

1469 PIV・LIFによる単一気泡周りの液相運動と物質移動の可視化計測

Visualization of liquid motion and mass transfer around a single rising bubble via PIV・LIF

○ 学 山田雅人(静大院)
正 真田俊之(静大工)学 榎原和也(静大院)
正 齋藤隆之(静大院)Masato YAMADA
Toshiyuki SANASDAKazuya SAKAKIBARA
Takayuki SAITO

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

Liquid motion and mass transfer around a single bubble was experimentally investigated. High resolution PIV and LIF methods using a high-speed-video camera enable simultaneous visualization of the liquid motion and mass transfer around a single bubble. Dissolution process of a CO₂ bubble (2.8mm diameter) rising in a zigzag trajectory was observed. As a result, the dissolution of CO₂ intensively depended on the surrounding liquid motion, especially horse-shoe type vortices. Moreover, in order to evaluate the effects of a surfactant on the mass transfer from the bubble, 1-pentanol was added. We clarified that the change of the separation phenomena due to the Marangoni convection affects both the liquid motion and the mass transfer.

Key words: PIV, LIF, single bubble

1. 緒言

気体が分散相として多数存在する流れでは個々の気泡が持つ固有の運動によって複雑な流動状態を示す[1]. 宮本・齋藤ら[2]は気泡界面を左右エッジ部の曲率を用いて表すことで、左右非対称な形状変形を捉え、榎原ら[3]はPIVを用いて、気泡周りの渦放出に言及した。しかし、物質輸送を把握するためにはさらに濃度場の情報を必要とする。

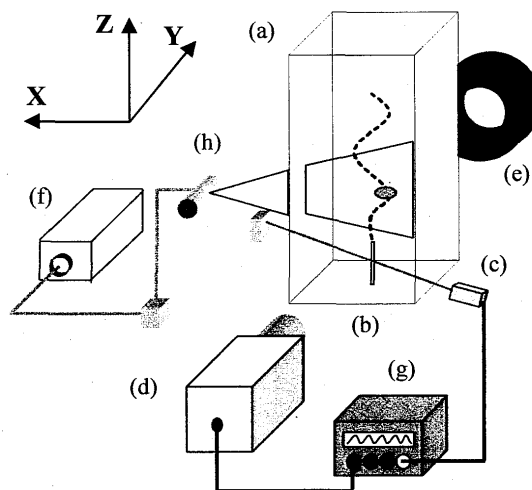
LIF(Laser Induced Fluorescence)法は熱輸送や物質移動を捉えるスカラー計測手法として、非常に有効である。また、LIF法の定量評価の精度向上のための手法として2C-LIFが提案されている[4][5]。

本実験では、精製水中でジグザグ上昇運動する単一CO₂気泡を対象に、LIF法によって上昇気泡溶解過程を可視化した。また、表面活性剤による界面の物性の変化の影響を理解するために1-ペンタノールを添加し、同様にLIF法による可視化を行った。同時に周囲液相についてPIV計測を行い、速度場との比較を行った。

2. 実験装置および方法

本実験では、蛍光試薬にHPTS((8-hydroxypyrene-1,3,6-trisulfonic acid)(励起波長ピーク455nm, 発光波長ピーク520nm))を使用した。HPTSは温度に依存せず、pHに依存する[6]。Fig.1に実験装置の概略を示す。アクリル製矩形水槽(a)にHPTS溶液(0.0001mol/l)を満たし、気泡は水槽底中央に設置された内径0.40mmの注射針(b)から射出される。気泡のガス成分にはCO₂を用い、その溶解過程を可視化する。HPTSの初期pH値は8.0に調整した。気泡射出部に注射針を使用することで気泡サイズおよび気泡の上昇運動と界面運動の高い再現性を得ることができる。本実験での気泡の球等価径は約2.8mmとなり、ジグザグ軌道を呈する。気泡が射出された際に注射針直上に設置されたレーザ通過センサ(c)の信号を計測開始の信号として、ファンクションジェネレータ(g)によって高速ビデオカメラ(d)の撮影フレームを制御する。HPTSの励起光源にはアルゴンイオンレーザ(f)(488nm)を使用した。水槽内にはPIV計測用のトレーサー粒子も混入させており、レーザ光による粒子の散乱光を同一画面内に収める。さらに、気泡界面形状を捉えるために、光源としてリング状に配置された赤色の連続LED(e)(波長660nm)

