鉛直円管内粗大粒子系固気液三相スラグ流 における体積率と相速度特性に関する実験的研究^{*}

Volume Fractions and Phase Velocities of Gas-Liquid-Solid Three-Phase Slug Flow in a Vertical Pipe with Large Particles

坂口 忠 司^{**}
SAKAGUCHI Tadashi

楊 京 龍^{***}
YANG Jinglong

木 下 茂 生[†]
KINOSHITA Shigeo

津 上 弘 道^{††}
TSUGAMI Hiromichi

Abstract Characteristics of the volume fraction and the phase velocity of gas-liquid-solid three-phase slug flow with quite large particles in a vertical pipe have been studied experimentally. Air, tap water and aluminum-ceramic balls of mean diameter 24.8mm were flowed in a vertical pipe with 30.8mm inside diameter and about 7.5m in height. The volume fraction of each phase is measured by use of the quick closing valve method and the image processing method based on VTR images, jointly. The same following results that have been obtained in the case of gas-liquid-solid three-phase bubble flow and slug flow with small particles are recognized even in this gas-liquid-solid three-phase slug flow with quite large particles. Each volume fraction of three phases increases with increasing the volumetric flux of each corresponding phase like in the case of two-phase flow. When only the volumetric flux of gas phase or liquid phase increases, the volume fractions of the other two phases decrease. However, if only the volumetric flux of solid phase increases, the volume fraction of gas phase or liquid phase increases in some flow conditions. The equation to estimate the gas phase velocity can be expressed by a linear function of total volumetric flux with small deviation, but the influence of volumetric flux of each phase must be incorporated to express the equations to estimate the velocities of liquid phase and of solid phase because the experimental data distribute with large deviations from linear functions of total volumetric flux.

Keywords : Volume Fraction, Phase Velocity, Gas-Liquid-Solid Three-Phase Slug Flow, Vertical Pipe, Large Particle

1. 緒 言

粗大粒子系固気液三相スラグ流は、鏝のエアリフト方式による荷役、浚渫土砂と土石の輸送などで見られ、大気泡と粗大粒子の相互干渉が特徴的現象の一つである。既に粗大粒子系固気液三相ス

ラグ流の流動状況については報告した[1-3]。本報では、巨視的物理量である体積率の実験結果と体積流束を体積率で除して得られる相速度について述べる。その際、基礎二相流である気液二相スラグ流に第3番目の相として固相が添加された影

* 1999.1.12 受付

** 神戸大学名誉教授 〒651-2276 神戸市西区春日台3-1,2-703
TEL(078)961-2245 E-mail: t-sakaguchi@mve.biglobe.ne.jp

*** 中国清華大学 † クボタ †† 三菱電機株式会社

響とその固相が粗大粒子であることの効果、もう一つの基礎二相流である粗大粒子系固液二相流に第3番目の相として添加された気相が主として大気泡を形成し、流動様式がスラグ流であることに注目して考察を行ない、基礎二相流との共通点と三相スラグ流固有の特性について報告する。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の主要部は、試験部、各相供給機器と配管系統、各相混合部、各相分離部と計測機器系統である。Fig. 1 にその概要を示す。

試験部⑬は、内径 $D=30.3\text{mm}$ 、全長約 7.5m 、三相流部長さ約 6.8m の透明アクリル樹脂製鉛直円管である。流体として常温・常圧の水と空気、固相として平均直径 $d_s=24.8\text{mm}$ 、密度 $\rho_s=2370\text{kg/m}^3$ の親水性のセラミック製球形固体粒子を用いた。その水中自由沈降終速度は 0.899m/s 、粒子レイノルズ数は22100、抗力係数は0.461である。また本試験部における水中管干渉沈降終速度は 0.168m/s である。45度間隔の四方向で計測した直径の平均値からの最大偏差と最小偏差で表した球形度は、 -1.52 から 1.33% である。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

粗大粒子供給用下降管からの粗大粒子を、回転式粗大粒子供給装置③を用いて固液混合部⑥から試験部に供給する。主タンクに蓄えた水を、試験部下方のモノポンプ①-aによってノズル②から固液混合部を介して、試験部に供給する。固液混合部の上部に余剰の液相を試験部外へ排出する部分がある。その上部に設置した気相混合部⑦を通して圧縮機からの空気を試験部に供給する。

