混入微細粒子が鉛直管内気液二相スラグ流動に及ぼす影響*

南川 久人^{*1}, 赤 対 秀 明^{*2}, 内 藤 悦 郎^{*3}Effect of Mixed Fine Particles on the Characteristics of Gas-Liquid
Two-Phase Slug Flow in a Vertical PipeHisato MINAGAWA^{*4}, Hideaki SHAKUTSUI and Etsuro NAITO^{*4} Department of Mechanical Systems Engineering, The University of Shiga Prefecture,
2500 Hassaka, Hikone-shi, Shiga, 522-8533 Japan

Among the recent measuring methods of multiphase flows, there are some methods in which we must mix fine particles into fluid as tracer or scattering particles; for example, LDV, PIV and some methods using ultrasonic sound. The effect of fine particles mixed in on the flow characteristics is, however, not examined in detail. Therefore, in this study, we measured some parameters to investigate the effect of fine particles mixed into gas-liquid two-phase slug flows in a vertical pipe. Polyethylene particles of 10.6 and 160 μm mean diameter were used. The effects of particle mixing on average void fraction, large bubble and slug length, large bubble rising velocity and shape are discussed.

Key Words: Gas-Liquid Two-Phase Slug Flow, Tracer Particles, Scattering Particles, Void Fraction, Shape of Large Bubbles, Length of Large Bubbles and Liquid Slugs

1. 緒 言

近年, 流量計測法がレーザ光や超音波を用いることにより急速に進展し, 各種現象の解明に大きく寄与している. 混相流工学の分野も例外ではなく, LDV 等のレーザによる散乱光を用いる方法, PIV, PTV 等の画像計測法⁽¹⁾, 超音波のドップラ効果を利用した UVP⁽²⁾等が各種混相流に適用され, 顕著な成果を挙げている. ところで, ここにあげた全ての計測法において, 使用流体を微細粒子(トレーサないしは散乱粒子)によりシーディングする必要がある場合が多い. 実際の計測では平均径数 μm ~数百 μm の微細粒子が, 混入されている場合が多い⁽³⁾⁻⁽⁹⁾が, どのような粒子をどのような濃度で用いたかを記載していないレポートも多く見られる. このことからわかるように, 多くの場合において, これら微細粒子によるシーディングの影響はほぼ無視できるものとして扱われている. しかし, その流れに及ぼす影響については, 十分な知見が得られていないのが実状である. 特に, 気液界面を持つ気液系混相流の場合, 気液界面に及ぼす粒子の影響により, 流れが

ミクロ的からマクロ的な影響を受ける可能性は十分にあり, 計測者はその影響の度合いを把握しておく必要があることはいうまでもない. そこで, 本研究ではまず, 気液二相流において, 比較的頻繁に見られる鉛直管内の気液二相スラグ流を対象に, 粒子として平均粒子径 10.6 並びに 160 μm のポリエチレン製球状粒子を用い, その混入量を変化させながら, ボイド率並びに大気泡長さや大気泡の形状等のスラグ特性量に対してどのような影響を及ぼすかを調べた. 粒子濃度としては, 実際の計測に用いられる希薄な体積濃度(~0.05%)を対象とした. なお, 本研究での一連の実験によって得られるデータは, 微細粒子系固気液三相スラグ流⁽¹⁰⁾の基礎データであることも併記しておく.

2. 混相流の計測に用いられている粒子の例

混相流計測で実際に用いられた粒子の例(主に液相中に混入されるもの)を表1に示す⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾. 平均粒子径数 μm ~数百 μm の微細粒子が混入されている. LDV や UVP では比較的小さい, PTV では比較的大きい粒子が使われる場合が多い. 一方, 粒子の混入濃度に関しては, ほとんどのレポートで, 記述が見あたらない. 必要以上に混入することは考えられないので, 一般的には, 体積濃度でせいぜい 0.1%以

* 原稿受付 2002年8月9日.