を使用し、同時に一台のカメラで撮影した。互いに直交する二平面(X-Z, Y-Z)で可視化した。



(a) Water vessel, (b) Needle, (c) Laser sensor, (d) High-speed Camera, (e) Continuous LED, (f) Argon ion laser, (g) function generator, (h) Rod lens.

Fig. 1: Schematic of experimental setup

また、界面の性状の変化の影響を理解するために、1-ペンタノール(500ppm)を添加し、同様の計測を行う。その際の表面張力係数と粘性係数をTable 1に示す。

Table 1 Liquid property

1-pentanol concentration [ppm]	Surface tension [mN/m]	Viscosity [mPa·s]
0	75.2	0.83
500	70.1	0.84

3. 結果と考察

本実験条件において液相の性質そのものに優位な差は見られなかったものとして考察を進める。Fig.2は精製水

中での可視化画像である。約 2.8mm の単一気泡は注射針から射出された直後は直線上昇を示し、上昇速度の増加が止まると、ジグザグ運動を開始する。Fig. 2 は直線軌道からジグザグ軌道に遷移した直後を撮影した画像である。図から気泡下部から液相中に溶解した CO₂ が連続的に放出されている様子が確認される。また、溶解した CO₂ が特徴的な構造を示していることがわかる。Lunde[7]らは染料を用いた気泡後流の可視化計測によって、単一気泡がジグザグ軌道を呈する際に、ヘアピン渦を放出して上昇することを示した。Fig.2 で見られる CO₂ が溶解した気泡後流は同様のヘアピン渦を示していると考えられる。

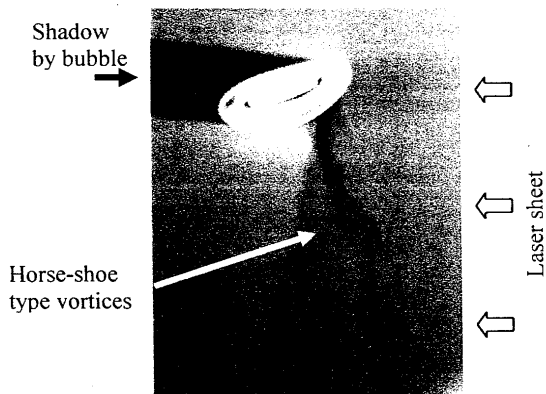


Fig. 2: hairpin vortex behind the bubble

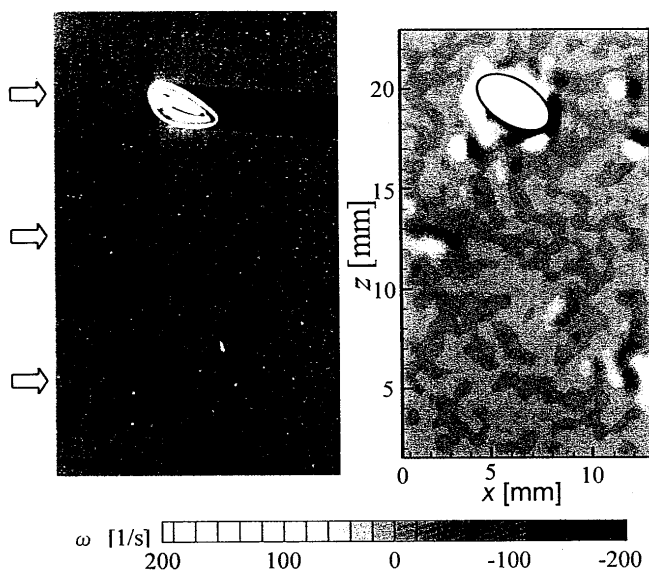


Fig. 3: vorticity field after the inversion point

Fig. 3 はジグザグ変更点後の可視化画像と渦度場を示す。CO₂ が気液界面を通して溶解した後、気泡後部に輸送され、後部での連続的な縦渦の放出によって周囲の液相に拡散していく。図中の CO₂ の濃度の高い部分と強い渦度の分布領域が酷似しており、PIV の結果からも物質移動は気泡後流に強く依存していることが確認された。

