垂直管内固気液三相気泡流の体積率に関する研究*

坂口 忠司^{*1}, 赤 對 秀 明^{*2}, 高 橋 広 光^{*3}
富 山 明 男^{*1}, 南 川 久 人^{*1}Study of Volumetric Fraction in Gas-Liquid-Solid Three-Phase Bubbly Flow
in Vertical PipesTadashi SAKAGUCHI, Hideaki SHAKUTSUI, Hiromitsu TAKAHASHI,
Akio TOMIYAMA and Hisato MINAGAWA

The volumetric fractions of each phase in air-water-particle three-phase bubbly flows were measured in vertical pipes of about 10 m in height, and of 20.9, 30.8 and 50.4 mm inside diameter, respectively. The solid particles used in this experiment were three kinds of spherical particles of 1.15, 2.56 and 4.16 mm mean diameter, made of aluminum ceramics with 2 270-2 400 kg/m³ density. Effects of the volumetric fluxes of each phase, the particle diameter and the pipe diameter on the volumetric fractions of each phase were discussed in this experimental range. Then, empirical correlations of the volumetric fractions of each phase were proposed using dimensionless numbers such as the Froude number, the Reynolds number and the volumetric flow fraction. The differences between the measured and calculated volumetric fractions were $\pm 10.8\%$, $\pm 8.91\%$ and $\pm 0.397\%$ for the solid, gas and liquid phase, respectively.

Key Words: Multiphase Flow, Pipe Flow, Bubble, Gas-Liquid-Solid Three-Phase Bubbly Flow, Volumetric Fraction, Dimensionless Correlation, Vertical Pipe

1. 結 言

固気液三相流は、エアリフトポンプを利用した深海底のマングラン塊の揚鉱⁽¹⁾、魚類の船倉からの陸揚げ⁽²⁾などの各種流体輸送装置や石炭液化プラントの予熱器・反応器⁽³⁾などにおいてみられる。これらの装置の合理的設計および安全で効率的な運転を実現するためには、各相体積流束と管内平均各相体積率および摩擦圧力降下との関係などの巨視的流動特性、ならびにその巨視的流動特性を支配する各相の体積率や速度の空間的分布などの微視的流動特性の資料が必要であり、その流動特性の解明が行われつつある⁽⁴⁾。

著者らは、固気液三相流のうち、固気液三相スラグ流についてその体積率特性と摩擦圧力降下特性を研究してきた^{(5)~(8)}。本報では、垂直管内固気液三相気泡流を対象として、固気液各相体積率の測定を行い、その各相体積流束、管径、粒子径に対する変化特性を明らかにするとともに、これらにより構成される無次元数

を用いて各相の体積率を推算する実験式を提案した。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。高さ約10 m、管内径 $D=20.9, 30.8, 50.4$ mm の3種類のアクリル樹脂製垂直円管に、固体粒子と常温・常圧の水および空気を2台のモノポンプと1台の圧縮機によりおのおの供給し、三相流として強制流動させた。表1に実験に用いた固体粒子の諸特性を示す。平均粒子径 d_s は、200個の平均値である。本実験装置・範囲における気泡径は2~6 mmである。固相と液相を、固液混合物として試験部の最下部において一方向から水平に流入させた。気相を、試験部と同一内径の多孔質管を内筒とする二重円筒形混合部を通し、固液混合物の流れに全周から直角に流入させた。多孔質管は肉厚2.5 mmのポリメチルメタアクリレート製焼結体(平均細孔径 $\delta=100$ μm , 気孔率 $\varepsilon=36\%$)で、その長さは、 $D=20.9, 30.8$ mmの場合は50 mm、 $D=50.4$ mmの場合は70 mmである。

固気液各相体積率 $\langle \alpha_s \rangle$, $\langle \alpha_g \rangle$, $\langle \alpha_L \rangle$ を、試験部に設置した二方弁を用いて流路を瞬間的に締め切り、弁間(図1, 区間 L_4)に存在する各相の高さを拡大鏡を用いて0.1 mmの精度で測定し、各相体積の弁間の全体積

* 平成元年3月23日 関西支部第64期定時総会講演会において講演, 原稿受付 平成3年3月15日。

^{*1} 正員, 神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)。

^{*2} 正員, 神戸市立工業高等専門学校 (〒651-21 神戸市西区学園東町8-3)。

^{*3} ファナック(株) (〒401-05 山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場3580)。

表 1 粒子の諸特性

Mean Diameter d_s (mm) (Standard Deviation) (mm)	1.15 (0.0837)	2.56 (0.101)	4.16 (0.183)
Material	Aluminum Ceramics		
Shape	Sphere		
Density ρ_s (kg/m ³)	2270	2380	2400
Free Settling Velocity V_{st} (m/s)	0.152	0.297	0.416
Drag Coefficient C_D (-)	0.890	0.560	0.440
Particle Reynolds Number Re_s (-)	153	676	1540

D (mm)	L (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)
20.9	9820	853	3599	2002	2020
30.8	9965	974	3583	2003	2002
50.4	9954	1138	3443	2003	1995

