

# 単一上昇気泡の界面運動と周囲液相運動における相関特性 (GLADシステムの素過程研究 その1)

## Correlation characteristic of interfacial motion of isolated single rising bubble and its surrounding liquid (Fundamental Study on GLAD System, Phase 1)

○学 宮本 悠樹 (静大院) 熊谷 彰哲 (静大院) 学 安間 優 (静大院)  
正 齋藤 隆之 (静大工) 青島 紳一郎 (浜松ホトニクス)

Yuki MIYAMOTO, Akinori KUMAGAI, Suguru AMMA and Takayuki SAITO,  
Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561

Shinichiro AOSHIMA, Hamamatsu Photonics, 325-6 Sunayama-cho, Hamamatsu, Shizuoka 430-8587

The interrelation between the liquid motion in the vicinity of a zigzag rising bubble and the interfacial motion of it in rest water has been investigated experimentally. The interfacial motion and surrounding liquid motion were measured by illumination imaging technique and PIV measurement, respectively. We discussed the asymmetric vorticity field of surrounding liquid and bubble shape deformation. As a result, it was confirmed that the curvature of outside at the inversion point was larger than that of inside, the vorticity of outside at the inversion point was also larger than that of inside, and these two parameters periodically fluctuate and have close correlation.

**Key Words:** PIV, Single bubble, Bubble wake, Interfacial motion, Curvature

### 1. 緒言

地球温暖化の対策技術の一つに、ガスリフト効果を利用してCO<sub>2</sub>を深海に固定するGLADシステム<sup>(1)</sup>がある。GLADシステムでは海水の酸性化を抑制するため、CO<sub>2</sub>気泡の溶解制御を行う必要がある。溶解プロセスは種々のスケールに跨っていることから、中でも気泡界面運動は気泡と液相間の物質移動のメカニズムを解明する上で重要である<sup>(2),(3)</sup>。

本研究では、気泡近傍の局所的な流動構造および非対称性を有する気泡界面運動における相互干渉について論じる。静止流体中をジグザグ上昇運動する単一気泡を計測対象とし、CCDカメラから気泡形状、そして周囲流動構造は粒子画像流速計(PIV)を用い、気液両相を同時に可視化計測する。

### 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は150×150×300mm<sup>3</sup>であり、煮沸脱気したイオン交換水を、深さ約270mmまで満す。水槽底中央部に内径0.4mm、刃面角度12°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。注射針先端からは、約2秒間隔で単一の気泡が射出される。この射出間隔においては、前気泡の上昇運動によって誘起される液相運動が十分に散逸し、その後流の影響を無視することができる。本条件下では、 $x$ - $z$ 平面においてジグザグ軌道、それに直交する $y$ - $z$ 平面上で直線軌道を呈した。また射出された単一気泡は、球等価径2.56mmの扁平楕円体形状、気泡レイノルズ数729、エトベス数0.877を有している。

本研究では、ジグザグ上昇運動する気泡の形状変形ならびにその周囲の液相運動を同時に可視化する。そのため、レーザ誘起蛍光法(LIF: Laser Induced Fluorescence)と単色LEDによる投影画像技術<sup>(4)</sup>を応用した。気泡の界面運動を捉えるために、リング状の赤色LED(660nm)により照射された気泡画像を、CCDカメラ(1024×1024pixel<sup>2</sup>)を用いて撮影した。得られた画像から、気泡の重心座標、弦長、そして輪郭座標等の気泡パラメータを求める。また、輪郭座標からは気泡左右部におけるエッジの曲率が算出される。

気泡形状の可視化と同時に、Nd:YAGレーザーからシート状のパルス光が照射され、可視化トレーサである蛍光粒子(励起波長542nm, 発光波長570nm)が発光する。高波長域にシフトした発光により、高輝度の気泡散乱光を光学フィルタによって除去でき、気泡近傍の流動構造を捉えることが可能となる。この可視化トレーサのみの画像は、PIV用CCDカメラ(1000×1016pixel<sup>2</sup>)で撮影され、輝度の相互相関アルゴリズムによって速度場情報を得る。

なお、注射針を用いた射出方法は、気泡の上昇運動に対して高い再現性が得られる<sup>(5)</sup>。再現性を確保した上で、統計的な処理を行う。気泡の上昇軌道にレーザ式通過センサを設置し、気泡の任意座標における気泡界面運動および周囲液相運動を捉える。通過センサの信号を計測のトリガーとすることで、二台のCCDカメラ、LED照明およびNd:YAGレーザーを同期することができる。注射針先端を座標原点として、ジグザグ運動の進行方向が変わる最初の変向点直前( $z=45.6$ mm)から、第二の変向直後( $z=81.0$ mm)までの区間を、1msの間隔で気泡形状および液相運動の同時計測を $x$ - $z$ 平面に対して行う。その後、各計測点で気泡100個分の撮影を行い平均処理を施す。

