

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2023

課題番号：21K20420

研究課題名（和文）泡沫の生成崩壊過程における液膜運動の計測技術開発

研究課題名（英文）Development of measurement techniques for liquid-film dynamics during foam formation and collapse

研究代表者

齋藤 慎平（Saito, Shimpei）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・研究員

研究者番号：80909606

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：気泡が密に詰まった系である「泡沫」を対象とし、泡沫の微細かつ非定常な挙動と泡沫の巨視的特性を明らかにするための可視化および計測技術の開発を行った。平行平板に泡沫を流動させることで2次元的な観察体系を構築し、泡沫の流動様相がdry状態からwet状態に遷移する条件を明らかにできた。さらに、光ファイバプローブを用いた気液界面の計測系を構築し、泡膜（液相）と気泡（気相）がファイバ先端と短時間で接触する泡沫特有の信号を10 us以下の高時間分解能で捉えることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、泡沫の構造を精緻に捉えるために平行平板間に泡沫を流動させることで2次元的な泡沫の運動をその場で直接観察するとともに、光ファイバプローブによる光学的な気液界面の計測技術を泡沫に適用し、泡沫特有の信号をとらえた。本研究の成果は、極めて複雑で多様な様相を見せる泡沫の「特性理解」の一助となる学術基盤であり、可視化と光学技術を組み合わせることでこれを実現しうることを示した点にある。

研究成果の概要（英文）：We have developed visualization and measurement techniques to clarify the microscopic and transient behavior of foams and their macroscopic characteristics. We constructed a two-dimensional observation system by generating foams flow on a parallel plate, and were able to clarify the conditions under which the flow phase of bubbles transitions from a dry state to a wet state. Furthermore, we constructed a measurement system for the gas-liquid interface using an optical fiber probe, and succeeded in capturing the foam-specific signal, in which the foam film (liquid phase) and the bubble (gas phase) come into contact with the fiber tip in a short time, with a high temporal resolution of less than 10 us.

研究分野：混相流

キーワード：泡沫 界面活性剤 光ファイバプローブ 液膜 泡

### 1. 研究開始当初の背景

気泡が自由界面に到達するとある持続時間を経て破泡するが、界面に何らかの安定化作用が働くと気泡が破泡せずに密に詰まった状態が長時間形成されることがある。この様相を泡沫と呼ぶ。単に泡やフォームと呼ばれることもある。

泡沫は、食品や化粧品といった広い産業で活用されている。建築分野におけるウレタンフォーム等、断熱材として使用される側面もある一方、ガラス溶解で発生する泡沫はその断熱効果により、エネルギー利用効率を大幅に悪化させる。泡沫を構成する液膜(泡膜)が非常に微細かつ非定常に運動するため、泡膜の厚みや移動の動的な挙動を捉えることが極めて難しく、その計測や評価法そのものが確立されていないのが現状である。泡沫が本質的に、いつどのような条件で発現して形状を維持し、どのような過程を経て崩壊に至るかは解明されていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、泡膜の動的挙動計測・評価手法を開発することである。本研究では、極めて応答性に優れた光ファイバプローブ法により、極短時間かつ微小領域で発生する泡膜のダイナミクスを詳細に捉える計測手法を構築する。

### 3. 研究の方法

図1に泡沫を生成し、その様子を観察するために製作した装置の概要を示す。実験装置は、界面活性剤水溶液を溜め泡沫を生成する水槽部と泡沫を観察するための平板状の観察部から構成される。水槽中にはベンチュリ管を設置し、ポンプで液を循環させることにより空気を吸引するとともに、微細気泡の状態で水槽中に放出される。界面活性剤水溶液中に放出された微細気泡は自発的に合一、成長し泡沫を形成する。水槽上部に形成された泡沫は、平行平板からなる観察部を流出する。この様子をカメラで捉えた。また、カメラの撮影開始信号をトリガとし、観察部上流と下流に設置した差圧センサのデータも同時に取得した。

