急拡大を伴う鉛直円管内を上昇する気泡流のボイド率分布*

近藤 宏一^{*1}, 吉田 憲司^{*2}, 松本 忠義^{*2}
大川 富雄^{*2}, 片岡 勲^{*2}Void Fraction Distribution of Upward Bubbly Flow
in a Vertical Pipe with Sudden ExpansionKoichi KONDO^{*3}, Kenji YOSHIDA, Tadayoshi MATSUMOTO,
Tomio OKAWA and Isao KATAOKA^{*3} Department of Marine Engineering, Marine Technical College,
12-24 Nishikura-cho, Ashiya-shi, Hyogo, 659-0026 Japan

Experimental study was made on the multi-dimensional behavior of upward gas-liquid two-phase flow through a vertical pipe with an axisymmetric sudden expansion. In this study, the measurement on the void fraction distribution was carried out for the sudden expansion channel. The void fraction distributions below and above the sudden expansion point were measured at the different axial and radial positions using a point-electrode resistivity probe for various gas and liquid flow conditions. The results of measured void fraction distributions showed that how the two-phase flow develops along the direction of the downstream of the sudden expansion. Furthermore, the development of the void fraction distribution also revealed quite complicated behaviors depending upon flow rates of gas and liquid phases and bubble size. Based on the measured void fraction distribution in the sudden expansion, cross-sectional averaged void fraction and phase distribution parameter were evaluated at the different tube cross sections in the sudden expansion. As a result, it revealed that the void fraction along the flow direction in the sudden expansion might be predicted by using the appropriate distribution parameter representing the void fraction distributions in the sudden expansion.

Key Words: Bubbly Flow, Pipe Flow, Sudden Expansion, Void Fraction, Distribution Parameter

1. 緒 言

気液二相流動を詳細に解明することは、様々な沸騰伝熱機器における伝熱・流動特性を理解し、またその性能評価や安全解析、設計のための合理的なモデリングやシミュレーションを行う際に必要不可欠であり、極めて重要である。

従来の気液二相流解析では、主流方向の一次元解析に基づくものが多く行われてきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかしながら、一般に流路内における気液二相流では流速やボイド率等の諸値は多次元構造を有していることが明らかにされている⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾。また、実際の沸騰伝熱機器では曲がり管や複雑な断面を有する流路、あるいは断面積が変化する流路等の多次元形状をもつ流路が数多く存在する。このことから、より正確かつ一般的な二相流動を予測

するためには多次元流路における気液二相流の多次元的流動挙動や構造を詳細に解明することが必要である。筆者らは、実験室レベルの比較的簡単な体系下での多次元的流路における二相流動・構造の解明を目的として多次元現象の典型的な形態である急拡大を伴う鉛直円管内を上昇する非加熱空気-水系気液二相流を対象に研究を行っている。この急拡大流路は、はく離、再付着、循環などの多次元的な要素を持つ流れ場であり、原子炉内における燃料集合体から上部プレナムに至る沸騰二相流路がその代表的な実用例である。これまでに急拡大流路において引き起こされる特徴的な二相流動現象や急拡大部が及ぼす流動様式への影響などを実験的に明らかにしてきた⁽¹⁰⁾。

気液二相流の微細構造や多次元構造を決定する重要な特性としてボイド率分布が挙げられる。このボイド率分布に影響を及ぼす因子として、気相ならびに液相流速、管路形状、流れの過渡特性、ボイド発生条件あるいは混合方法、気泡サイズなどが挙げられる。これ

* 原稿受付 2004年6月23日。

^{*1} 正員、(独)海技大学校(〒659-0026 芦屋市西蔵町12-24)。^{*2} 正員、大阪大学大学院工学研究科(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)。

E-mail: kondou@mail.mtc.ac.jp

までも管軸方向および管断面方向におけるボイド率分布に関して実験的あるいは解析的な研究がいくつかなされ、ボイド率分布予測方法の確立に対しての実績が挙げられている。しかしながら、鉛直単円管内を上昇する気泡流のボイド率分布に関する知見は数多く見られるが、多次元的な流路に関してはいくつかの報告がなされている程度である^{(10)~(14)}。したがって、このような多次元的なボイド率分布データを明らかにすることは、気泡挙動メカニズムの解明のみならず、今後の多次元二相流解析へ適用できるとともに、数値解析のための有用な検証データとなり得ると考えられる。

