細管内気液二相流のボイド率特性*

植田 忠伸^{*1}, 竹中 信幸^{*2}, 浅野 等^{*3}
杉本 勝美^{*3}, 川端 祐司^{*4}, C. M. SIM^{*5}Void Fraction Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow
in a Small Diameter TubeTadanobu UEDA^{*6}, Nobuyuki TAKENAKA, Hitoshi ASANO,
Katsumi SUGIMOTO, Yuji KAWABATA and C. M. SIM^{*6} Department of Mechanical and Systems Engineering, Kobe University,
1-1 Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo, 657-8501 Japan

Void fraction of nitrogen gas-water two-phase flow in a circular tube from 1 to 10 mm in diameter was measured by neutron radiography. The measured void fraction results were compared with Ishii's drift flux model based on Mishima-Ishii's flow regime criteria. The void fraction was predicted well in annular flow region except for $\alpha < 0.8$. Mishima-Ishii flow regime map was modified by a churn to annular flow transition criterion of $\alpha = 0.8$. The void fraction was predicted well by Ishii's drift flux model in annular flow region in every diameter tubes.

Key Words: Multi-Phase Flow, Heat Exchanger, Void Fraction, Drift Flux Model, Small Diameter Tube, Flow Regime

1. 緒 言

熱交換器などの流路には、伝熱面積の向上、小型化などの目的で、内径の細い流路を用いることが多い。この細管内での気液二相流の流動は、従来用いられてきた径の太い管とは異なり、内径が小さくなると表面張力の影響が顕著となる。また、管径が5mm以下になると静止水中の単一気泡の上昇速度が零になることが知られている⁽¹⁾。

Bamea ら⁽²⁾は、内径が4~12.3mmの水平・垂直のガラス管について実験を行い、流動様式線図を得ている。Mishima と Hibiki⁽³⁾は、管内径が1~4mmのアルミニウム製円管について管内径の影響を調べ、全体積流速が20m/s以下の条件で細管におけるドリフトフラックスモデル相関式を得ている。細管内の気液二相挙動に関する研究は、流動様式、圧力損失などの基礎データについて行われてきたが、ボイド率予測についての知見は少ない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

新型軽水炉の燃料集合体として検討されている稠密ロッドバンドルは、サブチャンネルの水力等価直径が数mm程度と小さく、従来のバンドルの安全設計に使用されてきたボイド率予測式が適用できるか検討する必要がある。

本研究では、中性子ラジオグラフィを用いて、内径1~10mmの円管内垂直上昇窒素ガス-水気液二相流の断面平均ボイド率を計測し、Mishima-Ishiiの流動様式線図から推定される環状流領域のボイド率がIshiiのドリフトフラックスモデルではよく予測できない領域が存在するという結果が得られ、予測法を検討したので報告する。

2. 記 号

A	: 管断面積 [m ²]
C_0	: 分布パラメータ
D	: 内径
V_{Gj}	: ドリフト速度 [m/s]
j	: 全体積流速 [m/s]
g	: 重力加速度 [m/s ²]
u	: 流速 [m/s]
α	: 断面平均ボイド率
δ	: 1画素の幅 [m]
μ	: 粘性係数 [Pa·s]
μ_m	: 質量減衰係数 [cm ² /g]

* 原稿受付 2007年7月20日。

^{*1} 正員, 神戸大学大学院自然科学研究科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)。^{*2} 正員, フェロー, 神戸大学大学院工学研究科。^{*3} 正員, 神戸大学大学院工学研究科。^{*4} 京都大学原子炉実験所(〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2)。^{*5} Korea Atomic Energy Research Institute (P. O. Box 105, Yuseong, Daejeon, 305-600 Korea)。

