

Correlation Characteristics of Bubble-Interface Motion and Surrounding Liquid Motion

○学 宮本悠樹 (静大院)
学 榊原和也 (静大工)

学 安間 優 (静大院)
正 齋藤隆之 (静大工)

Yuki MIYAMOTO, Suguru AMMA, Kazuya SAKAKIBARA and Takayuki SAITO

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

Key Words: Multi-phase Flow, PIV, Bubble, Wake, Zigzag motion, Interface motion

1. 緒言

静止流体中を単一気泡が上昇する際、気泡特有の上昇軌道であるジグザグおよびらせん運動が観測される。これら運動のメカニズムを解明するため、様々な研究が現在まで数多く成されてきている。近年での粒子画像流速計(PIV)に代表される液相を可視化する技術の飛躍的な発展に伴い、気泡によって誘起された瞬時の速度分布を定量的に捉えることが可能となっている。

Fujiwara ら⁽¹⁾および Lindken and Merzkirch⁽²⁾は気泡形状と周囲液相運動を同時に可視化して詳細な解析を行っており、良好な解析結果を得ている。本研究では彼らの可視化技術を応用する。PIV の可視化トレーサに彼らと同様に蛍光粒子を用いる。一方、気泡形状の可視化においては、赤色 LED のバックライトとする気泡の投影画像とせず、リング状の赤色 LED を用い、気泡界面で生じる屈折光を利用して気泡のエッジを検出する。投影画像より気泡の輪郭を鮮明に捉えることができ、PIV 計測にはほぼ影響がない。

また、従来の PIV 計測は LDV 等と比較すると、測定次元数は高いものの時間分解能が低いという欠点を有していた。そのため、気泡後流のような非定常な流れを把握するには不十分であった。本実験では高速度・高解像度 CCD カメラおよび連続光レーザを使用することで、従来の欠点を克服し気泡に誘起される流動構造を詳細に把握する。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図 1 に示す。アクリル製矩形水槽(150×150×300mm³)に沸騰脱気したイオン交換水を深さ 270mm まで満たす。水槽底中央部に内径 0.34mm の注射針を設置し、ガスシリンダーから一定圧力および一定流量の純空気を注入する。注射針先端を座標原点とし、そこから約 3 秒の一定間隔で球等価径 $D_{eq} = 2.86\text{mm}$ の気泡を射出する。この時気泡はジグザグ上昇軌道を有する。注射針を用いた射出方法により、気泡の上昇運動に対して高い再現性を得ることができる⁽³⁾。気泡が注射針先端から離脱した直後を $t = 0$ として、ジグザグ運動を開始して一回目の進行方向が変わるまでの約 0.2 秒間を計測対象とする。気泡軌道上にレーザ式通過センサを設置し、CCD カメラ(Phantom V9.0)の撮影開始のトリガーとする。ジグザグ運動平面における気泡形状変形と気泡に誘起された液相運動を PIV により解析を行う。

PIV の光源は連続光 YAG レーザ(532nm, 5W)とし、照射したレーザ光をシリンドリカルレンズを介してシート状に拡散させる。可視化トレーサに蛍光粒子(ローダミン B, 粒径 $50\mu\text{m}$, 励起波長 542nm, 発光波長 570nm)を用い周囲液相を可視化して、CCD カメラにより撮影する。カメラの

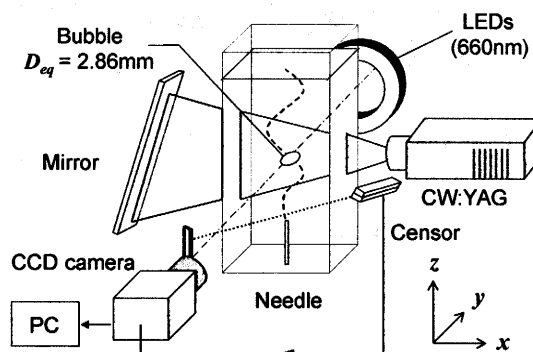


Fig. 1 Schematic of experimental setup

フレームレートは 1900fps, 解像度 $960 \times 960\text{pixel}^2$, 露光時間 $220\mu\text{s}$ とした。カメラの視野は $16.70 \times 16.70\text{mm}^2$, ピクセルサイズは 0.0174mm となり、微視的な解析と高時間分解能な解析を両立させている。また気泡形状の可視化においてはリング状に配置した LED(660nm)を連続発光させることで、PIV の撮影と同時に気泡の輪郭を検出することができる。図 2 に本実験で得られた画像の一例を示す。トレーサ粒子と気泡形状の両者を明瞭に捉えていることが確認される(図 2 a)。この画像を画像処理を施して、気泡画像(図 2 b)と気泡部分を削除した PIV 処理のための画像(図 2 c)を作成する。前者から気泡形状の解析を行い、重心座標、弦長、輪郭座標等を求める。さらに輪郭座標からは、気泡左右部におけるエッジの曲率を算出する⁽³⁾。

