47 画像処理法による気泡界面挙動の測定限界

賞雅寛而° 三好直巳 近藤宏一 張 建国

Limit of Measurement of Bubble Interface Configuration
with Image Processing Method

Tomoji TAKAMASA*, Naomi MIYOSHI**, Kouichi KONDOH* and Jian-Guo Zhang*

An image processing method on two back-lit images which were taken from directions at right angle each other has been developed to measure bubble interface configurations in tube bubbly flow. The position of the bubble in tube cross section cannot be measured when bubble diameter and the concentration increase and making no pairs of bubbles whose vertical position are the same in two images. This paper presents the result of calculation on limit of diameter and concentration for measurement with the image processing method.

1. 緒言

管内液流体中に分散する気泡の大きさ、位置などの管内気泡の挙動を測定する方法として、ステレオ撮影によるビデオ気泡画像を画像処理する方法が開発され、垂直円管内の三次元気泡挙動が測定されている。しかしながらこの方法では、測定領域内の気泡の径及び密度の増加による類似気泡の増加及び気泡の重なりによって気泡の識別が困難になり、測定できなくなる。この測定限界を計算し、低ボイド域の気泡流ではこの測定方法が有効であることを確認したので報告する。

2. 気泡の画像処理法⁽¹⁾

直角方向に2方向から撮影される、内径25mmの垂直管空気-水気泡流の気泡画像(A B画像と呼ぶ、画像範囲は80×80mm)は、画像素子256×256×の画像ボードでパーソナルコンピュータに読み込まれる。A B画像において同じ管軸方向位置に同じ縦径の気泡がある場合には、図1のように気泡を同定できない。また気泡の重なりの部分で輪郭のはっきりしない場合があるために、重なった気泡の外側輪郭を全ては測定できない。従って以下の2つの条件でA B画像の気泡を同定する。

図1 同径・同管軸位置による同定不可

同定条件(1) 気泡が重ならず、気泡の下端位置と上端位置がA B画像で同じ気泡(図2)

$$\{Z_{Au}(n)=Z_{Bu}(m)\} \quad \{Z_{Al}(n)=Z_{Bl}(m)\} \quad (1)$$

同定条件(2) 一方の画像で2個の気泡が重なっており、その気泡の下面位置もしくは上面位置のどちらかが同じ2つの気泡が他方の画像にある(図3)

*Tokyo University of M.Marine **Institute for Ship Training

$$\begin{aligned}
 &[(B \text{画像で} \textcircled{n} \text{は} 2 \text{個の気泡の重なり}) \quad \{Z_{Bu}(m) = Z_{Au}(n)\} \\
 &\quad \{Z_{B1}(m) = Z_{A1}(n')\}] \quad [(A \text{画像で} \textcircled{n} \text{は} 2 \text{個の気泡の重なり}) \quad (2) \\
 &\quad \{Z_{Au}(n) = Z_{Bu}(m)\} \quad \{Z_{A1}(n) = Z_{B1}(m')\}]
 \end{aligned}$$

画像素子数による画像分解能及び視差のため、±1画素が誤差範囲とされる。

3. 気泡の重なりによる測定限界

測定領域内の気泡数が多くなると同じ管軸方向位置に同径の気泡がある確率や気泡が重なる確率が多くなって、A B画像での気泡同定を本測定方法ではできなくなる

(1) A B画像で同じ管軸方向位置に同径の気泡が存在する確率 直径dの気泡中心が測定範囲内に取りうる領域 V_s と2個の気泡が同じ管軸方向位置にあると考えられる範囲 ΔV_s は、

$$V_s = \frac{\pi}{4} (D-d)^2 L$$

$$\Delta V_s = \frac{\pi}{4} (D-d)^2 \Delta L \quad (3)$$

画像処理画素数±1までを誤差範囲としているので、微小長さ $\Delta L = 80/256 \times 3 = 0.94\text{mm}$ である。1個の気泡によって減少する有効領域 V_a はNによって変わるが、ここで $N=2d^3$ とする。測定領域内にN個の気泡がある時に同じ管軸範囲に2個以上の気泡がある確率 $P_{E(1A)}$ は、

$$\begin{aligned}
 P_{E(1A)} = & 1 - (1 - \frac{\Delta V_s}{V_s}) (1 - \frac{\Delta V_s}{V_s - V_a}) \cdots (1 - \frac{\Delta V_s}{V_s - (N-2)V_a}) (1 - \frac{\Delta V_s}{V_s - (N-1)V_a}) \\
 & - N (1 - \frac{\Delta V_s}{V_s}) (1 - \frac{\Delta V_s}{V_s - V_a}) \cdots (1 - \frac{\Delta V_s}{V_s - (N-2)V_a}) \frac{\Delta V_s}{V_s - (N-1)V_a} \quad (4)
 \end{aligned}$$