従来、小粒子の試験部への供給には、小粒子を主タンク内で予め液相と混合して固液混合体とし、これをスクリュウ式容積型のモノポンプを用いて試験部に輸送するという方法[4]を用いた。しかし、ここで使用した固体粒子の寸法が非常に大きいため、同じ方法を利用することは不可能である。また粗大粒子を時間的に規則正しく試験部へ供給しないと、固相体積流量が時間的に変動し、その度合いは固体粒子の大きい程大きくなる。以上のことを考慮して、粗大粒子を等時間間隔で一個ずつ試験部に送るために、ステップ状回転式粗大粒子供給装置を新たに試作した。Fig. 2 に、その概念図を示す。ステップ状回転式粗大粒子供給装置の主要部は、同一円周上に等間隔で直径 25.2mm の穴を8個開けた円盤である。この穴あき円盤を、粗大粒子供給用下降管⑨の出口と固液混合部の間に設置した。一時停止状態の穴あき円盤中の一つの穴に、粗大粒子供給用下降管から粗大粒子を一個受け入れる。この間、先に順次受け入れた粗大粒子の内、固液混合部のところに運ばれて来ている粗大粒子一個を試験部の方へ送り出す。ついで円盤を一つ穴分だけ回転させ、粗大粒子の受け入れと、送り出しを行う。この操作を順次繰り返す。一定の周期で粗大粒子を試験部へ供給する。そのさい、これらの各操作における時間間隔を、規定値に設定しなければならない。これを実現するために、ステッピングモータ④を使用して、穴あき円盤に回転-停止-一回転という周期的断続動作を行わせた。固相体積流束 $\langle J_s \rangle$ (固相体積流量/管断面積)を、ステッピングモータの回転数および待機時間によって調整し、それらの値と粗大粒子の直径から求めた。

液相体積流束 $\langle J_L \rangle$ を、モノポンプの回転数によって調整し、受止法で測定した。

圧縮機②③によって $0.9\text{--}1.0\text{MPa}$ に圧縮した空気を冷却器⑱、エアフィルタ⑲、減圧弁⑰、気相流量設定用臨界ノズル⑯を介し、気相混合部から

Fig. 2 Feeder of large particles

試験部へ供給した。気相混合部は、試験部と同一内径、肉厚2.5mmのポリメチルメタアクリレート製焼結体多孔質管を内筒とする二重円筒式のものである。試験部への供給気相体積流速をガスメータ並びに臨界ノズル圧力計システムの両方法を用いて測定した。なお、本報で使用している気相体積流速 $\langle J_G \rangle$ の値は、試験部の管壁上の6箇所に取付けた静圧タップ⑭とマノメータによって測定された管内の静圧分布から算出された体積率測定区間の中心位置の静圧に対応する値である。

試験部を上昇した固気液三相スラグ流中の空気は、大気開放の気液分離部で大気に解放される。その後粗大粒子と水は固液分離部⑩で分離され、粗大粒子は粗大粒子供給用下降管に入り、一方水は主タンクに戻り、試験部へと送られる。

本研究で用いているような粗大粒子を含む混相流の時空間平均体積率の測定に対して、従来から小粒子を含む混相流に対して用いていた回転式締切弁④を用いた場合、弁が粗大粒子を噛み込んで破損する危険性がある。したがって、時空間平均気相体積率の測定には、Fig. 3に示す平板型急閉締切弁法を、固相体積率の測定には、ビデオ画像処理法を用いた。そして両測定値から液相体積

Fig. 3 Plate type quick-closing valve

率を求めた。2個の平板型急閉締切弁⑫の流動軸方向間隔は1.67mである。弁の主要部は、厚さ2mmのステンレス製のスライド板とそれを作動させる空気圧シリンダである。

なお、流動軸方向の流れの発達状況を、3台の8ミリビデオカメラ⑪の映像によって観察し、最下流部に位置する体積率測定部の最下部において流れが、完全に発達していることを確認した。

本実験範囲は、気相体積流速 $\langle J_G \rangle = 0 - 1.02$ m/s、液相体積流速 $\langle J_L \rangle = 0.591 - 1.01$ m/s、固相体積流速 $\langle J_S \rangle = 0 - 0.0158$ m/sである。

