

Structure of Dynamics of Liquid Field Induced by Buoyancy
of a Single Zigzagging Bubble

○学 熊谷彰哲 (静大院) 准 山下知克 (デンソー) 正 齋藤隆之 (静大工)

Akinori KUMAGAI, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka, 432-8561
Tomokatsu YAMASHITA, Denso
Takayuki SAITO, Shizuoka University

Key Words; Multiphase flow, Single bubble, Bubble wake, PIV

1. 緒言

地球温暖化対策技術の一つに、CO₂の海洋固定^[1]がある。科学技術会議の専門部会は、CO₂の地中あるいは海洋固定を重要な分野と位置づけている。筆者らは、気液二相流のガスリフト効果を利用したGLADシステム^{[2],[3]}を提案し、その実用化に向けた基礎研究^[4]を行っている。GLADシステムの運転効率向上のためには、CO₂気泡の溶解を制御することが重要となる。そこで本研究では気泡近傍のローカルな流動構造に着目し、CO₂気泡の溶解は、気泡の界面運動、気泡周囲の液相運動、液相の乱流渦との相互作用によって起こるものと仮定し、多点同時計測可能な粒子画像流速計(PIV; Particle Image Velocimetry, 以下PIV)^{[5],[6],[7]}を用いて単一気泡浮力に誘起される流れ、気泡周囲の流動構造の特性を把握することを目的として計測を行った。

2. 実験装置および方法

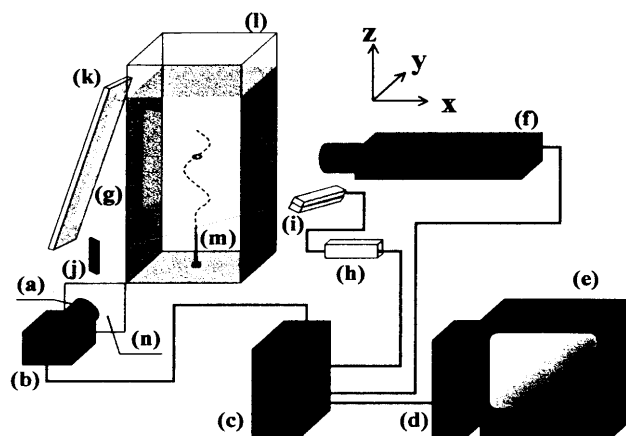
2.1 実験装置

Fig.1に本研究で用いた実験装置の概略を示す。150×150×300mmの亚克力製矩形水槽(l)に、イオン交換した純水を深さ270mmまで満たし、可視化トレーサを混入した。水槽底に固定した注射針(m)(内径0.65mm)から射出した気泡に、YAGレーザー(f)(New Wave Research社製, Model DPIV-50N)からのレーザーシート(g)を照射し、Laser Pulse Synchronizer(c)(TSI社製, Model 1610034)によって同期化されたCCDカメラ(b)(TSI社製, Model PIVCAM10-30)により撮影した。

ここで、気泡を含む気液二相流のPIV計測では、気泡界面の非定常な変形、液体と気体との間の密度差によって、非常に大きな光強度を持った散乱光が発生し、気泡周囲の液相運動を捕えることが困難であった。そこで本研究では、レーザー誘起蛍光法(LIF: Laser Induced Fluorescence)を応用し、蛍光粒子(励起波長542nm, 発光波長612nm)を可視化トレーサとし、CCDカメラに光学フィルタ(n)を取り付けることでこれを解決した。また、本研究では気泡が任意位置にあるときの瞬時の液相運動を捕え、その平均的な流れ場を計測するために、通過センサ(KEYENCE社製 LV-H62)を併用した。通過センサは、アンプユニット(h)、センサヘッド(i)、リフレクタ(j)からなり、BNCケーブルによりLaser Pulse Synchronizerの外部トリガーに接続した。

2.2 計測対象気泡の特性

本研究のPIV計測対象である気泡の特性を高速ビデオカメラ(NAC社製 MEMORECAM)により計測した。気泡は平均長軸3.55mm, 平均短軸1.43mmの扁平楕円体であり、平均球等価径 D_{eq} は2.62mmであった。対象気泡は、静止流体中をジグザグに上昇する。平均上昇速度 U_b は300.5mm/s



(a) Zoom lens, (b) CCD camera, (c) Synchronizer, (d) Computer, (e) Display, (f) YAG laser, (g) Laser sheet, (h) Amplifier, (i) Sensor head, (j) Reflector, (k) Mirror, (l) Acrylic water vessel, (m) Needle, (n) Optical filter