本報では、多次元流路における気液二相流の多次元的な挙動を明らかにすることを目的に、急拡大を伴う鉛直円管内を上昇する非加熱空気-水系気泡流を対象として点電極式ボイドプローブを用いてボイド率分布の測定を実施した。急拡大流路におけるボイド率分布を様々な気液流束条件や気泡サイズにわたって詳細に明らかにし気液二相流の多次元挙動解析に関する実験データを提示するとともに、急拡大部上流域から下流域に至る管断面平均ボイド率分布の変化や一次元モデルの予測に対する可能性の検討を行った。

主 な 記 号

C_0	: 分布定数	[-]
D	: 管径	[mm]
d_b	: 気泡径	[mm]
j	: 体積流束	[m/s]
R	: 管半径	[mm]
r	: 管中心からの位置	[mm]
V_{Gj}	: ドリフト速度	[m/s]
Z	: 管軸方向位置	[mm]
α	: ボイド率	[-]
$\langle \alpha \rangle$	: 管断面平均ボイド率	[-]

$$\left(= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r \cdot \alpha dr \right)$$

添 字

G	: 気相
L	: 液相
20	: 20 mm 管
50	: 50 mm 管

2. 実験装置と実験方法

実験対象は、内径 20.0 mm の上流側の円管（以下、20 mm 管という）と内径 50.0 mm の下流側の円管（以下、50 mm 管という）を鉛直同軸に結合した急

Fig. 1 A point-electrode resistivity probe

Fig. 2 Data processing system

Fig. 3 Measuring section

拡大流路内⁽¹⁰⁾を鉛直上昇する大気圧条件下での空気-水系の気泡流である。

この急拡大流路におけるボイド率分布を点電極式プローブにより測定する。図 1 は本実験で使用した点電極式プローブの概略図であり、急拡大部における気泡の多次元挙動を考慮しボイド率測定にはストレート形、すなわち I 形プローブを使用した。プローブ先端の細線部には直径 0.2 mm のステンレス製ワイヤを使用し、

先端部を除いて外径 0.36 mm のテフロンチューブで被覆し外部との絶縁を施した。細線先端部は、先端面以外の部分で絶縁性を得るために、絶縁エナメル樹脂をコーティングした上で、さらに 200℃ の恒温槽内で焼結させた。この細線を直径 2.0 mm のステンレス製さや管に挿入しエポキシ系接着剤で固定している。このプローブにより検出されたボイド信号は図 2 に示す信号処理回路と AD コンバータを用いてパーソナルコンピュータで直接処理しボイド率を求める。また、急拡大部におけるボイド率の測定では図 3 の供試管を用いる。ボイドプローブはトラバース装置の装着により、マイクロメータを用いてプローブ先端を管半径方向の任意の位置に移動、固定することが可能である。また、急拡大部はプローブとの距離を 0~500 mm の範囲で移動させることができる構造となっている。本実験に際して、このボイド信号の S/N 比を向上させるため液相の比抵抗を低レベルで一定となるよう塩化カリウムを微量投入した。実験中この比抵抗を電気伝導度計により監視することで一定条件の下で実験が行われるよう配慮した。

ボイド率測定実験にあたり、管内圧の変化に起因する気相の下流方向における体積膨張を考慮する必要がある。本実験ではボイドプローブを挿入している正面位置から半導体圧力計 (PT) により液相の静圧を、この上部において熱電対 (TC) により液相の温度を測定することでボイド率測定部に対する気相流量の補正を行った。

一般に、点電極式プローブによるボイド率測定は上流形、すなわち L 形プローブが採用されていることが多いので、I 形プローブの妥当性を検討するために予備実験として 50 mm 管において I 形プローブと L 形プローブを用いたボイド率の測定を行った。図 4 はその結果の一例を示す。図の横軸は管中心軸からの無次元位置、縦軸はボイド率測定の結果である。図中の $Z=500$ mm は、急拡大部から 500 mm 下流位置を示す。

