫には液体分率に応じて super dry・dry・wet という3つの状態があり、各状態は明確に区別できることがわかってきた。super dry と dry では力の伝搬の仕方が異なり、dry から wet に転移すると気泡位置を変える再配置が可能となる[2]。Super dry 泡沫では、協同的に一気に崩壊することが知られており[3]、wet 泡沫ではジャミング転移点近傍における臨界現象が示唆されている[4]。しかしながら、協同的崩壊のメカニズムや臨界現象の動的性質について未解明なままである。

2. 研究の目的

そこで我々の本研究では、(1) 協同的崩壊現象を引き起こす原因を解明し、メカニズムを明らかにすることを目的とした。高速度カメラを用いて、擬2次元泡沫の雪崩的崩壊の様子を直接観察した。(2) ジャミング転移近傍における動的臨界現象を調べ、その性質について解明することを目的とした。

3. 研究の方法

我々は、界面活性剤である tetradecyl trimethyl ammonium bromide (TTAB) を純水とグリセロール混合溶媒に溶かし、14%の濃度の溶液を作成した。グリセロールは泡沫の溶液の粘性を調整するために混合している。本研究では、主に、グリセロール濃度が17%の時の結果を示す。TTAB溶液にキャピラリーチューブを通してポンプから空気を送り出し、泡沫を作成した。その泡沫をすくい、2枚の平行なアクリル板で挟んだ(図1)。泡沫の厚さはスペーサーを用いて、調整して、2.2 mmとした。気泡の平均直径は3.5 mmであるため、本研究

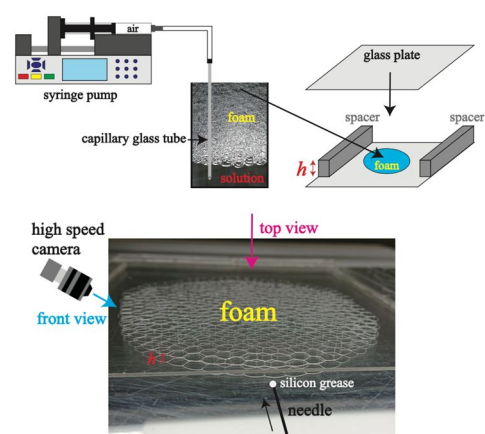


図1 泡沫の実験セットアップ [5]。泡沫をポンプで作成して、高速度カメラで斜めから撮影を行った。

の泡沫は擬2次元系として考えて良い。気泡の数はおよそ150-200程度、大きい泡沫では500程度だった。

崩壊実験では、キャピラリーの先端にシリコングリースを少量塗布し、そのキャピラリーを一番外側の気泡に触れることで崩壊させる。液体分率が小さい時、その気泡から協同的な崩壊が発生する。高速度カメラ(KEYENCE, VW-9000)を用いて、この崩壊過程をフレームレート4000、もしくは10000 fpsで撮影した。

動的臨界現象を調べる実験では、泡沫の中央に少量の水を注入し、その後の構造緩和の様子を撮影した(図2)。

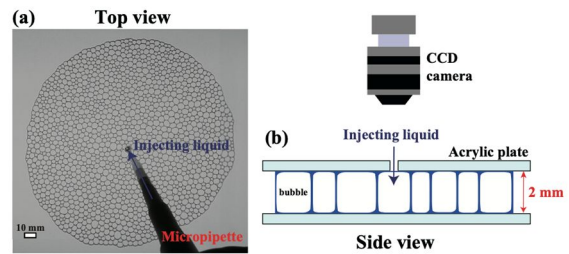


図2 動的臨界現象実験のセットアップ[6]。泡沫に水を少量入れ、構造緩和していく様子を撮影した。

4. 研究成果

4.1 協同的崩壊過程のメカニズム[5]

我々は、泡沫を平行板で挟み込み、一番外側の気泡を針で割り、高速度カメラを用いて泡沫の液膜崩壊の様子を観察した。図3はその液膜崩壊過程を表している。泡沫外側の液膜が破れると、その液膜と連結していた垂直プラトー境界は解放される(これをRVPBと呼ぶ)(図3(a))。RVPBの近くでクラック(液膜の破れ)が生じ、RVPBを輸送しながら泡沫内側に向かって崩壊し始め(図3(b))、さらにRVPBが輸送されていく過程で、崩壊フロントの曲率が反転し(図3(c)-(e))、最終的に形成された液滴が飛び出すことがわかった。この崩壊フロントの曲率反転は、シャボン玉のような単一の気泡ではみられない特異的なふるまいである。