^{*1} 正員, 滋賀県立大学工学部(☎ 522-8533 彦根市八坂町 2500).^{*2} 正員, 神戸市立工業高等専門学校(☎ 651-2194 神戸市西区 学園東町 1-3).^{*3} 正員, 愛知工科大学工学部(☎ 443-0047 蒲郡市西迫町馬乗 50-2).

E-mail: minagawa@mech.usp.ac.jp

Table 1 Examples of tracer or scattering particles used in measurements for multiphase flows

Method	Material	Diameter
LDV	Polystyrene	$0.557\mu\text{m}^{(3)}$
	Glass	$30\text{--}40\mu\text{m}^{(4)}$
PIV	Titanium oxide (surface)	$100\mu\text{m}^{(5)}$
	SiO ₂ (porous type)	$3\mu\text{m}(\text{average})^{(6)}$
PTV	Polymer (porous type)	$200\text{--}600\mu\text{m}^{(7)}$
UVP	Polyethylene	$10\text{--}160\mu\text{m}^{(8)}$
	Nylon	$10\mu\text{m}(\text{average})^{(9)}$

内の希薄な濃度が用いられているものと考えられる。

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置 実験装置の概略図を図1に示す。流体には気相として空気、液相として水（水道水）を用いた。貯水タンクに、恒温水循環装置を設置した。これにより、水温を $20\pm 1^\circ\text{C}$ に保った。水中には平均粒子径 $10.6\mu\text{m}$ 並びに $160\mu\text{m}$ のポリエチレン製球状粒子を逐次、均一に分散するように注意しながら混入した。この際、アルコールや界面活性剤等はいっさい使用しなかった。

貯水タンクの水はモノポンプにより流量が調整され、試験部へと送られる。空気はコンプレッサにて圧縮されたあとクーラにより冷却され、フィルタを通り、水分・油分が除去される。空気はレギュレータバルブと二種類の臨界ノズルを経た後試験部に送られる。空気と水は、気液混合器にて混合され、その前後を細管の束にて整流している。気液各相の体積流速 $\langle U \rangle$, $\langle U_L \rangle$ はともに $0.30\text{m/s} \pm 3\%$ に固定した。測定区間は気液混合器の下流 1650mm にあり、内径は 20.0mm の円管で、内部の流動状態を屈折の影響無しに観察できるように外形のみ矩形とした透明アクリル製のパイプを用いた。

実験に用いた平均粒子径 $10.6\mu\text{m}$ 並びに $160\mu\text{m}$ の粒子は、三菱精化(株)製真球状粉末樹脂ポリエチレン製球状粒子で、それぞれグレード CL-2080 並びに CL-2507 である。粒度分布はそれぞれ $5\sim 25$, $75\sim 250\mu\text{m}$ の粒子が 95% を越えるほぼ正規分布、密度はともに 918kg/m^3 である⁽¹¹⁾。

3.2 平均ボイド率の測定法 試験部には、瞬時体積平均ボイド率を測定するために、二つの急閉締め切り弁を設置した。これにより、測定部分の 955mm の区間を瞬時にかつ同時に締め切ることができる。同じ条件での締め切りの回数は、玉井ら⁽¹²⁾の研究にならい、その標準偏差と誤差率によって測定回数の十分性を判断した。まずそれぞれの設定条件に対して最低 15 回のボイド率測定を行い、それ

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

以降は、測定値の相対標準偏差が 10% 以内、誤差率が 1% 以内に入れば測定回数は十分とした。こうして得られたボイド率の算術平均値を、管内の断面平均ボイド率 $\langle \alpha \rangle$ とした。実際のボイド率測定値における相対標準偏差は平均 7.8% 、誤差率は平均 0.75% であった。