Fig. 4 Comparison of measuring data between I-probe and L-probe

I 形プローブの結果は丸印 (●), L 形プローブは三角印 (▲) で示している。これより、両プローブを使用して測定したボイド率測定結果に大きな違いが見られない。異なる条件においても同様に、I 形プローブと L 形プローブによる測定結果に大きな違いは見られなかった。よって、後述のボイド率分布の考察についてはこの結果を基に議論を進める。

実験条件として、流動観察実験で得られた急拡大を伴う円管流路に対する流動様式判定線図⁽⁴⁰⁾に基づき、急拡大部上流側の 20 mm 管における液相体積流速 j_{L20} を 0.265 から 5.31 m/s, 気相の体積流速 j_{G20} を約 0.05

Fig. 5 Void fraction distribution of fully-developed region

から 0.6 m/s の範囲で変化させた気泡流領域を対象とした。

3. 実験結果と考察

3.1 急拡大部上流領域および下流領域におけるボイド率分布 急拡大部におけるボイド率の測定に先立ち、まずは 20 mm 管および 50 mm 管それぞれの下流領域において管断面ボイド率分布の測定を行った。測定位置は、気泡発生器あるいは急拡大部から 1.0 m および 2.5 m 下流の位置とした。これは、いずれも管直径 D の 50 倍に相当し、二相流が十分発達した位置である（図中には $L/D=50$ で表す）。図 5 は 20 mm 管（左側）および 50 mm 管（右側）それぞれの結果を示す。従来の知見で得られている単円管に関する鉛直上昇分散気泡流の研究では、気液流速や気泡径が変化することで壁面近傍にピークを持つ鞍形分布や、管中心にピークを持つべき乗則分布などがボイド率分布として現れることが示されている⁽⁶⁾⁽⁹⁾。20 mm 管におけるボイド率測定結果では、低液流速条件では壁面に気泡が集中する鞍形分布が現れ、高液流速条件になるにつれて壁面のボイドピークが緩やかになり気泡が管

中心にも集まることで管断面に渡って気泡が存在する分布へと変化する。一方、50 mm 管における測定結果は、20 mm 管に比べて低い液流速となることから低液流速条件では管中心部に気泡が集まるべき乗則分布となり、高液流速条件では壁面付近に気泡が集まる傾向を示すボイド率分布となった。この 20 mm 管および 50 mm 管の十分発達した領域における気泡流のボイド率測定結果は、従来の傾向と同様であることが確認された⁽⁹⁾。

3.2 急拡大流路におけるボイド率分布 急拡大部における管断面ボイド率分布について管軸方向の測定位置を任意に変化させ、ボイド率の二次元分布を詳細に測定した。図 6 は一定の気相流速条件 ($j_{G20}=0.05$ m/s 程度) の下で液相流速を変化させた場合の急拡大流路内でのボイド率分布測定結果であり、急拡大部以降の代表的な管断面位置でそれぞれ表している。横軸は管中心軸からの無次元位置を示し、縦軸は管軸方向位置ならびにボイド率を示す。 $Z=0$ mm は急拡大部に相当する。 $Z=1$ mm における測定結果は、20 mm 管において測定されたボイド率分布と同様の分布であることが図 5 より確認できる。また、この 20 mm 管

Fig. 6 Void fraction distribution in the sudden expansion under the low gas flux condition

におけるボイド率分布がここでは境界条件となり、これらが急拡大部下流にいくにしたがい半径方向へ拡散しながら発達する様子が測定されている。これより、急拡大部から 200 mm 付近の下流位置においてボイド率分布がほぼ均一な分布を呈し、その後 50 mm 管の発達域へと移行していることがわかる。

