

20302 界面活性剤吸着による単一上昇気泡の挙動の変化

Change of a Single Rising Bubble Motion by Attachment of Surface Active Surfactant

○学 榊原和也(静大院) 学 宮本悠樹(静大院) 正 齋藤隆之(静大工)

Kazuya SAKAKIBARA, Yuki MIYAMOTO, Takayuki SAITO,
Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Shizuoka, 432-8561

The effect of a surfactant on the motion of a single ascending bubble was experimentally investigated using high-speed visualization in a 1-pentanol and purified-water system. The bubble-interface vibration is damped down with increase in the 1-pentanol mass concentration. Shifts of the amplitude and frequency of the bubble trajectory were quantitatively confirmed. The frequency reached the minimum at a 1-pentanol mass concentration of 200ppm; after that, the frequency increased. Contrary, amplitude reached the maximum at a 1-pentanol mass concentration of 200ppm. Also, under a high concentration of the surfactant, the bubble drift motion was not observed any longer. Furthermore, the bubble motion is compared with the motion of a spherical solid particle which has no interface vibration. The drag coefficient of the bubble becomes closely similar to that of the solid particle in consequence of adsorption of the 1-pentanol on the bubble-interface.

Key Words: Single Rising Bubble, Interface-Motion, Surfactant

1. 緒言

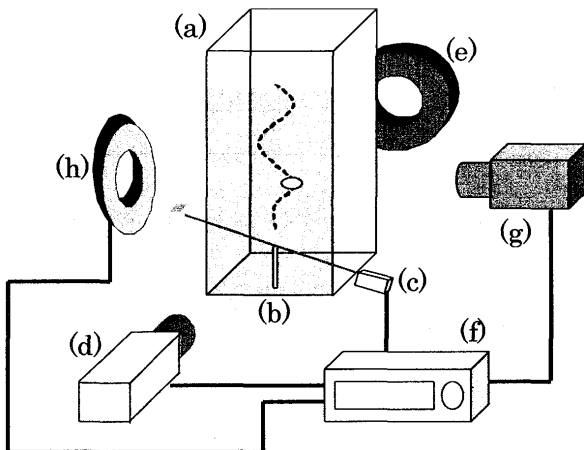
気液二相流は熱交換器や反応器など様々な工業装置において重要な流動現象であり、マイクロからマクロな各スケール間の流れの干渉によって複雑になる。単一気泡の研究として、高木ら⁽¹⁾上昇運動する気泡を対象にして界面活性剤が気泡挙動に及ぼす影響について論じた。実験および数値計算によって界面活性剤の吸着による気泡の上昇速度の低下を示した。本研究では、ジグザグ上昇運動する単一気泡を対象にし、精製水中に界面活性剤として1-ペンタノールを少量ずつ添加した。高速ビデオカメラによる時間分解能・空間分解能を高めた微視的な撮影によって、気泡界面運動を詳細に捉えた。さらに界面運動を持たない固体球の上昇運動との比較を行う。

(e)を使用した。さらに、高時間分解能なデータを得るために通過センサの信号をファンクションジェネレーター(f)を使用し、100 μ sずつ遅らせて撮影することで擬似的に10000fpsの撮影を可能にした。本研究では、界面活性剤が気泡挙動に与える影響を捉えるために、精製水中に少量ずつ1-ペンタノールを添加した。また、気泡の平均球等価径を画像から算出した。空間分解能の高いビデオカメラ(g)(露光時間200 μ s, 1024 \times 1024 pixels, 3.404 μ m/pixel)を使用し、光源としてLED(h)を同期させた。

さらに本研究では、固体球と気泡を比較するためにポリスチレン製固体球(密度25kg/m³)の上昇運動を可視化した。詳細に捉えるために直交する二方向から高速ビデオカメラで撮影を行い、光源としてLEDを使用した。固体球の最大球径は2.77mm, 最小球径は2.71mm, 平均径は2.74mmである。固体球の表面粗さの影響が生じるのは一般的にレイノルズ数が10⁵付近であり10³以下である本実験では表面粗さの影響は無視する。

