

乱流せん断流れが気泡分裂に及ぼす影響の実験的解析

日大生産工(院) ○西澤 拓馬 日大生産工 沖田 浩平

1. 諸言

マイクロバブルは、比表面積が大きく浮上速度が遅いといった特徴から、工業分野や医療分野など幅広い応用が期待されている。その効率的な生成法を確立するため、気泡分裂メカニズムの解明が重要な課題である。気泡の微細化メカニズムは、これまで実験・数値の両面から研究され、狭小流路内での気泡崩壊挙動^{1,2)}や、次式で表される Hinze-scale を超える気泡が乱流場で連鎖的に分裂する現象^{3,4)}などが挙げられる。

$$d_H = \left(\frac{We_c}{2}\right)^{3/5} \left(\frac{\gamma}{\rho_w}\right)^{3/5} \epsilon^{-2/5} \quad (1)$$

せん断流れ場における気泡の分裂挙動、特に定量的な分裂条件については、未だ知見が少ないのが現状である。そこで本研究では、急拡大流路（バックステップ流れ）によって形成される強いせん断流れ場に着目した。本研究の目的は、この流れ場における気泡の分裂現象を高速度カメラで詳細に観察し、画像解析を通じて定量的評価を行うことで、せん断流れが気泡分裂に及ぼす影響を明らかにすることである。

2. 実験方法

2.1 実験装置

Fig.1 に、本研究で用いた実験装置の概略図およびバックステップ流れの流路形状を示す。ポンプから供給された流体は、可視化部を通過した後タンクに戻る構成となっている。可視化部におけるステップ高さは $H=10$ mm、流路の入口寸法は 20mm、出口寸法は 30mm、流路の奥行きは 20 mm である。なお、可視化部はアクリル製とし、流路内の気泡挙動を高速度カメラにより明瞭に観察可能な構造としている。また、気泡は、シリジンから押し出された空気を内径 1.2 mm、外径 1.6 mm のニードルを通じて注入することで生成され、その直径は約 1.5 ~ 2.0 mm である。

2.2 実験条件

流量 Q から算出される平均流速 U とステップ高さ H を用いて、レイノルズ数は $Re = UH/\nu$

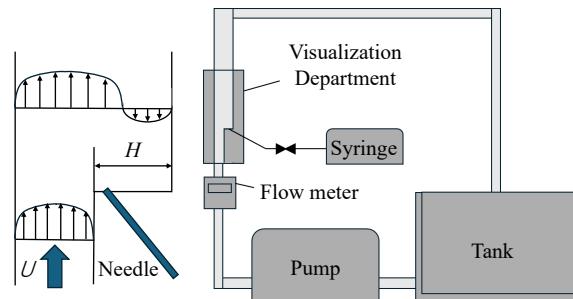


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

で定義した。実験における流量条件 $Q = 47.8 \sim 90 \text{ L/min}$ に対応するレイノルズ数は $Re = 1.98 \times 10^4 \sim 3.73 \times 10^4$ となる。ただし、水の動粘度 $\nu = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ @ 20°C を用いた。気泡の可視化には、高速度カメラ (nac 社製: HX-7S) を用い、バックライト法により流路内の気泡挙動を撮影した。管内全体の気泡挙動を観察する際の撮影条件は、フレームサイズ 1024 × 1920 ピクセル、シャッタースピード 20k、フレームレート 2000 fpsとした。

撮影された気泡分裂の画像は、画像解析ソフト ImageJ⁵⁾ を用いて処理し、長径 R_l 、短径 R_s 、周囲の長さ L 、および面積 S を算出した。また気泡が完全な球形でないことを考慮し、平均気泡径 R_a を次式で算出した。

$$R_a = \frac{1}{2}(R_l + R_s) \quad (2)$$

3. 実験結果

Fig.2 および Fig.3 に、各レイノルズ数における気泡状態と気泡分裂の様子を示す。Fig.2 より、レイノルズ数の増加に伴って気泡分裂数が増加していることがわかる。また、Fig.3(a) より、 $t = t_0 + 31.5 \text{ ms}$ で気泡はせん断流れにより流れに引き伸ばされ、 $t = t_0 + 47.7 \text{ ms}$ で 2 つに分裂しており、Fig.3(b) および(c) より、レイノルズ数の増加に伴って、気泡がより微細化していることがわかる。Fig.2 の画像から、画像処理によって得られた気泡分裂数 N_d の結果を Fig.4 に示す。図より、気泡分裂数 N_d がレイノルズ数の 2.92 乗に比例する関係があることが明らかとなった。これは、流れが乱流状態にある本実験条件において、レイノルズ数の増加が