図 2 c からは、PIV ソフトウェア Insight (TSI) により流速分布を得る。時間間隔 $526\mu\text{s}$ の二画像から輝度値パターンの相互相関をおこない速度ベクトルを算出する。再帰的相関法⁽⁴⁾を併用することで解像度の高い分布が得られる。測定パラメータは初期検査領域を $64 \times 64\text{pixel}$, 第二検査領域を $32 \times 32\text{pixel}$ とした。

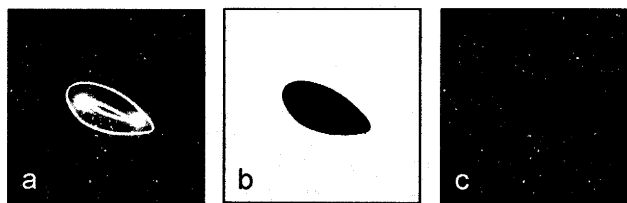


Fig. 2 Typical bubble and particles images

a Original image with bubble and tracer particles.
b Only bubble image. c Tracer particles (Cut off bubble shape).

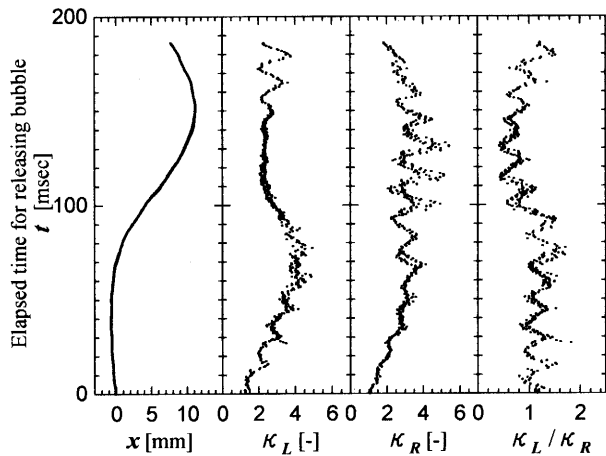


Fig. 3 Bubble trajectory and curvature fluctuation

3. 実験結果および考察

3・1 気泡の界面運動 図3に本実験で得られた気泡の上昇軌道、気泡形状として球等価径で無次元化された左右エッジの曲率 κ_L , κ_R とこれらの比を示す。気泡射出後約70msecにおける直線上昇区間では、左右の曲率は共に増加傾向を示している。さらに左右の比が1前後を呈していることから、気泡形状の対称性が現れていることが認められる。しかしながらジグザグ運動が始まると、この左右の対称性は破綻する。軌道外側に面する気泡界面では周期的な変動が現れているのに対して、軌道内側の κ_L ではそのような変動は発生せず、ほぼ一定の形状を保持していることがわかる。この非対称性は、気泡の比較的近傍で発生する渦およびその放出に起因していると思われる。非対称な渦構造が気泡エッジ周囲の圧力場に影響を与え、気泡形状の著しい左右非対称性をもたらしたと考えられる。

3・2 周囲液相運動 図4に気泡射出後 $t=70$ msec から10msec 間隔での気泡形状とその後流の速度分布を、速度ベクトルの大きさの等高線と流線で定量化して示した。

気泡近傍における気泡上部から後部へ回り込む流れ(Near-wake)と、非定常で複雑な後流(Far-wake)が存在している。前者は安間ら⁽⁵⁾が渦度の局所面積平均を算出して定量的な解析を行っているが、Far-wake の流動構造には触れていないため、本研究では後者に着目する。

気泡右側近傍の Near-wake が、左側近傍と比較すると広範囲に存在している。そのため、軌道外側の領域($t=90$ msec, A)では、比較的低い速度場が分布しており、また上方へ向かう流れが比較的安定している。これに反し領域 B では気泡近傍の回り込む流れと、領域 A の流れとが干渉し合い、複雑な構造を呈している。さらに数個の新たな渦が生成しており、Near-wake で見られるような渦の放出⁽⁵⁾とは異なっている。この渦は次第に上方に移流し、消散する。ジグザグ軌道内側においては、気泡界面はこれに面するエッジが言わば安定した状態であったのが、Far-wake では逆に乱れが大きくなり、軌道外側では逆の現象となっていることは非常に興味深い。気泡の上昇運動に直接影響を与える Near-wake と Far-wake では流れの構造が異なっており、両者を分け隔てて再考察する必要があると思われる。

