

## 2825 光ファイバプローブによる気泡界面運動計測 Measurement of bubble interfacial motion by optical fiber probes

齋藤隆之 (静大工)  
梶島岳夫 (阪大工)

ロバート F. ムッダ (デルフト工大)  
土屋活美 (徳島大工)

Takayuki SAITO, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu 432-8561, JAPAN

Robert F. MUDDE, Delft University of Technology

Takeo KAJISHIMA, Osaka University

Katsumi TSUCHIYA, Tokushima University

Probe methods have been widely used in bubble measurements such as local void fraction, bubble velocity and diameter. Bubble contacts directly with the probe. However, the contacting process is unknown. We have developed 4-tip optical probe with each edge cut under 30 degrees with probe axis. We discuss the performance and accuracy of the probe and examples of measuring bubbles in turbulent bubbly flows in large-diameter vertical pipe.

**Key Words:** Optical fiber probe, bubble, Interfacial motion, bubbly flow

### 1. はじめに

気泡流は気液間の密度差によって生じる複雑な流動現象であり、運動量、物質、エネルギーが気泡界面を介して授受され、かつミクロ (ローカル) からマクロ (グローバル) に至る多重スケール構造を有している。このため気泡計測には細心の注意が要求される。大口径管内気泡乱流には、大規模な組織化構造が見られ、液相 (連続相) と気相 (分散相) の運動をローカルあるいはグローバルに計測することが必要となる。本研究においては、先端を楔状に切断した光ファイバを4本組み合わせた4点光ファイバプローブによる気泡計測について述べる。気泡検出時の気泡界面および並進運動に対する同プローブの影響度を考察し、気泡運動の計測精度を考察する。さらに、同プローブによる大口径管内気泡乱流における気泡測定例<sup>(1)</sup>をとりまとめる。

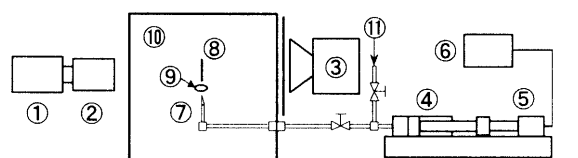
### 2. 実験装置と方法

本研究では、4点プローブによる単一気泡計測実験 (以下、実験-1) と内径 149mm, 高さ 10m のアクリル製ループ内気泡計測実験 (以下、実験-2) を行った。実験装置 1 および 2 の概要を Fig.1, Fig.2 に示す。実験装置 1 は 300\*300\*300mm のアクリル水槽<sup>(10)</sup>, 内径 0.78mm の注射針<sup>(7)</sup>, 高速ビデオカメラ (500frame/s)<sup>(1)</sup>, 実体顕微鏡<sup>(2)</sup>, ストロボ (1000Hz)<sup>(3)</sup>, 注射器<sup>(4)</sup>, パルスモーター<sup>(5)</sup> 等から構成される。気泡<sup>(9)</sup>を自由上昇運動させ、4点プローブ<sup>(8)</sup>に接触させ、一連の気泡運動を可視化撮影すると同時にプローブ出力信号を A/D 変換して PC に取り込んだ。実験装置 2 は、気泡発生装置<sup>(1)</sup>, 気泡分散板<sup>(2)</sup>, 鉛直アクリル管<sup>(4)</sup>, 4点プローブ<sup>(7)</sup>, プローブ移動装置<sup>(16)</sup>, プローブ昇降装置<sup>(15)</sup>, ガスボンベ<sup>(11)</sup>, 質量流量計<sup>(12)</sup>, 圧力変換器<sup>(13)</sup>, 熱電対<sup>(14)</sup>, 電磁流量計<sup>(9)</sup>, 気液分離タンク<sup>(6)</sup>, 水槽<sup>(7)</sup> 等から構成される。実験はアクリル管内に液相流をポンプで作成し、気泡発生装置から分散性の高い気泡を発生させ、任意の気泡流を設定した。