3.3 各種スラグ特性量の測定法 測定区間の前方から、デジタルビデオ（以下、DV）により締め切り区間と同じ測定部分での流動の様子を撮影した。DVは、シャッタースピードを $1/10000\text{s}$ に設定し、各流動条件において約 2 分間撮影した。この画像より、大気泡長さ L_B と液体スラグ長さ L_L 、大気泡後端の上昇速度 V_B はそれぞれの算術平均値を表す。なお、 L_B , L_L , V_B の測定時には、DVの撮影区間内で合体してしまう大気泡を省き、一定速度で上昇しているものだけを対象とした。大気泡形状の変化が大きかった粒子径 $160\mu\text{m}$ の場合、一枚の静止画像から先端位置の特定が困難な際、DV画像のコマ送りにより特定を行った。また、DVのズームアップ画像から大気泡周囲の液膜厚さを流動軸方向に測定し、大気泡の形状を求めた。測定位置は大気泡の先端から 5mm までは 1mm 間隔で 6 点、 17mm までは 3mm 間隔で 4 点、 41mm までは 6mm 間隔で 4 点の計 14 点とした。なお、屈折の影響は、外形を矩形としたパイプを用いることでほぼ解消できるが、内壁近くの領域は屈折の影響が残るので、大気泡の形状を測定する際には、さらに屈折補正を行った。形状についても、各位置での液膜厚さデータを算術平均して、各流動条件における平均的な大気泡形状を求めた。

大気泡形状、すなわち液膜厚さのデータから、大気泡体積率の平均値 α_b を算出した。 α_b は、大気泡部の全体積 $(=AL_b)$, A は管断面積に占める大気泡の体積 v_b の割合 $(\alpha_b = v_b / AL_b)$ である。この際、デー

タが無くなる先端からの距離が41mm以降、平均大気泡長さまで、液膜厚さは変化しない、また液膜内には小気泡は存在しないという仮定を適用した。同時に管内の平均ボイド率 $\langle\alpha_G\rangle$ と α_B , L_B , L_{LS} を用いた次の体積バランス式を用いて液体スラグ部での気相体積率の平均値 α_{GLS} を算出した。

$$\langle\alpha_G\rangle = \frac{L_B\alpha_B + L_{LS}\alpha_{G,LS}}{L_B + L_{LS}} \quad (1)$$

また、気相の分配率 ε_{GB} , ε_{GLS} を以下の式で求めた。

$$\varepsilon_{G,B} = \frac{v_B/v_T}{\langle\alpha_G\rangle}, \quad \varepsilon_{G,LS} = \frac{v_{G,LS}/v_T}{\langle\alpha_G\rangle} \quad (2)$$

ここで、 v_{GLS} , v_T はそれぞれ液体スラグ部内の気相（小気泡群）の体積、大気泡と液体スラグ部からなる1スラグユニットの全体積（ $=A(L_B + L_{LS})$ ）を表している。すなわち、1スラグユニットの中で気相が大気泡部到大気泡として ε_{GB} の比率、液体スラグ部に小気泡群として ε_{GLS} の比率で存在することを表す量である。したがって $\varepsilon_{GB} + \varepsilon_{GLS} = 1$ を満たす。

実際のスラグ特性量測定では、各条件で平均170個のスラグユニットを測定し、相対標準偏差は条件によって大差はなく、大気泡長さ、液体スラグ長さ、大気泡上昇速度に関してそれぞれ平均で27%, 74%, 35%であった。

4. 実験結果と考察

4.1 画像観察結果 DVによる画像撮影結果で明らかとなった典型的な大気泡の画像例を、図2に示す。左端は粒子を混入していない気液二相スラグ流の状態、そこから右は上段が $d_s=10.6\mu\text{m}$ の場合、下段が $d_s=160\mu\text{m}$ の場合である。また、 C_s は粒子の水中における混入体積濃度で、右に行くほど濃度が大きくなる。下段に示した $d_s=160\mu\text{m}$ の場合は明らかに粒子を混入していくほど、大気泡先端の形状は滑らかな砲弾型からずれていき、先端部に段差を有したり、小気泡が内部や周りに付随した歪んだ形状の大気泡に変化しているのが確認できる。あたかも気泡流からスラグ流に移る際に小気泡が凝集して合体した直後の大気泡のような姿である。もちろん、すべての大気泡が写真のような形態であるわけではなく、様々な程度のものが流動していくのであるが、粒子を増加させると、粒子未混入時と比較して、先端形状が異なった大気泡の発生頻度が高かった。また、大気泡前後の液体スラグ部における小気