Fig. 1: Experimental setup

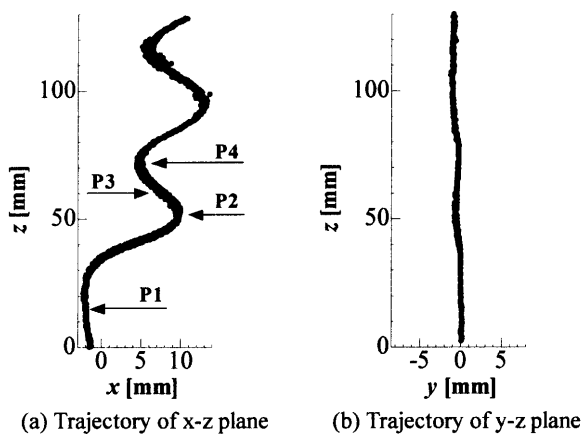


Fig. 2: Trajectory of the center of gravity of bubbles

であった。ジグザグ軌道を x - z 平面, 直線軌道を y - z 平面とした。

2.3 実験方法

空気注入流量を0.5ml/min, 気泡射出時間間隔を約2秒として単一気泡による実験を行った。Fig.2に高速ビデオカメラによって計測された気泡の重心軌道とPIVによる計測点を示す。注射針の先端を原点(0mm, 0mm)とし、P1(-2.0,0,15.0), P2(9.8,0,52.4), P3(7.3,0,62.2), P4(4.8,0,72.1)の各点に気泡が存在するときの x - z 平面を計測した。P1は

気泡がジグザグ運動を開始する点、P2 および P4 はそれぞれ変曲点であり、P3 は気泡の傾斜角が最大値をとる位置である。また、変曲点 P2 および P4 についてはそれぞれ $\pm 15\text{ms}$ における気泡周囲の液相運動も計測した。CCD カメラの視野は $20.04\text{mm} \times 20.36\text{mm}$ 、空間分解能は $20.04\mu\text{m}/\text{pixel}$ とした。YAG レーザからのレーザ光を厚さ 1.5mm のシート光にし、相互相関を行うために撮影される 2 枚の連続画像の時間間隔(パルス間隔)は、気泡の平均上昇速度およびカメラの視野との関係から $300\mu\text{s}$ とした。PIV ソフトウェア INSIGHT(TSI 社製) 上で連続画像の相互相関をとり、気泡周囲の液相のベクトル図を得た。さらに、画像のノイズにより生じたベクトル除去のためフィルタ処理を施した。

通過センサはセンサヘッドから照射される半導体レーザが気泡の軌道と重なるように設置し、気泡がレーザを遮断すると Laser Pulse Synchronizer の外部トリガーに 5V の TTL 信号が入力され、撮影が開始される。このとき、撮影のトリガーのタイミングは PIV ソフトウェア INSIGHT 上で $0 \sim 66\text{ms}$ まで遅らせることができる。

3. 実験結果および考察

本研究で用いた計測法によって得られた、P2 における瞬時の平均速度分布を Fig.3 に示す。Fig.3(b) は P2 点、同図(a)、(c) はそれぞれ P2 点の 15ms 上流下流を気泡が通過する際の気泡周囲の液相運動を示している。値はすべて気泡の平均上昇速度 U_b および平均球等径 D_{eq} で無次元化されている。図中のベクトルは平均速度ベクトル、等値線は x 方向の平均速度分布 $\langle u \rangle / U_b$ を示している。また、図中の点線は高速ビデオカメラによって得られた気泡の平均形状を示し、気泡位置の空白は PIV 画像中の気泡上には誤ベクトルが多く確認されたことから、これらを取り除いたからである。統計量の算出にはそれぞれ気泡 100 個分のデータを用いている。図に示すように、同図(a)においては気泡底部の変曲点内側(この場合、気泡の左側)から気泡中心に向かって特に強い $\langle u \rangle / U_b$ の値が確認され、変曲点を過ぎ、同図(c)に到るまでに分散していく様子が見られる。さらに、気泡後流範囲は気泡とともに移動している。また、このとき気泡上部にも気泡の浮力および気泡を押し上げようとする後流の影響によって流れが生じ、気泡中心から変曲点内側に強い負の値が分布している。変曲点付近において気泡は、浮力だけでなく気泡の界面振動によって生じた液相の乱れにより、変曲点内側の気泡エッジ部に強い渦を発生させながら進行方向を変化させていると考えられる。