図 1 実験装置概略図

に対する割合として求めた。また、平均気泡径 d_c をこの弁間の中心位置で、写真撮影により、各条件において約 100 個の平均値として求めた。

実験を、管径と粒子径それぞれ 3 種類による組合せのうち 7 条件について行った。固相および液相体積流量を、検定済みの固相用シリンダと液相用シリンダにより吐出固液混合物を受けとめ、固相用シリンダ内に残存する液相を十分液相用シリンダ中に移動させたあと、それぞれのシリンダ内の各相の高さを読取ることにより測定した。気相体積流量を検定済み臨界ノズルを用いて、その上流側圧力を調節して設定した。本実験における固気液各相体積流量の範囲は、それぞれ $\langle J_s \rangle = 0 \sim 0.0375$, $\langle J_c \rangle = 0 \sim 0.121$, $\langle J_L \rangle = 0.395 \sim 1.02$ m/s である。ここで $\langle J_c \rangle$ は、体積率測定用弁間(区間 L_4)の中心位置の静圧に対応する値である。また、記号 $\langle \rangle$ は、断面平均値を表す⁽⁹⁾。水温は 9.7~22.2°C、気温は 10.6~24.7°C である。

3. 実験結果および考察

固気液三相気泡流の各相体積率に影響する因子として、各相体積流量、管径、粒子径、気泡径、表面張力、各相の密度および粘性係数などが考えられる。ここでは、本実験結果を用いて検討できる各相体積流量、粒子径、管径と各相体積率の関係について述べる。

なお、本実験の測定精度は、測定値の最適曲線補間による推定値に対する測定値の相対精密度 S_r ⁽¹⁰⁾ で表すと、 $\langle a_s \rangle$, $\langle a_c \rangle$, $\langle a_L \rangle$ に対してそれぞれ 4.98, 2.67, 0.133% である。

3.1 体積流量の影響

3.1.1 固相体積流量の影響 図 2 に、各相体積率と $\langle J_s \rangle$ の関係の一例を示す。各枠内に $\langle J_L \rangle$ 一定で

図 2 各相体積率と固相体積流量の関係 ($D=30.8$ mm, $d_s=2.56$ mm)

の測定値を示す。記号×と+で表されている固液二相流における $\langle a_s \rangle$ および $\langle a_L \rangle$ の $\langle J_s \rangle$ に対する定性的傾向は、従来の研究結果⁽¹¹⁾と一致する。図2中の実線は4章で述べる無次元整理式による各相体積率の推算線で、この推算線と実験値との関係については4章で述べる。図6~8についても同様である。

$\langle J_s \rangle = 0$ の状態、すなわち気液二相気泡流の状態とそれに固体粒子が加わった三相気泡流の状態を比較すると、 $\langle J_s \rangle$ が大きいほど $\langle a_s \rangle$ は大きく、 $\langle a_L \rangle$ は小さい。また、その変化の割合は、 $\langle J_L \rangle$ が小さいときのほうが大きい。 $\langle a_G \rangle$ は、 $\langle J_s \rangle$ が大きいほどわずかに小さいが、他の実験条件では $\langle J_s \rangle$ が大きいほどわずかに大きい場合も認められ、体積率-体積流束線図上ではその傾向を確定できなかった。そこで、 $\langle a_G \rangle$ と $\langle J_s \rangle$ の関係を明らかにするため、各実験条件における $\langle a_G \rangle$ と $\langle J_s \rangle$ の関係を以下のような方法で調べた。気液二相気泡流の気相体積率 $\langle a_G \rangle_{GL}$ を基点とするために $\langle a_G \rangle$ を $\langle a_G \rangle_{GL}$ で除して、縦軸に用い、 $\langle J_L \rangle$ および $\langle J_G \rangle$ の影響を考慮して $\langle J_s \rangle$ を三相流の合計流束 $\langle J_T \rangle$ で除した値 β_s を横軸として、 $\langle a_G \rangle / \langle a_G \rangle_{GL} - \beta_s$ 線図を作成した。図3にその例を示す。 β_s に対して $\langle a_G \rangle / \langle a_G \rangle_{GL}$ が増加する場合と減少する場合がある。この図3において、両者の関係をほぼ直線的であるとみなして実験点を一回帰し、その回帰配 K_G を求めた。図3中の実線はその回帰線である。ここでは、三相気泡流を気液二相気泡流に固体粒子が添加された流れとみなしているので、 d_G および D に対する d_s の相対的な大きさが気泡上昇速度ひいては気相体積率に関係すると考え、 $(d_s/d_G)(d_s/D)$ に対して K_G を整理した。図4にその結果を相関式と共に示す。 K_G は、 $\langle J_L \rangle$ 、 $\langle J_G \rangle$ に対して系統的な特性は認められず、ばらつきはあるが、

図3 $\langle a_G \rangle / \langle a_G \rangle_{GL} - \beta_s$ 線図

$(d_s/d_G)(d_s/D)$ が小さいとき負で、大きいとき正となっている。したがって、たとえば d_G および D が一定で d_s が小さいとき $\langle a_G \rangle$ は $\langle J_s \rangle$ に対して減少し、 d_s が大きいとき $\langle a_G \rangle$ は $\langle J_s \rangle$ に対して増加していることがわかる。この理由は次のように考えられる。 $\langle a_G \rangle$ 、 $\langle J_s \rangle$ および気相平均速度 $\bar{V}_G$ の間には式(1)

$$\langle a_G \rangle = \langle J_G \rangle / \bar{V}_G \quad (1)$$

の関係があるので、 $\bar{V}_G$ と d_s の関係に着目する。高速ビデオの観察によると、本実験の直径2~6mmのうち大きいほうの気泡は小さい固体粒子を押しつけてほぼ直線的に上方へと通過するが、小さい気泡は d_s の大きい固体粒子に対して、その周りを回り込むように運動することが認められた。この回運動のため d_s が大きいと、 $\bar{V}_G$ が小さくなって $\langle a_G \rangle$ が大きくなるのである。なお、この回運動には固体粒子の密度 ρ_s も関係すると思われるが、本実験で用いた粒子は同じ材質から作製されているので、 ρ_s はほぼ同じ値であり、この影響については言及できない。