Fig.2 Large bubble images when tracer particles are added into gas-liquid two-phase slug flow

泡の数も明らかに増加していることが確認できた。一方、上段の $d_s=10.6\mu\text{m}$ の場合には大気泡形状にはほとんど変化が見られず、液体スラグ部における小気泡の増加も見られなかった。このことから、混入する粒子のサイズが、大気泡の形状や小気泡への分裂に大きな影響を与えていることが確認できる。

4.2 平均ボイド率 締切法により測定した測定区間における平均ボイド率 $\langle\alpha_G\rangle$ の測定結果を図3に示す。 $d_s=160\mu\text{m}$ の $\langle\alpha_G\rangle$ は、図中の破線で示すように、気液二相流の値から減少し、 $C_s=0.02\%$ 程度で極小値を取った後、再び増加している。最も差のあるところで、混入なしの状態から3.5%程度の減少である。一方、 $d_s=10.6\mu\text{m}$ の $\langle\alpha_G\rangle$ は、多少のばらつきはあるものの、図中の実線で示すように、気液二相流の値からほぼ単調に減少し、増加はしていない。初期の減少率は $d_s=160\mu\text{m}$ よりずいぶん小さいが、 $C_s=0.05\%$ 程度では、混入なしの状態から4.3%程度減少した。なお、この程度のボイド率の変動であれば、気液各相の流量設定値の変動の影響である可能性も懸念されるので、各流動条件における気液二相流のボイド率推算値（ドリフトフラックスモデル使用）を計算した。図中に $d_s=160\mu\text{m}$ のデータに対する各相体積流量の値からドリフトフラックスモデルによって算出したボイド率の推算値を示しておく。これより、流量設定値の影響は十分に小さいことが確認でき、測定値の変化は流量設定値の影響ではないことが確認できる。

Fig.3 Average void fraction

Fig.4 Large bubble length and liquid slug length

Fig.5 Large bubble rising velocity

Fig.6 Coalescence ratio

4. 3 各部長さ DV画像より測定した大気泡長さ L_B 、液体スラグ長さ L_b を図4に示す。 $d_S = 160 \mu\text{m}$ の L_B は粒子混入によりわずかに減少する傾向を見せている。 $C_S = 0.05\%$ 程度では、混入なしの状態から10%程度減少している。これは、 $d_S = 10.6 \mu\text{m}$ の場合もほとんどかわらず、大気泡長さには粒子のサイズは影響していないようである。一方 L_b は $d_S = 160 \mu\text{m}$ では $C_S = 0.02\%$ 程度まではほぼ一定値であり、その後急激に増加しているが、 $d_S = 10.6 \mu\text{m}$ の場合は最初20%程度減少し、その後はほぼ一定値をとっている。 $d_S = 160 \mu\text{m}$ の高濃度域で L_b が急激に増加する原因は、図2に示した大気泡の崩壊のような現象で大気泡が

小気泡の長い帯状になってしまい、液体スラグの一部と見なされてしまうものが増加したためである。しかし、後に示すように大気泡は同時に細くなるため、崩壊のような現象が生じて大気泡長さはあまり急激に減少しないのであろう。

4. 4 大気泡上昇速度と大気泡合体率 図5に示すように、大気泡上昇速度 V_B も粒子混入の影響を受け、しかも粒子径によりその変化の仕方に違いを生じている。 $d_S = 160 \mu\text{m}$ の場合、粒子混入により気液二相流の状態より5%程度増加した後、ほぼ一定値となっている。それに対し、 $d_S = 10.6 \mu\text{m}$ の場合は、逆に4%程度減少した後、少し回復するような形と

