D106

ワイヤーメッシュトモグラフィ法を用いた

鉛直円管内気液二相流の可視化

茂手木 裕一[○](東工大院), ワンヂラニラン・ウィーリン(東工大院), 木倉 宏成(東工大原子炉研)
有富 正憲(東工大原子炉研), 山内 豊明(原電)

Visualization for gas-liquid two-phase flow using wire mesh tomography

Yuichi MOTEKI, Weerin WANJIRANIRAN, Hiroshige KIKURA,
Masanori ARITOMI and Toyoaki YAMAUCHI

ABSTRACT

Wire Mesh Tomography (WMT), which is system to measure two-phase flow, has been developed in our laboratory. Measurement principle of WMT is detecting conductivity difference between gas and liquid. WMT measures void fraction as raw data, and calculates gas velocity and bubble volume etc. In this paper, this measurement technique was applied to vertical circular pipe of 50mm diameter and about 7m heights. New Wire Mesh Sensor (WMS), which is measurement part of WMT, for circular pipe, have been made. When experiment was performed, superficial gas and water velocity. The effect of each flow parameter was found for void fraction, true gas velocity and bubble volume and the results was in good agreement with the past research, qualitatively.

Keywords: Wire Mesh Tomography, Gas-liquid two-phase flow, Vertical pipe, Void fraction, Visualization

1. 結論

受動的機能を利用した将来型軽水炉では、動的機能に比べて駆動力が小さいため、大気泡ができやすく、多次元的な流れ場が起きやすいといった特長がみられる。この多次元流動を解明するため、従来から数多くの計測技術が提唱され、それらにより実験が行われてきた¹⁾。しかしながら、軽水炉の運転条件(高温・高圧)下では、X線やγ線を利用したボイド率分布計測に限られているのが現状である。その中、著者らは実機条件下での適用が有望視されているワイヤーメッシュ型二相流計測システムの開発を行ってきた²⁾³⁾。本システムは電気伝導プローブ法を応用し、ワイヤーメッシュセンサー(Wire Mesh Sensor; WMS)を用いたワイヤーメッシュトモグラフィ(Wire Mesh Tomography; WMT)法により、流路断面の瞬時ボイド率分布を計測することができ、同時に気泡上昇速度分布および気泡体積を計測可能である。本報では、新に可視化用円管 WMS を製作し、実機条件下に先立ち、大気圧下における気泡流の多次元流動特性を解明することを目的とし、可視化実験を行った。

2. 測定原理

2.1 Wire Mesh Sensor

Fig. 1a) に WMT 法のセンサー部である WMS の概略図、b) に電極であるワイヤーの流路断面での配置を示す。WMS は、電圧印加平面および受信面の 2 種類の電極平面(トランスミッタ電極 1 平面、レシーバ電極 2 平面)を有し、平面間距離を一定に保って配置されている。

WMT 法では、それら電極平面間の電気抵抗を計測することにより計測を行い、計測された局所・瞬時の電気抵抗値より、流体内の相分布を知ることが出来る。本実験では、トランスミッタ電極平面の上下にレシーバ電極平面が 2 平面ある WMS を用いることにより、局所瞬時ボイド率から気泡上昇速度および気泡体積(気泡径)を求めることが出来る。諸元を Tab. 1 に示す。

Tab. 1 Specification of WMT

流路断面	直径 50mm の円管流路
電極ワイヤー直径	0.125mm (SUS304)
トランスミッタ電極	16 本×1 平面
レシーバ電極	16 本×2 平面
電極平面間距離	2mm
計測点	2×16×16 点
空間分解能	2.94×2.94mm
時間分解能	10,000Hz

Fig. 1 Wire mesh sensor

2.2 ボイド率

WMS で計測された電極間の電気抵抗は電圧信号として AD 変換器を通してメモリーに取得され、得られたデータからボイド率を計算する。

計測点以外のスキャンされない電極は電圧が印加されていないのでポテンシャルがゼロであるため、計測点の周りに $2.02 \times 6.06 \times 1.5 \text{ mm}$ の測定体積が作られる。すなわち気相分布 $\Phi^e(x_1, x_2, x_3, t_w)$ と計測点周りの測定体積 $(x_1 \times x_2 \times x_3)$ を用いて瞬時ボイド率 $\varepsilon(t_w)$ は次のように表される。

$$\varepsilon(t_w) = \frac{\int_{x_1=0}^{x_{w1}} \int_{x_2=-\frac{x_{w2}}{2}}^{\frac{x_{w2}}{2}} \int_{x_3=-\frac{x_{w3}}{2}}^{\frac{x_{w3}}{2}} \Phi^e(x_1, x_2, x_3, t_w) dx_1 dx_2 dx_3}{x_{w1} \cdot x_{w2} \cdot x_{w3}} \quad (1)$$