2つの気泡の直径の差が誤差範囲(画像処理画素数±1画素:0.94mm)以内にあれば、同径と判断される。気泡径分布から同径と判断される確率 $P_{E(1B)}$ を求めることができるが、ここでは気泡径の分布が平均径d、標準偏差d/2の正規分布をしていると仮定して $P_{E(1B)}$ を求めた。よってA B画像で同じ管軸方向位置に同径の気泡が存在する確率 $P_{E(1)} = P_{E(1A)} \cdot P_{E(1B)}$ となる。平均気泡径2-5mmの場合の計算結果を図4に示す。測定結果から平均気泡径は3-5mm、ボイド率は2-5%の範囲にあるので、A B画像で同じ管軸方向位置に同径の気泡が存在することによって気泡が同定測定不能になる確率は1%以下であることがわかる。

図2 同定条件(1)によるA B画像の気泡同定

図3 同定条件(2)によるA B画像の気泡同定

実際の画像解析では、500枚の画像の内0-3枚程度が気泡の区別ができなかった。

(2) 気泡の重なりによる測定限界

気泡数が増えると気泡の重なりによって誤差を生じる。気泡写真で目視判断できる気泡の重なりも、この画像処理では二値化しており、かつ内側境界と外側境界の区別が付きにくいために1つの気泡として判断されてしまう。気泡の重なりによる誤差を検討するために同定条件(1)、(2)による測定限界をそれぞれ図5、6のような平面モデル

で考える。断面積 S の中に N 個の気泡があって、1個の気泡中心が1辺 h の正方形中心 (x_1, y_1) にある時、他の気泡が図5の斜線部分 $\Delta S_{x_1 y_1}$ に入らず同定条件(1)による測定可能な確率 $P_{E(2A)}$ は、

$$P_{E(2A)} = \iint_{x_1^2 + y_1^2 < R^2} \frac{h^2}{S} \cdot \frac{S - \Delta S_{x_1 y_1}}{S - S_a} \cdot \frac{S - \Delta S_{x_1 y_1} - S_a}{S - 2S_a} \dots \frac{S - \Delta S_{x_1 y_1} - (N-3)S_a}{S - (N-2)S_a} \cdot \frac{S - \Delta S_{x_1 y_1} - (N-2)S_a}{S - (N-1)S_a} dx_1 dy_1 \quad (5)$$

斜線部分の大きさは、

$$\Delta S_{x_1 y_1} = \Delta S_{x_1} + \Delta S_{y_1} - h^2 \quad \Delta S_{x_1} = 2h\sqrt{R^2 - x_1^2} \quad \Delta S_{y_1} = 2h\sqrt{R^2 - y_1^2}$$

図5 同定条件(1)による測定限界

図6 同定条件(2)による測定限界

ここで $R = (D-d)/2$, $h = 2d$, また1個の気泡によって減少する有効領域 $S_a = d^2$ と仮定する。断面積 S の中に N 個の気泡があって、1個の気泡中心が1辺 h の正方形中心 (x_1, y_1) にある時、もう1個の気泡だけが $\Delta S_{x_1 y_1}$ に入り他の気泡が ΔS_{x_2} もしくは ΔS_{y_2} のなかに入らず、同定条件(2)による測定ができる確率 $P_{E(2B)}$ は、

図4 同径・同管軸位置による測定限界

$$P \varepsilon (2B) = 2 \iiint_{\substack{x_1^2 + y_1^2 < R^2 \\ x_2^2 + y_2^2 < R^2}} \frac{h^2}{S} \cdot \frac{\Delta S_{x_1 y_1}}{S - S_a} \cdot \frac{S - \Delta S_{x_1 y_1} - \Delta S_{x_2} S_a}{S - 2S_a} \dots \dots$$

$$\frac{S - \Delta S_{x_1 y_1} - \Delta S_{x_2} (N-3) S_a}{S - (N-2) S_a} \cdot \frac{S - \Delta S_{x_1 y_1} - \Delta S_{x_2} (N-2) S_a}{S - (N-1) S_a} d x_1 d x_2 d y_1 \quad (6)$$

ここで、 $\Delta S_{x_2} = 2h\sqrt{R^2 - x_1^2} - h^2$
 である。従って、気泡が重なりによ
 って、A B画像での気泡同定を同定
 条件(1)、(2)で同定できなくなる確率
 $P \varepsilon (2) = 1 - P \varepsilon (2A) - P \varepsilon (2B)$ である。
 平均気泡径3mmと4mmの場合の計算結
 果を図7に示す。実線は同定条件(1)
 によってのみ同定した場合の同定で
 きなくなる確率 $1 - P \varepsilon (2A)$ を示してお
 り、同定条件(2)を加えることにより
 30-50%の精度向上を果たしているこ
 とがわかる。図8に気泡径と気泡数
 密度の管断面分布の測定例を示す。気
 泡数密度分布図の印、△と▲は、そ
 れぞれ本気泡画像処理法で使用され
 た気泡の同定条件(条件
 (1)、(2)の両方)で求め
 られた気泡数密度と同
 定条件(2)で求められた
 気泡数密度を示してい
 る。底層気泡流におい
 てもコア気泡流におい
 ても、A Bどちらかの
 画像で気泡が重なっ
 ている場合の同定条件(2)
 による気泡測定数は、
 管断面全体にわたって
 全測定数の30-40
 %を占めていることが
 わかる。

図7 気泡の重なりによる測定限界

図8 気泡径と気泡数密度の測定例

文献 (1)賞雅ほか、機論、59-564、B(1993)、63