図4の関係において、 d_s 、 D が一定で d_G が大きいと、 K_G が負となり $\langle a_G \rangle$ は $\langle J_s \rangle$ が大きいとき小さくなる。これは、 d_G が大きいほど気泡は固体粒子を押しつけて直進するため、 $\bar{V}_G$ は大きくなり、 $\langle a_G \rangle$ が小さくなるためと考えられる。

3.1.2 気相体積流束の影響 図2において、 $\langle J_s \rangle$ 一定のもとで、気相体積流束 $\langle J_G \rangle$ が異なるときの各相体積率を検討すると、各相体積率と $\langle J_G \rangle$ の関係を調べることができる。 $\langle J_G \rangle = 0$ の状態、すなわち固液二相流の状態とそれに気泡が加わった状態、すなわち三相気泡流の場合を比較すると、 $\langle J_G \rangle$ が大きいほど、 $\langle a_G \rangle$ は大きく、 $\langle a_L \rangle$ 、 $\langle a_s \rangle$ は小さい。

固液二相流に気泡が添加されたときの $\langle a_s \rangle$ に及ぼす $\langle J_G \rangle$ の影響を定量的に表すために、3.1.1項において $\langle a_G \rangle$ と $\langle J_s \rangle$ の関係を d_s に対して検討したのと同様の方法で、 $\langle a_s \rangle$ と $\langle J_G \rangle$ の関係を d_G に対して検

図4 K_G の特性

討する。まず、図2において、 $\langle J_s \rangle$ 一定のもとで各 $\langle J_c \rangle$ における $\langle a_s \rangle$ を内挿して読取る。これらを用いて $\langle a_s \rangle / \langle a_s \rangle_{SL} - \beta_c$ 線図を作成した。ここで、 $\langle a_s \rangle_{SL}$ は固液二相流の固相体積率、 β_c は $\langle J_c \rangle / \langle J_T \rangle$ である。この線図において両者の関係をほぼ直線的であるとみなして一次回帰し、その回帰係数 K_s を求めた。ここで、三相気泡流を固液二相流に気泡が添加された流れとみなすと、 d_s および D に対する d_c の相対的な大きさ $(d_c/d_s)(d_c/D)$ に対して、 K_s を整理できる。図5にその結果を相関式と共に示す。 K_s は、 $\langle J_L \rangle$ 、 $\langle J_s \rangle$ に対して系統的な特性は認められず、ばらつきはあるが、ほとんどが負であり、 $\langle a_s \rangle$ は $\langle J_c \rangle$ に対して減少していることが本図にも表れている。

3・1・3 液相体積流束の影響 図6に、各相体積率に及ぼす液相体積流束 $\langle J_L \rangle$ の影響の一例を示す。 $\langle J_L \rangle$ が大きいほど、 $\langle a_L \rangle$ は大きく、 $\langle a_s \rangle$ および $\langle a_c \rangle$ は小さい。 $\langle a_s \rangle$ の $\langle J_L \rangle$ に対する減少割合は、 $\langle a_c \rangle$ の

図5 K_s の特性 図6 各相体積率に及ぼす液相体積流束の影響
($D=30.8$ mm, $d_s=2.56$ mm, $\langle J_c \rangle=0.017$ m/s)

それより大きい。

3・2 粒子径の影響 図7に各相体積率に及ぼす粒子径 d_s の影響の一例を示す。 d_s が大きいほど、 $\langle a_s \rangle$ は大きく $\langle a_L \rangle$ は小さい。また、 $\langle a_c \rangle$ はわずかに大きい。

d_s が大きい場合、 $\langle a_s \rangle$ が大きい理由は次のように考えられる。固体粒子の液相速度に対する相対速度は、浮遊速度⁽¹²⁾あるいは自由沈降速度⁽¹³⁾のいずれかで表されるものと思われるが、ここでは自由沈降速度の増加関数として表されると仮定し、これに基づいて以下の考察を行う。単一粒子の自由沈降速度 V_{ST} は、抗力、浮力および重力の釣り合いから式(2)のように表せる。

$$V_{ST} = \sqrt{4gd_s(\rho_s/\rho_L - 1)/(3C_D)} \quad (2)$$

ここで、 g は重力の加速度、 ρ_L は液相密度、 C_D は抗力係数である。 C_D は本実験範囲では d_s が大きいほど小さくなっている。また、 ρ_s は3・1・1項で述べたようにほぼ同じ値である。したがって、式(2)より、 d_s が大きいほど、 V_{ST} は大きくなり、そのため固液の相対速度が大きくなる、いいかえれば固相平均速度 $\bar{V}_s$ が小さくなる。 $\bar{V}_s$ が小さくなると、式(1)と同様の関係、

$$\langle a_s \rangle = \langle J_s \rangle / \bar{V}_s \quad (3)$$

より $\langle a_s \rangle$ が増加するものと考えられる。なお、 d_s が大きい場合、 $\langle a_c \rangle$ が大きくなる理由はすでに3・1・1項で述べたように、気泡の回転運動によるものである。 $\langle a_L \rangle$ は、 $\langle a_s \rangle$ と $\langle a_c \rangle$ の増加分だけ減少している。