測定された電圧から局所瞬時ボイド率 $\varepsilon(t)$ への変換は流路内が全て気相で満たされた場合に得られる電圧 (U^A : ボイド率 100%) と流路内が全て液相で満たされた場合に得られる電圧 (U^W : ボイド率 0%) と比較して、1 次近似で次のように表せる 4)。

$$\varepsilon(t)_{x_1, x_2} = 1 - \frac{(U(t)_{x_1, x_2})}{(U(t)_{x_1, x_2}^W)} \frac{(U(t)_{x_1, x_2}^A)}{(U(t)_{x_1, x_2}^A)} \quad (2)$$

2.3 気泡上昇速度

局所気泡上昇速度 U_{GG} は、ボイド率の立ち上がり信号 $\phi_{pos}^{u_{pos}}$ の上下電極平面間での遅れ時間解析から求めている 2)。本実験で用いた WMS はレーザ電極平面が 2 平面あるので、2 平面を通過する気泡からのボイド率信号より気泡上昇速度が計測できる。すなわち、ある時刻 t において上流側計測平面でボイド率信号が検出されると、ある時間遅れ Δt をもって下流側計測平面で同様なボイド率信号が検出される。この遅れ時間 Δt 、平面間距離 s を用い、気泡上昇速度は以下のように示すことができる。

$$\Delta t : \Phi_{pos}^u(\vec{r}, t) \cap \Phi_{pos}^u(\vec{r} + \vec{s}, t + \Delta t) \quad (3)$$

2.4 気泡体積

以上のようにして得られた局所瞬時ボイド率と気泡上昇速度から気泡体積を計算する。ある計測点でのボイド率変化とその上下左右前後の 6 計測点それぞれでのボイド率変化が同じ履歴を示す場合、その計測体積を互いに同一の気泡が通過しているとする。一方、同じ履歴を示さない場合、それぞれ別の気泡であると考える 2)。これを個々の気泡に対して繰り返し計算することにより気泡体積を求めている。

この結果、得られた気泡体積は気泡が球形であると仮定すると、気泡径スペクトル f_B は確率密度関数を導入し、

$$f_B(d_{B, sph}) = \left[\frac{\partial P(d_{B, sph} < D_B)}{\partial d_{B, sph}} \right] \quad (4)$$

と表され、さらに、Eq. (4) を拡張することにより、次式が得られ、各気泡径の気泡のボイド率への影響をみることができる。

$$f_{B, \varepsilon}(d_{B, sph}) = \frac{\partial \varepsilon(D_B)}{\partial D_B} = \frac{6}{\pi D_B^3} \frac{\partial P(d_{B, sph} < D_B)}{\partial d_{B, sph}} \quad (5)$$

3. 実験

3.1 実験装置

本実験で用いたテスト流路を Fig. 2 に示す。実験装置は、水循環系、空気供給系、気泡発生装置、計測部 (WMS) から構成されている。流路は、直径 50mm、全長約 8m の鉛直アクリル鉛管流路で、上昇流において実験を行った。また、気相は、Fig. 3 に示すような気泡発生装置^[6]を用いて注入される。液相サブフローを調整することにより、気泡径を一定 (約 2mm) として実験を行った。

Fig. 2 Experimental apparatus

Fig. 3 Bubble generator

3.2 実験条件

実験条件を Tab. 2 に示す。WMS の空気注入孔からの位置は、流れが十分に発達していると考えられる流路最上部 (93D) に設置し、温度一定、大気圧下において実験を行った。気相見かけ速度 U_G 、液相見かけ速度 U_L を Tab. 2 に示すように変化した。

Tab. 2 Experimental conditions

Systematic pressure	atm	Atmosphere
Water temperature	C	20.1±2
Measuring position from the bubble generator	m.	4.7 (93D)
Sub-water velocity	mm/s	49.3±2.4
Superficial gas velocity	mm/s	5.2±0.03, 7.7±0.02, 10.2±0.05
Superficial water velocity	mm/s	203±8, 303±10, 401±15

4. 実験結果

4.1 ボイド率

Fig. 4 に時間平均ボイド率分布を時間・断面平均ボイド率で標準化したものを示す。WMT 法により得られる瞬時ボイド率分布を時間平均 (100sec×10000sample) することにより時間平均ボイド率分布を求めている。本実験では、すべての条件下でボイド率の壁面ピークが観察された。 U_G が低く、 U_L 高いほど、すなわちボイド率がより低いときボイド率の壁面ピークがより顕著になる。一方、 U_G が高く、 U_L が低いほど、すなわちボイド率がより高いときボイド率の壁面ピークは小さくなり、断面分布はで平坦化した。このとき、平均ボイド率は、0.59% ~ 2.14% であった。

Fig. 4 Normalized void fraction distribution

4.2 半径方向分布

WMT 法では Fig. 1b) に示すように、電極の交差領域で計測を行っている。そのため、 x - y 直交座標でデータが取得される。各パラメータの半径方向分布を調べるために以下のように円筒座標への変換を行った。

