水平円柱下流の気液界面積濃度分布の遷移

石川 温士^{*1}, 吉田 憲司^{*2}, 片岡 勲^{*3}

Transition of interfacial area concentration distribution of air-water two-phase flow downstream of single horizontal tube and horizontal tube bundle

Atsushi ISHIKAWA^{*1}, Kenji YOSHIDA^{*2} and Isao KATAOKA^{*3}^{*1} Heat and Fluid Dynamics Department, Research Laboratory, IHI Corporation

1 Shin-Nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8501, Japan

^{*2,3} Department of Mechanical Engineering, Osaka University

2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

Received 9 November 2015

Abstract

Measurements of the interfacial area concentration and the void fraction in a vertical upward air-water two-phase flow downward of single horizontal tube and horizontal tube bundle were carried out by a double sensor electrical conductivity probe. The test section comprised a 50mm × 50mm square channel partially obstructed by the single horizontal tube and the horizontal tube bundle inside. Five types of the test sections which the horizontal tube arrangement is different were used to provide various distributions of air-water two-phase flow downstream of the test section. The superficial gas velocity and superficial liquid velocity ranged from 0.02 to 0.20 m/s and from 0.13 to 0.53 m/s, respectively. Local flow measurements were performed at the three axial locations of $z(z') = 110$ (70), 340 (300), and 640 (600) mm and the transverse locations from $r = 3$ to 25 mm. The single horizontal tube and the horizontal tube bundle effect the distributions of the interfacial area concentration and the void fraction at $z(z') = 110$ (70). This effect was decreased along the flow direction due to the diffusion of bubble toward horizontal direction. At high gas flow rate conditions, void fraction increase, while interfacial area concentration decrease with increasing gas flow rate because of the bubble coalescence.

Key words : Two-phase flow, Interfacial area concentration, Void fraction, Bubbly flow, Wall peak distribution, Core peak distribution, Horizontal tube, Horizontal tube bundle

1. 緒 言

気液二相流に関して、ボイド率輸送モデル、気液界面積濃度輸送モデル等の解析モデルの開発はボイラや原子力発電所の蒸気発生器、化学プラントなどの多くのエネルギー機器の性能向上や安全性向上に必要不可欠である。気液二相流の実用的なシミュレーションモデルとしては、均質流モデル、スリップ流モデル、ドリフトフラックスモデル、二流体モデルなどが提案されている。中でも二流体モデルは、気相と液相それぞれについて、質量、運動量、エネルギーの輸送方程式を解くことから、より正確に流動を予測できるモデルと言われている。また、それぞれの輸送方程式において気相と液相の質量、運動量、エネルギーの交換量を表す、界面輸送項を導入することで予測精度をさらに向上させることができる(Kataoka et al., 1986)。界面輸送項は、気液二相流単位体積あたりの気相と液相の界面面積を意味する気液界面積濃度(単位: 1/m)に比例する形で表されることから、気液界面積濃度の予測精度向上が二流体モデルによる数値解析の信頼性を高める上で重要になる。

従来の二流体モデルでは、気泡や液滴などの分散相の界面の幾何形状から導出した構成方程式を用いて、気液

No.15-00608 [DOI:10.1299/transjsme.15-00608], J-STAGE Advance Publication date : 3 March, 2016

^{*1} 正員, (株)IHI (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1)

^{*2} 正員, 大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

^{*3} 正員, フェロー, 大阪大学大学院 工学研究科 (現 福井工業大学工学部)

