斜め平板に沿って上昇する球形気泡群のクラスタ化に関する実験的解析

An experimental analysis of the clustering phenomenon of spherical bubbles rising along an inclined flat plate

○学 白井 翔文 (阪府大院) 正 小笠原 紀行 (阪府大)
フェロー 高比良 裕之 (阪府大)Shota SHIRAI, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531
Toshiyuki OGASAWARA, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531
Hiroyuki TAKAHIRA, Osaka Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531

The motion of mono-dispersed spherical bubbles rising along an inclined flat plate has been observed experimentally and the effects of the inclination angle and the air flow rate have been instigated. When number density of bubbles becomes higher and the rising velocity along an inclined flat plate becomes slower, the bubbles tend to be horizontally arranged in lines and such arrangements pile up to the bubble cluster. This clustering tendency is similarly confirmed when the no-slip condition, as well as the free-slip condition, is imposed on the bubble surface. On the other hand, the interaction of the no-slip bubbles yields larger displacement in the lateral direction.

Key Words: Bubble cluster, Bubbly flow, Inclined flat plate, Electrolyte, Surfactant

1. 緒言

液体中に多数の分散体としての気体を含む気泡流は、自然界から工業応用技術に至るまで幅広く見られる流動現象である。この気泡流の流動構造は気液間相互作用の影響を大きく受けるが、例えば同様のボイド率を有する気泡流であっても、気泡群の分散形態の差異により流動構造が異なることが知られている。特に、気泡群が局所的に集積して形成される気泡クラスタは液相流動に対して多大な影響を及ぼすが、その形成メカニズムに関しては不明な点が多い。Takagi and Matsumoto⁽¹⁾は、垂直チャンネル内上昇気泡流中において、壁面近傍で二次元的にその運動を拘束された気泡群による気泡クラスタを報告しているが、液相流動が乱流場であること、水中に混入した界面活性剤による濃度マランゴニ効果により気泡表面の境界条件がハーフスリップであることなど、気泡運動への影響因子が複雑であった。したがって、本研究では、より単純化された系における気泡群挙動として、静止流体中における斜め平板下を上昇する単分散の気泡径分布を有する球形気泡群を対象とし、気泡クラスタの形成過程の解明を目的とした実験を行う。特に、気相流量や平板の傾斜角、気泡表面における境界条件の差異の影響を解析する。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の概略図をFig. 1に示す。実験装置は、高さ 980 mm、横幅 300 mm、奥行き 40 mmの透明の亚克力製のチャンネルであり、下部に 40 本のステンレス細管 (内径 100 μm)

Fig. 1 Schematic of experimental setup

を 5 mm 間隔で一列に配置した気泡発生部からなる。気相には空気をを用いており、その流量 Q_g を 50 ml/min から 150 ml/min の範囲で設定する。発生時の気泡は直径約 1.5 mm 程度で大きさがそろっているが、この単分散の気泡径分布を維持するためには上昇中の気泡合体を防止する必要がある。そのため液相としては、溶媒である蒸留水に電解質を添加した 0.05 M の硫酸マグネシウム水溶液、または界面活性剤を添加した 10 ppm の Triton X-100 水溶液を用いる。硫酸マグネシウム水溶液中では、気泡表面にはせん断応力が発生せず、境界条件はフリースリップとなる一方、10 ppm の Triton X-100 水溶液中では、濃度マランゴニ効果によりノースリップとなる。なお、これらの薬品添加による液相の動粘度に対する影響は軽微であるため、水と同様とみなすことができる。また、チャンネルは任意の角度に傾けられるようになっており、チャンネル壁面と水平軸のなす傾斜角を θ とし、 $\theta = 90^\circ$ (垂直) から $\theta = 30^\circ$ まで 10° 刻みで設定する。観察領域は気泡発生部より 490 mm 上流のスパン方向中央部付近とし、高速度カメラとバックライト照明により 90 mm 角の範囲における気泡群の影絵の時系列画像を撮影する。

