

齋藤隆之 (静岡大工)

土屋活美 (徳島大工)

山下知克 (静岡大工・学)

Takayuki SAITO, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu 432-8561, JAPAN

Katsumi TSUCHIYA, The University of Tokushima

Tomokatsu YAMASHITA, Shizuoka University

Key Words: Bubble, Interfacial dynamics, Bubbly flow, Multiphase flow, Visualization

## 1. はじめに

筆者らは、地球温暖化を防止するための技術 (Gas Lift Advanced Dissolution System: GLAD<sup>[1,2]</sup> および Progressive GLAD System: P-GLAD<sup>[3,4,5]</sup>) を提案し、その実用化に向けた技術開発を行っている。同システムは、ガスリフトポンプを利用して二酸化炭素溶解海水を深海に送り込み、地球温暖化の主要因である二酸化炭素を人工的に長期海洋隔離するものである。システムの主要部であるライザー内には気泡乱流が形成される。周知のように、気泡乱流はマイクロ (ローカル) からマクロ (グローバル) に至る多重スケール構造を有している。ライザー内における二酸化炭素気泡の溶解は、気泡近傍のマイクロかつ局所的な流動機構と流れ場全体のグローバルな流動機構<sup>[6]</sup> により決定されると考えられる。

技術開発を進める過程で、二酸化炭素気泡の溶解を制御するためには気泡近傍のローカルな流動構造に着目する必要性が生じた。本研究では、その準備として上昇気泡の界面運動<sup>[7,8]</sup> を可視化し、その特性を考察することを目的とする。

## 2. 実験装置と方法

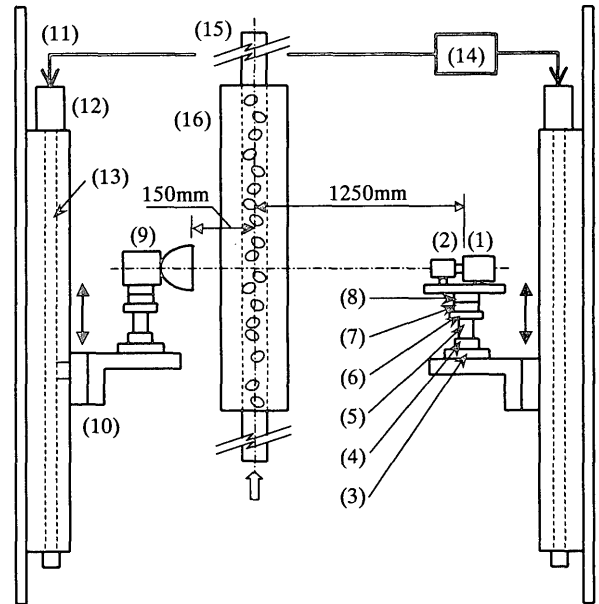
実験には、アクリル製循環ループ装置 (内径 25mm, 供試管長 7m) とアクリル水槽 (300mm・300mm・300mm の矩形水槽) の 2 種類の装置を用いた。気泡流の実験には前者を、単一気泡実験には後者を用いた。Fig.1 に循環ループ実験装置の可視化部を、Fig.2 に単一気泡水槽実験装置の全体図を示す。この二つの実験とも、透過光による shadow image として気泡を可視化した。500 frame/sec の高速ビデオとストロボを 2 組用い、互いに直交する 2 方向から気泡を可視化撮影した。

**循環ループ実験装置可視化部:** 気泡群撮影用高速ビデオ(1)とズームレンズ(2)を 6 軸の精密光学ステージ(3)~(6)に搭載する。ストロボ(9)についても同様とする。これらは垂直移動テーブル(10)上に設置され、1 軸ロボット(11)により任意高さに移動・固定される。アクリル製供試管(15)を矩形ウォータージャケット(16)で覆い、円管のレンズ効果による画像の歪みを除去した。

**単一気泡水槽実験装置:** 発生する気泡サイズを均一に保つとともに、気泡発生の時間間隔を制御するためにパルスモータとボールネジ駆動系(5)により注射器(4)を押して、注射針(7)から単一気泡(8)をアクリル製矩形水槽(9)内に発生させた。この実験では、気泡界面運動をより精密に捉えるために、高速ビデオカメラ(1)に実体顕微鏡(2)を取り付けた。可視化領域におけるストロボ(3)の光強度を均一にするために、複数枚のトレーシングペーパー(11)を水槽側面に貼り付けた。