E-mail of corresponding author: atsushi_ishikawa@ihi.co.jp

界面積濃度を求めていた。しかしながら、この場合には気泡や液滴の径を与える必要があった。

近年、二流体モデルの予測精度の向上を目的として、気液界面積濃度の輸送方程式を構築する試みに関する報告が数多くなされている(Graf and Papadimitriou, 2004, Graf and Papadimitriou, 2007, Hibiki and Ishii, 2000a, 2000b, 2002, Hibiki et al., 2003, Kataoka et al., 2012, Kataoka et al., 2013, Kocamustafaogullari and Ishii, 1995, Lee et al., 2013, Lin and Hibiki, 2014, Morel et al., 1999, Morel, 2007)。また、多くの研究者によって開発されている気液界面積濃度の輸送方程式についての評価、レビュー等もなされている(Chuang and Hibiki, 2015, Kataoka, 2010, 玉井, 富山, 2002, 三島, 中村, 2001)。気液界面積濃度の輸送方程式を構築するにあたっては、実際の現象のモデル化とともに、様々な条件での気液界面積濃度の詳細な実験データが必要となる。そのため様々な流路形状流動条件での気液界面積濃度の実験ならびに解析が行われてきた(Dowlati et al., 1980, Haquet and Gouirand, 1995, Kondo and Nakajima, 1980, McNeil et al., 2012, Paranjape et al., 2010, Serizawa et al., 1975, Ulbrich and Mewes, 1994)。著者らもこれまでに乱流モデル、ボイド率輸送モデル、気液界面積濃度輸送モデルの開発を行ない、垂直円管内の発達した空気 - 水系の気泡流における実験結果に適用し、実験結果を良好に予測できることを示した(石川他, 2015, Kataoka et al., 2012)。こうしたモデルの適用範囲を拡大し様々な幾何学的形状の流路における気液二相流に適用するためには、より広範な実験条件ならびに境界条件についての詳細かつ十分な情報を有する実験データを用いて比較検証する必要がある。本研究では、矩形管を用いた水 - 空気系の気液二相流の実験装置により、単一ならびに複数の水平円柱の下流の流れ方向に発達する気液二相流のボイド率ならびに気液界面積濃度の水平方向分布を、幾何学的条件や入口条件をパラメータとして変更して計測した結果について報告する。様々な幾何学的配置の単一ならびに複数の水平円柱を通過した気液二相流のボイド率分布と気液界面積濃度分布は、極めて多様で複雑な分布形を示す。これを入口条件としてその下流の各位置での気液界面積濃度やボイド率分布を測定することにより、ボイド率の輸送モデルや気液界面積濃度の輸送モデルの検証を行うことが可能となると考えられる。なお、本稿で示す実験結果に関して気液界面積濃度輸送モデルを用いて予測した結果については別途報告する予定である。また、単一ならびに複数の水平円柱を通過した気液二相流のボイド率と気液界面積濃度の輸送挙動は加圧水型原子炉の蒸気発生器の気液二相流挙動を解析する上でも重要となる。勿論、水平円柱が存在する領域でのボイド率分布、気液界面積濃度分布の測定と解析も重要であるが、ここでのボイド率と気液界面積濃度分布の輸送のモデルはこれまで開発した円管内、矩形管内の輸送モデルとは大きく異なっており、これについても別途報告する予定である。

2. 実 験

常温、大気圧の空気 - 水を用いた垂直上昇気液二相流を形成し、流れ方向の任意の断面におけるボイド率および気液界面積濃度の水平方向分布を計測した。

2・1 実験装置

図1に実験装置の概要図を示す。濾過器を通して貯水タンクに貯められた水は、循環ポンプによって昇圧されて、流量計、気泡混入部を経由して供試体に供給される。一方、空気はドライヤー付コンプレッサーから加圧タンクに貯められた後、面積式流量計を経由して供試体上流の気泡混入部に供給される。流量範囲の異なる面積式流量計を2台用意し、空気流量に応じて切り替えて使用した。図2に気泡混入部の概要図を示す。気泡混入部は二重円管構造になっており、空気は気泡混入部の外周4箇所から空気チャンバ（二重円管の内壁と外壁の間）に供給され、内壁のオリフィス孔から水の流路に混入される。ここで形成された気液二相流が供試体を通過し、大気開放状態の気液分離器に流れ込み、重力によって分離される。空気供給圧は水頭圧に依存し、気泡混入部から気液分離器の液面までの高さや流路内のボイド率に応じて変化する。本実験において計測した流量計下流の空気圧力は0.36～0.46 MPaGであった。なお、本稿において空気流量は面積式流量計の位置と二相流計測位置において計測した圧力を用いて補正した値を示している。

図3に供試体の概要図を示す。気液二相流の流動を観察するために、供試体は透明アクリル製のものを製作した。流路は50 mm 角の正方形断面を有する。この流路に単一ならびに複数の水平円柱を配置して気液二相流を形成しその下流でのボイド率分布、気液界面積濃度分布を測定した。気液二相流が供試体に到達するまでに発達した気泡流を形成させるため、水平円柱の位置は気泡混入部から約2 m 下流とした。気相と液相の電気伝導率の差

異から気相と液相を検知する2針式ボイドセンサーとトラバース装置を用いて、様々な幾何学的配置の単一ならびに複数の水平円柱後流でのボイド率ならびに気液界面積濃度の水平方向分布を計測した。センサーの位置は、水平円柱の軸に対して鉛直方向に流路中心からの水平方向距離を r とし、水平円柱中心からの流れ方向距離を z とした。なお、水平円柱が複数ある供試体については、最上段の円柱中心からの流れ方向距離を z' とした。

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus used for the study of vertical upward air-water two-phase flow. The test section comprised a 50mm $\times$ 50mm square channel partially obstructed by the single horizontal tube and the horizontal tube bundle inside.

Fig. 2 Schematic diagram of the bubble generator. Bubbles were injected into the flow channel through the inner wall of the flow channel.

Fig. 3 Schematic diagram of test section with horizontal tube, horizontal tube bundle and void sensor probe. This probe can traverse in a horizontal direction from the center of the flow channel to the wall.

Fig. 4 Double sensor probe used to detect the difference of electrical conductivity between the gas-phase and liquid-phase.

