

E126

発達過程にある気泡スワームを構成する個々の気泡の運動 (GLAD システムの素過程研究 その3) The Motion of the individual bubbles composing a bubble swarm in development (Fundamental Study on GLAD System, Phase 3)

○ 学 落合 康敬 (静大院) 草野 裕昭 (静大院, 現 Canon)
学 石飛 正規 (静大院) 正 齋藤 隆之 (静大工)

Yasutaka OCHIAI and Hiroaki KUSANO, Masaki ISHITOBI, Takayuki SAITO
Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561

This study was experimental investigation of the process of development of a bubble swarm and tries to clarify its relation to motion of liquid phase. The bubble swarm and its surrounding liquid motion were measured via high-speed CCD cameras and LDA system, respectively. As the bubble swarm progress, following bubbles are accelerated by the wake of preceding bubbles, and it caught up with preceding bubbles. Furthermore the members of the bubble swarm were dispersed. On the basis of the frequency analysis of the bubble motion in the bubble swarm and that of the liquid phase motion, a characteristic frequency has been found owing to the center of gravity motion of the bubbles.

Key Words: High-speed visualization, Bubble swarm, Frequency analysis, LDA

1. 緒言

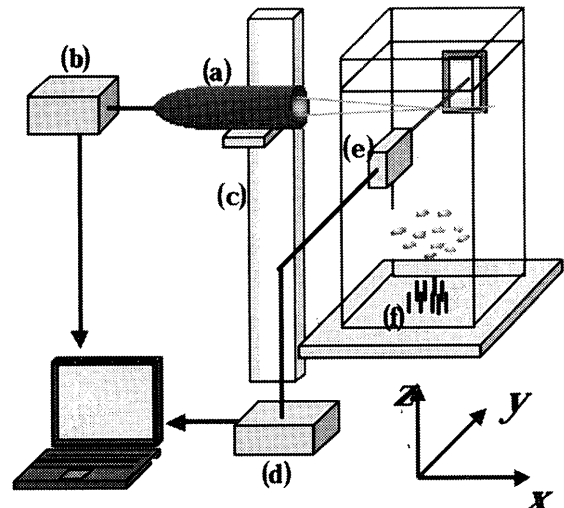
GLADシステムの効率向上には、気泡に含まれるCO₂の溶解制御が必要となる。本研究では、複数の単一気泡の集合である気泡群の可視化実験を行い、気泡群構成気泡と気泡群内の液相運動の関係性を論じることにより、溶解制御技術の確立に必要な指標を得ることを目的とする。上昇する気泡群を追尾し、高速ビデオカメラにより2方向から可視化撮影し、個々の構成気泡の運動(重心座標と気泡速度)を4時刻追跡法により求めた。また気泡運動を周波数解析し、この結果を気泡群内の液相運動の周波数、単一気泡の周波数と比較することにより気泡群内の気相、液相の相互干渉と単一気泡運動との関連を考察した。

2. 実験方法と実験装置

気泡群の実験装置を Fig.1 に示す。アクリル製矩形水槽(149×149×520mm)の底部に19本の注射針(TERUMO 社製 25G×5/8)を9.58mm 間隔で千鳥格子状に配列・固定し、各針から気泡を19個2層となるように射出して、計38個の気泡で構成される気泡群を約10秒間隔で打ち上げた。高速ビデオカメラ(NAC 社製)により気泡群を可視化・撮影するため、実験装置に滑らかな鉛直1軸運動を行うロボットを併用した。気泡群を常に捕捉するため、単軸ロボットに高速ビデオカメラを固定し、気泡群を正確に追尾して可視化実験を行った。得られた画像から気泡形状と気泡重心軌道を求めた。気泡は扁平楕円体であり平均球等価径は5.44mmであった。

気泡群内の気泡速度は、0.5秒間の気泡上昇運動を高速ビデオカメラにより可視化して、4時刻追跡法により個々の気泡運動を求めることにより、 x, z 軸方向速度を算出した。その気泡速度を高速フーリエ変換し周波数解析を行った。

気泡群(分散した浮力)に誘起された液相運動の周波数特性を明らかにするため、可視化実験と同様に鉛直1軸ロボットを用い、計測点が常に気泡群内に位置するよう気泡群を正確に追尾して、LDA計測を実施した。LDAプローブを、 $z = 54 \sim 365$ [mm]の間で移動させ、その区間で計測された0.9秒間の x, z 軸方向流速 u, w に対し高速フーリエ変換により周波数解析を行った。計測は u, w ともに15回ずつ行った。また、液相速度のLDA生データには、気



(a) LDA probe, (b) LDA system, (c) LDA stage, (d) Laser optic sensor, (e) A/D converter, (f) 19 needles

Fig.1: Schematic of the experimental setup.