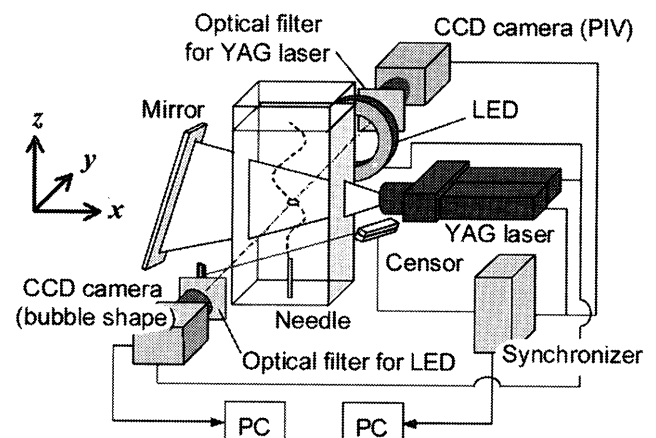


Fig. 1 Schematic of experimental setup

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 気泡の界面運動

図 2(a), (b), (d)にそれぞれ、計測した各点における気泡重心の軌跡、および気泡径で無次元化された左右部エッジの曲率を示す。最初の変向点付近では右部エッジの曲率の変動、ならびにその値が左部よりも大きい。一方、第二の変向点付近においては、逆に左部側が大きくなることを確認される。これはジグザグ上昇軌道の外側では、内側に比べて曲率の変動、値が共に大きいことを意味している。また、第一から第二変向点に至る区間において、第二の変向点で外側に面するエッジの曲率変動が大きいことも確認でき、宮本ら<sup>(5)</sup>の界面振動の結果とよい一致を示している。以上のことから、気泡の界面運動は左右非対称である。

#### 3.2 周囲液相の渦度分布

図 3 に気泡上昇軌道上にある PA( $z=46.25$ ), PB( $z=48.61$ ), PC( $z=50.99$ ), PD( $z=57.13$ ), PE( $z=68.89$ ), PF( $z=73.11$ )の各点における瞬時の平均速度ベクトルを矢印で、平均渦度分布を等値線に示す。最初の変向付近である PA, PB および PC では、気泡後流の右側の渦度分布が範囲、値ともに大きくなっている。さらに、変向後は右側から大きい渦の放出が確認される。両変向点の中間に位置する PD, PE では、気泡の上昇に伴い気泡後流の左側の渦度が右側に比べて大きくなる。気泡の両エッジから、交互にやや小さい渦を放出している様子が見られる。そして第二の変向点 PF では、PA, PB および PC で見られた渦度分布の傾向とは逆に、気泡後流の左側でより大きい渦度分布を示している。これらの知見より、ジグザグ運動の変向においては、気泡後流の外側では内側に比べて渦度が大きくなり、気泡の上昇運動に大きく影響を与えると考えられる。

#### 3.3 気泡の界面運動および周囲液相運動の相関性

図 2(c), (e)は図 4 に表されるような、気泡後流の左右部における特定の領域において、渦度分布の面積平均を示している。気泡が最初の変向点に接近すると、外側に面する後流右側の渦度が先ず極大値を有し、その後右側の曲率が極大値を取る。第二の変向点に向かう中間点では、左部エッジの曲率変動が大きくなり、渦度は左右部ともに増加傾向を示すが、特に後流左側において渦度の発達が著しい。そして第二の変向点に至ると、最初の変向とは反転した傾向、即ち左側で渦度が極大値をとり、その後気泡の左部エッジの曲率が極大値を示す。

ジグザグ上昇運動する気泡は、次の変向点に到達するまで、気泡の傾斜を水平に保とうとし、次に外側に面する気泡エッジの曲率を大きく変動させる。これと同時に、気泡後流の渦度は発達し、渦度分布の非対称性が顕著となった時、気泡オリエンテーションが水平となり、外側の曲率が極大となる。そして、液相の慣性力により変向前とは逆の方向に気泡が傾き上昇する。このような過程を順次繰り返すことによって、ジグザグ上昇運動を成り立たせていると思われる。