Fig.7 Large bubble shape

なっている。この場合、単純に大気泡上昇速度と気相平均速度がほぼ近いものと考え、上昇速度が減少するということはボイド率が増加することを意味し、図3に示した傾向と一見矛盾しているように感じる。この矛盾を生じさせる原因としてあげられるのが大気泡合体の増加で、実際にDVの撮影区間で合体してしまう大気泡の率 β （＝区間内での合体件数）／（区間に入ってきた全大気泡数）をとったものが図6である。 $d_s=10.6\mu\text{m}$ の粒子の混入濃度が大きくなるにつれ、 β は明らかに増加し、10%程度になっている。大気泡合体時には大気泡は上昇速度を増加させるので、合体する大気泡が増えることは気相平均速度を増加させる役割を果たすものと考えられる。撮影区間内での大気泡合体の増加自体の原因は、小気泡から大気泡へ、そして定常なスラグ流へと発達していく過程の遅れと考えられる。すなわち、粒子混入なし、あるいは混入濃度が小さいうちには気液混合部からある程度の距離でほとんど大気泡が形成し、撮影区間内では既にある程度以上発達したスラグ流が形成されていたものが、 $d_s=10.6\mu\text{m}$ の粒子混入濃度を増すにつれ、その発達に要する距離、すなわち助走距離が長くなってしまい、撮影区間内で合体する大気泡の割合が増えたものと考えられる。この傾向は $d_s=160\mu\text{m}$ の場合には観察されず、発達性にも混入粒子のサイズが影響を及ぼしていることが確認できた。

4. 5 $160\mu\text{m}$ 粒子混入時の大気泡形状と大気泡体積率、液体スラグ部ボイド率 図7は図2で激しい形状の変化が見られた $d_s=160\mu\text{m}$ の場合の大気泡先端部形状の測定結果であり、100個の大気泡形状に対する平均値である。図中、Zは大気泡先端からの距離、Rは管軸中心からの距離である。これより、大気泡は気液二相流の状態が最も太く、微細粒子混入とともに徐々に先端が細く尖り、やがてやや戻っていく傾向を示している。大気泡周囲の液膜の厚さという観点でみると、気液二相流の状態で最も薄い液膜が、微細粒子混入により厚くなって、その後また少し薄くなるという傾向を示している。

Fig.8 Large bubble volume fraction and void fraction in liquid slug

Fig.9 Distribution ratio of gas phase

この形状より算出した大気泡体積率 α_b 、この形状と前述の平均ボイド率並びに各部長さの測定値を式(1)に用いて算出した液体スラグ部ボイド率 α_{GLS} を図8に示す。粒子を混入することによって大気泡部ではボイド率が一旦減少し、その後また増加している。一方、液体スラグ部では単調に増加している。

その変化は両データの間にある平均ボイド率 $\langle\alpha\rangle$ のデータの変化より十分に大きいことが確認できる。つぎに、式(2)を用いて算出した気相体積全体の大気泡部への分配率 ϵ_{GB} と液体スラグ部への分配率 ϵ_{GLS} を図9に示す。分配率で見ると、微細粒子の混入濃度増加とともに、液体スラグ部で小

気泡として存在する気相が増加していき、混入前には3割程度の気相分配率であった液体スラグ部が $C_g=0.03\%$ 程度で大気泡部の気相分配率より大きくなっていることが確認できる。これより、 $d_p=160\mu\text{m}$ の微細粒子を混入することにより、流れは視覚的に変化すると同時に、スラグ流の微細構造が実際大きく変化していることが確認できた。

4. 6 1~4mmの粒子を用いた固気液三相スラグ流との比較 著者の一人は、20.9及び30.6mmの管内径を持つ鉛直鉛管に粒子径 $d_p=1.14, 2.57, 4.17\text{mm}$ 、密度約 2400kg/m^3 のアルミナセラミック沈降性粒子を固相に、空気と水をそれぞれ気相・液相とした固気液三相スラグ流の実験的研究を行った⁽¹⁰⁾。その結果においては、 $d_p=160\mu\text{m}$ の微細粒子混入時のような大気泡形状の大きな変化は見られなかった。ボイド率、大気泡・液体スラグ長さに関しては、数ミリの沈降性粒子では一様に減少し、大気泡上昇速度は一様に増加した。これらもまた、今回実験を行った $d_p=10.6\mu\text{m}$ 並びに $160\mu\text{m}$ のポリエチレン製微細粒子の結果と一致するものではなく、このことから混入する粒子の径や密度が各スラグ特性量に複雑に影響を及ぼしていることが確認できる。今後のさらなる検討が必要であろう。