E-mail: tadanobu_ueda@stu.kobe-u.ac.jp

- ρ : 密度 [kg/m³]
 σ : 水の表面張力 [Pa]
 添字
 G : 気相
 L : 液相

3. 実験装置および方法

3・1 実験装置 図1に本実験で使用した実験装置及びその配置を示す。作動流体は、常温、大気圧の窒素と水を用い、主にスラグ流、チャーン流、環状流領域で実験を行った。試験部は、1, 2mm についてはステンレス製、3, 5, 6, 8, 10mm についてはアルミニウム製の垂直円管を用いた。試験部は、助走区間 100D mm, ボイド率測定部 100mm, 測定部下流から出口までの距離を 200mm とした。ギアポンプにより水を供給し、気液混合部内で N₂ タンクより供給された窒素と混合させた。気液混合部は、1, 2mm 管については T 字管、3mm 以上の管については多孔質樹脂を用いた混合部により、窒素と水を混合させた。ボイド率の測定は、中性子ラジオグラフィによって行った。

Fig. 1 Experimental apparatus

熱中性子ラジオグラフィ設備として、京都大学原子炉実験所(KURRI) B4 ポートおよび、韓国原子力研究所(KAERI) NR ポートを用い実験を行った。試験部に中性子線を照射し、二相流によって減衰した中性子線を蛍光コンバータで可視光に変換し、カメラボックス内で鏡により光軸を曲げ、CCD カメラによって撮影した。カメラボックス内で光軸を曲げる理由は、中性子ビームから距離をとることでカメラ素子の放射線による損傷を防ぎ、 γ 線ノイズを低減させるため

である。撮影は KURRI では、画素数 772×580, 露光時間 10 秒, KAERI では、画素数 1340×1300, 露光時間 15 秒で冷却型 CCD カメラを用い撮影した。試験部を通過した気液二相流は、試験部上部の分離部で気水分離され、窒素は大気開放、水はポンプに戻し循環させた。ガス流量と液流量は、体積流量計を用い測定を行った。各流体温度は、気液混合部手前に設置した K 型シース熱電対により測定した。実験は、 $j_G=0.1\sim43\text{m/s}$, $j_L=0.03\sim2.2\text{m/s}$ の範囲で行った。

3・2 中性子ラジオグラフィとボイド率算出法

中性子ラジオグラフィは、中性子線の透過率の差異を利用した可視化計測法であり、中性子線が大抵の金属を透過し、水素や特定の元素で減衰する特性を有する。水で大きく減衰するため、金属管内の二相流流動現象の可視化計測に適しており、プレート熱交換器^⑧や沸騰流^⑨、エンジンのインジェクションノズル内キャビテーション^⑩の可視化計測などに用いられている。

断面平均ボイド率 α は、撮影された二相流の画像 S_m 、水の存在しない画像 S_l と各々のオフセット O_l , O_i から求められる⁽¹⁰⁾。

$$\alpha = 1 + \frac{\delta}{\mu_{ml} A} \sum_n \ln \left(\frac{S_g(x, y) - O(x, y)}{S_l(x, y) - O_l(x, y)} \right) \quad (1)$$

ここで、 δ は 1 画素の幅、 μ_{ml} は水の質量減衰係数、 A は管断面積である。中性子ラジオグラフィによってボイド率を定量的に計測するために、B₄C 製の中性子吸収体グリッドを用いた真影法⁽¹⁰⁾により、オフセットを計測した。オフセットは、物体での中性子の散乱やカメラボックス内での光の散乱、カメラの暗電流などによるものである。著者らは内径 10mm のボイド率測定に対する不確かさ解析を行っており⁽¹¹⁾、今回のボイド率計測の条件では、チャーン流、環状流では数%以下、スラグ流では 20% 程度の不確かさが予想される。

4. 実験結果および考察

計測したボイド率は、Ishii⁽¹²⁾によるドリフトフラックスモデルならびに Mishima と Hibiki⁽⁹⁾による細管についてのドリフトフラックスモデルと比較した。流動様式の判別は Mishima と Ishii による流動様式線図⁽¹³⁾を用いた。