ボイド率および気液界面積濃度は気液二相流の単位体積あたりの気相の体積および気液界面の面積として定義されることから、本来はある大きさの体積空間について計測される物理量である。本研究ではこれらを空間の一点において定義されるものに拡張した局所時間平均のボイド率および気液界面積濃度を計測した(Kataoka et al., 1984)。計測には、気相と液相の電気伝導率の差から気相と液相を検知する導電式ボイドセンサーを用いた。1本のプローブに2つのセンサー部（ワイヤー）を有する2針式ボイドセンサーをトラバース装置に装着し、水平円柱下流の任意断面におけるボイド率ならびに気液界面積濃度の半径方向分布を計測した。局所のボイド率を計測する手法としては、代表的なものとして導電式のほかに気相と液相の屈折率の違いを利用した光学式ボイドセンサーが挙げられる。また、2針式よりも気液二相流の流動に関する詳細な情報を得られるセンサーとして、光学式、導電式の両方とも4針式のもが開発されており、これらのセンサーを使用した研究実績が多数報告されている(Corre et al., 2003, Hervieu and Junqua, 2004, Mizuno and Saito, 2005, Shen et al., 2005, Zhang et al., 2014)。ただし、本研究では強制流動型の垂直上昇気液二相流を対象としており、気液界面は2本のセンサー間を垂直に移動すると仮定することによって信号処理を簡素化できる点、ならびに比較的容易に堅牢なプローブを作成できる点から、2針式の導電式ボイドセンサーを使用した。図4に導電式2センサープローブの概要図を示す。直径0.2 mmのステンレス線を絶縁処理し、先端のみを露出したセンサーを、ステンレスの保護管に挿入したものである。水と空気の電気伝導率の違いを利用して、センサー先端が気相か液相かを識別する。二本のセンサー先端の位置について、流れ方向距離は5 mm程度とし、水平方向についてはテフロン被覆を接触させて、鞘管に挿入しており0.1～0.2 mm程度とした。局所時間平均のボイド率および気液界面積濃度を計測した。

局所の時間平均ボイド率は、任意の計測時間における気相の存在割合で定義され、式(1)のように計測時間中の気相時間から求めることができる。

$$\bar{\alpha} = \frac{T_G}{T} \quad (1)$$

ここで、 T_G ：気相の計測時間、 T ：全計測時間である。プローブ先端が水で満たされている場合、センサーと水が導通することで低い電圧を検出し、プローブ先端が空気に触れている場合には絶縁されて、高い電圧を検出する。サンプリング周波数は10 kHz、サンプリング時間は30秒として計測を行なった。

2 センサープローブでは、局所の時間平均気液界面積濃度は気液界面が垂直方向にのみ移動すると仮定し、以下の式を用いて算出した(Kataoka et al., 1984).

$$\overline{a_i} = 4 \frac{N}{T} \frac{1}{V_b} \quad (2)$$

ここで、 N : 気液界面のカウント数、 V_b : 気液界面速度である。 V_b は気液二相流の流れに沿った方向にずらしたセンサー間の距離と両センサーの界面を検知する時間差から求めた。

2・2 実験条件

実験は常温、大気圧、表 1 に示す流束（見かけ速度）条件でのボイド率および気液界面積濃度の分布を計測した。流れ方向の二相流計測位置として、供試体#1 については気泡混入部から約 2 m の位置に、水平円柱を有する供試体については水平円柱下流 z (供試体#4, #5 は z') = 110(70) mm, 340(300) mm, 640(600) mm とした。なお、水平円柱まわりのボイド率分布は L 字型のプローブを挿入できなかったため、計測していない。表 2 に本実験に使用した供試体の図およびそれぞれの供試体の水平円柱まわりの気液二相流の写真を示す。写真では水平円柱をハッチングしており、黒く見えるところが気液界面（気泡）である。

図 5 に、Taitel ら(1980)の垂直上昇円管内の流動様式線図に本実験条件をプロットした。供試体部で観察された気泡流（◆）と大気泡の観察されたスラグ流（◇）が Taitel らの線図とほぼ一致していることが分かる。

Table 1 Experimental condition.

Superficial gas velocity, j_G [m/s]	0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.15, 0.20
Superficial liquid velocity, j_L [m/s]	0.13, 0.27, 0.53

Table 2 Horizontal tube and horizontal tube bundle of the test sections and two-phase flow images around the tubes.

Test section #1 Bulk	Test section #2 Single 10mm	Test section #3 Single 20mm	Test section #4 In-line array 10mm	Test section #5 Staggered array 10mm

No image
$j_G = 0.04$ m/s $j_L = 0.53$ m/s	$j_G = 0.04$ m/s $j_L = 0.53$ m/s	$j_G = 0.04$ m/s $j_L = 0.53$ m/s	$j_G = 0.04$ m/s $j_L = 0.53$ m/s	$j_G = 0.04$ m/s $j_L = 0.53$ m/s

Fig. 5 Flow regime map of vertical upward air-water two-phase flow through a 50 mm round tube (Taitel et al., 1980). Included are the data observed under the conditions of the experiment, where bubbly flow was observed under the conditions denoted by the filled diamonds and large bubbles (churn or slug flow) was observed under the conditions denoted by the open diamonds.