3. 実験結果及び考察

3-1 気泡クラスタ形成の様子 Fig. 2(a)に硫酸マグネシウム水溶液中における $\theta = 30^\circ$ のときの気相流量別の気泡群の様子を示す。まず、いずれの Q_g においても、数個の気泡が横方向に並んだ気泡群が多く存在する。この横一列の気泡群は比較的安定して配列を保ちつつ上昇する様子が見られた。一方で、縦方向に並んだ状態を保ったまま安定的に上昇する気泡群は観測されない。 Q_g の増加に伴い、より多くの気泡がより長い横方向の列を形成するようになると同時に、横一列一層の気泡群同士が干渉することで多層に並んだ気泡群が形成されやすくなった。さらに、 $Q_g = 150$ ml/min まで増加すると、既存の研究で報告されているような、ブーメラン型の気泡クラスタに成長する気泡群が頻繁に観測された。次に Fig. 2(b)に、硫酸マグネシウム水溶液中における $Q_g = 50$ ml/min のとき、傾斜角 θ を 30° , 40° , 50° と変化した場合の結果を示す。いずれの条件においても、比較的安定してその配置を保ったまま上昇する横方向に並んだ気泡群が観察される。しかしながら、傾斜角 θ の増加に伴い、隣接する気泡間の間隔が広がっている様子が見受けられる。これは、平板に沿う上昇速度の増加により、気泡数密度が減少したことや、気泡レ

Fig. 2 Snapshots of mono-dispersed spherical bubbles rising along the inclined flat plate

Fig. 3 Bubble clustering in MgSO_4 aq. (left, $\theta = 30^\circ$) and Triton X-100 aq. (right, $\theta = 60^\circ$) at $Q_g = 150$ ml/min

イノルズ数の増加により気泡間の定量的な相互作用に変化が生じたことが原因であると考えられる。また、図示はしないが、 $\theta = 40^\circ$ 、 $Q_g = 150$ ml/minの条件では、気泡群のクラスタ形成はなされるが、Fig. 2(a)の $\theta = 30^\circ$ 、 $Q_g = 150$ ml/minの場合とは異なり、いったん気泡クラスタが形成されてもすぐに分散してしまう傾向があった。これは、 θ の増加に伴い浮力の壁面に沿う方向の成分が増加するため、気泡径の微小な差異に起因する浮力の差がより大きな上昇速度の差をもたらすため、横並びの気泡配置の安定性が低下したことが原因であると考えられる。以上から、個々の気泡レイノルズ数が低くなる傾斜角 θ が小さい条件において、より安定的な気泡クラスタ形成が促進されるものと考えられる。

硫酸マグネシウム水溶液中においては、気泡表面はフリースリップの境界条件を有する。今、気泡表面における境界条件の差異が気泡クラスタ形成に及ぼす影響の調査を目的として、濃度マランゴニ効果により気泡表面がノースリップとなるような界面活性剤溶液（10 ppmのTriton X-100水溶液）を用いた実験との比較を行う。気泡表面の状態以外の条件を揃えるため、傾斜角 θ を調整し、平均気泡直径 d と平板に沿う上昇速度の平均値で定義する平均気泡レイノルズ数 Re を比較した。Triton X-100水溶液中で $\theta = 60^\circ$ のとき $Re = 138$ となっており、これは硫酸マグネシウム水溶液中における $\theta = 30^\circ$ および $\theta = 40^\circ$ の条件における $Re = 102$ と $Re = 145$ の中間的な値であった。Fig. 3に $Q_g = 150$ ml/minの場合の、Triton X-100水溶液中における $\theta = 60^\circ$ の結果と硫酸マグネシウム水溶液中における $\theta = 30^\circ$ の結果の比較を示す。Triton X-100水溶液中においても、横方向に並ぶ安定的な気泡配置と気泡クラスタの形成が確認できる。しかしながら、隣接気

泡間隔等、気泡間相互作用の詳細には多少の違いが認められる。

3-2 気泡中心の配置とその動径分布関数 各条件における気泡配置を定量的に評価するため、気泡中心の動径分布関数の算出を行う。動径分布関数は、群挙動における要素の選択的集積に対する定評的な評価として多く用いられており、気泡流の解析においてもしばしば利用される⁽²⁾。まず、各気泡の中心座標は、得られた画像から円ハフ変換を用いた画像処理により算出される。動径分布関数は、任意の気泡中心 i から動径方向 r だけ離れた場所における他の気泡 j の中心の数密度を領域全体の平均数密度で規格化したものであり、以下の式によって定義する。

$$G(r) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{S}{N_b(N_b - 1)} \frac{1}{2\pi r \Delta r} \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_b} \left(H\left(r_{ij} - r + \frac{\Delta r}{2}\right) - H\left(r_{ij} - r - \frac{\Delta r}{2}\right) \right)$$