Mishima と Ishii による流動様式判別式⁽¹³⁾は、気泡流からスラグ流に対して、

$$\alpha = 0.3 \quad (2)$$

スラグ流からチャーン流に対し、

$$\alpha = 1 - 0.813 \left[\frac{(C_0 - 1)j + 0.35 \sqrt{\Delta \rho g D / \rho_L}}{j + 0.75 (\Delta \rho g D / \rho_L)^{1/2} \left[\Delta \rho g D^3 / (\rho_L \nu_L^2) \right]^{1/8}} \right]^{0.75} \quad (3)$$

チャーン流から環状流に対しては、

$$D < \frac{\sqrt{\sigma / \Delta \rho g} \left\{ \mu_L / \left[\rho_L \sigma \sqrt{\sigma / (g \Delta \rho)} \right]^{1/2} \right\}^{-0.4}}{(1/C_0 - 0.11)^2} \cong 50 \text{ mm} \quad (4)$$

であるので、小口径管用の半開式

$$j_G = \sqrt{\frac{\Delta \rho g D}{\rho_G}} (\alpha - 0.11) \quad (5)$$

を用いた。

ドリフトフラックスモデルより、体積流束と平均ドリフト速度との関係は次式で表され、分布パラメータとドリフト速度の値は、流動様式に応じて変化する⁽²⁾。

$$u_G = \frac{j_G}{\alpha} = C_0 j + V_{Gj} \quad (6)$$

Ishii による円管の相関式はそれぞれ次式で与えられる。

気泡流：

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}, \quad V_{Gj} = (1 - \alpha)^{1.5} \sqrt{2 \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right\}}^{1/4} \quad (7)$$

スラグ流：

$$C_0 = 1.2, \quad V_{Gj} = 0.35 \left\{ \frac{g D (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

チャーン流：

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}, \quad V_{Gj} = \sqrt{2 \left\{ \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right\}}^{1/4} \quad (9)$$

環状流：

$$C_0 = 1.0, \quad V_{Gj} = 23 \left\{ \frac{\mu_L j_L}{\rho_G D} \right\}^{1/2} \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L} \quad (10)$$

Mishima と Hibiki⁽³⁾は、細管での静止水中の気泡の上昇速度が零になることから、ドリフト速度を零とおき、次式を得ている。

$$u_G = \frac{j_G}{\alpha} = C_0 j, \quad C_0 = 1.2 + 0.510 e^{-0.691 D} \quad (11)$$

ここで、管内径 D の単位は mm である。

図 2 に計測したボイド率 α_{exp} と Mishima と Hibiki の細管のドリフトフラックスモデル、Ishii のドリフトフラックスモデルによる予測値 α_{cal} との比較を示す。Mishima と Hibiki によるモデルのボイド率予測を中実記号、Ishii によるモデルの予測を中空記号で示す。スラグ流、チャーン流領域ではどちらのモデルも実験値の不確かさによる誤差の範囲にある。管径が 3mm 以上では、予測値と実験値は 20% の範囲内で一致しているが、環状流においては、管径 1, 2mm と同様に特異な傾向を示す。Mishima と Hibiki のモデルでは環状流の高ボイド域で実験値がモデルよりも高くなり一致しないが、Mishima と Hibiki はモデルの有効な範囲を全体積流束 20m/s までと定義しているので妥当な結果だといえ、予測値はどの管径においてもボイド率が約 0.8 を境に実験値から外れる傾向を示す。一方、Ishii のモデルでは、環状流領域でどの管径においても高ボイド率でよく一致し、低ボイド率では、実験値よりもモデルのほうが低くなっている。この傾向は管径が小さくなるにつれ、より顕著に現れ、いずれの管径でも環状流領域の $\alpha < 0.8$ の条件では、Ishii のモデルは、実験値と一致しない。

Jones と Zuber⁽¹⁴⁾は、水力等価直径が約 9mm の矩形管について気液二相流実験を行い、スラグ流から環状流への遷移がボイド率約 0.8 で起こることを報告している。Barnea ら⁽²⁾は、Mishima と Ishii の流動様式線図のチャーン流の領域よりもガス流速の高い領域でチャーン流を観察している。