4. 結言

本研究ではジグザグ上昇運動を有する気泡の界面運動と周囲液相運動の相互関係を論じた。気泡形状は左右エッジの曲率で表すことにより、非対称性を定量化することができた。また周囲液相においては、気泡から離れた後流ではその構造が異なり、後者はより複雑な流動構造であった。今後は非定常な後流をより精微に解析を進め、渦の発生メカニズム等を詳細に捉えて行きたい。

参考文献

- (1) Fujiwara, A. et al., *Exp. Fluids*, **36** (2004), 157-165.
- (2) Lindken, R., Merzkirch, W., *Exp. Fluids*, **33** (2002), 814-825.
- (3) 宮本悠樹・齋藤隆之, 機論, 査読中.
- (4) Hart, D. P., *Exp. Fluids*, **29** (2000), 13-22.
- (5) 安間優, 他3名, 日本混相流学会 年会講演会, (2004).

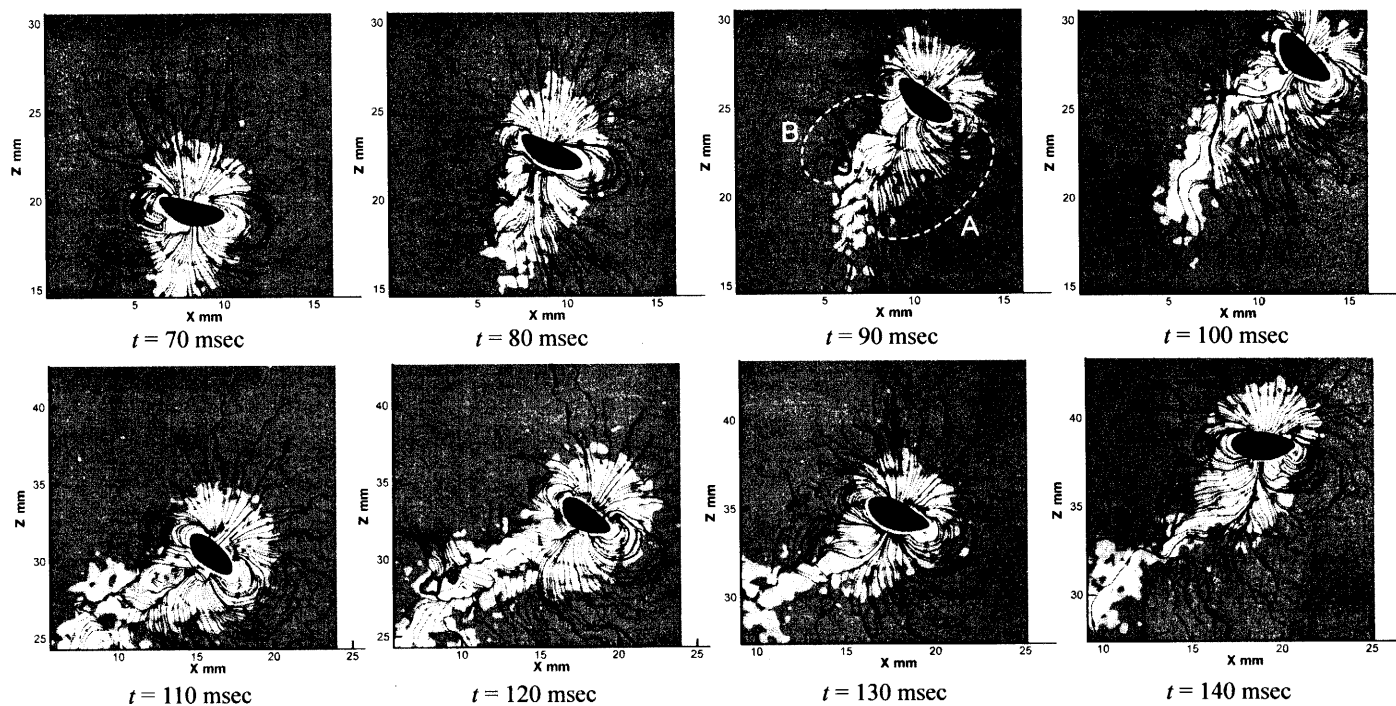


Fig. 4 Contour map of velocity magnitude and stream lines