### 4. 結言

本研究では、単一上昇気泡の界面運動とその周囲の液相運動を同時計測することで、左右非対称な気泡の界面運動、気泡に誘起される周囲液相運動、およびこれらの相互干渉を捉えた。気泡の界面運動については左右部エッジの曲率、液相運動については気泡後流の渦度を算出した。その傾向から、両者の運動および気泡の重心運動には強い相関性があると考えられる。今後は、高時間分解能、さらには三次元計測を達成することで、より精緻な計測を行い、圧力変動も含めた更なる相関性を探る必要があると考えている。

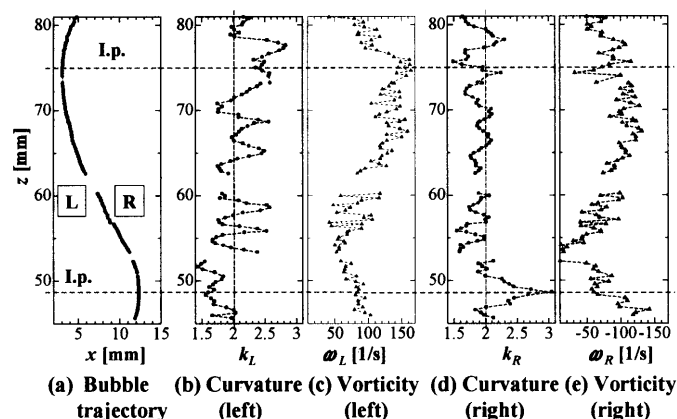


Fig. 2 Curvature of bubble shape and distribution of vorticity

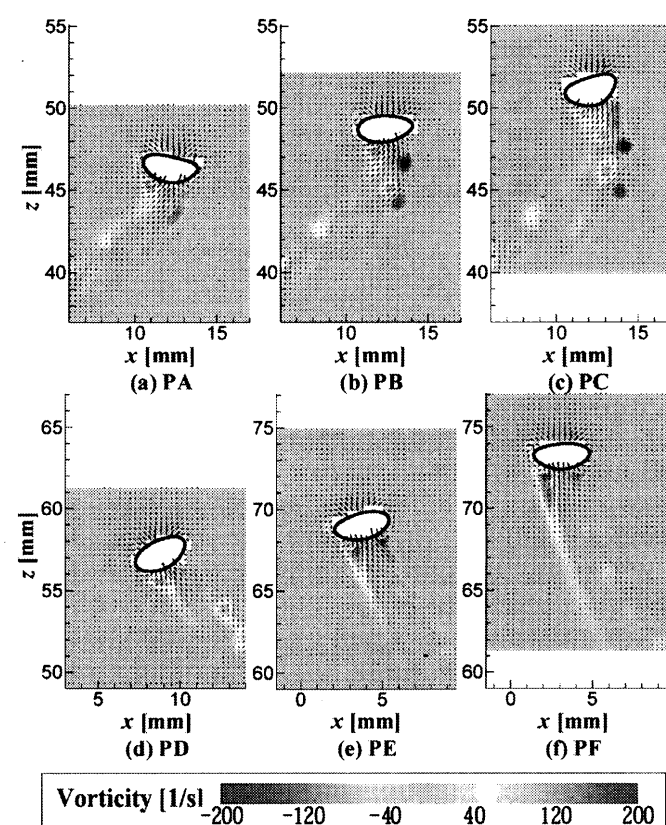


Fig. 3 Profile of normalized vector of averaged velocity and contour of averaged vorticity

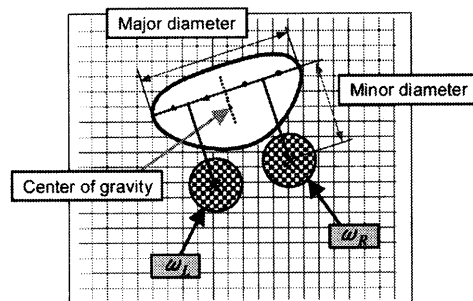


Fig. 4 Definition of two circles to average vorticity locally

### 参考文献

- (1) Saito, T. et al., *Environ. Sci. Technol.*, **34** (2000), 4140-4145.
- (2) Tsuchiya, K. et al., *Can. J. Chem. Eng.*, **81** (2003), 647-654.
- (3) Saito, T. et al., *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **28** (2004), 479-488.
- (4) Fujiwara, A. et al., *Exp. Fluids*, **36** (2004), 157-165.
- (5) 宮本悠樹, 齋藤隆之, 機論, 投稿中.