この特異な崩壊の起源を探るために、RVPBについて詳しく調べた。図4は、泡沫外側

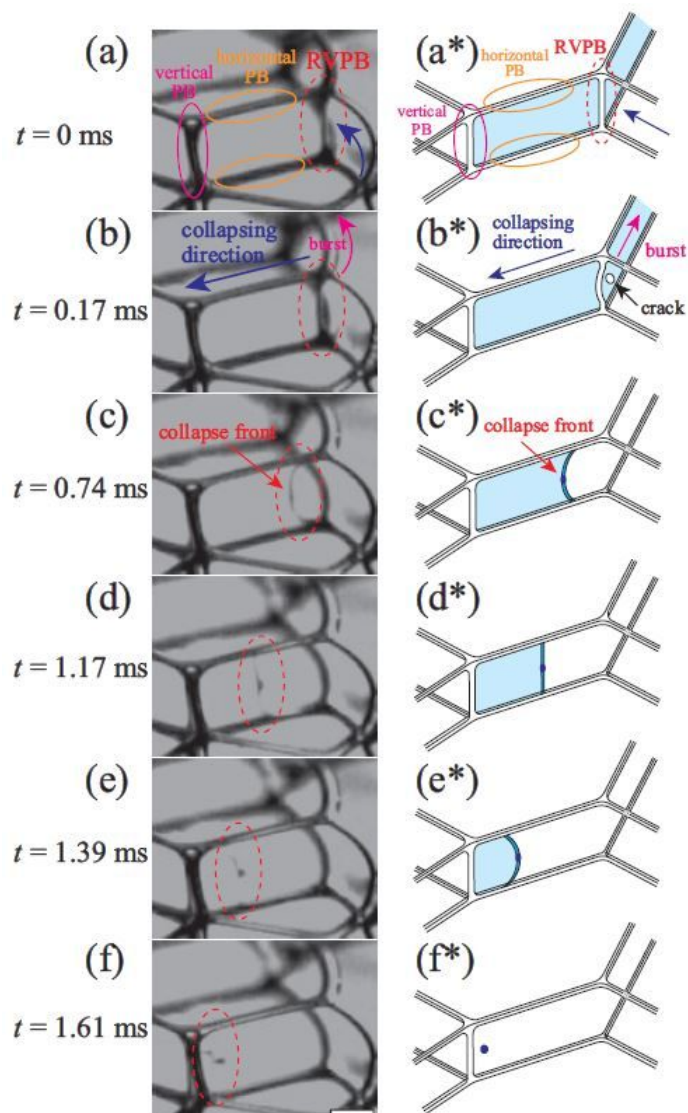


図3 泡沫の液膜が崩壊し、液滴が形成される様子(左)とその模式図(右)。(f)の白線は1mmを表す。[5]

でクラックが起きた直後の RVPB のふるまいの様子を表しており、RVPB の中心方向に液体が移動していることがわかった。また、RVPB の輸送をともなった液膜の崩壊フロントの速度について調べた。この RVPB の輸送をともなった液膜の崩壊は、運動方程式を用いて理論的に見積もられた値と、実験で測定した値がよく一致することがわかった。この理論から崩壊フロントの曲率の反転は、慣性の液体輸送によって生じる RVPB の中心部分と両端部分の質量差が原因であることがわかった。

また、泡沫の液体の粘性、界面活性剤の種類を変えて実験を行ったところ、同様な液膜崩壊の様子を観察することができた。洗剤溶液の場合は、クラックが生じないために、RVPB の輸送をともなった液膜崩壊は観察されなかったが、RVPB の中心方向への液体輸送の様子は観察された。このことから、泡沫の液膜崩壊は、液体の粘性や界面活性剤の種類に依存しない一般性をもっているといえる。