低液流束条件では（図 6 (a) および (b)），前述のように急拡大部から 40 mm 位置以降の発達中の領域の壁面付近において高いボイド率の値が測定されていることがわかる。これは気泡がこの付近で形成される循環流領域で停滞する現象によるものである⁽¹⁰⁾。図 7 (a) にこの流れの様子を示す。急拡大部では液相せん断層と管壁との間に逆流領域を形成する。気泡は低液流束条件では急拡大部から管断面全体に分布するが、壁面付近の気泡には（①），逆流領域の影響で上流方向への力が働く。しかしながら、比較的大きなサイズの気泡であることによる浮力とのバランスで気泡は管壁面付近に停滞するようになり（②），その後下流方向へ放出されるようになる（③）。この結果、低液流束条件では前述のようなボイド率分布が測定されたものである。

一方、高液流束条件の結果では（図 6 (c) および (d)），急拡大部発達領域において気泡は半径方向へ拡散する挙動を示すと同時に循環流の影響により急拡大部付近まで逆流することが確認された（図 7 (b) 参照）。さらにこの流束条件では、急拡大部で形成される液相のせん断層により気泡の変形、分裂現象⁽¹⁰⁾が引き起こされるため気泡は必ずしも管壁面方向には移動せず、壁面付近で高いボイド率を示す傾向はないことがわかった。

なお、本急拡大流路における気泡流の範囲で気液流

Fig. 7 Bubble behaviors in the sudden expansion

量を様々に変化させた場合のボイド率分布測定データを付図 1 として添付する。基本的には図 5 と同様の傾向を示しているが、詳細は付図 1 を参照されたい。

3.3 管断面平均ボイド率分布 急拡大部における多次元的なボイド率分布の結果を基に、ここでは急拡大部における管断面平均ボイド率を算出する。図 8 にその結果を示す。縦軸は管断面平均ボイド率であり、横軸は管軸方向位置で $Z = 0$ が急拡大部に相当し、左側が 20 mm 管、右側が 50 mm 管の結果をそれぞれ示している。

(a) $j_{L20} = 0.531 \text{ m/s}$, $d_{b20} = 4-5 \text{ mm}$

(b) $j_{L20} = 1.062 \text{ m/s}$, $d_{b20} = 3-4 \text{ mm}$

(c) $j_{L20} = 2.12 \text{ m/s}$, $d_{b20} = 1-3 \text{ mm}$

(d) $j_{L20} = 3.19 \text{ m/s}$, $d_{b20} = 1-2 \text{ mm}$

Fig. 8 Cross-sectional averaged void fraction distribution in the sudden expansion.

Fig. 9 Relationship between $j_L + j_G$ and $j_G / \bar{\alpha}$

図 8 より, すべての流束条件に対して 20 mm 管から 50 mm 管に流路断面積が急拡大することから管断面平均ボイド率は急激に減少する。高液流束条件では (図 8 (c) および (d)) , 管断面平均ボイド率は急拡大部から下流領域へ移行するにつれて単調に増加する傾向を示している。

一方, 低流束条件では (図 8 (a) および (b)) , 急拡大部で減少した管断面平均ボイド率が急拡大流路の 100 mm 下流位置まで急激に増加しているものの, その後減少しながら一定値に達する傾向を示した。このことは前述の急拡大部付近で見られる壁面付近に気泡が停滞する挙動およびボイド率分布によって説明することが可能であり, 何らかの多次元的なモデリングが必要であろうことを示唆するものである。

3.4 急拡大部における分布定数 気液の体積流束とボイド率とを評価する一次元ドリフトフラックス相関式は次式で与えられる²⁾。

$$\frac{j_G}{\langle \alpha \rangle} = C_0(j_L + j_G) + V_{Gj} \quad (1)$$

式(1)において, 気相体積流束 j_G および液相体積流束 j_L , 分布定数 C_0 , ドリフト速度 V_{Gj} が適切に評価されれば管内の軸方向のボイド率分布を予測することが可能と考えられる。そこで, これまでの急拡大部における管断面平均ボイド率分布の結果から C_0 および V_{Gj} を算出することとする。

図 9 は, 急拡大流路における全体積流束と気相平均速度の関係を示し, グラフの傾きと切片として C_0 ならびに V_{Gj} を求めることができることから急拡大部から様々な管断面におけるそれぞれの値を評価した結果である。 C_0 については, この結果から急拡大部直後において 7.7 程度を示し, その後下流方向に沿って