3. 時空間平均体積率特性

平板型急閉締切弁法と画像処理法を併用して求めた粗大粒子系固気液三相スラグ流における時空間平均各相体積率特性を、Fig. 4に基づいて説明する。図中の各印は、実験値を表す。各線は、端数のない値の各体積流速毎の回帰線である。これらは、各実験値の各相体積流速が必ずしも端数のない値でないため、これらから内挿して求めた値に基づいて得られた[5]。気液二相スラグ流に対応する状態を細線で、本実験条件中で最大の固相体積流速である $\langle J_S \rangle = 0.0158$ m/sの状態を太線で表し、固相体積流速の効果を示した。

各基礎二相流において、一方の相(ここでは自相と呼ぶ)の体積流速のみを増加させ、他の一相(他相と呼ぶ)の体積流速を一定に保持しておく、自相の体積率は増加し、他相の体積率は減少している[6]。三相流では、三種類の体積流速と体積率の関係を考察しなければならない。そのために、視点として、三相の内の二相を抽出し、これを仮

Fig.4 Volume fractions of gas phase, liquid phase and solid phase of basic two-phase flows and three phase flows

想的に一相と見なし、残りの一相とで二相流を構成するとして、従来の二相流との比較等の考察をする。まず固液両相(まとめて他相と呼ぶ)の体積流束を一定として、気相体積流束(自相と呼ぶ)を増加させると、気相体積率は増加している。同様に、固気両相あるいは気液両相の体積流束を一定として、液相あるいは固相の体積流束を増加させると、液相あるいは固相の体積率は増加している。これは、図中に示した小粒子系固気液三相スラグ流[4,5]においても認められる共通の特性である。

以上より、他相の体積流束を一定に保持した状態で自相の体積流束のみを増加させると、自相の体積率が增加することが、二相流はもとより三相流でも成立するとの結論を得た。

ついで、自相の体積流束の増加に対する他相の体積率の変化について検討する。気液二相スラグ流に粗大粒子を添加したとき、 $\langle \alpha_G \rangle - \langle J_T \rangle$ 並びに $\langle \alpha_L \rangle - \langle J_T \rangle$ 線図における $\langle J_S \rangle$ 一定の曲線群は、並行するだけでなく、交差する。この交差の存在は、小粒子系固気液三相スラグ流でも認められている[4,5]。ただし、両実験範囲と

固体粒子径が異なるため、交差している場合の数や交差点の位置、交差前後の体積率の値すなわち曲線の上下の間隔などは異なっている。

他相である固液両相あるいは固気両相の体積流束を一定として、自相である気相体積流束、あるいは液相体積流束を増加させたとき、他相である固液両相の各体積率、あるいは固気両相の各体積率はいずれも減少している。しかし、気液両相の体積流束を一定として、固相の体積流束を増加させると、気液両相の各体積率は、ほとんどの場合いずれも減少するが、片方の体積率が增加する場合もある。この場合、気相体積率が增加すると液相体積率は減少し、両体積率の固相体積流束に対する増減の傾向は、逆関係になっているようである。本実験範囲においては、 $\langle J_L \rangle = 1.00 \text{ m/s}$ で、 $\langle J_G \rangle = 0.750, 1.00 \text{ m/s}$ の場合に、 $\langle \alpha_G \rangle$ は増加し、 $\langle J_L \rangle = 0.600 \text{ m/s}$ で、 $\langle J_G \rangle = 0.500, 0.750 \text{ m/s}$ の場合に、 $\langle \alpha_L \rangle$ が増加している。

小粒子系固気液三相スラグ流において、気液両相の体積流束を一定として、固相体積流束を増加させたとき、液相体積率は多くの場合減少し、中には増加する場合も認められたが、気相体積率は、増加するまでには至ってない[4,5,7]。また、小粒子系固気液三相気泡流において、気液両相の体積流束を一定に保持して、固相体積流束のみを増加させたとき、固体粒子径が1.15mmと小さい場合には、気相体積率は減少することが多いが、固体粒子径が4.16mmとやや大きい場合には、気相体積率が增加する場合が多く認められている[8,9]。

