

単一上昇気泡近傍の液相速度の周波数分析

Liquid-phase velocities and the frequency analysis in the vicinity of a single-rising bubble

○学 石飛 正規 (静大工)

学 草野 裕昭 (静大院)

学 落合 康敬 (静大院)

正 齋藤 隆之 (静大工)

Masaki ISHITOBI, Hiroaki KUSANO, Yasutaka OCHIAI, Takayuki SAITO

Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561

Key Words; Single Bubble, LDV,

1. 緒言

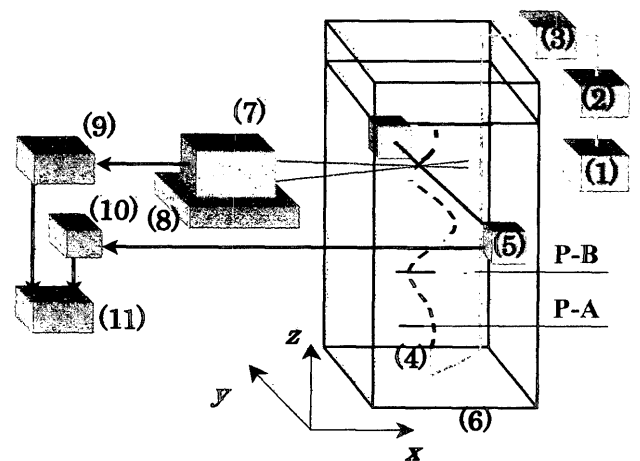
気液二相流は、燃焼排ガスからの CO₂ の分離・回収システムおよびその深海固定システム^{[1], [2]}などの工業装置、ならびに大気・海洋間の物質や熱の移動プロセスに見られる重要な流れである。その流動メカニズムに関するより詳細かつ正確な知識が必要となっている。本研究では、気泡流の流動メカニズム^[3]を解明する基礎として、静止液相中をジグザグ上昇運動する単一気泡の近傍に誘起される液相運動を LDV により計測し、ローカルな空間スケールにおける流動特性を把握することを目的とする。類似の研究が行われてきたが、気泡径に対する計測の空間間隔が粗く、気泡近傍の流れを正確に計測するには至っていない。

本研究においては、気泡に誘起される液相運動が気泡近傍の狭い領域に限られることから、半導体レーザー通過センサーを使用して気泡通過を正確に検知し、気泡通過前後の微小時間における液相運動のみを抽出、計測した。加えて、単一気泡の浮力により発生する液相運動の特性を液相速度の周波数分析からアプローチすることを試みる。

2. 実験装置および計測方法

Fig.1 に実験装置の概略を示す。アクリル製矩形水槽(150×150×300mm)の底部中央に注射針(内径 0.65mm)を固定し、 $x-z$ 平面($y=0$)でジグザグ運動するように、静止水中に気泡を射出する。液相、気相はそれぞれイオン交換水(煮沸脱気済)および純空気である。計測平面は、気泡が直線上昇運動を呈する区間の点(P-A)ならびにジグザグ運動の変曲点(P-B)における 2 つの $x-y$ 平面とした。LDV (TSI 社製)を使用して、気泡周囲の液相流速を計測した。計測範囲は、気泡の重心軌道(以下、気泡軌道)を中心とする 12×12mm の領域とし、メッシュ間隔は、中心部の 6mm×6mm において 0.5mm、その外側の領域において 1mm とした。計測平面上においてレーザー光軸と気泡軌道とが交差するように、半導体レーザー通過センサーを設置した。同通過センサーの信号を LDV と同期させて、A/D 変換器に取り込むことにより、計測平面を気泡が通過する時間を検出した。これにより気泡が計測平面を通過する際の、またその前後の液相流速を正確に抽出することが可能である。計測精度を向上させるため、通過センサー信号を基に、LDV 信号から気泡散乱ノイズを除去した。

気泡がジグザグ運動を示す平面($y=0$, $x-z$ 平面)を気泡軌道面とする。気泡射出間隔を約 2.0 秒とし、気泡約 70 個を計測した。なお、気泡は常に計測平面の中心を通過しているものとし、計測範囲として、流速が平均気泡上昇速度の 30% 以上を示す領域とした。この計測範囲は、PIV 計測の