3. 結果と考察

各1-ペンタノール濃度における気泡径、鉛直上昇速度から算出したレイノルズ数 Re 、ジグザグ軌道の周期、振幅、気泡形状の長軸と短軸の比であるアスペクト比をTable 1に示す。また、本実験ではウェーバー数 $We = 3.0$ 、エトベス数 $EO = 0.82$ 、モルトン数 $M = 2.34 \times 10^{-11}$ である。注射針先端から気泡が射出される際、1-ペンタノールの添加による表面張力の低下の影響を受けたために気泡径は僅かながら減少傾向を示した。ジグザグ周期は1-ペンタノールの添加によって低下するものの200ppmで最小値となりそれ以上の濃度では増加傾向を示す。一方、振幅については周期と異なり200ppmで最大値を示す。また、アスペクト比は1-ペンタノール濃度の増加に伴い増加し、球形に近づいていることが明らかであり、界面活性剤の吸着による気泡形状への影響と考えられる。Fig. 2に各濃度における速度成分を示す。100ppmまでは合成速度はほぼ一定の値であるに



(a) Water vessel, (b) Needle, (c) Optical sensor,
(d) Camera, (e) Continuous LED,
(f) Function generator, (g) Camera, (h) Pulse LED.
Fig. 1 Schematic of experimental setup.

2. 実験装置および方法

Fig. 1に実験装置の概略図を示す。アクリル製矩形水槽(a)に煮沸脱気・イオン交換を施した精製水を満たし、中央底に設置された内径0.4mmの注射針(b)から気泡(約2.5mm)を射出する。射出された気泡は軌道上に設置された通過センサ(c)をトリガーとする高速ビデオカメラ(d)(露光時間100 μ s, フレームレート1960fps, 960 \times 960 pixels, 14.09 μ m/pixel)により可視化される。また、光源としてLED

Table 1

 D_{eq} , Re , frequency, amplitude, aspect ratio at each conditions.

Concentration [ppm]	0	50	100	200	300	400	500
D_{eq} [mm]	2.535	2.534	2.522	2.497	2.477	2.478	2.470
Re	780	773	753	685	604	571	541
Frequency [Hz]	7.36	6.05	5.40	4.79	5.67	6.31	77.86
Amplitude [mm]	6.36	8.67	10.96	11.43	7.59	5.92	5.17
Aspect ratio	0.48	0.51	0.56	0.71	0.82	0.85	0.87

も拘らず並進速度成分は増加し、鉛直速度成分は減少していることが確認できる。それ以上の濃度では全体的に減少傾向を示した。Fig. 3 に気泡の左右エッジ部の曲率とその比を精製水と 100ppm および 500ppm の 1-ペンタノール濃度について示す。精製水および 100ppm の場合では、左右の曲率変動は高周波と低周波の成分の存在とジグザグ周期の半分に相当する位相差を生じていることが確認できる。つまり気泡は左右非対称な形状を周期的に繰り返し、ジグザグ運動を形成する。一方、500ppm の場合では気泡射出直後すぐに界面振動は減衰し、精製水で見られるような高周波成分は存在しない。Tomiyama ら⁽²⁾の形状変形が気泡挙動に大きく影響すると論じた。これらの結果から、界面活性剤が上昇気泡に与える影響は界面振動の減衰が最も大きいと考えられる。このことによってジグザグ軌道の振幅や周期の変動、さらに速度の減少が生じた。しかしながら 100ppm までは高周波な界面振動が確認でき、特異な速度成分の変動が見られたことはとても興味深い。

1-ペンタノールの影響として気泡は球形になり、界面振動が減衰し、形状において固体球に近づくと考えられるために固体球の運動との比較を行った。本実験では固体球は上昇開始後すぐにらせん軌道を呈し、気泡のジグザグ軌道とは異なった。らせん軌道における振幅、周期はそれぞれ 4.1mm, 5.8Hz である。Fig. 4 に各濃度における気泡と固体球の合成速度から算出した抗力係数を示す。気泡の抗力係数はペンタノール濃度が増加するにつれて固体球の抗力係数に近づいていることが確認できる。しかしながら固体球はらせん軌道であったために 500ppm 時の気泡とほぼ等しい抗力係数、振幅でありながら周期の違いが見られる。

4. 結言

本研究では、界面活性剤が気泡挙動に与える影響を理解するために 1-ペンタノールを使用して気泡界面を高速度な可視化によって詳細に捉えた。1-ペンタノールの界面への吸着の結果として、界面振動の高周波成分が現れずジグザグ軌道の振幅や周期に変化が見られた。これは射出直後の界面振動の減衰という初期形状変化が大きく影響していると考えられる。しかしながら、100ppm 以下では界面振動が存在するにも関わらず特徴的な速度成分の変動を捉えた。また固体球の上昇運動を実験的に捉え、気泡の抗力係数は界面活性剤濃度が高くなるにつれて徐々に固体球の抗力係数に近づくことを確認した。

参考文献

- [1] 高木周, 宇田東樹, 渡邊祐二, 松本洋一郎, 機論 69-686, B(2003), 2214-2220.
- [2] A.Tomiyama, G.P.Celate, S.Hosokawa & S.Yosida, *International Journal of Multiphase Flow*. Vol. 28(2002). pp1497-1519.