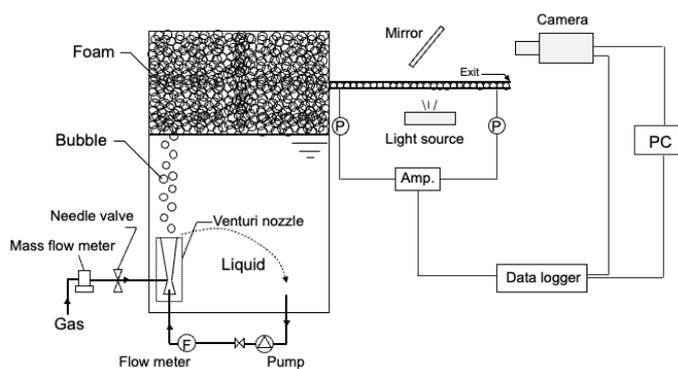


図1 製作した泡沫観察装置の概要

図2に、文献[1, 2]を参照して構築した光ファイバプローブ計測系の概要を示す。レーザーダイオードから放出された光束状の光は、ハーフミラーを介して対物レンズへと導入され、集光されて光ファイバプローブへと導かれる。プローブ先端では、接触する対象の屈折率に応じて、強度の異なる戻り光が生じる。この戻り光は再びハーフミラーに到達するので、偏光フィルタを用いて戻り光の強度が最大となるよう角度を調整し、光検出器で電圧信号に変換した。この信号をオシロスコープで測定した。

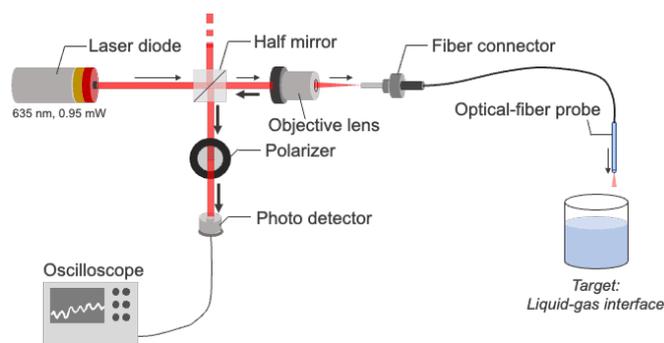


図2 光ファイバプローブ計測系の概要

### 4. 研究成果

図3に、製作した実験装置を用いて得られた泡沫の観察結果の一例を示す。それぞれ、水槽部に吹き込む気相の体積流量を5から180 mL/minの範囲で調整した結果を示している。図に示されるように、気相流量が小さい条件では、気泡は多角形の構造を示しており、いわゆる dry foam の状態であることがわかる。流量を大きくしていくことで、気泡の数は減少し、気泡のサイズは大きくなった。気相流量が50 mL/minを上回る条件付近から、泡沫中の液分が多くなり、画像としては全体的に暗くなっていることが確認できる。気泡形状は徐々に丸みを帯びてきており、いわゆる wet foam の状態であることがわかる。本実験装置を用いて、このような dry から wet まで、異なる様相の泡沫が流動する様子が捉えられることがわかった。

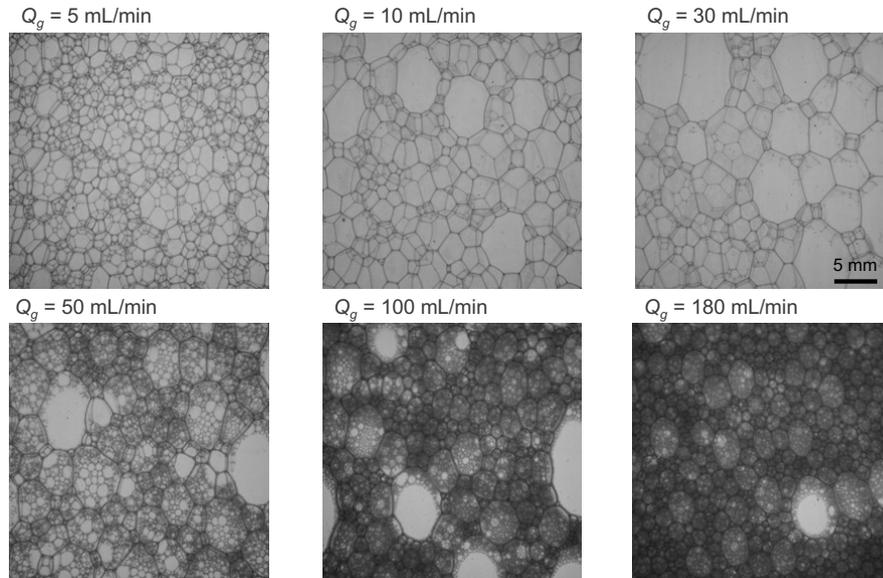


図3 平行平板間を流動する泡沫の流動様相

図4に、光ファイバプローブによる計測結果として、単純な水面への接触を繰り返した場合 [図4 (a)]と、図1の装置を用いて流動させた泡沫にプローブを当てた場合の結果 [図4 (b)] をまとめて示す。図4 (a)より、単純な水面にプローブを接触させた場合、単純な矩形波のような信号が得られていることがわかる。高い側の電圧が気相との接触を、低い側の電圧が液相との接触を表している。気相と液相が明確に区別できる場合は、得られる信号の解釈も明確である。