以上のことから、泡沫の協同的崩壊が起きるための物理的条件は 2 つあることがわかります。ひとつは、RVPB が輸送されるためには連続してクラックが起きる必要があることです。もうひとつは、液膜崩壊の間に崩壊フロントの曲率反転が起きることです。なぜなら、曲率反転によって RVPB は液滴となって放出され、液滴が別の遠くの液膜を突き破る（貫通モード）ためです。崩壊が起きないように安定化させるには、クラックが起きないように液膜の表面粘弾性を調整してたわみやすくすること、RVPB の中心方向への液体輸送の慣性を弱くすることが重要であるとわかりました（図 5）。

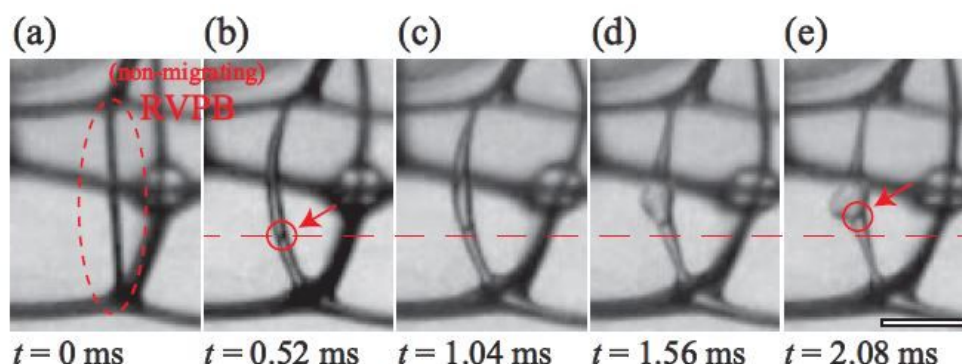


図 4 泡沫外側でクラックが起きた直後の RVPB の中央に液体が集まる様子。(b)と(e)の赤円は RVPB 内の不純物を表しており、中心に向かって移動している。(e)の白線は 1mm を表す。

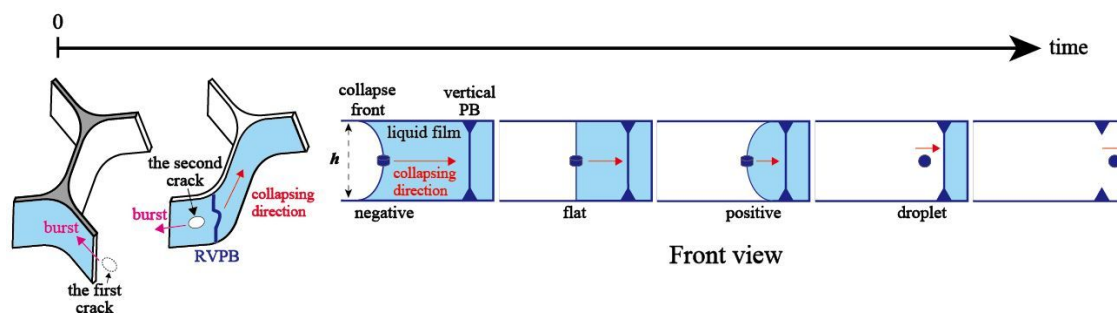


図 5 液膜崩壊の模式図。2 箇所クラックが生じることで RVPB が輸送され、曲率が反転すると液滴が形成され、放出される。

4.2 動的臨界現象 [4][6]

泡沫を平行板で挟み込んだ2次元的な泡沫に外側から水を加えた．水を加えることで，泡沫が安定状態から少しだけずれるため，新しい安定状態へ変化しようとする．この間の構造緩和の様子を観察した．この変化は外力を加えて内部の構造を強制的に変化させた時の構造緩和に対応している．

外側から水を加えてからしばらく経った後(水の加えた影響が充分になくなった後)でも内部で構造緩和する様子が観察された．図7は内部の気泡が構造緩和した時の移動を赤矢印で表している．図7左は気泡のサイズが揃っている時で，協同的に気泡の動きが揃っている，もしくは，反対になっている様子(スリップ緩和)がわかった．一方，気泡のサイズがバラバラの時，気泡の動きはランダムになっている様子(ランダム緩和)が観察された．このように内部構造緩和は気泡サイズのばらつきに大きく依存することがわかった．

