気液混合法の気泡流相分布への影響*

文字 秀明^{*1}, 杉山 隆行^{*2}, 松井 剛一^{*1}

Effects of Mixing Methods on Phase Distribution in Vertical Bubble Flow

Hideaki MONJI, Takayuki SUGIYAMA and Goichi MATSUI

The mechanism of the phase distribution formation in a bubble flow is one of the most important problems in the control of two-phase flow systems. The effect of mixing methods on the phase distribution was experimentally investigated by using upward nitrogen gas-water bubble flow under the condition of fixed flow rates. The experimental results show that the diameter of the gas injection hole influences the phase distribution through the bubble size. The location of the injection hole and the direction of injection do not influence the phase distribution of fully developed bubble flow. The transitive equivalent bubble size from the coring bubble flow to the sliding bubble flow corresponds to the bubble shape transition. The analytical results show that the phase distribution may be predictable if the phase profile is judged from the bubble size.

Key Words: Multiphase Flow, Bubble, Pipe Flow, Mixing Methods, Phase Distribution, Bubble Size

1. 序 論

気泡流は、原子炉、液体金属 MHD 発電装置をはじめとするエネルギー変換機器、化学反応炉、医療機器などで積極的に利用され、その流動構造を理解することはシステムの制御、高効率化、安全性を計るうえで重要である。そのため、これまでに多くの研究がなされ、気泡流の流動構造に関する多くの知見が得られている。気泡流の液相流速の乱れは単相流のそれよりも流路断面中央部で小さくなり得ること⁽¹⁾、断面平均でも乱れのエネルギーが単相流よりも小さくなり得ること⁽²⁾、気泡流はその断面内径方向相分布形状の違いにより分類されること⁽³⁾、気泡の大きさにより同一流量条件の下でも異なる相分布を持つこと⁽⁴⁾、界面活性剤の添加により一様気泡流が得られること⁽²⁾などが示された。また、単一ノズルから生ずる気泡の運動も調べられ⁽⁵⁾、気泡の管断面内の存在位置はその大きさに依存することが明らかにされた。これらの知見のうち、同一ガス流量の下でも、気泡の大きさにより相分布が異なるという点は、二相流制御の点から特に興味

深い。

ここでは、二相流の制御を考える立場から、気泡流の基本的性質を知るために、系統的に気泡発生法(発生孔の大きさ、位置、向き)を変えることにより気泡径を変え、相分布への影響を調べた。そして、気泡径をも

1. Separator 2. Pump 3. Turbine-type flowmeter
4. Flow rate control valve 5. Mixer 6. Test section
7. Float-type flowmeter 8. Pressure gage

図 1 実験装置概略

* 原稿受付 平成3年7月2日。

^{*1} 正員、筑波大学構造工学系(☎305 つくば市天王台1-1-1)。^{*2} 筑波大学理工学研究科。

とにした相分布予測の可能性について検討した。

2. 実験装置と計測系

図1に実験装置の概略を示す。水はポンプにより駆動され、気液分離タンクからタービン流量計、流量調節弁を経た後、混合器に供給される。一方、窒素ガスは浮子式流量計、精密ブルドン管圧力計を経た後、混合器に供給される。混合器で形成された気泡流は垂直上昇管内を上昇し、上部の大気開放型の気液分離タンクへ至る。垂直管は、内径40 mm、長さ2 mの透明アクリル管である。

混合器は二重円筒形(外筒内径100 mm、内筒外径45 mm、高さ100 mm)をしており(図2)、外室に窒素ガスが、内筒内部に水が供給され、内筒を介して混合される。内筒内径は垂直管と同じ内径で、気体注入部(斜線部)を交換することにより、気泡発生方法を変えることができる。図3に本実験で使用する5種類の気体注入部を示し、表1にその仕様などを示す。注入部は管壁からガスを供給するタイプ(管壁型：A～C)と管中央部から供給するタイプ(管中央型：D、E)に大別できる。注入部A～Cは気泡発生孔の大きさがこの順に小さい(孔径A：2 mm、B：0.5 mm、C：100 μ m)。これによって、孔径の違いによる発生気泡の大きさと相分布への影響を調べられる。気泡注入部D、Eは発生孔の大きさがほぼ気体注入部Bと同じで、気泡発生位置と発生方向が異なり、その影響を調べること