泡散乱ノイズ、単軸ロボットの振動の影響を除去する前処理を施した。LDAの原理上、流速を等間隔にサンプリングすることは不可能なため、計測された流速値を線形補間により512点の等間隔データとしている⁽¹⁾⁽²⁾。

3. 実験結果と考察

3.1 気泡群可視化実験

Fig.2に $x-z$ 平面の気泡重心座標と同位置における気泡画像を示す。注射針から気泡が射出された直後は、先行気泡と後方気泡の境界は容易に判別でき、先行・後方気泡は各々同一平面上に位置している。しかし、 $z=170$ [mm]付近では後方気泡が先行気泡に追いつき、これらの識別は困難となり、個々の気泡は複雑な運動を示しながら上昇している。Brucker(1999)⁽³⁾, Katsら(1996)⁽⁴⁾による同一軸上を上昇する並列二気泡、複数気泡の研究では、先行気泡の後流の影響により後方気泡が加速され、先行気泡に追いつく現象が報告されており、今回の気泡群の実験においても同様の現

象が起こっていると考えられる。注射針より射出された気泡は、上昇するにつれ分散され、気泡間距離の増加が確認される。気泡群の形状も上昇するにつれ、水平方向に 1.6 倍程度広がり、気泡群中心の気泡数密度が増加し、扁平回転楕円体状に分布する。

3. 2 周波数解析

Fig.3 に気泡の z 軸方向速度 w_b の周波数解析結果を示す。上昇する個々の気泡は独自の運動をとるため、気泡速度について 5 回分の平均スペクトルを取っている。 w_b では 6.61 [Hz] と 13.2 [Hz] にピークが確認でき、 x 軸方向の気泡速度 u_b でも同様に 6.61 [Hz] においてピークが確認された。これは気泡群のスパイラル運動の周期であると考えられる。単一気泡のジグザグ周期は 7 [Hz] 付近であり、気泡群のスパイラル運動の周期は単一気泡のジグザグ周期と近い値を示す。また w_b では、56.2 [Hz] においてもピークが確認できる。単一気泡の界面振動は、気泡径が 2.94 [mm] の時 69.9 [Hz] の周期で振動しており気泡径の増加に伴い周波数は減少することが分かっている(宮本ら, 2004)⁽⁵⁾。よってこのピークは界面振動による影響とも考えられる。しかし、気泡速度の算出には画像処理上の誤差の影響も多く含まれており、今後画像処理精度を向上させ、検討していくことが必要である。

気泡群内の z 方向速度 w_l の周波数解析結果を Fig.4 に示す。LDA の計測点と気泡の位置関係は計測ごとに異なるため、周波数解析結果にも、スペクトルの分布の違いが生じた。そのため、5 回分の平均をとって、平均スペクトルとした。ゆえに、個々のスペクトルの大きさについては論じることができない。よって、各周波数帯の相対的な違いについて論じることとする。液相流速 w_l のスペクトルでは 5~9 [Hz] において特長的な周波数帯のピークが確認できる。これらは気泡群のスパイラル運動の周期と強い相関性を示す。このことから、気泡群により誘起される液相運動には、並進運動(厳密には、分散した浮力の干渉)の影響が現れていると考えられる。

4. 結論

本研究では、気泡群の可視化実験を行い気泡群構成気泡の個々の運動を計測した。計測結果から、個々の気泡同士の相互干渉、および各気泡の周囲液相運動の干渉により、上昇するにつれ気泡群構成気泡は分散し、気泡群形状は扁平回転楕円体形状に変化していくことが確認された。また気泡群が発達するに伴い、先行気泡の後流の影響により、後方気泡が追いつき先行気泡と後方気泡の判別がつかず、複雑な気泡運動を示すことも確認された。

