C111

フォトクロミック染料による気泡後流の可視化

高曾 徹[○] (九州大学), 宇宿 史彦 (九州大学), 岩下 裕之 (九州大学)

Visualization of a Wake of a Rising Bubble Using Photochromic Tracer

Toru KOSO, Fumihiko USUKI and Hiroyuki IWASHITA

ABSTRACT

Wake of single bubble rising in a still liquid is studied experimentally using photochromic tracer. Dye patterns in the bubble wakes are observed after the bubbles pass across the activated dye regions. The wakes are examined for the bubbles of Reynolds number $Re = 21$ to 436 which show rectilinear, spiral and zigzag motions during their rise. Wake patterns of bubbles of $Re = 166, 209$ and 436 show hairpin vortex loops shed alternatively in case the bubbles exhibit zigzag motion. The spiral motion is observed in rare cases at $Re = 209$ and the wake shows spiral pattern without vortex shedding. At $Re = 21$ and 93, the dye was drawn straightly along the laminar wake of the bubble.

Keywords : Single bubble, Wake, Vortex shedding, Zigzag motion, Spiral motion, Rectilinear motion

1. はじめに

フォトクロミック染料は紫外光を照射すると発色し、照射を止めた後もしばらく発色を保つので、1967年に Popovich と Hummel¹⁾ によってはじめて流れの可視化に適用された。それはフォトクロミック染料溶液の流れに細い光ビームを瞬間的に照射して発色線を作り、その流下を追跡して流速を求めるものであった。以来、この方法は非接触の流速測定方法²⁾³⁾として用いられてきた。

一方、著者らは広い範囲の液体を発色させ、そこに気泡を通過させることによって、気泡後流による液体の乱流混合⁴⁾や、気泡後流の渦構造⁵⁾を調べることができることを示した。

本研究では、この方法を用いて気泡レイノルズ数 $Re = 21 \sim 436$ で、気泡運動が直線上昇、ジグザグ運動、らせん運動する気泡の後流を観察し、気泡後流に及ぼすレイノルズ数の影響、気泡運動との関係について検討した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

図1に実験装置の概略図を示す。内径 $d = 15\text{mm}$ 長さ 505mm のガラス円管の中に液を満たし、円管下端より空気を1個上昇させた。液にはフォトクロミック染料 (1, 3, 3-トリメチルインドリノ-6'-ニトロベンゾピロスピラン)²⁾ を 50ppm 溶かし、紫外光を照射して約 10mm 幅を発色させた。気泡が発色部を通過した直後の後流を観測した。気泡は細管 (内径 2.5mm) より空気をゆっくり注入して発生させた。気泡の後流の正面像と側面像を1台の CCD カメラで撮影した。その際、正面像と側面像の寸法が同じになるように、側面像撮影の光路上に水槽を置いて光路長を合わせた。また、撮影範囲は円管軸方向に 87mm である。撮影は白黒 CCD カメラ (東芝 IK-542) を使い、 60フレーム/秒 ($1\text{フレーム } 640 \times 480\text{ピクセル}$) で撮影した。気泡位置 (図心) の時間変化から気泡軌跡と気泡速度3成分を求め、気泡運動の形態を判断した。

2.2 実験条件

液体はケロシンとケロシン・流動パラフィン混合液を用いた。高粘度の流動パラフィンの混入量を変えること

Fig.1 Experimental apparatus.

によって粘度を変化させ5種類の気泡レイノルズ数の実験を行った。表1に気泡の等価直径 d_e , 上昇速度 $\bar{u}$, Reynolds 数 Re , Eötvös 数 Eu , Morton 数 Mo , 抗力係数 C_D を示す。

3. 実験結果および考察

図2に気泡A ($Re=436$)の可視化の様子を示す。左側が正面図で右側が側面図である。図2 (e)には気泡の軌跡も示す。気泡間の時間間隔は $1/60s$ である。ジグザグ運動して上昇し、染料を横切っている。この染料パターンは気泡が染料を通過する際に巻込んだ染料の分布で、統合流膜⁹⁾ではないが、後流の渦構造が可視化され、気泡後方で渦パターンを観察することができる。

3.1 気泡後流に及ぼすレイノルズ数の影響

図3に気泡A～Eの後流の可視化画像を示す。いずれも発色染料を横切った直後である。気泡A, B, Cは円盤状の回転楕円体でジグザグ運動をしており、Cliftら⁷⁾の気泡形状線図と一致した。図3 (a) (b) (c)に示すように気泡の後流には左右にヘアピン状のループ渦⁸⁾が観測された。気泡から周期的な渦の放出が生じていると考えられる。レイノルズ数が比較的高い気泡A ($Re = 436$)では、細かな乱れが見られたが、これは高レイノルズ数で乱れの最小スケールが減少したためと考えられる。

図3 (d) (e) の気泡D, Eの後流は層流で染料は気泡の軌跡に沿って直線状に移動した。また、図3 (d)の気泡背後の染料パターンは、気泡背後に閉後流領域が存在し、そこに染料が入らないためと考えられる。

Table 1 Properties of bubbles.

	d_e (mm)	$\bar{u}$ (m/s)	Re	Eu	Mo	C_D
A	3.64	0.182	436	3.81	1.3×10^{-9}	1.43
B	3.63	0.183	209	3.83	2.6×10^{-8}	1.42
C	3.64	0.191	166	3.88	8.0×10^{-8}	1.31
D	3.53	0.205	93	3.56	8.8×10^{-7}	1.10
E	3.55	0.152	21	3.59	1.1×10^{-4}	2.01

Fig.2 Sequential pictures of Bubble A passing across the dye ($Re = 436$, $Eu=3.81$, Zigzag).

Fig.3 Wake of bubbles passing across the dye.

3.2 気泡運動による違い

気泡Bの条件で、まれに（確率0.1程度）ら旋運動が観測された。図3 (f)に、ら旋運動する気泡の後流を示す。ら旋状の染料が連続的に伸びており、ジグザグ運動で見られた周期的な渦放出が生じないことがわかる。

4. まとめ

フोटクロミック染料を用いて気泡後流の構造に及ぼす気泡レイノルズ数の影響と、気泡運動との関連を調べた。その結果、ジグザグ運動する $Re=166 \sim 436$ では気泡背後にヘアピン状のループ渦が交互に放出され、ら旋運動する気泡からは、渦放出しないことが観測された。また、気泡が直線的に上昇する低レイノルズ気泡 ($Re = 21, 93$)では、後流は層流であることがわかった。

参考文献

- 1) Popovich, A.T., Hummel, R.L., Chem. Eng. Sci., 22(1967), pp.21-25.
- 2) Seeley, L.E., et.al., J. Fluid Mech., 68-3 (1975), p.591.
- 3) Kawaji, M., et.al., Nucl. Eng. Design, 141 (1993), p.343.
- 4) Koso, T., Nakayama, H., Kuniba, Y. and Tokai, H., 5th Int. Conf. Multiphase Flow, ICMF2004 (2004) Paper 525.
- 5) 高曾, 國場, 渡海, 速水, 機講論 No.99-19(1999), pp.145-146.
- 6) 笠木ほか編, 流体実験ハンドブック, 朝倉書店 (1997) p.194.
- 7) Clift, R., Grace, J.R., Weber, M.E., Bubbles, Drops and Particles, Academic Press (1978), p.185.
- 8) Brücker, C., Phys. Fluids, 11 (1999) pp.1781-1796.