ができる。

実験は、窒素ガスと水を利用することにし、窒素ガスの見掛け速度を $j_g=0.011$ m/sに、水の見掛け速度を $j_L=0.66$ m/sに設定して行った。十分に流れが発達したと思われる混合器より約1.5 m下流の断面で、気泡に関しては複針式電気抵抗プローブシステムを用い、液相に関してはレーザドップラー流速計を用い測定した。測定点は、断面上の管中心より半径方向に1 mm間隔に設定した。得られたデータは、パーソナルコンピュータに取り込み、処理した。これらの測定より時間平均ボイド率、流れ方向の気泡速度、気泡弦長、液相流速とその変動、気液間のすべり速度などの径方向分布が得られた。また、相分布の気泡混合方法への依存性を調べるため、気泡発生直後(気泡発生孔から0.1 m下流)の断面でも抵抗プローブによる測定を行った。

3. 実験結果

3.1 気体注入部孔径の影響 管壁型注入部A～Cを用いたときの混合器より下流0.1 mと1.5 mの測定面の相分布を図4に示す[なお、図4中に注入部の型(TYPE)と印を表示しているが、その詳細は表1に示されている]。図4の横軸は、管内径で無次元化した管断面中心からの径方向位置である。気泡発生直後の相分布は、気泡発生孔が小さいほど管壁近くに気泡が多く存在する傾向を見せ、気泡発生方法に強く依存

表1 注入部の仕様と図中の記号

Type of Injector	Location of Injection	Hole Diameter	Number of Hole	Direction of Injection	Category of Bubble Flow	Symbols in Figures
A	Wall	2 mm	12	$\perp$	Coring Type	$\square$
B	Wall	0.5 mm	16	$\perp$	Sliding Type	$\triangle$
C	Wall	100 μ m	Porous	$\perp$	Sliding Type	$\bigcirc$
D	Core part	0.5 mm	15	$\perp, \parallel$	Sliding Type	$\diamond$
E	Core part	0.8 mm	3	$\parallel$	Sliding Type	$\times$

$\perp$ denotes the direction of injection is perpendicular to main flow.

$\parallel$ denotes the direction of injection is parallel to main flow.

図2 混合器概略

図3 注入部

(Type C：焼結合金リング幅5 mm、Type D、E：挿入管外径8 mm)

すると言える。これは、発生孔が小さいほど発生孔での圧力損失が大きく、ガスの吹出し速度が小さくなるためと思われる。ところが下流 1.5 m では、流れは最も大きな孔径を持つ注入部 A を用いた場合、コア型気泡流を示す。注入部 B, C の場合、底層気泡流を維持している。しかし、発生直後と下流(1.5 m)の相分布には微妙な変化が見られ、下流では、C の場合のほうが管コア部でボイド率が低くなり、底層気泡流の特徴を顕著に示す流れに発達していると言える。

また、図 5 に二つの断面での平均気泡弦長分布を示す。混合器より 1.5 m 下流の測定断面の平均気泡弦長は、コア型気泡流を示す注入部 A を用いた場合が最も大きく、C, B の順になっている。定性的には、大きな気泡の場合コア型気泡流、気泡が小さくなると底層気泡流となっている。これは、単一ノズルから気泡を発生させた場合の結果と同じ傾向にある⁽⁵⁾。しかし、底層気泡流の相分布を強く示す注入部 C の場合の気泡弦長は注入部 B の場合より大きい。界面活性剤を水

に添加した場合、発生気泡は小さくなるが相分布は一様になる⁽⁴⁾ことを考え合せば、小さい気泡ほど底層気泡流を作るのではなく、ある範囲の大きさの気泡が底層気泡流を形成し、その度合いも気泡の大きさに依存すると推測される。これは、単一ノズルの結果と異なる。相分布が異なる原因としては、孔径の違いに依存する気泡の大きさが挙げられる。