3・3 管径の影響 図8に各相体積率に及ぼす管径 D の影響の一例を示す。 $\langle a_s \rangle$ は D が大きいほどわずかに大きい。 $\langle a_L \rangle$ は $D=20.9, 30.8$ mmのときはほぼ同じで、 $D=50.4$ mmのときは小さくなっている。 $\langle a_c \rangle$ は、 $D=20.9, 30.8$ mmのときはほぼ同じで、 D

図7 各相体積率に及ぼす粒子径の影響
($D=30.8$ mm, $\langle J_L \rangle=1.0$ m/s, $\langle J_c \rangle=0.023$ m/s)

図 8 各相体積率に及ぼす管径の影響
 ($d_s=1.15$ mm, $\langle J_L \rangle=0.70$ m/s, $\langle J_G \rangle=0.034$ m/s)

=50.4 mm のときは大きくなり、管径により差が認められた。なお、最近、原子炉の安全解析に関連して、直径 50 mm 以上の大口径管における気液二相流の気相速度に関して研究が行われている^{(14)~(16)}が、気液二相気泡流における体積率に及ぼす管径の影響についてはまだ明らかにされていないので、混相流の体積率に及ぼす管径の影響に関しては今後さらに研究する必要がある。

以上の各節の説明において、紙面の都合上、他の実験条件の図面は省略したが、いずれの場合も、それぞれの特性は他の実験条件においても認められた。

以上、3 章では各相体積率に及ぼす各相体積流束、粒子径および管径の影響を検討したが、これらの特性はいずれも断面内の各相体積率分布や各相速度分布などの微視的特性に支配されるものであり、それらについては今後解明する予定である。

4. 無次元数による整理

4 章では、各相体積率に影響を及ぼす各相体積流束、管径、粒子径などのパラメータを用いた無次元数により各相体積率を推算する実験式を提案する。提案した実験式は、スリップ流モデルを用いて垂直管内固気液三相気泡流の解析を行う際に必要となる構成方程式として有用となる。また、本式は、各相間の抗力、摩擦力などの構成方程式を導くのにも役立つ。

三相気泡流における無次元数には、幾何学的相似に基づく管径、粒子径および気泡径による各比があり、力学的相似に基づく各相の体積流束比、密度、動粘性係数、粘性係数などの物性値の比、および慣性力、粘性力、重力、表面張力などの力の比が考えられる。

3・1 節において示した体積率の特性、すなわち固気

液三相気泡流の固相体積率 $\langle \alpha_S \rangle$ が、固液二相流における固相体積率 $\langle \alpha_S \rangle_{SL}$ から気相の混在により減少する特性および固気液三相気泡流の気相体積率 $\langle \alpha_G \rangle$ が気液二相気泡流における気相体積率 $\langle \alpha_G \rangle_{GL}$ から固相の混在により変化する特性、を表すために、 $\langle \alpha_S \rangle_{SL}$ 、 $\langle \alpha_G \rangle_{GL}$ に気相の混在効果を表す項を乗じた関数形、すなわち式 (4)、(5) を提案する。両式中の K_S および K_G は、それぞれ図 5、4 で示したものであるが、これらを用いることによって、それぞれ $\langle \alpha_S \rangle$ に及ぼす $\langle J_G \rangle$ の影響および $\langle \alpha_G \rangle$ に及ぼす $\langle J_S \rangle$ の影響が d_s 、 d_G 、 D の各比によって異なるという 3・1・1、3・1・2 項で述べた特性を取り入れることができる。

$$\langle \alpha_S \rangle = (1 + K_S \beta_G) \langle \alpha_S \rangle_{SL} \quad (4)$$

$$\langle \alpha_G \rangle = (1 + K_G \beta_S) \langle \alpha_G \rangle_{GL} \quad (5)$$

$$\text{ここで、} \beta_G = \langle J_G \rangle / \langle J_T \rangle \quad (6)$$

$$\beta_S = \langle J_S \rangle / \langle J_T \rangle \quad (7)$$

$$\langle J_T \rangle = \langle J_S \rangle + \langle J_G \rangle + \langle J_L \rangle \quad (8)$$

$$K_S = 6.01(d_G/d_s)(d_G/D) - 3.70 \quad (9)$$

$$K_G = 10.6(d_s/d_G)(d_s/D) - 1.26 \quad (10)$$

次に式 (4)、(5) において基準として用いた $\langle \alpha_S \rangle_{SL}$ 、 $\langle \alpha_G \rangle_{GL}$ について検討する。これらに関して、従来の諸相関式を流用してもよいが、ここでは、本実験結果に基づいて、新たに無次元式を導出した。

$\langle \alpha_S \rangle_{SL}$ の無次元整理式として、沈降性固体粒子を用いた固液二相流の場合、たとえば、Engelmann⁽¹¹⁾ は固相速度 $\bar{V}_{SSL}$ 、固相および液相体積流束 $\langle J_S \rangle_{SL}$ 、 $\langle J_L \rangle_{SL}$ を介して、式 (11)~(13) で表している。

$$\langle \alpha_S \rangle_{SL} = \langle J_S \rangle_{SL} / \bar{V}_{SSL} \quad (11)$$

$$\bar{V}_{SSL} = h \langle J_L \rangle_{SL} \quad (12)$$

$$h = \frac{1}{\xi} - A \left(\frac{d_s}{D} \right)^{n_1} \left(\frac{\langle J_L \rangle_{SL}^2}{gD} \right)^{n_2} (1 - \eta_S)^{n_3} \left(\frac{\rho_S}{\rho_L} - 1 \right)^{n_4} \quad (13)$$