2・3 ボイド率および気液界面積濃度の計測結果と考察

図 6 に、水平円柱のない供試体(Test section #1)でのボイド率分布および気液界面積濃度分布の結果を示す。図中には、各気相流束において液相流束を変化させた結果を示している。図の横軸は流路中央からボイドセンサー先端までの距離である。図から、気相流束が小さい条件では、ボイド率および気液界面積濃度が流路中央で比較的一様な分布を持つことを確認することができる。この傾向は、液相流束が大きい場合に強くなる。 $j_G = 0.02 \sim 0.04$ m/s, $j_L = 0.53$ m/s の条件では、図中の赤丸で示す部分において、ボイド率分布と気液界面積濃度分布ともに壁面近傍で若干のピークを示す結果が得られた。また、気相流束が大きい条件では、大きな気泡が流路中心部に集まるようになるため、ボイド率分布は流路中心部でピークを持つ結果となった。これらの結果から、円管を対象とした従来の研究により知られているボイド率分布や界面積濃度分布の傾向を確認することができた。すなわち、気相流束が少なく液相流束が大きい条件では、流路中央が平坦な分布になり、気相流束が増加すると流路中央に気泡が集まるコアピークの分布になっている。ボイド率と気液界面積濃度の分布を比較すると、気相流束と液相流束が共に大きい条件において、気液界面積濃度分布がボイド率分布よりも壁側に広がり勾配の緩やかな分布になる傾向が見られる。その理由を以下に示す。

- ① 液相流束が大きい場合、流路内の液相速度勾配によって気泡に壁面方向への揚力加わる。ただし、壁面に輸送される気泡は直径の比較的小さいものが多いことから、ボイド率分布にはそれほど影響しないが、気液界面積濃度分布には影響したと考えられる。
- ② 気相流束が大きい場合、流路中心部に生じた大きな気泡により、ボイド率は大きくなるが気液界面積濃度は気泡の合体により小さくなるためと考えられる。

水平円柱のある供試体(Test section #2 ~ 5)の上流におけるボイド率ならびに気液界面積濃度の分布は、図 6 に示した分布に近いものとなっている。また、図では i) $j_L = 0.13$ m/s, $j_G = 0.10$ m/s $\rightarrow$ $j_L = 0.13$ m/s, $j_G = 0.15$ m/s, ii) $j_L = 0.27$ m/s, $j_G = 0.15$ m/s $\rightarrow$ $j_L = 0.27$ m/s, $j_G = 0.20$ m/s の条件において、ボイド率は大きくなるが気液界面積濃度は小さくなっている。これは気泡の合体によって、気泡流からスラグ流に遷移したためであり、観察結果と一致する。

なお、本稿に示した計測データは、センサー先端位置調整の過誤により、流路中央の 3 mm 分が欠落している。正しいセンサー位置で再計測した値との比較結果を図 7 に示す。図から、ボイド率および気液界面積濃度の絶対値ならびに分布は、流路中心から正しく計測したデータと良好に一致することを確認した。

Fig. 6 Void fraction distributions and interfacial area concentration distributions of the test section of the flow channel without horizontal tube (test section #1). At the condition of $j_G = 0.02 \sim 0.04$ m/s and $j_L = 0.53$ m/s, both distributions are flat at the center of flow channel and are peak at the vicinity of the wall. At a high gas flow rate ($j_G = 0.20$ m/s), interfacial area concentration decreases with decreasing liquid flow rate due to the bubble coalescence.

Fig. 7 Comparison of the measurement results incorrectly positioned probe with them correctly positioned probe. Reproducible results were obtained in in these experiments.

図8に供試体#2の水平円柱まわりの気液二相流の写真を示す。流量条件によって水平円柱後流の流れが変化していることが分かる。特徴として、液相流束が小さいときには、水平円柱により分割された気泡がそのまま下流に流れている。一方、液相流束が大きい時には、水平円柱後流に生じる渦によって、水平円柱直後から流路中央に気泡が集中し、ボイド率が高くなっている様子が見て取れる。

Fig. 8 Images of the air-water two-phase flow through the 50 mm × 50 mm channel around the horizontal tube (20 mm diameter) of the test section for superficial gas and liquid velocities j_G and j_L , respectively. Bubbles tend to gather at the wake region of the horizontal tube at the condition of high liquid flow rate or high gas flow rate.

図9に、気相流束が小さい $j_G = 0.04$ m/s の水平円柱のある4種類の供試体(Test section #2 ~ 5)の水平円柱下流 $z(z') = 110$ (70), 340 (300), 640 (600) mm におけるボイド率分布の結果を示す。横軸に水平円柱が配置されている部分を赤線で示した。また供試体#5については、複数の水平円柱の中段の位置を赤破線で示した。各図は気相流束が比較的小さい $j_G = 0.04$ m/s において液相流束を変化させた結果を示している。水平円柱に最も近い $z(z') = 110$ (70) mm でのボイド率分布が、円柱の影響を受けていることが確認できる。供試体#2では、際立った影響が見られないものの、供試体#3では図8の写真 ($j_G = 0.04$ m/s) で示したように、液相流束が大きい条件において水平円柱後方に生じたウェイク流によって気泡が水平円柱後方に集まる。これにより、図中に実線の丸で示した水平円柱直上のボイド率が高くなっている。また、液相流束が小さい条件では、図中に破線の丸で示した水平円柱直上から逸れた部分でボイド率が大きな値となっている。このことから、単一の水平円柱では円柱の直径が太いほど、ボイド率分布に影響を及ぼしていると言える。