4点プローブの構造を Fig.3 に示す。光ファイバ先端を軸に対して 30度で楔状に切断した。4本を図のように配置して4点プローブとした。センタープローブ C をプローブ 1,2,3 で形成する正三角形の重心に置き、先端を約 1.5mm 長くした。多の 1,2,3 は先端位置を同一平面とした。

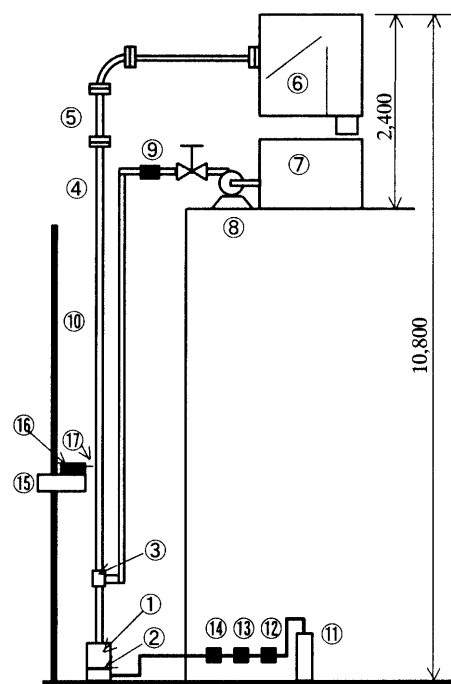
### 3. 実験結果と考察

代表的プローブ信号を Fig.3 に示す。プローブ先端の切断形状のためプローブ先端は徐々に気泡に覆われことから、各



①High-speed video camera ②Microscope ③Strobe ④Syringe ⑤Pulse motor ⑥Controller ⑦Needle ⑧4-tip optical probe ⑨Bubble ⑩Vessel ⑪Air

Fig.1 Experimental setup used in single bubble contacting with 4-tip optical fiber probe.



①Bubble column ②Bubble disperser ③Liquid inlet screen ④Acrylic pipe ⑤Telescopic pipe ⑥Knockout vessel ⑦Water vessel ⑧Pump ⑨Electromagnet flowmeter ⑩Lift ⑪Cylinder ⑫Mass flow controller ⑬Thermo couple ⑭Pressure transducer ⑮Probe stage ⑯Probe traverse ⑰4-tip probe

Fig. 2 Experimental set up used in bubble measurement in turbulent bubbly flows

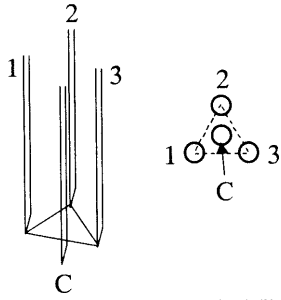


Fig. 3 Structure of 4-tip optical fiber probe

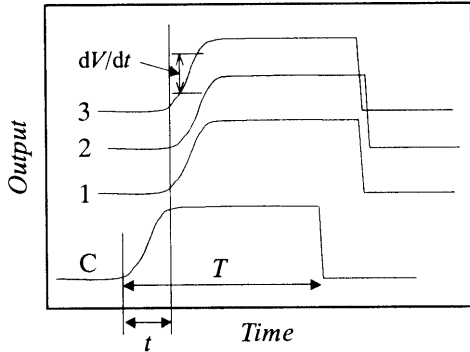


Fig. 4 Example of output of 4-tip optical fiber probe

プローブの気泡検出開始信号は傾斜する。プローブ先端が完全に気泡に覆われると出力信号は一定となり、気泡離脱時の信号は鋭く降下する。Probe-CとProbe-1, 2, 3との間には気泡速度に応じた時間差が観測される。この立ち上がりの微分値は気泡界面速度に比例する<sup>(2), (3)</sup>。この関係から気泡界面速度を計測することができる。さらに、以下によりプローブ信号を解析することにより気泡並進速度（ただし、上昇速度のみ）が測定される。加えて、4つの時系列気泡検出信号  $s_i(t_j)$  ( $i = C, 1, 2, 3$ ) に適切なしきい値  $th_\alpha$  を採用することにより、局所ポイド率は  $s_c$  より得られる。