以上より、ここに提示した固気液三相流において、気液両相の体積流束を一定として、固相体積流束のみを増加させたとき、他の二相の体積率の内一方の体積率が增加する場合もあり、それが固体粒子径の大きいほど現れやすいことが、固気液三相流の体積率特性の注目すべき結果として得られた。なお、その他の場合には、二相流と同じように、他相の体積流束を一定として、自相の体積流束を増加させたとき、他相の両体積率はいずれも減少するとの結論を得た。

4. 平均相速度特性

混相流において、体積率の推算式を導出する際、Fig. 4 に示される複雑な特性を示す体積率の曲線群を扱うより、Fig. 5 から 8 に示されている実験値が直線で表される各相の平均相速度 $\bar{V}_G$ 、 $\bar{V}_L$ 、

$\bar{V}_s$ と全体積流速 $\langle J_T \rangle$ の関係を対象とするのが常套手段である[10,11]。図中には、実験値以外に回帰線とその回帰式が、式(1)で表される偏差指標と共に示されている。

$$ID_E = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{\text{estimated value} - \text{experimental value}}{\text{experimental value}} \right)^2} \times 100\% \quad (1)$$

従来からドリフト流速モデルによると、これら平均相速度の値は、全体積流速 $\langle J_T \rangle$ の一次関数で、次式のように表される。

$$\bar{V}_G = C_{OG} \langle J_T \rangle + \bar{V}_{GJ} \quad (2)$$

$$\bar{V}_S = C_{OS} \langle J_T \rangle + \bar{V}_{SJ} \quad (3)$$

ここで、ドリフト速度 $\bar{V}_{GJ}$ 、 $\bar{V}_{SJ}$ は、気相あるいは固相の自由ないし干渉上昇あるいは沈降終速度で与えられるとしている場合が多い。これらの値は、管路形状・寸法以外に、気液二相流では流動様式と物性値、固液二相流では、固体粒子径と物性値が与えられると定数となる。また分布パラメータの C_{OG} 、 C_{OS} には、1.0から1.2の値が与えられることが多い[11,12]。したがって、このような条件下では、気相並びに固相の平均相速度は、全体積流速に対して、一本の直線で表される。

ところが、既に報告されているように、 $\bar{V}_G$ 、

Fig.5 Mean velocities of gas phase of gas-liquid two phase flow and of solid phase of liquid-solid two phase flow

$\bar{V}_s$ 等は、各相体積流速の関数となっていて、平均相速度に及ぼす、各相体積流速の効果は厳密には同じでない。したがって、二相流の平均相速度を、全体積流速の一次関数で表すことに加えて、各相体積流速の効果さをさらに考慮する方がよい[13]。

本実験においても、Fig. 5 上部に示されているように、気液二相スラグ流の $\bar{V}_G$ における $\langle J_G \rangle$ と $\langle J_L \rangle$ をパラメータとする線は交差し、四辺形を構成している。同図下部に示されている固液二相流における $\bar{V}_s$ の各実験値は、一本の直線上に分布しているようにも見えるが、 $\langle J_s \rangle$ の変化量が小さいために、その差が認めにくいだけで、液相を連続相とし粗大粒子を不連続相としているので、固相体積流速の変化量が大きければ、同じように大気泡が不連続相である気液二相スラグ流の場合と同じ特性を示すと思われる。

以下に、各固相体積流速 $\langle J_s \rangle$ ごとに示したFig. 6から8を用いて、基準二相流に第三番目の相を加えた場合の相速度特性について考察する。

4. 1 平均気相速度 $\bar{V}_G$ の特性

平均気相速度 $\bar{V}_G$ の実験値を $\langle J_T \rangle$ に対して描いた場合、実験値は一本の線のまわりに小さい偏差で分布し、いずれの固相体積流速の場合におい

Fig.6 Mean velocities of gas phase, liquid phase and solid phase of gas-liquid-solid three phase slug flow ($\langle J_s \rangle = 0.00325$)

Fig.7 Mean velocities of gas phase, liquid phase and solid phase of gas-liquid-solid three phase slug flow ($\langle J_s \rangle = 0.00850$)