次に、P2 における気泡周囲の液相の変動速度分布を Fig.4 に示す。Fig.3 と同様に Fig.4(b) は P2 点、同図(a)、(c) はそれぞれ 15ms 上流下流における気泡周囲の液相運動の平均速度ベクトル図および x 方向の変動速度分布 u_{rms} / U_b の等値線図を示している。変動速度については、同図(a)において気泡底部の中心に強い u_{rms} / U_b の値が確認される。その値は気泡が変曲点を通過していくとともに増加し、通過したあとは同図(c)にみられるように気泡から離れた位置(図中の黒線で囲まれた領域)で最も強い値が確認される。つまり、変曲点において x 方向の変動速度 u_{rms} / U_b は気泡通過後も気泡の軌道上付近で卓越し、特に変曲点の位置に強い変動が存在するという特徴を持っている。

4. 結言

本研究において、PIV システムに通過センサを併用し、トリガーのタイミングを任意に決定することで、上昇気泡に対し、より正確な瞬時の平均速度分布の計測が可能となった。

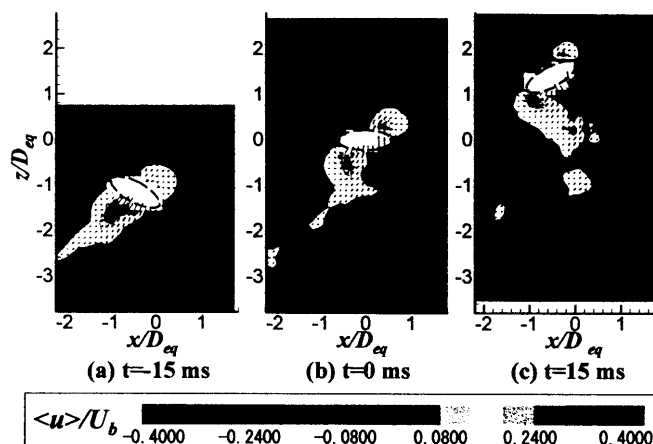


Fig.3: Profile of Normalized vector field of averaged velocity and contour of averaged velocity at P2

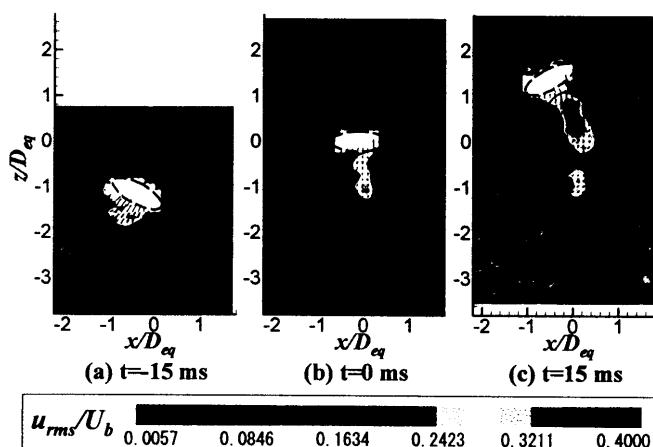


Fig.4: Profile of Normalized vector field of averaged velocity and contour of rms velocity at P2

ジグザグ運動する単一気泡により誘起される液相運動は、特に変曲点付近において激しい変動を示していることが確認された。後流範囲は気泡とともに移動し、その x 方向の範囲は気泡径の 2 倍程度であった。

気泡の特徴として、界面の振動およびスリップ速度の存在、さらには液相との大きな密度差による気泡浮力から生じるエネルギーの授受の関係が挙げられる。そこで今後、本研究で用いた気泡と同スケールの固体粒子を計測対象とし、単一気泡と比較・検討することで、さらに単一気泡の特性を把握していく。

参考文献

- [1] Marchetti, C.: *Climatic Change*, **1977**, 1, 59-68.
- [2] T. Saito, T. Kajishima, K. Tsuchiya, S. Kosugi: *Chem. Eng. Sci.*, **1999**, 54, 4945-4951.
- [3] T. Saito, T. Kajishima, R. Nagaosa; *Environ. Sci. & Tech.*, **2000**, 34, 4140-4145.
- [4] R. F. Mudde and T. Saito: *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 437, 203-228, (2001)
- [5] 藤原暁子他 4 名; 機論 B 編, **1998**, 64, 662, 1697-1704.
- [6] A. Tokuhira, M. Maekawa, K. Iizuka, K. Hishida, M. Maeda: *Int. J. of Multiphase Flow*, **1998**, 24, 1383-1406.
- [7] C. Brückner; *Physics of fluids*, **1999**, 11, 1781-1796