正方配列の水平円柱群を有する供試体#4では、供試体#3と同様の傾向を示している。すなわち、液相流束が大きい条件では気泡は水平円柱直上に集まり、液相流束が小さい条件では水平円柱直上から逸れた部分に気泡が集まるボイド率分布となっている。千鳥配列の水平円柱群を有する供試体#5においては、流路中央と壁側のボイド率が大きくなっているように見えるが、この傾向は供試体#3や#4に比べると弱い。これは、複数ある水平円柱の最上段と中段により生じる乱れによって、気泡の水平方向への拡散が促進されたためと考えられる。

全ての供試体について、 $z(z') = 110$ (70) mm において観察された水平円柱の影響は下流に進むにつれて弱まり、 $z(z') = 640$ (600) mm では4種類の供試体とも類似のボイド率分布になっている。流れ方向に沿って発達する水平方向のボイド率分布は、円管内の気液二相流に関する実験(石川他, 2015)においても観察されており、気泡が水平方向に拡散したためと考えられる。また、液相流束が大きく壁面に気泡が多く存在する条件では、壁面近傍において、気泡に働く揚力の効果により壁面近傍にピークを持つ分布となっている。 $z(z') = 640$ (600) mm のボイド率分布は水平円柱のない供試体のボイド率分布(図6)にも類似していることから、本試験においては $z/D_h = 12$ 程度で概ね発達した気液二相流が形成されたと考える。

Fig. 9 Transition of the distributions of the void fraction along the flow direction. At the position of $z = 110$ mm, peak of the void fraction distribution appears above the horizontal tube at $j_L = 0.53$ m/s due to wake flow of the tube. Whereas peak of the void fraction distribution appears in the area without horizontal tube at $j_L = 0.13$ m/s. It is because bubble was separated by the horizontal tube. Void fraction spreads across the flow channel along with the flow direction due to bubble diffusion.

図 10 には、図 9 と同じ条件での気液界面積濃度分布の結果を示す。ボイド率分布と同様に、水平円柱に近い $z(z') = 110(70)$ mm では、水平円柱の影響を受けて、液相流束の大きい条件では水平円柱の直上（図中、実線丸）において大きな値を示し、液相流束の小さい条件では水平円柱直上から逸れた部分（図中、破線丸）において凸部が生じる分布になっている。また、流れ方向に進むにつれて、気泡の拡散と壁面近傍の気泡に働く揚力の効果によって、水平方向の気液界面積濃度分布が発達していく様子もボイド率と同様の傾向を捉えられている。比較的小さい気泡が合体して、スラグ流やチャーン流において現れるような大気泡になると、ボイド率の増加に反して気液界面積濃度は減少する。図 10 では、液相流束を小さくしたことによるボイド率の増加にともなって、気液界面積濃度も増加していることから、全ての条件で気泡流が形成されていると考えられる。つまり、小さな気泡が合体せず、その量を増やしていることを意味し、これは可視化観察結果と一致する。下流の $z(z') = 640(600)$ mm では気泡の水平方向の拡散により発達した気液二相流が形成され、供試体#1 の結果(図 6)と類似の分布が得られた。

図 11 には、気相流束が比較的大きい $j_G = 0.10$ m/s におけるボイド率分布の計測結果を示している。この結果からも、図 9 の結果と同様に $z(z') = 110(70)$ mm において水平円柱の影響を大きく受けていることが分かる。また、供試体#2 と#3 では、全ての液相流束において流路中央でボイド率が高くなっており、図 8 の写真 ($j_G = 0.10$ m/s) で示されている傾向に一致する。供試体#4 および#5 では、図 9 と同様に液相流束が大きい場合に水平円柱の直上において、ボイド率分布のピークが現れている。なお、気相流束と液相流束が小さいときに生じていた水平円柱直上から逸れた部分の凸部は、液相流束の増加のみのならず気相流束の増加によっても生じなくなる結果となった。これは、気相流束の増加によって液相の速度が加速されることで、水平円柱後流の効果が強まったためと考えられる。図 12 には、図 11 と同じ条件での気液界面積濃度分布の結果を示す。図 10 と同じく、液相流束の増加によってボイド率および気液界面積濃度が低下しており、気泡流であることが分かる。ボイド率および気液界面積濃度とも気泡の水平方向への拡散と壁面近傍の気泡に働く揚力のバランスにより流れ方向に沿って発達していき、各供試体とも $z(z') = 640(600)$ mm において比較的類似の分布となっている。

Fig. 10 Transition of the distributions of the interfacial area concentration along the flow direction. Same as Fig. 9, interfacial area concentration distributions were influenced by the horizontal tube at the position of $z = 110$ mm. Interfacial area concentration spreads across the flow channel along with the flow direction due to bubble diffusion.