Fig.8 Mean velocities of gas phase, liquid phase and solid phase of gas-liquid-solid three phase slug flow ($\langle J_s \rangle = 0.0158$ m/s)

ても、 $\langle J_T \rangle$ の大きいほど $\bar{V}_G$ は大きい。したがって、分布パラメータとドリフト速度を定数と見た場合のドリフト流速モデルから導かれる、 $\langle J_T \rangle$ の一次関数の形の相関式で、実験値を評価することができるだろう。ただし、これらの実験値の分布状態を細かく見ると、各相体積流速ごとの実験値は、各々異なる線上にある。各実験値のこれらの線からの偏差指標は、上記の全実験値を表す一本の線からの偏差指標に比べると小さい。すなわち、 $\bar{V}_G$ に及ぼす各相体積流速の効果が異なるので、より精密な相関式が必要な場合、 $\bar{V}_G$ を単に $\langle J_T \rangle$ のみの関数で表すより、各相体積流速の重みを何らかの形で考慮する必要がある。

$\langle J_L \rangle$ と $\langle J_s \rangle$ が一定の場合あるいは $\langle J_s \rangle$ と $\langle J_G \rangle$ が一定の場合の $\bar{V}_G$ の線の $\langle J_T \rangle$ に対する勾配は異なるが、 $\bar{V}_G$ はいずれも $\langle J_G \rangle$ あるいは $\langle J_L \rangle$ の増加と共に増加している。Fig. 6から8に示す $\bar{V}_G$ と $\langle J_T \rangle$ の相関図における $\langle J_G \rangle$ 一定の線と $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配と固相体積流速との関係をFig. 9に示した。固相体積流速の増加に対して、 $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配は、それほど変化していないが、 $\langle J_G \rangle$ 一定の線の勾配は、 $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配より大きな値から急に小さくなって、 $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配より小さくなり、両者の大小関係は、途中で逆転している。すなわち、 $\langle J_s \rangle$ の大きな場合には、 $\langle J_G \rangle$ を単位量増加させた場合の方が、 $\langle J_L \rangle$ を単位量増加させた場合の方よりも、 $\bar{V}_G$ は大きく増加し、 $\langle J_s \rangle$ の小さな場合には、逆になることが分かる。小粒子系固気液三相スラグ流の実験データ[4,5]を検討したところ、同じ特性が認められたので、これは小粒子系並びに粗大粒子系固気液三相スラグ流共通の特性であると言える。

4. 2 平均液相速度 $\bar{V}_L$ の特性

Fig. 6から8に示すように、 $\bar{V}_L$ の実験値は、 $\langle J_T \rangle$ の大きいほど大きい。また、 $\langle J_L \rangle$ と $\langle J_s \rangle$ が一定の場合あるいは $\langle J_s \rangle$ と $\langle J_G \rangle$ が一定の場合、 $\bar{V}_L$ は、いずれも $\langle J_G \rangle$ あるいは $\langle J_L \rangle$ の増加と共に増加している。しかし、実験値は、 $\bar{V}_G$ の場合とは異なり、一本の線のまわりに小さい偏差で分布しているとはみなせない。各相体積流速ごとの実験値は各々異なる線上に分布している。そこでの偏差指標は、上記の全実験値を一本の線で表した場合の偏差指標よりかなり小さい。

$\bar{V}_L$ の線における $\langle J_G \rangle$ 一定の線の勾配と、

Fig. 9 Gradients of straight line of gas-phase velocity, liquid-phase velocity and solid-phase velocity against volumetric flux of solid phase

$\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配は必ずしも一致していない。 $\langle J_G \rangle$ 一定の線群と $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配を比較すると、Fig. 9 に示すように、固相体積流速の変化にかかわらず、 $\overline{V}_L$ の $\langle J_G \rangle$ 一定の線の勾配の方が、 $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配より大きい。これと同じ傾向は、小粒子系固気液三相スラグ流においても認められる。これは、固体粒子の添加に拘わらず、 $\overline{V}_L$ は、自相の体積流速 $\langle J_L \rangle$ の増加に対して、より大きく増加し、他相の体積流速 $\langle J_G \rangle$ の増加に対しては、それほど大きく増加しないことを意味している。この相互関係特性は、 $\overline{V}_G$ の場合とは異なっている。