ここで、 N は処理する画像の枚数、 N_b は測定領域内（面積 S ）の気泡数、 r_{ij} は気泡 i と気泡 j との中心間距離、 H はヘビサイド関数である。また、 Δr は $\Delta r = d/5$ （ d は測定領域内に存在する気泡の平均直径）とした。この際、測定領域は、その範囲が気泡クラスタの大きさに対して十分に広くなるよう留意して設定している。

Fig. 4に硫酸マグネシウム水溶液中で $\theta = 30^\circ$ のとき、気相流量別の動径分布関数 G を示す。なお、横軸は動径半径 r を各々の条件下での平均気泡直径 d を用いて規格化したものである。まず、いずれのプロットにおいても $r/d = 1$ に顕著なピークが存在していることがわかる。これは気泡中心間の距離がちょうど平均気泡直径分だけ離れた位置、つまり別の気泡が隣接する位置に高い頻度で存在することを示している。さらに、 $r/d = 2$ にも第二のピークが存在している。これは、すなわち、三つの気泡が接した状態で列をなしている群構造が多く存在することを意味する。 $G = 1$ とは、気泡数密度が測定領域全体の平均密度と同様であることを示すが、いずれの気相流量条件においても $r/d < 8$ の領域で $G > 1$ となっているため、クラスタ形成のなされる影響範囲は平均気泡直径の8倍程度であるということが出来る。気相流量の差による主な相違は、 $r/d = 1$ における第一のピークの高さにある。 $Q_g = 50$ ml/minから $Q_g = 100$ ml/minと流量が二倍になると、ピーク値は約30%減少する。流量が二倍に増加すると、平均数密度も約二倍になるため、接する気泡数が同様の場合には G の値は半分になる。しかしながら、30%の減少に留まってい

Fig. 4 Radial pair distribution function G as a function of the air flow rate (MgSO_4 aq., $\theta = 30^\circ$)

ることから、気泡数密度の増加によってより密集した気泡配置になっていることがわかる。さらに気相流量を増加して $Q_g = 150 \text{ ml/min}$ とすると、第一ピークの値は $Q_g = 100 \text{ ml/min}$ のときよりも増加する。これは、平均数密度の増加割合以上に、急激に気泡群が隣接した配置をとりやすくなったことを意味する。これは、Fig. 2(a)に見られるように、低流量の条件においては横一列に並んでいた気泡群が、流量増加に伴い縦方向に層をなして気泡クラスタを形成する際、横方向のみならず縦方向にも隣接する気泡配置が頻出することに対応しているものと考えられる。

次に、Fig. 5 に 硫酸マグネシウム水溶液中で $\theta = 30^\circ$ 、 $Q_g = 50 \text{ ml/min}$ のときの領域を限定した動径分布関数 G を示す。この三つのプロットは、気泡 i の中心を通る水平方向に対する傾きがそれぞれ $\pm 45^\circ$ の二直線で仕切られる領域のうち、横方向の領域（サブセット 1、実線と□）もしくは縦方向の領域（サブセット 2、点線と◇）のみに存在する気泡 j を条件付きサンプリングした場合の双方の動径分布関数と全方位においてサンプリングした結果（破線と○、Fig. 3 の $Q_g = 50 \text{ ml/min}$ の場合と同様）とを比較したものである。まず、 $r/d = 1$ におけるピーク値には横方向と縦方向の配置に違いは見られない。これは、横一列に並んだ気泡群の様子（Fig. 2）からもわかるように横に二つ隣接した配置が安定である一方、列が層状に重なった顕著な気泡クラスタが形成されない $Q_g = 50 \text{ ml/min}$ のような低い気相流量条件においても二つの気泡が縦に隣接した配置が頻出していることを意味している。これは、先行する気泡背後の後流域の影響により、後続する気泡に働く抗力が低下することで、先行する気泡に後続する気泡が追い付き、縦に隣接する二気泡になる描像が存在するからである。しかしながら、 $r/d > 1$ の領域では縦方向に対する動径分布関数（サブセット 2）は急激に低下することから、三つ以上の気泡が縦に並んだ気泡配置の頻度は低いことがわかる。さらに、平均気泡直径の 4 倍程度離れると G が 1 以下になり、平均的には気泡の集積が生じていない。これに対し、横方向に対する動径分布関数（サブセット 1）に関して、 $r/d > 1$ における減少が緩やかであることは、横方向に対して気泡が選択的に集積している観測結果に対応するものである。

3-3 気泡表面の境界条件による依存性 Fig. 3 に示すように、硫酸マグネシウム水溶液及び Triton X-100 水溶液を用いた双

Fig. 5 Radial pair distribution functions G for different alignments of bubble centers ($\text{MgSO}_4 \text{ aq.}$, $\theta = 30^\circ$, $Q_g = 50 \text{ ml/min}$). Solid line with squares, centers of each pair aligned about $\pm 45^\circ$ to the horizontal direction (subset 1); dots with diamonds, centers of each pair aligned about $\pm 45^\circ$ to the vertical direction (subset 2); dashed line with circles, all directions.