Fig. 11 Transition of the distributions of the void fraction along the flow direction at the condition of high gas flow rate ($j_G = 0.10$ m/s). Peak of the void fraction distribution appears above the horizontal tube at the high liquid flow rate condition, and it spreads across the flow channel along with the flow direction due to bubble diffusion.

Fig. 12 Transition of the distributions of the interfacial area concentration along the flow direction at the condition of high gas flow rate. Interfacial area concentration distribution was influenced by the horizontal tube and it spreads across the flow channel along with the flow direction due to bubble diffusion.

3. 結 言

気液界面積濃度の輸送方程式を構築するために必要となる水平円柱下流での様々な入口条件についての気液界面積濃度およびボイド率の計測を実施した。5種類の単一ならびに複数の水平円柱を用いて、気泡流からスラグ流への遷移領域における二相流計測を行なった結果、以下の結論が得られた。

水平円柱のない供試体を用いた実験結果から、矩形流路においても円管を対象とした従来の研究により知られているボイド率分布や界面積濃度分布の傾向を確認することができた。すなわち、気相流束が少なく液相流束が大きい条件 ($j_G = 0.02 \sim 0.04$ m/s, $j_L = 0.53$ m/s)では、流路中央において平坦な分布となり、気相流束が $j_G = 0.15 \sim 0.20$ m/s まで増加すると、全ての液相流束において気泡が流路中央に集まるコアピークの分布になっている。

水平円柱下流のボイド率分布および気液界面積濃度分布は水平円柱の影響を強く受ける結果が得られた。水平円柱まわりの気液二相流の流動観察からも、その影響は鮮明に捉えられた。特徴として、液相流束が小さい時 ($j_L = 0.13$ m/s)には、水平円柱によって流路壁面側に分割された気泡がそのまま下流に向かう一方、液相流束が $j_L = 0.53$ m/s まで増加すると、水平円柱の直上に気泡が集中し、ボイド率が高くなっている。これは水平円柱後流に生じる渦が影響しているものと考えられる。なお、この水平円柱の影響が $z = 640$ mm に向かって減衰していく傾向も確認された。これは、気泡が流れ方向に垂直な方向（水平方向）に拡散するためと考えられる。また、壁面近傍においては、気泡に働く揚力の効果によって、液相流束の大きな条件では壁面近傍にボイド率と気液界面積濃度のピークが生じる結果が得られた。流れ方向に沿って発展するボイド率および気液界面積濃度の半径方向分布は、気泡の拡散と揚力の効果のバランスによるものと考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、大阪大学大学院工学研究科の元学生、石山圭介氏、石川玄樹氏、幸野哲也氏、船越翔太氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

文 献

- Chuang, T. J. and Hibiki, T., Vertical upward two-phase flow CFD using interfacial area transport equation, *Progress in Nuclear Energy*, Vol.85(2015), pp.415-427.
- Corre, J. M., Hervieu, E., Ishii, M. and Delhaye, J. M., Benchmarking and improvements of measurement techniques for local-time-averaged two-phase flow parameters, *Experiments in Fluids*, Vol.35 (2003), pp.448-458.
- Graf, U. and Papadimitriou, P., Status of development and verification of the CTFD code FLUBOX, 6th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-6) (2004), Paper No. N6P103.
- Graf, U. and Papadimitriou, P., Simulation of two-phase flows in vertical tubes with the CTFD code FLUBOX, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.237, No.20-21 (2007), pp.2120-2125.
- Hervieu, E. and Junqua, A., Using and assessing four-sensor optical probe for interfacial area concentration measurement in stratified flow, *Proceedings of the 5th international conference on multiphase flow (ICMF'04)* (2004), Paper No. 487.
- Hibiki, T. and Ishii, M., One-group interfacial area transport of bubbly flows in vertical round tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.43, No.15 (2000a), pp.2711-2726.
- Hibiki, T. and Ishii, M., Two-group interfacial area transport equations at bubbly-to-slug flow transition, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.202, No.1 (2000b), pp.39-76.
- Hibiki, T. and Ishii, M., Development of one-group interfacial area transport equation in bubbly flow systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.45 (2002), pp.2351-2372.
- Hibiki, T., Mi, Y., Situ, R. and Ishii, M., Interfacial area transport of vertical upward bubbly two-phase flow in annulus, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.46, No.25 (2003), pp.4949-4962.
- Ishii, M. and Chawla, T. C., Local drag laws in dispersed two-phase flow, *Argonne National Laboratory Report, NUREG/CR-1230, ANL-79-105* (1979).
- 石川温士, 内藤正則, 吉田憲司, 片岡勲, 気泡流の界面積濃度輸送に関する実験と解析, *日本機械学会論文集*, Vol. 81, No. 831 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00303.
- Kataoka, I., Development of research on interfacial area transport, *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol.47, No.1 (2010), pp.1-19.
- Kataoka, I., Ishii, M. and Serizawa, A., Local formulation of interfacial area concentration and its measurements in two-phase flow, *Argonne National Laboratory Report, NUREG/CR-4029, ANL-84-68* (1984).
- Kataoka, I., Ishii, M. and Serizawa, A., Local formulation and measurements of interfacial area concentration in two-phase flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.12, No.4 (1986), pp.505-529.
- Kataoka, I., Yoshida, K., Naitoh, M., Okada, H. and Morii, T., Basic equations of interfacial area transport in gas-liquid two-phase flow, *The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14)* (2011), Log Number: 166.
- Kataoka, I. and Serizawa, A., Bubble dispersion coefficient and turbulent diffusivity in bubbly two-phase flow, *Turbulence Modification in Multiphase Flows, ASME FED-Vol. 110, Proceedings of the 1st ASME/JSME Joint Fluid Engineering Conference* (1991), pp.59-66.
- Kataoka, I. and Serizawa, A., Analyses of the radial distributions of averaged velocity and turbulent velocity of the liquid phase in bubbly two-phase flow, *JSME International Journal. Series B, Fluids and thermal engineering*, Vol. 36, No. 3(1993), pp.404-411.
- Kataoka, I., Yoshida, K., Naitoh, M., Okada, H. and Morii, T., Modeling of turbulent transport term of interfacial area concentration in gas-liquid two-phase flow, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.253 (2012), pp.322-330.
- Kataoka, I., Yoshida, K., Naitoh, M., Okada, H. and Morii, T., Derivation of the basic equations and simplified transport models of the interfacial area in gas-liquid two-phase flow, *Nuclear Technology*, Vol.181 (2013), pp.1-13.
- Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., Foundation of the interfacial area transport equation and its closure relations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.38, No.3 (1995), pp.481-493.