(1)Cylinder, (2)Regulator, (3)Flow meter, (4)Needle, (5)Digital laser optic sensor, (6)Acrylic water vessel, (7)LDV-Probe, (8)LDV stage, (9)Photo multiplier, (10)A/D converter, (11)PC

Fig.1 Experimental Setup for LDV measurement

結果 (z 軸方向の平均速度分布) から決定した。

本研究で使用した気泡は、扁平回転楕円体(短軸:1.49mm, 長軸:3.21mm, 平均等価球径:2.87mm), 平均気泡上昇速度 $V_f = 0.301\text{m/sec}$ であった。トレーサー粒子には粒径 $15 \pm 5 \mu\text{m}$, 密度 1100kg/m^3 のポリスチレン粒子を使用した。

3. 結果および考察

3.1 単一気泡に誘起される液相運動

LDV 計測により得られた P-A 平面, P-B 平面における平均液相速度分布 $\langle u \rangle$, $\langle v \rangle$, $\langle w \rangle$ [mm/s] を Fig.2, Fig.3 にそれぞれ示す。 $\langle u \rangle$, $\langle v \rangle$, $\langle w \rangle$ はそれぞれ x , y , z 軸方向の速度成分である。 $\langle u \rangle$, $\langle v \rangle$ を速度ベクトルで、 $\langle w \rangle$ をカラースペクトルで示した。ただし、図中、ベクトルの絶対値を 10 倍にして、表示した。

P-A 平面では、気泡軌道を中心とした軸対称の液相運動が確認できる。 $\langle u \rangle$, $\langle v \rangle$ から、気泡上昇に伴って気泡軌道を中心として周囲に向かって放射状に排除される構造が観察される。また、気泡軌道から少し離れたところに強い流れが存在している。 $\langle w \rangle$ から、気泡軌道上に顕著な上昇流があり、その周囲に下降流が存在することがわかる。

P-B 平面では、P-A 平面とは異なる液相運動が観測される。 $\langle u \rangle$, $\langle v \rangle$ から気泡軌道を中心に広がる渦状の流れ構造が観察される。また、気泡軌道から少し離れたところに強い流

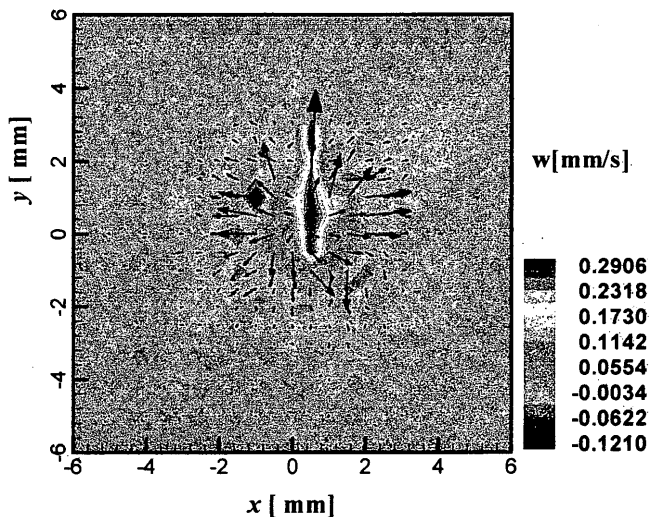


Fig.2: Profile of average velocity at P-A.