ここで、 $A=1.85$ 、 $n_1=0.44$ 、 $n_2=-0.43$ 、 $n_3=1.87$ 、 $n_4=0.5$ 、 $\xi=0.82$ 、 $\eta_S=\rho_S \langle J_S \rangle_{SL} / (\rho_L \langle J_L \rangle_{SL})$ である。

Engelmann による実験は、管径 200 mm、粒子径 13~52 mm、 $\langle J_L \rangle_{SL}=1.5\sim 4$ m/s であり、本実験範囲とかなり異なるため、式 (11)~(13) による推算値は本実験結果と比べると大きくなる。そこで、本実験における固液二相流の固相体積率を整理する無次元式を検討した。まず、固液混合体あるいは固液各相の慣性力、重力、粘性力の比、固液各相の体積流量、密度などの比、式 (13) においても考慮されている粒子径と管径の比や質量流量比などの無次元数を列挙した。次に、それらの無次元数と観察された固液二相流の流動状況や実験結果に基づく定性的傾向との対応関係を検討し、有意であると判断された無次元数を組合せて無次元式

を作成した。さらに、その無次元式を構成する各無次元数の係数を、本実験の固液二相流のデータおよび既報で示した固液二相流のデータ⁽¹²⁾⁽¹⁷⁾を用いて偏差が最も小さくなるように決定した。その際、密度比の係数は、本実験では密度比を実験条件として有意に変化させていないので、Engelmann⁽¹¹⁾と同様に式(2)を参考にして0.5とした。式(14)～(20)にその結果を示す。

$$\langle a_s \rangle_{SL} = B Fr_{SL}^{m_1} Re_{SL}^{m_2} \beta_{SL}^{m_3} Re_s^{m_4} (\rho_s/\rho_L - 1)^{m_5} \quad (14)$$

$$B = 0.471, m_1 = -0.371, m_2 = -0.0390, \\ m_3 = 0.900, m_4 = 0.164, m_5 = 0.5$$

ここで、 $Fr_{SL} = (\langle J_s \rangle_{SL} + \langle J_L \rangle_{SL}) / \sqrt{gD}$ (15)

$$Re_{SL} = D \rho_{SL} (\langle J_s \rangle_{SL} + \langle J_L \rangle_{SL}) / \mu_{SL} \quad (16)$$

$$\beta_{SL} = \langle J_s \rangle_{SL} / (\langle J_s \rangle_{SL} + \langle J_L \rangle_{SL}) \quad (17)$$

$$Re_s = d_s V_{ST} / \nu_L \quad (18)$$

である。 Fr_{SL} , Re_{SL} , β_{SL} は、それぞれ固液混合体としてのフルード数、レイノルズ数、体積流量比であり、 Re_s は粒子レイノルズ数、 ρ_{SL} および μ_{SL} はそれぞれ固液混合体の平均密度および粘性係数、 ν_L は液相の動粘性係数である。 ρ_{SL} は式(19)で与えられ、 μ_{SL} には、たとえば、Einstein⁽¹⁸⁾ による式(20)などがある。

$$\rho_{SL} = \langle a_s \rangle_{SL} \rho_s + (1 - \langle a_s \rangle_{SL}) \rho_L \quad (19)$$

$$\mu_{SL} = \mu_L (1 + 2.5 \langle a_s \rangle_{SL}) \quad (20)$$

ここで、 μ_L は液相の粘性係数である。本実験範囲では、 $\langle a_s \rangle_{SL}$ は小さいので、 $\rho_{SL} \approx \rho_L$, $\mu_{SL} \approx \mu_L$ として、計算を行った。

式(18)における d_s には各平均粒子径を、また、 V_{ST} の値には、式(2)の抗力係数 C_D に Clift ら⁽¹⁹⁾ の式(21)を代入して収束計算して求めた値を用いた。

$$C_D = \frac{24(1 + 0.15 Re_s^{0.687})}{Re_s} + \frac{0.42}{1 + 42500 Re_s^{1.16}} \quad (21)$$

次に $\langle a_G \rangle_{GL}$ の無次元整理について検討する。気液二相気泡流に関してその気相体積率を無次元整理したものに、たとえば、青木ら⁽²⁰⁾ による式(22)がある。

$$(1-x)(\rho_G/\rho_L)v^* \langle a_G \rangle_{GL}^2 \\ - \{(1-x)(\rho_G/\rho_L)(1 + kv^*) + x\} \langle a_G \rangle_{GL} + kx = 0 \quad (22)$$

ここで、 x はクオリティ、 ρ_G は気相密度、 v^* は気泡の相対速度(単一気泡の干渉終端速度 V_{GT})と液相体積流束 $\langle J_L \rangle_{GL}$ の比、 $k = 0.96$ である。式(22)において青木らは気泡の影響を気泡の相対速度を介して取り込んでいる。気泡流において気泡径はその気泡の上昇速度と密接な関係があるため、無次元整理を行う際、気泡径の陽関数形のほうが好ましいと考えられる。そのた