実験結果より、チャーン流から環状流への遷移が $\alpha = 0.8$ で起こると仮定し、Ishii の環状流のドリフトフラックスモデル、式(6)、(10)に $\alpha = 0.8$ を代入して、流動様式の境界線を加えた。修正した流動様式線図を図 3 に示す。 $\alpha = 0.8$ により設定した領域は、管径の減少と

Fig.2 Prediction of the void fraction by Ishii and Mishima-Hibiki drift flux model

Fig.3 Modified Mishima-Ishii's flow regime map

Fig.4 Prediction of the void fraction by Ishii's drift flux model based on the modified flow regime transition

ともに拡大していることがわかる。この領域は、管径の増加とともに縮小し、管内径が約 60mm で消滅する。

図 4 に実験値と修正した流動様式線図に基づく Ishii によるボイド率予測値との比較を示す。Mishima と Ishii の流動様式線図における環状流の $\alpha < 0.8$ でのボイド率予測値が最大で約 65% 修正され、すべての管径において約 $\pm 10\%$ 以内で予測が行えた。管径 1mm での修正領域におけるボイド率予測値に対する実験値の平均二乗誤差は、修正前は約 87%、修正後は約 4% であり、予測精度は大幅に改善されていることが解る。

管径 10mm では、 $\alpha = 0.8$ を環状流への遷移境界とし設定したチャーン流の領域を Ishii の環状流モデルで予測しても実験値との差異は小さいことから、10mm より大きな管径では、ほとんど差がない事が予想され、従来の研究では、この領域が見落とされていたものと考えられる。

5. 結 論

管内径 1~10mm の円管について、中性子ラジオグラフィにより、垂直上昇空素ガス-水気液二相流のボイド率を計測し、以下の結論を得た。

- (1) 計測したボイド率は、Mishima と Ishii の流動様式線図の環状流領域で、 $\alpha > 0.8$ のときは Ishii のモデルと良く一致したが、 $\alpha < 0.8$ では一致しなかった。
- (2) Mishima と Hibiki のモデルは、スラグ流、チャーン流では実験値と一致したが、環状流の $\alpha > 0.8$ では一致しなかった。

- (3) チャーン流から環状流の遷移が $\alpha = 0.8$ で起こると仮定し、Mishima と Ishii の流動様式線図にチャーン流から環状流の遷移線を加えて流動様式を決定すると、1mm から 10mm までの全ての管径で Ishii のドリフトフラックスモデルによりボイド率が良好に予測できることを示した。

文 献

- (1) Gibson, A.H., *Philos. Mag.*, **26** (1913), 952-965.
- (2) Barnea, D., et al., *Can. J. Chem. Eng.*, **61** (1983), 617.
- (3) Mishima, K., and Hibiki, T., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. **22**, (1996), 703-712.
- (4) Kariyasaki, A., et al., *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. **58**, No. 553 (1992), 2684-2690.
- (5) Ide, H., et al., *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. **63**, No. 606 (1997), 452-460.
- (6) Asano, H., et al., *Applied Radiation and Isotopes*, **61**, (2004), 707-713.
- (7) Kureta, N., et al., *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. **67**, No. 653 (2001), 179-188.
- (8) Kureta, N., et al., *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. **67**, No. 661 (2001), 145-153.
- (9) Takenaka, N., et al., *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A* **542**, (2005), 129-133.
- (10) Takenaka, N., et al., *Nondestruct. Test. Eval.*, **16**(2-6), (2000), 345-354.
- (11) Takenaka, N., et al., *Key Engineering Materials*, (2004), Vols. 270-273, 1356-1360.
- (12) Ishii, M., *ANL-Report*, (1977), ANL-77-47.
- (13) Mishima, K., and Ishii, M., *ANL-Report*, (1983), ANL-83-42.
- (14) Jones, O.C., and Zuber, N., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. **2**, (1975), 273-306.