また気泡運動を周波数解析し、この結果を単一気泡の周波数と比較することにより、構成気泡中のスパイラル運動の周期は単一気泡のジグザグ周期に近い値を示すことが確認された。

参考文献

- (1) R. F. Mudde and T. Saito, *J. Fluids Mech.*, 437, 203-228, (2001).
- (2) R. F. Mudde, et al., *Chem. Eng. Sci.*, 52, 4217-4224, (1997).
- (3) Brucker, C., *Phys. Fluids*, 11, 1781-1796 (1999)
- (4) Katz, J., et al., *Int. J. Multiphase Flow*, 22, 239-258, (1996)
- (5) 宮本, 安間, 齋藤, 混相流学会年会講演会 2004.

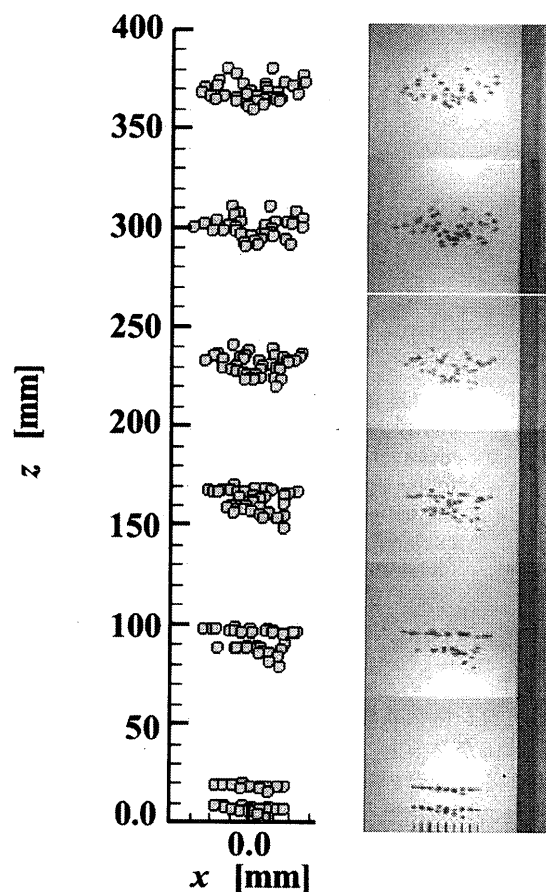


Fig.2: Transformation of bubble swarm form and bubble swarm image at x - z plane

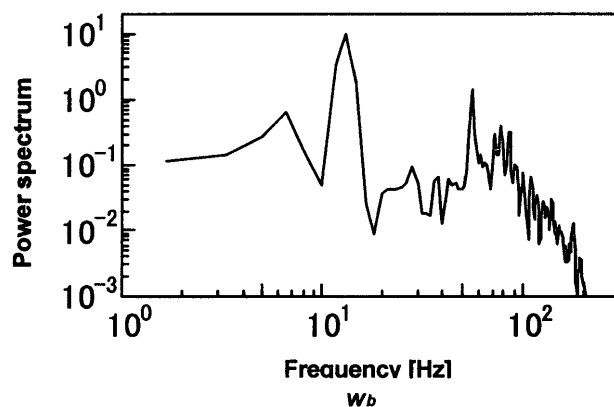


Fig.3: Frequency analysis of bubble velocity.

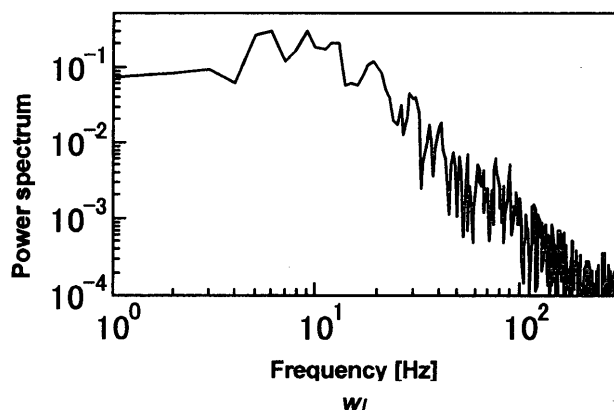


Fig.4: Frequency analysis of liquid-phase velocity