めここでは、気液二相気泡流と固液二相分散流の流動状況は類似していると仮定し、式(14)で示した固液二相流の固相体積率の整理式の関数形をそのまま使用し、 $\langle a_G \rangle_{GL}$ を無次元整理することにした。すなわち、まず、式(14)における添字 s を添字 G に変えて式(23)の関数形とした。

$$\langle a_G \rangle_{GL} = C Fr_{GL}^{m_1} Re_{GL}^{m_2} \beta_{GL}^{m_3} Re_G^{m_4} (1 - \rho_G/\rho_L)^{m_5} \quad (23)$$

ここで、 $Fr_{GL} = (\langle J_G \rangle_{GL} + \langle J_L \rangle_{GL}) / \sqrt{gD}$ (24)

$$Re_{GL} = D \rho_{GL} (\langle J_G \rangle_{GL} + \langle J_L \rangle_{GL}) / \mu_{GL} \quad (25)$$

$$\beta_{GL} = \langle J_G \rangle_{GL} / (\langle J_G \rangle_{GL} + \langle J_L \rangle_{GL}) \quad (26)$$

$$Re_G = d_G V_{GT} / \nu_L \quad (27)$$

である。 Fr_{GL} , Re_{GL} , β_{GL} は、気液混合体としてのフルード数、レイノルズ数、体積流量比であり、 Re_G は気泡レイノルズ数、 ρ_{GL} および μ_{GL} は、それぞれ気液混合体の平均密度および粘性係数である。 ρ_{GL} は式(28)で与えられ、 μ_{GL} には、気泡流に対して、たとえば Ishii ら⁽²¹⁾ による式(29)、均質流モデルに対しては Beattie ら⁽²²⁾ による式(30)などがある。

$$\rho_{GL} = \langle a_G \rangle_{GL} \rho_G + (1 - \langle a_G \rangle_{GL}) \rho_L \quad (28)$$

$$\mu_{GL} = \mu_L / (1 - \langle a_G \rangle_{GL}) \quad (29)$$

$$\mu_{GL} = \mu_G a_h + \mu_L (1 - a_h) (1 + 2.5 a_h) \quad (30)$$

ここで、 $a_h = 1 / [1 + \{(1/x - 1)(\rho_G/\rho_L)\}]$ (31)

μ_G は気相の粘性係数である。本実験範囲では $\langle a_G \rangle_{GL}$ および x は小さいので、 $\rho_{GL} \approx \rho_L$, $\mu_{GL} \approx \mu_L$ として計算を行った。次に、本実験の気液二相流の実験データを用いて各係数 C , $t_1 \sim t_5$ を以下のように決定した。

$$C = 0.108, t_1 = 0.0627, t_2 = 0.156,$$

$$t_3 = 0.969, t_4 = 0.0495, t_5 = -0.5$$

その際、 t_5 については式(2)と同様にして求められた式(32)に基づき、上昇方向を考慮して $t_5 = -0.5$ とした。

$$V_{GT} = \sqrt{4gd_G(1 - \rho_G/\rho_L)/(3C_D)} \quad (32)$$

式(27)における d_G に関しては、次のように検討して求めた値を用いた。気相を液相に混合する場合、世古口ら⁽²³⁾、芹澤ら⁽²⁴⁾、文字ら⁽²⁵⁾ が指摘しているように、各相流量が同じでも混合方式により気泡の形状・寸法は異なる。本装置の混合部は2章で述べたように多孔質管を用いた構造である。Koide らは気泡塔の下部に水平に置かれた多孔質板より生じる気泡径を、多孔質板の細孔を通る気相速度、表面張力、流体密度を考慮した無次元数により表している⁽²⁶⁾。そこでは、多孔質板表面上の液相速度はほとんど零なので、それによる効果は考慮されていない。しかし、本混合部では、多孔質円管表面に沿って流れる流動液相に、垂直方向

から気相を流入させて気泡を作製するので、Koide らの考えに多孔質円管内の液相速度および管径を考慮し、さらに固相が存在することの影響、すなわち固相体積流束、粒子径も考慮した無次元整理式を本実験データをもとに導いた。その結果を式(33)～(41)に示す。

$$d_c = d_{cGL} \left\{ (1 - k_1) \exp \left(\frac{\langle J_s \rangle / \langle J_T \rangle}{0.02} \right) + k_1 \right\} \dots (33)$$

$$d_{cGL} = k_2 \delta (We^{0.20} We_{in}^{-0.25})^{1/3} \dots (34)$$

$$k_1 = -1.68(d_s/D) + 0.885 \dots (35)$$

$$k_2 = 1.33 \times 10^4 Eo^{-0.907} \dots (36)$$

$$k_3 = -0.356 \log_{10} Eo + 1.01 \dots (37)$$

$$We = \rho_c u_c^2 \delta / \sigma \dots (38)$$

$$u_c = (\pi/4) D^2 \langle J_c \rangle_{in} / (\epsilon H) \dots (39)$$

$$We_{in} = \frac{\rho_L \langle J_L \rangle_{GL}^2 d_{cGL}^2}{\sigma \delta} + \frac{g(\rho_L - \rho_c) d_{cGL}^3}{\sigma \delta} \dots (40)$$

$$Eo = \rho_L D^2 g / \sigma \dots (41)$$

ここで、 d_{cGL} は気液二相気泡流における平均気泡径、 u_c は多孔質管の細孔を通過する気相速度、 H は多孔質管の外周側面積、 $\langle J_c \rangle_{in}$ は混合部入口での気相体積流束、 We はウェーバ数、 Eo はエトベス数、 σ は表面張力である。なお、添字 in は混合部入口での量を意味する。本式により本実験の d_c を標準偏差 8.91% で推算することができた。