一方で、図4 (b)のように、流動する泡沫に本計測を適用した場合、得られる信号も複雑である。プローブが、泡膜に接触した瞬間に、電圧は急激に下がる。そして再びプローブが気相と接触すると、電圧は急激に上昇する。この信号の解釈は単純ではない。まず、泡沫を生成するために界面活性剤を使用している点が挙げられる。すなわち、純水に比べて界面活性剤水溶液は界面張力係数が小さいため濡れやすく、プローブ先端に付着した液の影響が残る可能性がある。

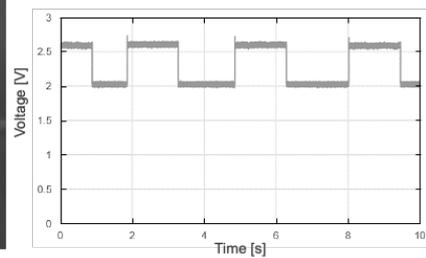
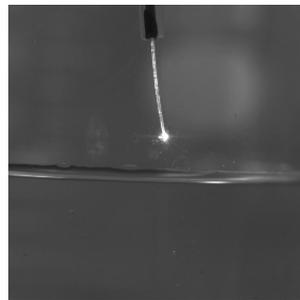
加えて、泡沫中の気泡の内部における光の反射は気泡形状に依存し、複雑である。結果として、図4 (b)に示すような、単純ではない信号が得られたものであろう。このような複雑な信号は、泡膜の厚さ、気泡サイズ、気泡形状など様々な情報を内包していると考えており、光ファイバプローブ計測法が泡沫の評価法として有益となりうる見通しは得られたと考えている。

本研究課題を通して、この報告に述べられない瑣末な失敗も含めて、泡沫の生成や観察、計測に関する確かな基盤を構築することができた。研究代表者は、泡沫の本質的な理解深化に向けて、本成果を足がかりとしてさらなる研究を展開していく所存である。

#### 参考文献

- [1] 齋藤隆之, 日本国特許 3018178, (2000)
- [2] 水嶋祐基, 齋藤隆之, レーザー研究, 39-6 (2011)

(a)



(b)

光ファイバプローブ (Φ0.2mm)

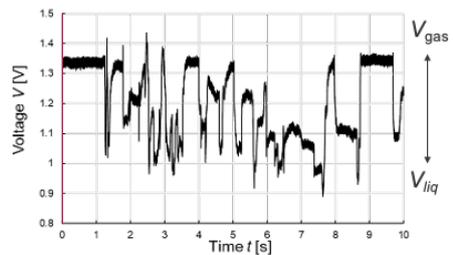
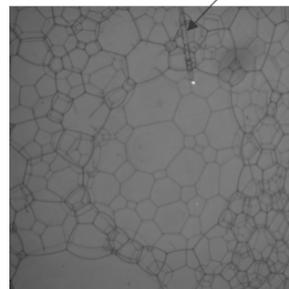


図4 光ファイバプローブ計測で得られた

- (a) 単純な水面にプローブを接触させた場合
- (b) 流動する泡沫に接触させた場合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Mizushima, S. Saito
2. 発表標題 Development of measurement method for dense foam using an optical fiber probe
3. 学会等名 The 12th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Saito, S. Baba, N. Takada, S. Someya, H. Ito
2. 発表標題 Visualization and measurement of foam flowing between two-dimensional narrow parallel plates
3. 学会等名 The 11th International Conference on Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤慎平, 馬場宗明, 高田尚樹, 染矢聡
2. 発表標題 省エネだけじゃない！熱交換促進がブレイクする革新技術
3. 学会等名 日本化学会 第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤慎平, 馬場宗明, 高田尚樹, 染矢聡, 伊藤博
2. 発表標題 平板間を流動する2次元泡沫の可視化計測
3. 学会等名 混相流シンポジウム2022
4. 発表年 2022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
---------	---------