4. 3 平均固相速度 $\overline{V}_s$ の特性

$\overline{V}_s$ の実験値は、一般に $\langle J_T \rangle$ の大きいほど大きい。 $\langle J_L \rangle$ と $\langle J_S \rangle$ が一定の場合あるいは $\langle J_S \rangle$ と $\langle J_G \rangle$ が一定の場合、 $\overline{V}_s$ は、いずれも $\langle J_G \rangle$ あるいは $\langle J_L \rangle$ の増加と共に増加している。 $\langle J_G \rangle$ と $\langle J_L \rangle$ が一定の場合、 $\overline{V}_s$ は、わずかに $\langle J_S \rangle$ と共に増加している。

粗大粒子系固液二相流の場合、固相体積流速の変化幅が小さいため、 $\overline{V}_s$ の実験値は、一本の線上に並んでいるが、固気液三相スラグ流の場合、

気液各相体積流速ごとの各一本の線上にある。また、固相体積流速ごとの実験値は、気液各相体積流速ごとの実験値を結んだ線とは異なる方向に分布しているようで、 $\overline{V}_s$ に及ぼす各相体積流速による効果が、必ずしも同じでないことがわかる。

Fig. 9 に示すように、同一固相体積流速の条件のもとで、 $\langle J_G \rangle$ 一定の線の勾配のほうが、 $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配より一般に大きい。したがって、単位量の $\langle J_L \rangle$ の増加による $\overline{V}_s$ の増加量のほうが、単位量の $\langle J_G \rangle$ の増加による増加量より大きい。すなわち、 $\overline{V}_s$ は、 $\langle J_G \rangle$ よりも、 $\langle J_L \rangle$ によって大きく増加する。この傾向は、平均液相速度の場合と同じように、固相体積流速が増加しても変わらない。また、平均固相速度の $\langle J_G \rangle$ 一定の線の勾配のほうが、 $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配より一般に大きいというこの特性は、小粒子系固気液三相スラグ流においても認められる[4,5]。

固相体積流速の増加による平均気相速度の勾配の変化特性が、平均液相速度や平均固相速度の勾配特性と異なるのは、以下の理由による。液相体積流速一定における勾配は固相体積流速の増加に対してほとんど変化していないが、気相体積流速一定における各相平均相速度の勾配は比較的大きく変化している。中でも平均気相速度の勾配は、他の二相の平均相速度の勾配に比べて極めて大きく変化している。これに加えて、液相体積流速一定における平均気相速度の勾配の値が大きくて、気相体積流速一定における値と同程度であることによるとと思われる。

このように、気液二相スラグ流に分散相である固相体積流速の添加によってもたらされる相速度並びに体積率に及ぼす効果が、連続相である液相の平均相速度並びに液相体積率よりも、分散相である気相の平均相速度並びに気相体積率に強く現れている。ここに粗大粒子と大気泡との差が原因として現れると思われたが、小粒子系固気液三相スラグ流においても同様の定性的特性が認められたので、この特性は、気相と固相の差によるものと思われる。小粒子と粗大粒子の差は、定量的特性として現れるようである。すなわち、粗大粒子系固気液三相スラグ流には、大気泡の粗大粒子による崩壊と大気泡への回復、粗大粒子の大気泡中の降下などと、それによって誘起される多くの特有の特性が存在している。また、粗大粒子と大気泡が共に管断面を閉塞するほどに大きいという共

通性と、その液相に対する相対速度が逆方向になり界面における液相との関係が異なるなどの相違性に関し、別報[3]で概説したが、さらにスラグ特性として詳細な報告をする予定である。

5. 結 論

鉛直円管内をほとんど閉鎖するほどに大きな固体粒子と大気泡が流動する粗大粒子系固気液三相スラグ流の体積率と相速度特性を実験的に研究し、以下に示す諸結果を得た。これらは小粒子系固気液三相気泡流並びにスラグ流で得られていた研究成果で、この領域においても認められることが明らかとなり、その適用範囲が広がった。

(1) 三相流において、自相以外の他の二相を二相流における他相と見なすと、この他相の体積流束を一定に保持した状態で自相の体積流束のみを増加(減少)させると、自相の体積率が増加(減少)する。二相流において認められていた特性が、粗大粒子系固気液三相スラグ流でも成立する。