抵抗プローブで測定した値は流れ方向の弦長であり、気泡径を表すものではない。実験で得られた気泡を偏平回転楕円体と仮定する。偏平率(=長軸/短軸)を x 、測定より得られた平均弦長を l とすると、気泡の等価直径 d は次式で表される。ただし、気泡はすべて同じ大きさ、主軸比を持ち、抵抗プローブの針先は気泡に均一に刺さると仮定している。

$$d = \frac{3}{2} x^{2/3} l \dots\dots\dots (1)$$

偏平率 x は局所ウェーバ数 We と次の関係にある⁽⁶⁾。

(a) 混合器下流 0.1 m

(b) 混合器下流 1.5 m

図 4 気泡発生孔径の相分布への影響

(a) 混合器下流 0.1 m

(b) 混合器下流 1.5 m

図 5 気泡発生孔径の気泡弦長への影響

$$We = \frac{\rho_L u^2 d}{\sigma}$$

$$= \frac{4(x^3 + x - 2) \left[x^2 \cos^{-1} \left(\frac{1}{x} \right) - (x^2 - 1)^{1/2} \right]^2}{x^{4/3} (x^2 - 1)^3} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ_L は液相の密度、 σ は表面張力を示す。ところで、気泡のすべり速度 u は、しばしば、静止水中の偏平気泡の上昇速度⁽⁷⁾ であてはめられる。

$$u = 1.35 \left[\frac{2\sigma}{\rho_L d} \right]^{0.5} \dots\dots\dots (3)$$

式(2)を式(3)に代入しすべり速度 u を消去すると、 d も同時に消去され、ウェーバ数 $We = 2 \times 1.35^2 = \text{const.}$ となる。このことは、気泡の偏平率 x は気泡径とすべり速度に依存せず、常に一定 ($x \approx 3.95$) であることを示す。

そこで、気泡の偏平率を $x = 3.95$ と推定すると、式(1)よりコア型気泡流の管中央部(中心から半径 17 mm の領域)の気泡の平均等価直径は 9.5 mm、底層気泡流の場合、注入部 B では、7.0 mm、注入部 C では 7.6 mm となる。したがって、本実験の範囲では、気泡等価直径にして 8 mm 程度が、コア型気泡流形成と底層気泡流形成の境界になると思われる。

発生直後の気泡の弦長分布は、孔径の大きい注入部 A の場合の気泡弦長が最も長く、発生孔径の影響を受けている。B、C では弦長分布はよく似ている。注入部 C の気泡発生孔径は B の 1/5 であるが、それに比例した小さな気泡は得られておらず、発生孔を小さくしても孔径に比例してその発生気泡は小さくはならない。

3・2 気泡発生孔の位置、向きの影響 管壁型注入部を用いてコア型気泡流を形成する場合は、発生位置とボイド率の高い部分が異なるので、相分布は発生

孔の位置による影響を受けていないと言ってよいであろう。また単一気泡の場合も、管壁付近から大きな気泡を発生させても管中央部に気泡が移動することが知られている⁽⁵⁾。管壁型注入部を用いて底層気泡流を形成する場合、相分布は気泡発生孔の位置による影響を受けていないとはいきれない。そこで、気泡発生孔の大きさを注入部 B と同じにして、その位置を管の中心部に変え、測定を行った(注入部 D)。注入部 D では気泡の吹出し口が流れに対して垂直方向にもあり、気泡が初めから管壁に寄ってしまうおそれがあったので、気泡発生孔の数が少なくなるが、管中心付近から上向きだけに気泡を発生させることも行った(注入部 E)。管壁から気泡を吹き出した場合(注入部 B)と管中央(注入部 E)から気泡を出した場合では、気泡発生直後の相分布に大きな違いがあるが[図 6(a)]、いずれの場合も 1.5 m 下流では底層気泡流になり、相分布に有意な差は見られない[図 6(b)]。もう一つの管中央型注入部 D の場合、発生直後の相分布は B と E の場合と中間的な分布になると思われるが、1.5 m 下流では底層気泡流になる。また、平均弦長も同様の分布を示しており(図 7)、類似の構造を持つ流れが得られた。これらの結果は、流れが発達すると、相分布が気泡発生孔の位置および向きの影響を受けないことを示している。

4. 相分布計算についての考察

今回の実験のように流速 1 m/s 以上の流れの中で発生気泡の大きさを予測することは現在困難なため⁽⁸⁾、発生後の気泡の大きさをもとにして相分布を予測することを考える。今回得られたコア型気泡流、底層気泡流についてはいくつかの相分布を表す予測式が

図 6 気泡発生孔の位置と発生方向の相分布に対する影響

図 7 気泡発生孔の位置と発生方向の気泡弦長に対する影響 (混合器下流 1.5 m)