- Lee, D. Y., Liu, Y., Hibiki, T., Ishii, M. and Buchanan Jr., J. R., A study of adiabatic two-phase flows using the two-group interfacial area transport equations with a modified two-fluid model, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.57 (2013), pp.115-130.
- Lin, C. H. and Hibiki, T., Databases of interfacial area concentration in gas-liquid two-phase flow, *Progress in Nuclear Energy*, Vol.74 (2014), pp. 91-102.
- 三島嘉一郎, 中村秀夫, 界面面積輸送モデルに関する基礎研究 (I) (委託研究), *JAERI-Review 2001-012* (2001).
- Mizuno, Y. and Saito, T., Formulation of four-tip optical-fiber probe for accurate characterization of bubbles, *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS international conference on heat transfer, thermal engineering and environment* (2005), pp.135-140.
- Morel, C., Goreaud, N. and Delhay, J.M., The local volumetric interfacial area transport equation: derivation and physical significance, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.25, No.6-7 (1999), pp.1099-1128.
- Morel, C., On the surface equations in two-phase flows and reacting single-phase flows, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.33, No.10 (2007), pp.1045-1073.
- Paranjape, S., Ishii, M. and Hibiki, T., Modeling and measurement of interfacial area concentration in two-phase flow, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.240, No.9 (2010), pp. 2329-2337.
- Serizawa, A., Kataoka, I. and Michiyoshi, I., Turbulence structure of air-water bubbly flow – II. local properties, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 2, Issue 3 (1975), pp.235-246.
- Shen, X., Saito, Y., Mishima, K. and Nakamura, H., Methodological improvement of an intrusive four-sensor probe for the multi-dimensional two-phase flow measurement, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.31, Issue5 (2005), pp.593-617.
- Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A. E., Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes, *AIChE Journal*, Vol.26, Issue 3 (1980), pp. 345-354.
- 玉井秀定, 富山明男, 界面積濃度輸送方程式の未発達気泡・スラグ流への適用性に関する検討, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.68, No.669 (2002), pp1376-1383.
- Zhang, H., Sun, H., Yokomine, T. and Kunugi, T., Void fraction effect on bubble deformation of turbulent bubbly flow in a large square duct, *Thermal Science & Engineering*, Vol.22, No.4 (2014), pp.73-84.

References

- Chuang, T. J. and Hibiki, T., Vertical upward two-phase flow CFD using interfacial area transport equation, *Progress in Nuclear Energy*, Vol.85(2015), pp.415-427.
- Corre, J. M., Hervieu, E., Ishii, M. and Delhay, J. M., Benchmarking and improvements of measurement techniques for local-time-averaged two-phase flow parameters, *Experiments in Fluids*, Vol.35 (2003), pp.448-458.
- Graf, U. and Papadimitriou, P., Status of Development and verification of the CTFD code FLUBOX, 6th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-6) (2004), Paper No. N6P103.
- Graf, U. and Papadimitriou, P., Simulation of two-phase flows in vertical tubes with the CTFD code FLUBOX, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.237, No.20-21 (2007), pp.2120-2125.
- Hervieu, E. and Junqua, A., Using and assessing four-sensor optical probe for interfacial area concentration measurement in stratified flow, *Proceedings of the 5th international conference on multiphase flow (ICMF'04)* (2004), Paper No. 487.
- Hibiki, T. and Ishii, M., One-group interfacial area transport of bubbly flows in vertical round tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.43, No.15 (2000a), pp.2711-2726.
- Hibiki, T. and Ishii, M., Two-group interfacial area transport equations at bubbly-to-slug flow transition, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.202, No.1 (2000b), pp.39-76.
- Hibiki, T. and Ishii, M., Development of one-group interfacial area transport equation in bubbly flow systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.45 (2002), pp.2351-2372.