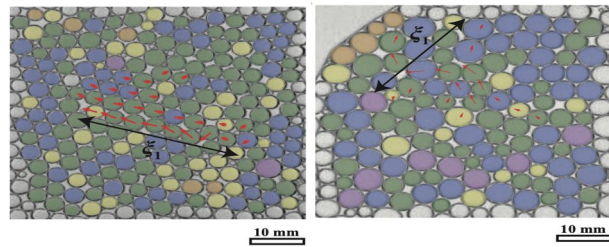


図7 構造緩和時の気泡の動き(赤矢印)と接触気泡数(色)．左図は気泡のサイズのばらつきが小さいときでスリップ緩和している．右図はばらつきが大きい時でランダム緩和していることがわかった．

また，図7の気泡の色は，緑が接触している気泡が5個，青が6個というように，接触している気泡数を表している．この接触している気泡の数の平均は気泡のサイズのばらつきにほとんど依存しないことがわかった．一方，少し離れた粒子も含めた構造を見ると，気泡のサイズが揃っているときは蜂の巣構造が多いことがわかる．これらのことから，構造緩和はこれまで接触している気泡数が重要と言われてきたが，接触している気泡数よりも中距離の構造の方が重要であることもわかった．

また，液体の量を変えて実験を行ったところ，液体量が増えると，構造緩和の特徴的な長さや時間が増大していくことがわかった(図8)．この特徴的な長さや時間の増大は気泡のサイズのばらつきには関係しないことも明らかになった．これらの結果は，ジャミング転移と呼ばれる現象のシミュレーション結果と一致している．これまで，ジャミング転移点近くの実験は数少なかったため，今回の成果はガラス分野にとっても重要な結果となっている．

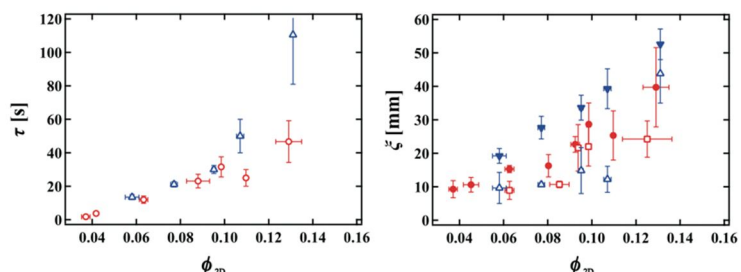


図8 液体量が増加すると，構造緩和の特徴的な時間(左)と長さ(右)が増大していることがわかった．赤は気泡の大きさのばらつきが小さい時の結果，青はばらつきが大きい時の結果を表している．

参考文献

- [1] Weaire, D. L. and Hutzler, S. The physics of foams (Oxford: Clarendon Press, 1999).
- [2] Yujiro Furuta, Noriko Oikawa and Rei Kurita, Sci. Rep. 6, 37506 (2016).
- [3] Naoya Yanagisawa and Rei Kurita, Sci. Rep. **9**, 5152 (2019).
- [4] Naoya Yanagisawa and Rei Kurita, Sci. Rep. **11**, 2786 (2019).
- [5] Naoya Yanagisawa, Marie Tani and Rei Kurita, Soft Matter **17**, 1738-1745 (2021).
- [6] Naoya Yanagisawa and Rei Kurita, Sci. Rep. **13**, 4939 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

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 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 Yanagisawa Naoya、Kurita Rei	4. 巻 11
2. 論文標題 Size distribution dependence of collective relaxation dynamics in a two-dimensional wet foam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2786
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-82267-4	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 KOBAYASHI Kazuya、KURITA Rei	4. 巻 35
2. 論文標題 Common Properties of Gravitational Instability in Liquid Systems and Granular Materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW	6. 最初と最後の頁 118 ~ 124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3811/jjmf.2021.017	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 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

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 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 Ryoko Shinohara, Kazuya U. Kobayashi, Marie Tani and Rei Kurita
2. 発表標題 Observation of inhomogeneous concentration field in a convection of a binary mixture
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 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 Naoya Yanagisawa and Rei Kurita
2. 発表標題 Collective bubble collapse dynamics in a foam
3. 学会等名 EUFoam 2020 conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

都立大ソフトマター研究室 https://www.comp.tmu.ac.jp/soft/index.html

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
---------	---------