(2) 固気液三相流において、気液両相の体積流束を一定として、固相体積流束のみを増加させたとき、他の二相の体積率の内一方の体積率が增加する場合もある。これは、固気液三相流の体積率特性の注目すべき結果である。この現象が、粗大粒子系固気液三相スラグ流でも、認められた。

(3) 粗大粒子系固気液三相スラグ流においても、各相の平均相速度は、 $\langle J_T \rangle$ に対して異なる特性を示す。すなわち、 $\overline{V}_G - \langle J_T \rangle$ 線図において、 $\overline{V}_G$ の実験値は、一本の線のまわりに小さい偏差で分布しているので、 $\langle J_T \rangle$ の一次関数の形の相関式で、実験値を評価することができるだろう。しかし、 $\overline{V}_L$ 並びに $\overline{V}_S$ の実験値は、かなりばらつき、特性が異なっているので、それらの相関式を提示する際には、各相体積流束の重みを何らかの形で考慮する方が好ましい。

(4) 粗大粒子系固気液三相スラグ流においても、気相平均相速度の $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配は、固相体積流束の増加に対して、それほど変化していないが、 $\langle J_G \rangle$ 一定の線の勾配は、 $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配より大きな値から急に小さくなって、 $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配より小さくなり、両者の大小関係は、途中で逆転している。しかし、液相平均相速度並びに固相平均相速度の $\langle J_G \rangle$ 一定の線の勾配は、常に $\langle J_L \rangle$ 一定の線の勾配より大きく、途中で逆転することはない。

(5) 気液二相スラグ流に分散相である固相体積流束の添加並びに増加によってもたらされる相速度並びに体積率に及ぼす効果は、連続相である液相の平均相速度並びに液相体積率よりも、分散相である気相の平均相速度並びに気相体積率に強く現れている。

なお、ドリフト流束モデルに基づく推算式が、万全で無いことを考えると、相速度と体積率のより高い精度の推算式を提示するために、ドリフト流束モデル等の改良、その他の新モデルの提案が期待される。

謝辞 著者らは、本実験に参加された当時学生南基樹君、秋山靖雄君に感謝いたします。

参考文献

- [1] 坂口忠司ほか、鉛直管内固気液三相流の流動状況(第1報、基礎流れの流動状況)、混相流、Vol.13, No.3, 246-254(1999)。
- [2] 坂口忠司ほか、鉛直管内固気液三相流の流動状況(第2報、固気液三相気泡流の流動状況)、混相流、Vol.13, No.4に掲載予定。
- [3] 坂口忠司ほか、鉛直管内固気液三相流の流動状況(第3報、固気液三相スラグ流の流動状況)、混相流、Vol.13, No.4に掲載予定。
- [4] Sakaguchi, T., et al., Volumetric Fractions and Phase Velocities of Gas-Liquid-Solid Three Phase Flow in Vertical Pipes, Proc. German-Japanese Sym. on Multi-Phase Flow, (1994), 451.
- [5] 南川久人、鉛直管内固気液三相スラグ流の流動特性に関する研究、神戸大学博士論文(1997)。
- [6] 赤川浩爾、気液二相流、コロナ社、(1974)。
- [7] 加藤洋治ほか、固体粒子用気泡ポンプの研究、機論(第2部)、40-335、(1974)、1974。
- [8] 坂口忠司ら、垂直管内固気液三相気泡流の体積率に関する研究、機論B、57-542(1991)、11。
- [9] 赤對秀明、鉛直円管内固気液三相気泡流に関する研究、神戸大学博士論文(1995)。
- [10] Zuber, N. and Findlay, J. A., Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems, Trans. ASME, J. Heat Transf., 87-4(1965), 453.
- [11] Giot, M., 7.2 Three-Phase Flow, Handbook of Multiphase Systems, Ed. by Hetsroni, G., Hemisphere-McGraw-Hill, (1982), 7-29.
- [12] Govier, G. W. and Aziz, K., The Flow of Complex Mixtures in Pipes, Van Nostrand Reinhold Company, (1972)。
- [13] 坂口忠司他、固気液三相流における各相体積率の推算法、機論B、53-487(1987)、1040。