Fig.4 に 1-ペンタノール(500ppm)添加時のジグザグ軌道変向点付近での可視化画像を示す。Fig.4 では Fig.2 とは異なる特徴的な流動を捉えている。気泡下部両側から流れが剥離している様子が確認される。気泡側面からの剥離は精製水中の Fig.2 では観測されない。高木ら[8]は、界面活性剤の添加によって、気泡の上昇速度は低下し気泡形状が球

形へと近づくこと、また気泡後部には大規模な剥離が形成されることを報告している。そのため、精製水中で確認されない剥離が 500ppm の溶液中で現れることは、界面活性剤の吸着による効果だと考える。界面活性剤溶液中を気泡が上昇する際には気泡底部に付着した界面活性剤の濃度勾配により生じたマランゴニ対流によって気液界面の境界層の剥離点が気泡上方に変化する。そのために気泡界面上部で溶解した CO₂ が剥離とともに気泡横側から流出している様子が観測されたと考えられる。

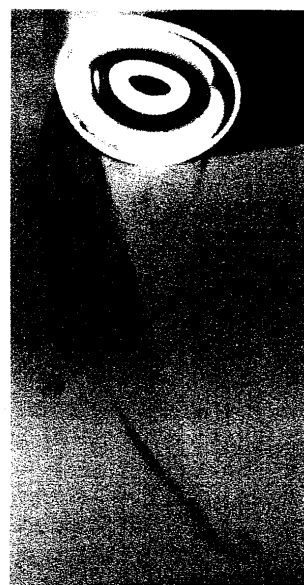


Fig. 4: bubble wake in the 1-pentanol contaminated water

4. 結言

LIF 法は染料を用いた計測などとは異なり、直接的に pH の変化を捉えうる手法である。本研究では LIF 法を CO₂ 単一上昇気泡周りに適用することで溶解過程の可視化計測を行った。LIF 法によって得られた画像は Lunde らの報告した染料を使用した場合の可視化画像に酷似しており、気液界面を通して溶解した CO₂ は周囲液相によって輸送され、後流構造に即したものであることを PIV 計測によって確認した。また、汚染系の評価として、1-ペンタノールを 500ppm 添加した場合には、気泡底部に付着した界面活性剤分子によるマランゴニ対流によって気泡界面の境界層の剥離点に変化し、その現象を可視化画像から確認した。

参考文献

- [1] T.Saito, K.Tsuchiya, T.Kajishima, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, 29, 305-313.
- [2] 宮本悠樹, 齋藤隆之, *機論* 71-705, B, 2005, 1307-1313
- [3] 榎原和也, 宮本悠樹, 齋藤隆之, *日本機械学会流体工学部門講演論文集*, 2005, 85
- [4] Mizuta, K., Odo, Y., Yoshimitsu, S., Kaji, H., Murakami, M., Matsumoto, T., 2006, *ASCON2006*, 7-12.
- [5] Sakakibara, J., Adrian, R. J., *Experiments in Fluids*, 1999, 26, 7-15.
- [6] Coppeta, J., Rogers, C., *Experiments in Fluids*, 1998, 25, 1-15.
- [7] Lunde, K. and Perkins, R., *ASME-FED Summer Meeting*, paper No. FEDSM97-3530, 1997.
- [8] 高木周, 宇田東樹, 渡邊祐二, 松本洋一郎, *機論* 69-686,B(2003), 2214-2220