5. 結 言

鉛直管内を流れる気液二相スラグ流を対象に、 $d_p=10.6\mu\text{m}$ 並びに $160\mu\text{m}$ のポリエチレン製微細粒子の混入が、ボイド率並びに大気泡長さ等のスラグ特性量に及ぼす影響を、実際に流体計測に用いられる希薄な体積濃度を対象として調べた。その結果、以下の結果が得られた。

1. 流れの観察の結果、 $d_p=10.6\mu\text{m}$ の場合には大気泡形状にはほとんど変化が見られなかったが、 $d_p=160\mu\text{m}$ の場合は粒子を混入していくほど、先端形状が異なった大気泡の発生頻度が高かった。
2. 粒子を混入すると、ボイド率、大気泡・液体スラグ長さ、大気泡上昇速度が、粒子の混入により最大20%程度変化した。しかし、大気泡長さを除いて、変化の仕方には混入粒子のサイズによる影響が見られた。
3. 形状変化の激しい $d_p=160\mu\text{m}$ の場合、微細粒子を混入することにより、流れは視覚的に変化する

ると同時に、スラグ流の微細構造が実際大きく変化していることが確認できた。

したがって、使用流体を微細粒子によりシーディングする必要がある計測器を用いて気液二相流の計測を行う場合、計測者はその影響の度合いを把握しておく必要があると考える。また、

4. 粒子径数ミリの沈降性粒子を用いた三相スラグ流の変化とも傾向が異なる場合が多く、混入する粒子の径や密度が複雑に影響を及ぼすことが確認された。

文 献

- (1) Raffel, M., et al, Particle Image Velocimetry, Springer-Verlag, (1998).
- (2) Arimori, M., et al, Measurement System of Bubbly Flow Using Ultrasonic Velocity Profile Monitor and Video Data Processing Unit, *J. Nucl. Sci. Tech.*, **33**-12(1996), 915-923.
- (3) 大場謙吉・ほか3名, レーザ計測法による垂直管内気ほう流の研究, *機論*, **42**-363(1976), 3560-3570.
- (4) 松浦章裕・ほか5名, 傾斜平板近傍の気液2相流速度分布, *混相流シンポジウム講演論文集*(1995-7), 312-313.
- (5) Yamauchi, M., Uemura, T. and Ozawa, M., PIV Measurement at Close Region to Interface of a Water Drop in Oil, *Theoretical and Applied Mechanics*, **49**(2000), 165-170.
- (6) Hosokawa, S., Moriyama, S. and Tomiyama, A., PIV Measurement of Pressure Distributions about Single Bubbles, *Proc. of Third Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, Kyeongju, Korea* (2002), 237-243.
- (7) 村井祐一・ほか3名, 気泡流中の物体が誘起する二相対流の画像計測, *日本混相流学会年会講演会講演論文集*(2000-7), 109-110.
- (8) 南川久人・廣瀬稔・伊吹征也, 超音波流速分布計による静止水中大気泡周囲の液速度分布の測定, *機講論*, No.024-1(2002-3), 9-1-2.
- (9) Zhou, S., et al, Measurement System of Bubbly Flow Using Ultrasonic Velocity Profile Monitor and Video Data Processing Unit, *J. Nucl. Sci. Tech.*, **35**-5(1998), 335-343.
- (10) 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, 神戸大学学位論文(1997).
- (11) 三菱精化株, 製真球状粉末樹脂ポリエチレン製球状粒子カタログ(1997).
- (12) 玉井秀定・富山明男, 鉛直管内未発達分散性気液二相流の体積率測定, 第2回オーガナイズド混相流フォーラム講演論文集(1998), 57-63.