- Hibiki, T., Mi, Y., Situ, R. and Ishii, M., Interfacial area transport of vertical upward bubbly two-phase flow in annulus, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.46, No.25 (2003), pp.4949-4962.
- Ishii, M. and Chawla, T. C., Local drag laws in dispersed two-phase flow, Argonne National Laboratory Report, NUREG/CR-1230, ANL-79-105 (1979).
- Ishikawa, A., Naitoh, M., Yoshida, K. and Kataoka, I., Experimental study and numerical simulation of interfacial area transport of bubbly flow, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 81, No. 831 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00303.
- Kataoka, I., Development of research on interfacial area transport, *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol.47, No.1 (2010), pp.1-19.
- Kataoka, I., Ishii, M. and Serizawa, A., Local formulation of interfacial area concentration and its measurements in two-phase flow, Argonne National Laboratory Report, NUREG/CR-4029, ANL-84-68 (1984).
- Kataoka, I., Ishii, M. and Serizawa, A., Local formulation and measurements of interfacial area concentration in two-phase flow, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.12, No.4 (1986), pp.505-529.
- Kataoka, I., Yoshida, K., Naitoh, M., Okada, H. and Morii, T., Basic equations of interfacial area transport in gas-liquid two-phase flow, *The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14)* (2011), Log Number: 166.
- Kataoka, I. and Serizawa, A., Bubble dispersion coefficient and turbulent diffusivity in bubbly two-phase flow, *Turbulence Modification in Multiphase Flows*, ASME FED-Vol. 110, Proceedings of the 1st ASME/JSME Joint Fluid Engineering Conference (1991), pp.59-66.
- Kataoka, I. and Serizawa, A., Analyses of the radial distributions of averaged velocity and turbulent velocity of the liquid phase in bubbly two-phase flow, *JSME International Journal. Series B, Fluids and thermal engineering*, Vol. 36, No. 3(1993), pp.404-411.
- Kataoka, I., Yoshida, K., Naitoh, M., Okada, H. and Morii, T., Modeling of turbulent transport term of interfacial area concentration in gas-liquid two-phase flow, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.253 (2012), pp.322-330.
- Kataoka, I., Yoshida, K., Naitoh, M., Okada, H. and Morii, T., Derivation of the basic equations and simplified transport models of the interfacial area in gas-liquid two-phase flow, *Nuclear Technology*, Vol.181 (2013), pp.1-13.
- Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., Foundation of the interfacial area transport equation and its closure relations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.38, No.3 (1995), pp.481-493.
- Lee, D. Y., Liu, Y., Hibiki, T., Ishii, M. and Buchanan Jr., J. R., A study of adiabatic two-phase flows using the two-group interfacial area transport equations with a modified two-fluid model, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.57 (2013), pp.115-130.
- Lin, C. H. and Hibiki, T., Databases of interfacial area concentration in gas-liquid two-phase flow, *Progress in Nuclear Energy*, Vol.74 (2014), pp. 91-102.
- Mishima, K and Nakamura, H., Fundamental study on interfacial area transport model (I) (contract research), *JAERI-Review 2001-012* (2001) (in Japanese).
- Mizuno, Y. and Saito, T., Formulation of four-tip optical-fiber probe for accurate characterization of bubbles, *Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS international conference on heat transfer, thermal engineering and environment* (2005), pp.135-140.
- Morel, C., Goreaud, N. and Delhaye, J.M., The local volumetric interfacial area transport equation: derivation and physical significance, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.25, No.6-7 (1999), pp.1099-1128.
- Morel, C., On the surface equations in two-phase flows and reacting single-phase flows, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.33, No.10 (2007), pp.1045-1073.
- Paranjape, S., Ishii, M. and Hibiki, T., Modeling and measurement of interfacial area concentration in two-phase flow, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.240, No.9 (2010), pp. 2329-2337.
- Serizawa, A., Kataoka, I. and Michiyoshi, I., Turbulence structure of air-water bubbly flow – II. local properties, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 2, Issue 3 (1975), pp.235-246.

- Shen, X., Saito, Y., Mishima, K. and Nakamura, H., Methodological improvement of an intrusive four-sensor probe for the multi-dimensional two-phase flow measurement, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.31, Issue5 (2005), pp.593-617.
- Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A. E., Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes, *AIChE Journal*, Vol.26, Issue 3 (1980), pp. 345-354.
- Tamai, H. and Tomiyama, A., Examination on the applicability of interfacial area transport equation to the prediction of developing bubble flows, *Transactions of the JSME, Series B*, Vol.68, No.669 (2002), pp1376-1383 (in Japanese).
- Zhang, H., Sun, H., Yokomine, T. and Kunugi, T., Void fraction effect on bubble deformation of turbulent bubbly flow in a large square duct, *Thermal Science & Engineering*, Vol.22, No.4 (2014), pp.73-84.