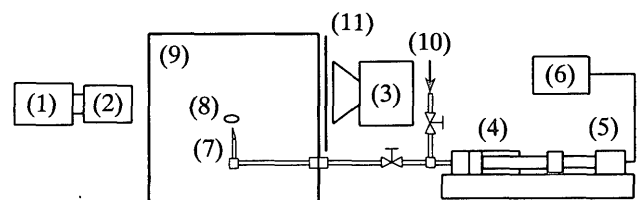
## 2. 画像処理

可視化画像から気泡群 (気泡) のみを抽出するためにバックグラウンド画像を、気泡サイズを計測するためにスケール画像を、実験に先立って撮影した。画像処理の手順を気泡群の



(1) High-speed video camera, (2) Zoom lens, (3)(4) Precision optical XY-stage, (5) Precision optical Z-stage, (6) Rotation optical stage, (7)(8) Gonio stage, (9) Stroboscope, (10) Lift table, (11) Lift, (12) Stepping motor, (13) Screw, (14) Controller, (15) Acrylic pipe, (16) Acrylic rectangular water jacket

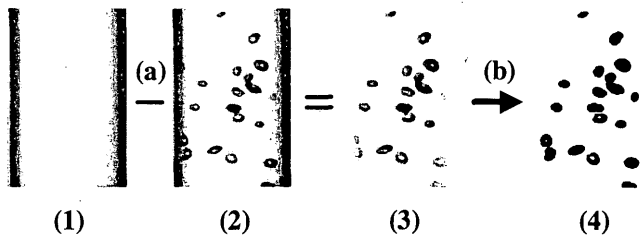
Fig. 1: Section of flow visualization in a loop experimental setup.



(1) High-speed video camera, (2) Microscope, (3) Stroboscope, (4) Syringe, (5) Pulse motor, (6) Controller, (7) Needle, (8) Single bubble, (9) Acrylic water vessel, (10) Cylinder (Pure-air), (11) Tracing paper

Fig. 2: Experimental setup for visualizing interfacial motion of a single bubble rising in a water column.

抽出を例に、Fig.3 に示す。各原画像にはあらかじめ median filter により前処理を施した。バックグラウンド画像と原画像と



(1) Background image, (2) Original bubbly flow, (3) Detected image of bubbles, (4) Binary image of bubbles, (a) Absolute difference between each pixels, (b) Binary process  
 Fig. 3: Procedure for detecting bubble by digital image processing.

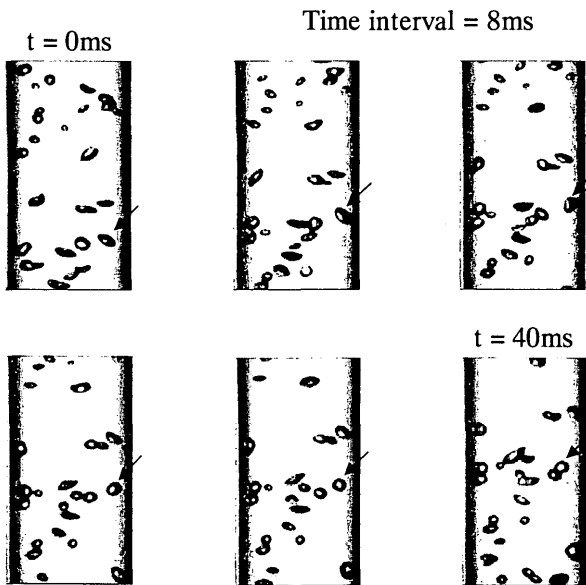


Fig. 4: Sample of bubble interfacial motion in a bubbly turbulent flow. Pay attention to the bubble indicated by an arrow.