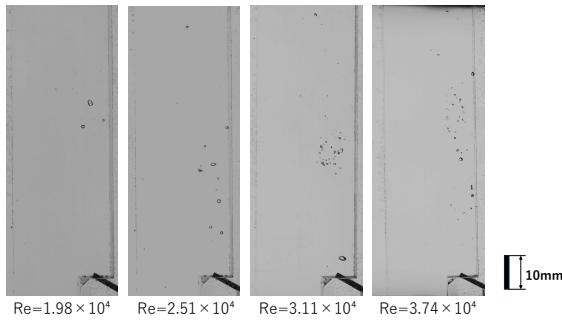


Fig.2 Comparison of bubble fragmentation at different Reynolds numbers

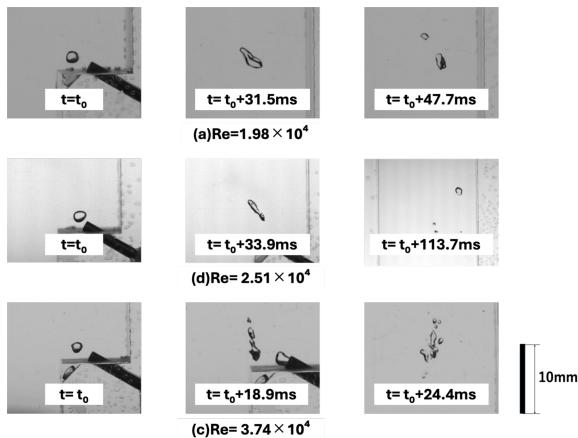


Fig.3 Time evolution of bubble fragmentation

乱流の強度、すなわち流れの不規則性を急激に高め、それに比例して気泡へのせん断応力や圧力勾配が増加することに起因すると考えられる。また、乱流場における気泡の分裂限界径を与えるHinze-scaleについて考察すると、 Re の増加に伴って値が小さくなることから、より小さな気泡も存在しやすくなり、気泡分裂数 N_d が増加したと考えられる。

Fig.5に、各レイノルズ数における分裂後の気泡数分布を示す。各レイノルズ数条件で3回の実験データの平均値を用いて作成した。レイノルズ数の増加とともに、1mm以下の気泡数が増加しており、特にレイノルズ数 $Re = 3.55 \times 10^4$ 以上で、1mm以下の気泡数が急増していることがわかる。

4. まとめ

乱流せん断流れが気泡分裂に及ぼす影響について調べるために、バックスステップ流れを用いた気泡分裂の可視化実験を行った結果、気泡分裂数がレイノルズ数の 2.92 乗に比例する関係があることがわかった。また各レイノルズ数における気泡系分布ではレイノルズ

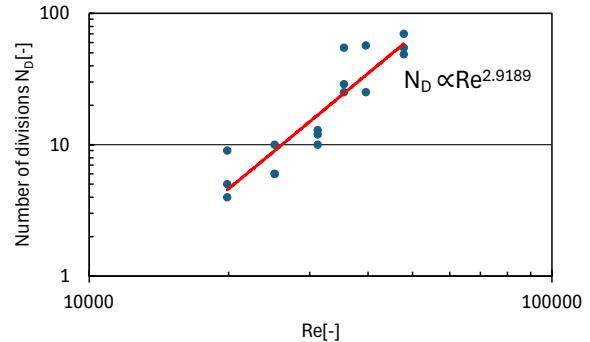


Fig.4 Number of divisions as function of Reynolds number.

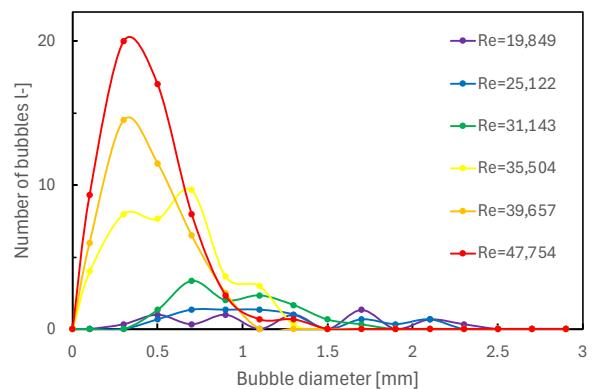


Fig.5 Bubble size distribution at various

数の増加とともに 1mm 以下の気泡数が増加することが確認できた。

参考文献

- 1) 藤原暁子, 菊田公一, せん断流中の単一気泡の挙動, 日本機械学会論文集 68 卷 667 号(2002)
- 2) 金子暁子, 野村康通, ベンチュリ管内における気泡崩壊現象, 日本機械学会論文集 78 卷 786 号(2012)
- 3) Warjito, 望月修, 石川仁, 単気泡の分裂とそれによる音, 日本流体力学会誌「ながれ」 21 卷 2 号(2002)
- 4) Aliénor Rivière ,Wouter Mostert , Stéphane Perrard ,Luc Deike , Sub-Hinze scale bubble production in turbulent bubble break-up ,J. Fluid Mech.(2021), vol. 917, A40, doi:10.1017/jfm.2021.243
- 5) <https://imagej.net/ij/>