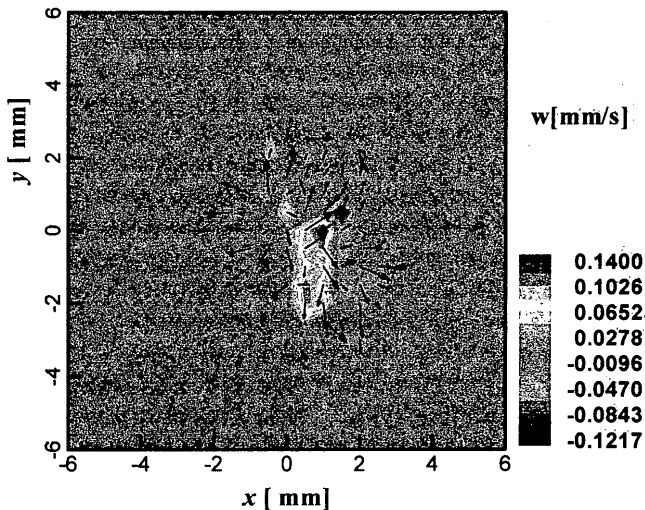


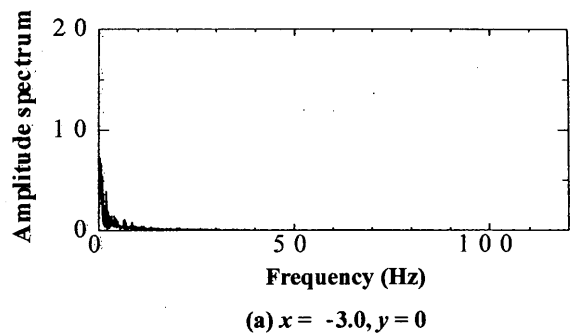
Fig.3: Profile of average velocity at P-B

が存在する。特に $x > 0$ かつ $y < 0$ の領域では広範囲で強い流れが存在する。 $\langle w \rangle$ から $x = 1.0\text{mm}$ 付近で顕著な上昇流が、 $x = 1.5\text{mm}$ 付近に下降流が観察される。すなわち、気泡軌道内側に強い上昇流、そのさらに外側に下降流が形成される。また、P-A 平面に見られた $\langle w \rangle$ の対象性は破綻していることがわかる。

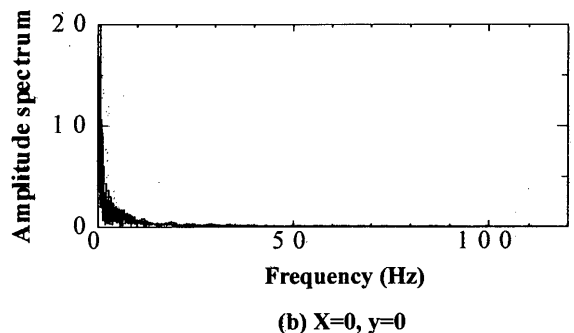
3.2 液相運動の周波数解析

Fig.4 に液相速度を高速フーリエ変換により周波数解析した結果の一例を示す。同図(a),(b),(c)は、P-A 平面の y 軸上の $\langle w \rangle$ (60 秒間の計測) を解析した結果である。(a),(b),(c) から、気泡射出間隔が約 0.5Hz に対応する低周波成分が卓越している。なお、 $\langle w \rangle$ 、 $\langle v \rangle$ ならびに他の測定点においても同様の結果を得た。

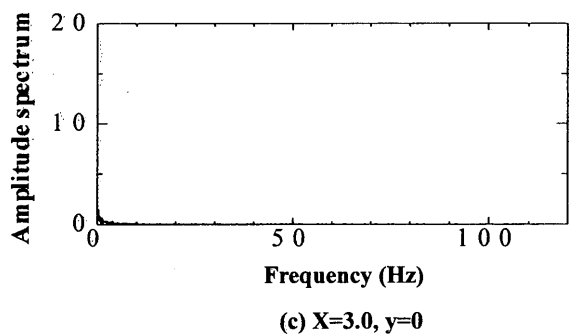
今回の周波数解析結果では、気泡重心運動の変動や界面運動と関連するような周波数帯域を見出すには至らなかった。今後、LDV の計測設定条件を変えて、すなわち、周波数レンジとシフト周波数を変えて、これら気泡の特徴的な運動と液相運動との干渉を表すような帯域の液相運動を抽出することを試みたい。



(a) $x = -3.0, y = 0$



(b) $X=0, y=0$



(c) $X=3.0, y=0$

Fig.4: Frequency analysis by FFT

4. 結言

LDV 計測により単一気泡に誘起されるローカルな液相運動の一部を見ることが出来た。気泡浮力に誘起される液相運動は、気泡起動を中心としたごく近傍であり、また、軌道の変化に伴い、液相運動も変化することが確認された。

今後、液相運動と気泡界面運動との関係を調べるとともに、気泡群、気泡乱流における流動構造、特に変調のメカニズムを調べていく予定である。

科学研究費補助金基盤 (A) 13355008 により実施したことを付記する。

参考文献

- [1] R. F. Mudde and T. Saito, *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 437, 203-228
- [2] C. Brucker, *Physics of Fluids*, 1998, 11, 7, 1781-1796
- [3] H. Kusano, A. Kumagai, T. Saito, *Proceedings of Thermal Engineering Conference*, 2003, 67-68