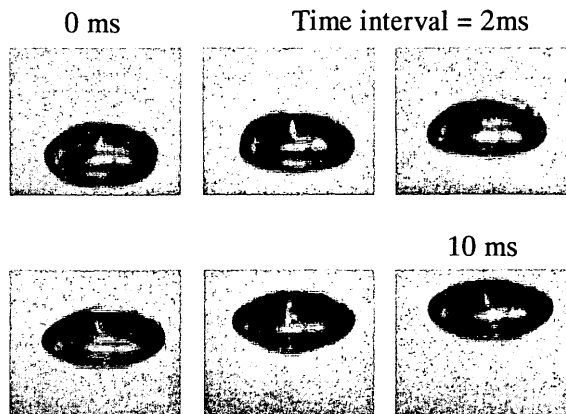


Fig. 5: Sample of interfacial motion of a single bubble rising in a water column.

の間で各ピクセルの絶対値を求めて、気泡群（気泡）のみを抽出し、さらに二値化して気泡群（気泡）を得る。

3. 実験結果と考察

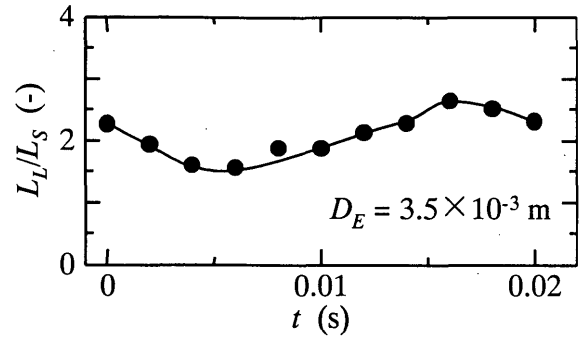


Fig. 6: Interfacial motion of a single bubble shown by the axial ratio of  $L_L/L_S$ .

内径 25mm のアクリル管内における気泡乱流の可視化画像を Fig.4 に示す。矢印を付した気泡に注目していただきたい。この気泡は、管中心部付近より、管壁に向かって移動し、壁面近傍で大きな変形を受けている。中心部付近を移動する同一サイズの気泡の界面変形量に比し、10~20%も大きな界面変形を受けることがわかった。さらに、このような界面変形の大きな気泡を追尾して、その物質移動速度を計算したところ（気泡を追尾して可視化撮影し、画像解析により気泡サイズの減少量を求めて、物質移動速度を計算）、同一サイズの変形をあまり受けない気泡に比べて、物質移動速度が大きくなる傾向が認められた。筆者らは、1)変形による界面積の増加、2)気泡界面変形と液相との相互作用により物質移動速度が増加すると考えている。なお、実験において観察された気泡は扁平回転楕円体に形状分類される気泡であった。

このメカニズムを考察する準備として、単一気泡（扁平回転楕円体、平均球等価径 3.5mm）の界面運動を可視化してその運動特性を考察した。可視化の一例を Fig.5 に示す。気泡界面の運動には種々のモードがあることが知られているが<sup>[7,8]</sup>、本研究においては、気泡画像から計測した長軸長  $L_L$  と短軸長  $L_S$  によって気泡の界面振動を定義する。軸長比  $L_L/L_S$  の変化の様子を Fig.6 に示す。軸長比は正弦波的に変化していることがわかる。

4. おわり

気泡界面運動をより詳細に把握すること、さらに気泡近傍の液相運動、界面振動と液相乱流渦との相互作用の解明等が今後の課題である。

さらに、これらマイクロ（ローカル）な流動構造とマクロ（グローバル）な流動構造との間に存在すると考えられるメソスケールの流動構造の解明にも取り組みたい。

参考文献

[1] T. Kajishima, T. Saito, *Energy*, Vol. 22, 257-262, (1997).  
 [2] T. Saito, T. Kajishima, R. Nagaosa, *Environmental Science & Technology*, (2000)  
 [3] T. Saito, T. Kajishima, K. Tsuchiya and S. Kosugi, *Chemical Engineering Science*, Vol. 54, 4945-4951, (1999).  
 [4] T. Saito, S. Kosugi, T. Kajishima and K. Tsuchiya, *Energy & Fuels*, in print, (2001).  
 [5] T. Saito, and T. Kajishima, *US patent*, No. 5662837, (1997).  
 [6] R.F. Mudde, and T. Saito, *J. Fluid Mechanics*, in print, (2001).  
 [7] Moore, D. W., *J. Fluid Mech.*, 23, 749-766, (1965).  
 [8] Longuet-Higgins, M. S., *J. Fluid Mech.*, 201,543-565, (1989).