Fig. 10 Correlation of distribution parameter in sudden expansion

徐々に減少しながら急拡大部下流の 2500 mm 位置では 0.69 に達する。この結果は, 急拡大部直後での管中央部に集中するボイド率分布が下流方向へ行くに従い, 下流域ではボイド率分布が変化していることに対応している。一方, V_{Gj} については, 図 9 より急拡大部下流域では 0.18 m/s の値を示し従来の知見と一致する結果が得られた²⁾。

図 9 により得られた結果より, 急拡大部以降の軸方向位置における管断面に対する C_0 の値の変化を図 10 に示す。本図より, C_0 は急拡大部からの距離の増加とともに指数関数的に減少し一定値に達している。この結果より得られた C_0 を概ね次式で近似し, 図 10 中に破線で併せて示す。

$$C_0 = 6.993 \left[\exp \left(-\frac{0.29z}{h} \right) \right] + 0.812 \quad (2)$$

$$h = \frac{D_{50} - D_{20}}{2} \quad (3)$$

ここで, h はステップ高さを表し, D_{20} は 20 mm 管内径, D_{50} は 50 mm 管内径である。

このように急拡大流路における詳細なボイド率分布が明らかにされることで多次元流路におけるボイド率分布データが提示されるとともに, 式(2)のような分布定数 C_0 の変化を構成モデルとして用いることで一次元モデルに多次元的な効果を組み込むことが可能となるものとする。

4. 結 言

本報では, 多次元流路の典型的な形態である急拡大を伴う鉛直円管内を上昇する非加熱空気-水系気泡流を対

Appendix 1 Void fraction distribution in the sudden expansion under various bubbly flow conditions

象として、この流路内の多次元的なボイド率分布を点電極式ボイドプローブにより測定し、以下のことを明らかにした。

1. 急拡大流路におけるボイド率分布を様々な気液流動条件や気泡サイズにわたって詳細に示し、上流域から下流域に至るボイド率分布の変化を明らかにすることで多次元的な検証データを示した。
2. 急拡大流路における上記のボイド率測定結果に基づき管断面平均ボイド率を算出し、急拡大流路における変化を明らかにした。
3. 急拡大流路におけるボイド率分布を一次元モデルにより評価するために、ドリフト相関式に基づいた分布定数の検討を行った。これにより急拡大流路における軸方向ボイド率分布を一次元解析において予測できる可能性を示した。

参 考 文 献

- (1) Wallis G. B., *One-dimensional two-phase flow*, (1969), McGraw-Hill.
- (2) Ishii, M., ANL-77-47, (1977).
- (3) Liels, D. R., Reed, W. H., *J. Computational Physics*, Vol.26, (1978), 390-407.
- (4) 秋元肇・阿部豊・大貫晃・村尾良夫, JAERI-M 91-086, (1991).
- (5) Serizawa, A. and Kataoka, I., In: Afgan, N. H. (Ed.), *Transient Phenomena in Multiphase Flow*, (1988), 179-224, Hemisphere.
- (6) Monji, H. and Matsui, G., *Proc. 1st Int. Conf. on Multiphase Flow*, Tsukuba, Japan, (1991), 449-452.
- (7) Liu, T. J., *Int. J. Multiphase Flow*, vol.19 (1), (1993), 99-113.
- (8) Zun, I., Kljenak, I., Moze, S., *Int. J. Multiphase Flow*, vol.19 (1), (1993), 151-172.
- (9) Hibiki, T., Ishii, M. and Xiao, Z., *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.44, (2001), 1869-1888.
- (10) 近藤宏一・吉田憲司・松本忠義・大川富雄・片岡勲, 機論, B, (投稿中: 論文 No. 04-0347)
- (11) 佐藤・佐田富・猿渡, 機論, B, 48-431, (1982), 1416-1419.
- (12) Lahey, R. T. Jr., Lopez de Bertodano, M., Jones, O.C., *Nucl. Eng. Des.*, vol.141, (1993), 177-201.
- (13) 賞雅寛而・近藤宏一, 機論, B, 61-587, (1995), 2372-2378.
- (14) Aloui, F., Doublier, L., Legrand, J. and Souhar, M., *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, vol.19 (2) (1999), 118.