まず、流路断面を半径方向 2mm 間隔にリング状に分割し、それぞれの領域に存在するすべて計測点のデータをそこでの値とし、以下の面積加重係数 A_r を用いて補正を行った⁶⁾。

$$A_r = \frac{A_{mesh,i}}{A_{ring,i}} = \frac{n_i \Delta x \Delta y}{\pi \left[\left(\frac{r_i + r_{i+1}}{2} \right)^2 - \left(\frac{r_i + r_{i-1}}{2} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

つづいて Eq. (6) の A_r を用いて、ボイド率の半径方向分布を次式で定義した。

$$\bar{\epsilon}_r = A_r \left(\frac{1}{n} \sum_{\theta=0}^{2\pi} \epsilon_{r,\theta} \right) \quad (7)$$

Fig. 4 の流路断面ボイド率分布がほぼ断面で対称な分布であることから、上記の操作によって半径方向分布へ変換し、4.1 と同様に壁面ピークについて調べた。代表的な例として、 $U_G=5.2$ mm/s の時の結果を Fig. 5 に示す。この結果は従来の研究と良好に一致した¹⁾。

Fig. 5 Radial void fraction distribution

この円筒座標系への変換は中心部の領域ほど対象となる計測点が少なく、サンプル数が外周部に比べ少ない。そのため、中心部では外周部と異なり計測誤差が大きくなる。また、 $r/R=0$ のデータは存在しないため、 $r/R=2$ と同じ値を用いている。

4.3 気泡上昇速度

上記の 4.2 のデータ処理と同様に、以下の式により、気泡上昇速度の半径方向分布を求めることができる。

$$\overline{U_{gg,r}} = \frac{1}{n} \sum_{\theta=0}^{2\pi} \overline{U_{gg,r,\theta}} \quad (8)$$

Fig. 6 に気泡上昇速度 U_{GG} の半径方向分布を示す。例として、 $U_G=10.2$ mm/s の時の結果を示す。このデータもボイド率の半径方向分布のデータ同様、中心部で計測点が少なく、また壁面ピークのため中心部を通過する気泡数は外周部を通過する気泡数より極端に少なくなっており、計測誤差が大きくなる傾向がある。

Fig. 6 Radial true gas velocity distribution

また, Fig. 7a)のように, U_G , U_L によらずボイド率の半径方向分布が一致するとき, U_{GG} の半径方向分布も U_G , U_L によらず一致する。

b) Normalized true gas velocity

Fig. 7 Comparison of void fraction and true gas velocity

4.4 気泡体積

Fig. 8にEq. (6)で示される各気泡径の気泡群が及ぼすボイド率に対する影響を示す。Fig. 7a)は U_G 一定, b)は U_L 一定のときの気泡径分布のボイド率への寄与である。3.1で述べたように液相サブフローを調整することにより, 気泡注入部から注入される気泡は平均径約2mmで一定に保たれている。

Fig. 7a)より U_L が減少, b)より U_G が増加すると, より大きい気泡径がボイド率に影響を及ぼすことが分かる。いま注入される平均気泡径は一定であるので U_G の増加により気泡数が増加すると考えられる。それによる気泡同士が相互作用(衝突)する確率が増加し, 結果として気泡の合体が起こり, より大きい径の気泡が発生していると考えられる。一方, U_L が減少により液相乱流が減少, つまり気泡への液相の作用が減少し, それによる気泡の分裂が起こりにくくなる, もしくは気泡の合体が抑制されなくなると考えられる。しかし, 液相構造はWMT法では計測することが困難であるため, 液相の影響は不明である。

また, Fig. 7の結果とボイド率分布 (Fig. 4)を比較す

ると, より大きな気泡が存在する条件においてボイド率の壁面ピークは小さくなっていることが分かる。すなわち, 大気泡は流路中心付近を, 小気泡は壁面付近を上昇していると考えられる。

Fig. 8 Contribution to void fraction of bubble diameter

5. 結論

鉛直円管内気液二相流にWMT法を適用し, ボイド率, 気泡上昇速度および気泡体積(気泡径)を計測した。

本実験条件下において, ボイド率は従来の研究同様壁面近傍にピークを示し, ボイド率が低いほど顕著に見られ, ボイド率が高くなるほど平坦化した。

気泡径分布のボイド率寄与が計測された。 U_G が増加, U_L が減少すると, より大きい気泡径がボイド率に影響を及ぼすことが分かった。これは気泡の合体, 分裂の影響であると考えられる。

参考文献

- 1) Serizawa, A. et al, Transient Phenomena in Multiphase Flow, Hemisphere, Washington, DC, 1988, pp. 179-224.
- 2) Richter, S. et al., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2002, 45, pp.1063-1075.
- 3) Motegi, Y. et al., NTHAS3, Kyeongju, Korea, 2002, pp.244-248.
- 4) Prasser H.-M. et al., *Flow Measurement and Instrumentation*, 1998, 9, 111-119.
- 5) Serizawa, A. et al., Proceedings, The Int. Conf. Multiphase Flows '91, 1991, Tsukuba, Japan, pp. 547-550
- 6) Wanjiraniran, W. et al., ICONE11, Tokyo, Japan, 2003, ICONE11-36075