プローブ出力信号を二値化する。

$$b_c(t_j) = 1 \text{ if } s_c(t_j) > th_\alpha \quad (1)$$

局所ポイド率は次式により得られる。

$$\alpha = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N b_c(t_j) \cdot \Delta t_s}{N \Delta t_s} \quad (2)$$

検出時間差は下記により得る。

$$\text{if } s_c(t_s) > th_v, \text{ bubble hits central tip at time } t_s, \quad (3)$$

$$\text{if } s_i(t_k) > th_v, \text{ bubble hits tip } i \text{ at time } t_k, \quad (4)$$

$$\tau_{ic} = t_k - t_s \quad (5)$$

下記により各時間差が妥当であるかを判断し、平均時間差を算出する。

$$\tau = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \tau_{ic} \quad (6)$$

$$\text{if } \frac{\tau_{ic} - \tau}{\tau} < \delta t \forall i, \text{ then valid bubble detection, else reject and reset.} \quad (7)$$

検出時間が上記により妥当と判断されるなら、気泡上昇速度  $v_b$  は

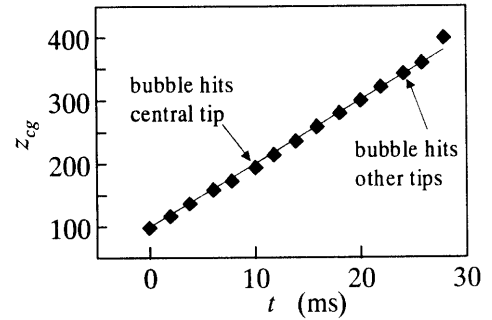


Fig. 5 Influence of 4-tip probe on bubble rising velocity

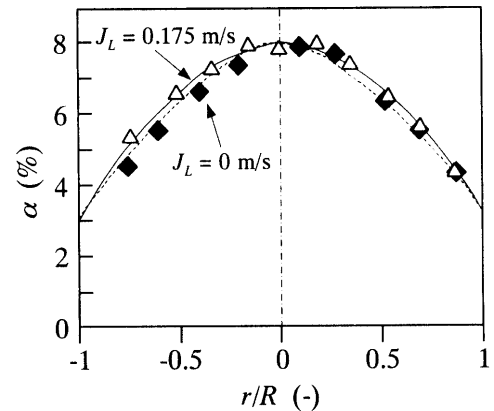


Fig. 6 Radial profile of void fraction measured by 4-tip probe

$$v_b = \frac{\Delta s}{\tau} \quad (8)$$

により与えられる。また、プローブcが気泡中に存在する時間から、気泡の弦長が次式により算出される。

$$\text{if } s_c(t_e) < th_v, \text{ central tip leaves bubble} \quad (9)$$

$$T = t_e - t_c \quad (9)$$

$$d_b = v_b * T \quad (10)$$

Fig. 5は4-tip probeに接触し、離脱する過程における気泡運動を高速ビデオカメラにより可視化し、画像処理により気泡上昇速度を解析した結果である。同プローブは気泡並進運動に影響を与えないことがわかる。また、気泡界面運動への影響も無視できる程度である<sup>(3)</sup>。Fig. 6はループ実験によるポイド率分布の測定例<sup>(1)</sup>である。

#### 4. おわり

気泡乱流における気泡測定のために開発した4点プローブについてその概要を述べた。今後は気泡界面運動を考慮したさらに精度の高いプローブ計測法を目指したい。

#### 参考文献

- (1) R. F. Mudde and T. Saito, submitted to JFM, (2000)
- (2) 齋藤, 日本国特許第 3018178, (2000).
- (3) T. Saito & T. Kajishima, ASME, FEDSM99-7789, FED-Vol.248, in CD-ROM, (1999).