また、式(27)の V_{GT} には、式(32)の C_D に Peebles-Garber⁽²⁷⁾ による式(42)を代入して収束計算した値を用いた。彼らは Re_c の大きさにより、四つの領域においてそれぞれ C_D を与えているが、本実験範囲では、式(42)に示す Region 3 での C_D を用いることになる。

$$\text{Region 3 : } 4.02 G^{-0.214} < Re_c < 3.10 G^{-0.250}$$

$$C_D = 0.0275 G Re_c^4 \dots (42)$$

$$\text{ここで、} G = g \mu_L / \rho_L \sigma^3 \dots (43)$$

G はガリレオ数である。なお、この $\langle a_s \rangle_{SL}$ 、 $\langle a_c \rangle_{GL}$ の計算方法と従来の相関式による推算結果などについては別途報告する。

以上のように、 $\langle a_s \rangle_{SL}$ と $\langle a_c \rangle_{GL}$ に影響を及ぼす無次元数について検討した。この $\langle a_s \rangle_{SL}$ と $\langle a_c \rangle_{GL}$ を用いて三相流における $\langle a_s \rangle$ と $\langle a_c \rangle$ を整理できたので、式(44)の関係より $\langle a_L \rangle$ を定めることができる。

$$\langle a_L \rangle = 1 - (\langle a_s \rangle + \langle a_c \rangle) \dots (44)$$

なお、 $\langle a_s \rangle$ 、 $\langle a_c \rangle$ 、 $\langle a_L \rangle$ が求まると、 $\bar{V}_s = \langle J_s \rangle / \langle a_s \rangle$ 、 $\bar{V}_c = \langle J_c \rangle / \langle a_c \rangle$ 、 $\bar{V}_L = \langle J_L \rangle / \langle a_L \rangle$ より、各相断面平均速度が計算できる。また、表 2 に、各種関係式を含めて、式(4)、(5)の適用範囲を示す。粘性係数、密度および表面張力に関して、それを変化させた実験を行っていないので、それらの影響については将来さらに検討する必要があるだろう。

表 2 式(4)、(5)の適用範囲

$Fr_{SL} : 0.281 - 2.30$	$Fr_{GL} : 0.281 - 2.29$
$Re_{SL} : 1.04 \times 10^4 - 5.24 \times 10^4$	$Re_{GL} : 1.04 \times 10^4 - 5.65 \times 10^4$
$Re_S : 175 - 1730$	$Re_G : 870 - 1160$
$\beta_S : 0 - 0.0741$	$\beta_G : 0 - 0.232$
$\beta_{SL} : 0 - 0.0741$	$\beta_{GL} : 0 - 0.232$

式(2)、式(4)～(10)、式(14)～(21)、式(23)～(44)を用いて各相体積率を推算した結果を、図 2、図 6～8 に実線で示した。本実験結果に対しては、当然のことながら本整理式は定性的にも定量的にもよく一致し、固相、気相および液相体積率をそれぞれ、 ± 10.8 、 ± 8.91 、 $\pm 0.397\%$ で推算することができる。本整理式と他の研究者による実験値との比較を当然行うべきであるが、現在までに行われている三相流の研究はほとんどがスラグ流領域におけるもので、本推算方法で比較検討できるような形で示されている気泡流領域の実験値は公表されていないようである。したがって、現時点では他の研究者による実験値との比較を行うことはできない。

なお、式(4)および式(5)を構成する無次元数の中に同一の因子が含まれているので、式(4)および式(5)において各無次元数を独立に変化させることは必ずしもできない。すなわち、ある無次元数の変化により、 $\langle a_s \rangle$ または $\langle a_c \rangle$ がどのように変化するかを論ずるときには注意が必要である。

また、本整理式は、三相気泡流において導出したものであり、適用範囲は気泡流領域に限られる。実験定数を限られた実験値より求めているので、その適用範囲はさらに多くの実験値との比較により検討されなければならないが、実験式の基本的考え方と形は妥当なものと考えられる。したがって、式(4)、(5)に示したように、三相流の固相体積率を固液二相流に気相が添加されたという立場、および三相流の気相体積率を気液二相流に固相が添加されたという立場でとらえているため、各流動様式に応じて式(4)、(5)における K_s および K_c を適正な関数形で与え、また $\langle a_s \rangle_{SL}$ および $\langle a_c \rangle_{GL}$ をその流動様式に応じた固相および気相体積率を表す式で与えると、各種三相流の各相体積率を推算することが可能である。すなわち、流路・流動条件をレイノルズ数、フルード数、ウェーバ数などを用いて区分し、この推算式に用いられている諸係数を決定し三相流全般に利用できる推算式を求める必要がある。本件の事例については別途報告する。

5. 結 言

固気液三相気泡流の体積率特性を明らかにすることを目的として、固体粒子に平均粒子径 1.15, 2.56, 4.16 mm, 密度が 2 270~2 400 kg/m³ のアルミナ・セラミックス球, 気相, 液相にそれぞれ常温・常圧の空気, 水を用い, 長さ約 10 m, 管内径 20.9, 30.8, 50.4 mm の 3 種類のアクリル製垂直円管を上昇する三相気泡流の各相体積率の測定を行い, 実験結果より各相体積率に及ぼす各相体積流束, 粒子径, 管径の影響を明らかにし, 本実験範囲において次の結果を得た。