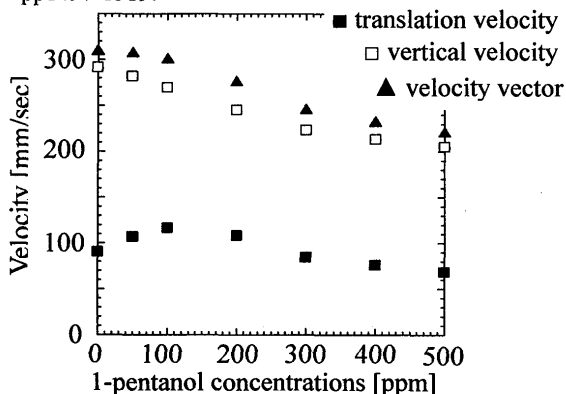


Fig. 2 Velocity component.

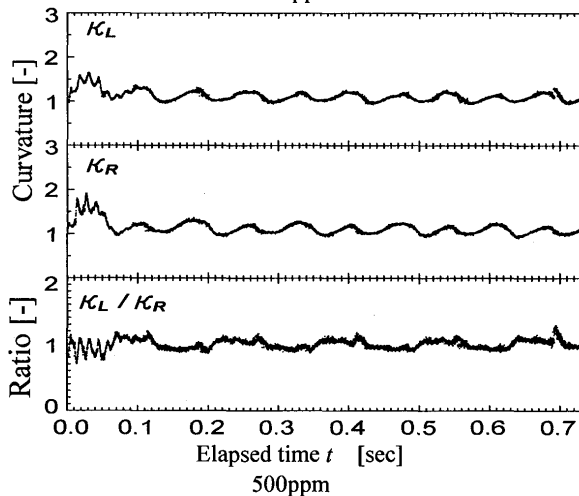
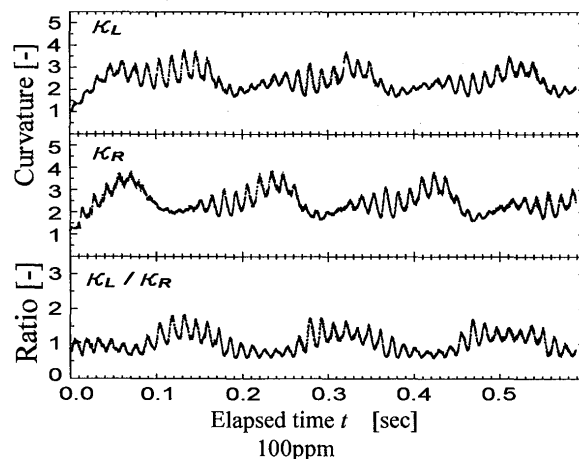
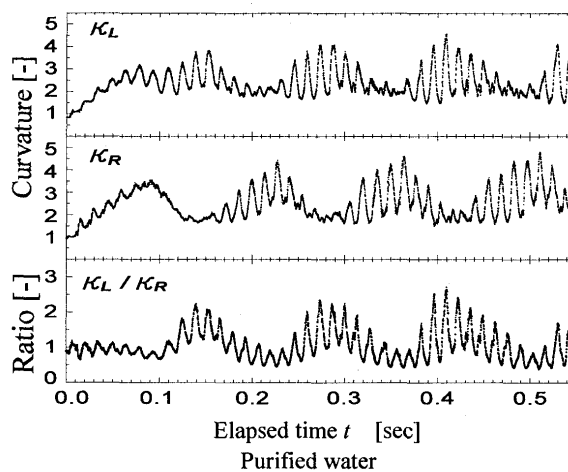


Fig. 3 Curvature fluctuation.

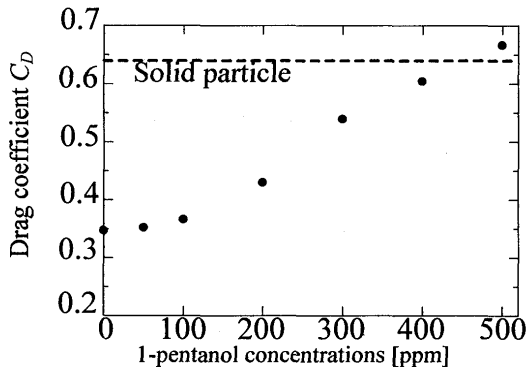


Fig. 4 Drag coefficient.