Fig. 6 Superimposed bubble trajectories at $Q_g = 50 \text{ ml/min}$ (left: $\theta = 30^\circ \text{ MgSO}_4 \text{ aq.}$, center: $\theta = 40^\circ \text{ MgSO}_4 \text{ aq.}$, right: $\theta = 60^\circ \text{ Triton X-100 aq.}$)

Table 1 Mean bubble Reynolds number and mean value of $|x_{top}|$ at $Q_g = 50 \text{ ml/min}$

conditions	Re	$ x_{top} $
$\text{MgSO}_4 \text{ aq.}, \theta = 30^\circ$	102	1.44 mm
$\text{MgSO}_4 \text{ aq.}, \theta = 40^\circ$	145	1.17 mm
$\text{MgSO}_4 \text{ aq.}, \theta = 50^\circ$	181	0.75 mm
$\text{Triton X-100 aq.}, \theta = 60^\circ$	138	1.65 mm

方の実験において、気泡表面がフリースリップ条件、ノースリップ条件のいずれの場合であっても、横一列の気泡群やそれらが層状に重なり合って形成される気泡クラスタが確認された。しかしながら、気泡間相互作用を反映した二気泡の干渉運動の詳細には差異がある。Fig. 6 は測定領域内において気泡が壁面に沿って 45 mm 上昇する間の軌跡を、それぞれの条件において複数のサンプリングを行い、始点をそろえて重ねて描画したものである。x 方向が横方向、y 方向が縦方向をそれぞれ示し、始点が $x = 0 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$ である。また、Table 1 には各条件における平均気泡レイノルズ数 Re と $y = 45 \text{ mm}$ での x 座標である x_{top} の絶対値の平均値 $|x_{top}|$ をまとめた。気泡レイノルズ数で整理すると、Triton X-100 水溶液中における $\theta = 60^\circ$ の条件は、硫酸マグネシウム水溶液中における $\theta = 30^\circ$ と $\theta = 40^\circ$ との中間に存在する。ここで、硫酸マグネシウム水溶液中では、気泡レイノルズ数の増加に伴い $|x_{top}|$ は単調減少するが、Triton X-100 水溶液中での $\theta = 60^\circ$ のときの $|x_{top}| = 1.65 \text{ mm}$ は、より Re の低い条件である硫酸マグネシウム溶液中での $\theta = 30^\circ$ のときの $|x_{top}| = 1.44 \text{ mm}$ よりも大きい値となっている。このことから、横方向に隣接した気泡配置が頻出する定性的な傾向は、境界条件の如何に依らず認められるが、気泡間相互作用による横方向への揺動は、気泡表面がノースリップである場合の方が大きくなることが示唆される。

4. 結言

斜め平板下に沿って上昇する単分散の気泡径分布を有する球形気泡群の群挙動を対象とし、平板の傾斜角や気相流量を変化する実験を行い、以下の知見を得た。水平方向に列をなすように集積する気泡群の挙動が確認され、特に、気泡数密度が高く、平板に沿う上昇速度が低い条件では、それら横一列に並ぶ気泡群が層をなすことで気泡クラスタが形成される。また、気泡中心の動径分布関数を算出することで、ク

ラスト構造の定量的な評価を行った。さらに、電解質や界面活性剤により気泡の合体を阻止しつつ気泡表面の境界条件を制御した実験から、フリースリップ条件とノースリップ条件のいずれの場合においても、気泡群が横一列に選択的に集積し、気泡クラスタが形成される定性的に同様な傾向が確認された。一方、ノースリップ条件の場合に個々の気泡の横方向の揺動が大きくなること等、気泡表面における境界条件の相違から生じる気泡間相互作用を反映した気泡運動に関する定量的な差異の存在を示した。

引用文献

- (1) Takagi, S. and Matsumoto, Y., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **43** (2011), 615-636.
- (2) Bouche, E. et al., *J. Fluid Mech.*, **704** (2012), 211-231.