(1) 今までの一連の研究^{(5)~(8)}で得られていた結論のうち, 「ある相の体積率は, その相の体積流束が大きいほど大きい。固相体積率および液相体積率は, 他の相の体積流束が大きいほど小さい。気相体積率は, 液相体積流束が大きいほど小さい。また, 粒子径が大きいほど, 固相体積率は大きく液相体積率は小さい」が本実験範囲においても確認された。

(2) しかし, 気相体積率は, 固相体積流束が大きいほど小さい場合と, 固相体積流束が大きいほど大きい場合がある。これは粒子径と気泡径の相対的な大きさによるもので, 粒子径が大きい場合には, 気泡が粒子の周りを回り込み, 気泡の上昇速度が小さくなるため, 気相体積率は大きくなるのである。

(3) 同一各相流量において, 管径が大きいほど固相体積率はわずかに大きい。D=20.9, 30.8 mm の場合, 気相体積率, 液相体積率は, それぞれほぼ同じで, D=50.4 mm の大口径の場合, それより気相体積率は大きく, 液相体積率は小さい。

(4) ついで, これらの実験結果に基づき, 体積率推算用無次元式を提案した。すなわち, (1)~(3)で述べた各相体積率の特性を考慮して, 三相流の気相体積流量比および固相体積流量比, 固液混合体および気液混合体としてのフルード数, レイノルズ数, 体積流量比, 粒子レイノルズ数, 気泡レイノルズ数, 密度比の無次元数を用いた各相体積率の推算式を提案した。各相の体積流束および密度, 粒子径, 気泡径, 管径, 重力の加速度, 気相および液相の動粘性係数および表面張力を既知量としたとき, 固相体積率は式(6), (8), (9), 式(14)~(20)と式(2), (21)を式(4)に代入することにより, また, 気相体積率は式(7), (8), (10)と式(23)~(31), 式(32), (42), (43)を式(5)に代入することにより求められる。液相体積率は式(44)より求められる。なお, 気泡径に関しては, 本装置の場合,

混合部に用いられている多孔質管の細孔径, 気孔率, 外周側面積および混合部入口での気相体積流束もさらに既知量として, 式(33)~(41)を用いて求めた。

研究に協力された当時学生牛尾雅之(現, 本学大学院 2 年), 小池定充(現, 松下電工), 馬場幸一(現, 東洋紡績), 越道 浩(現, ユニチカ), 吉岡克記(現, 住友電工), 泉 省吾(現, 石川島播磨重工)の諸氏に感謝する。また, 本研究の一部は関西電力(株)総合技術研究所の援助に負うものであることを記し, 謝意を表す。

文 献

- (1) 例えば, 植木・ほか 2 名, 採鉱と保安, 19-8(1973), 399.
- (2) 三井造船(株), 昭和 63 年度漁業新技術開発事業報告書, (1989), 全国近海かつお・まぐろ漁業協会.
- (3) 西田・ほか 2 名, 化学工学論文誌, 45-9(1981), 567.
- (4) 坂口, 機論, 54-503, B(1988), 1549.
- (5) 坂口・ほか 5 名, 機論, 53-487, B(1987), 1040.
- (6) Sakaguchi, T., ほか 5 名, *Proc. ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.* (1987), 373.
- (7) Sakaguchi T., ほか 3 名, *Proc. Jpn-U. S. Seminar Two-Phase Flow Dyn.*, (1988), B 4-1.
- (8) 坂口・ほか 3 名, 第 8 回混相流シンポジウム講演論文集, (1989), 41.
- (9) Zuber, N. and Findlay, J. A., *Trans. ASME, Ser. C*, 87-4(1965), 453.
- (10) 日本機械学会訳, アメリカ機械学会性能試験規約「計測の不確かさ」(1987), 17, 日本機械学会.
- (11) Engelmann, H. E., *Meerstech*, 9(1978), 115.
- (12) 坂口・ほか 3 名, 機論, B, 56-521(1990), 5.
- (13) Wallis, G. B., *One-dimensional Two-Phase Flow*, (1969), 93, McGraw-Hill Book Comp.
- (14) 日本原子力学会編, 原子炉における熱流動数値解析の現状, III(1988), Part 3, 30.
- (15) Hirao, Y. ほか 3 名, *Proc., 2nd Int. Topical Meet. Nucl. Power Plant Thermal Hydraul. Operat.*, Tokyo, (1986), 1-88.
- (16) Kataoka, I. and Ishii, M., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 30-9(1987), 1927.
- (17) Sakaguchi, T., ほか 6 名, *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics*, (1988), 1353, Elsevier Science Publishing.
- (18) Einstein, A., *Ann. Phys.*, 4(1906), 289 [文献(13)より引用].
- (19) Clift, R. and Gauvin, W. H., *Chemeca* '70, (1970), 14.
- (20) 青木・ほか 2 名, 機論, 31-224(1965), 588.
- (21) Ishii, M. and Chawla, T. C., *ANL*, 79-105(1979).
- (22) Beattie, D. R. and Whalley, P. B. *Int. J. Multiphase Flow*, 8-1(1982), 83.
- (23) 世古口・ほか 2 名, 機論, 40-333(1974), 1395.
- (24) 芹澤・ほか 4 名, 第 9 回混相流シンポジウム講演論文集, (1990), 9.
- (25) 文字・松井, 第 9 回混相流シンポジウム講演論文集, (1990), 13.
- (26) Koide, K. ほか 5 名, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 5-3(1972), 236.
- (27) Peebles, F. N. and Garber, H. J., *Chem. Eng. Prog.*, 49(1953), 88.