図 8 相分布の計算

提案されている^{(9)~(12)}。これらのうち、今回の実験条件に合う Zuber ら⁽⁹⁾ (コア型気泡流)と芹沢ら⁽¹²⁾ (底層気泡流)により与えられている式を用い実験結果と比較した(図 8)。コア型気泡流(一点鎖線と□印)については管中央部で合っている。また、底層気泡流(○印)では混合器下流 0.1 m (破線)と 1.5 m (実線)での気泡の大きさをもとにしてすべり速度を求めた。混合器下流 1.5 m での値を用いた場合、壁の近くを除いて良い一致を示す。また、混合器下流 0.1 m での値を用いても予測が可能のように見える。このようにそれぞれの相分布は予測可能であるが、これらの式はコア型気泡流か底層気泡流かを判定して使用する必要がある。実験では気泡の大きさが異なる相分布を形成する一要因になっていることが示されたが、コア型気泡流の予測式には気泡の大きさは全く考慮されておらず、いかなる条件を与えてもコア型気泡流の相分布しか示さない。また、底層気泡流の予測式ではすべり速度が含まれており、気泡の大きさはすべり速度を通して影響すると解釈できるが、すべり速度を変えても底層気泡流の相分布しか得られない。したがって、気泡の大きさによりどちらの相分布になるか判断基準が必要となる。

今回の実験条件では、気泡等価直径で 8 mm 程度がコア型気泡流形成と底層気泡流形成の境界であった。このとき推定した扁平楕円体気泡の主軸比は 3.95 であり、扁平楕円体気泡を維持できる値の上限に近い⁽⁶⁾。また、この気泡の大きさは Clift ら⁽¹³⁾の気泡形状線図中 wobbling に属する値であり、Peebles ら⁽⁷⁾による扁平気泡ときのこ状または冠球状気泡の境界

(6.9 mm)に近い。これらのことから底層気泡流には扁平楕円体気泡が、コア型気泡流には wobbling か冠球状気泡が主に含まれており、コア型気泡流中の気泡にかかる径方向揚力は底層気泡流中のそれとは異なっていると推測される。したがって、気泡の合体、分裂が生じないような定常状態の流れについては、気泡の大きさから気泡形状を判定し、相分布を与えることが可能であろう。

5. 結 論

同一流量条件の下、気泡発生法を系統的に変え、垂直気泡流の相分布への影響を調べた。

その結果、気泡発生孔の大きさは、発生する気泡の大きさを通して相分布に影響することが示された。本実験の範囲では、気泡等価直径にして、8 mm 程度がコア型気泡流形成と底層気泡流形成の境界になると思われる。気泡発生位置および向きは、発生直後の相分布に大きく影響するが、流れが発達する下流では相分布への影響が認められなかった。これらの結果は、気泡流の制御についての指針を与える。

流れの中での気泡発生孔と発生気泡の大きさの関係は不明であるので、発生方法を指定して相分布を予測することはできなかったが、発生気泡の大きさにより気泡形状を判定し、相分布を計算することは可能であると思われる。

文 献

- (1) Serizawa, A., Kataoka, I. and Michiyoshi, I., *Int. J. Multiphase Flow*, 2(1975), 235.
- (2) Matsui, G., *Proc. Jpn. - U. S. Seminar Two-Phase Flow Dyn.*, (1988), E. 2-1.
- (3) 世古口・ほか 3 名, 機論, 46-402, B(1980), 291.
- (4) 松井・山下・熊沢, 機論, 53-486, B(1987), 459.
- (5) 世古口・佐藤・本田, 機論, 40-333(1974), 1395.
- (6) Moore, D. W., *J. Fluid Mech.*, 23(1965), 749.
- (7) Peebles, F. N. and Garber, H. J., *Chem. Eng. Prog.*, 49-2 (1953), 88.
- (8) 日向・ほか 3 名, 機論, 57-535, B(1991), 971.
- (9) Zuber, N. and Findlay, J. A., *Trans. ASME, Ser. C*, 87-4(1965), 453.
- (10) 小林・飯田・鎌江, 機論, 35-280(1969), 2365.
- (11) 日向, 第 17 回伝熱シンポジウム講義集, (1980), 262.
- (12) 芹沢・Zun, I.・岐, 機論講義集関西支部第 4 回シンポジウム講義集, No. 824-11(1982), 13.
- (13) Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E., *Bubbles, Drops and Particles*, (1978), 27, Academic Press.