上昇及び下降気液二相流のプラグ流における 気液界面のプロフィールにみられる特徴*

世古口 言彦^{*1}, 森 幸 治^{*1}, 三 輪 恵^{*2}
中里見 正夫^{*3}, 清 水 英 男^{*3}, 加 治 増 夫^{*1}

Characteristics of Interfacial Profiles in Upward and Downward Gas-Liquid Two-Phase Plug Flow

Kotohiko SEKOGUGHI, Koji MORI, Megumi MIWA,
Masao NAKAZATOMI, Hideo SHIMIZU and Masuo KAJI

Gas-liquid interfacial profiles in plug flow for both upward and downward flows were obtained using semi-supermultiple-point-electrode probes, comprising 67 sensing tips arranged on a tube diameter. Typical interfacial profiles are demonstrated for both flows. Close inspection reveals that four zones exist in a pair of gas and liquid slugs for the upward plug flow region and the high slip velocity region in downward plug flow. Lengths of the swelling liquid front zone and the wake zone were determined. The length of the wake zone strongly depends on the relative velocity between the liquid film around gas slug and the liquid phase in liquid slug. Characteristic distributions of bubbles within liquid slugs were found, i. e., three types of radial distributions of void fraction, namely saddle-shaped, trapezoidal and bullet-shaped distribution, exist for upward flow, while the two types except the saddle-shaped distribution exist for downward flow.

Key Words: Interfacial Profile, Plug Flow, Void Fraction, Radial Distribution of Void Fraction

1. 緒 言

垂直上昇流と下降流では流動方向と重力の作用する方向が異なるため、両者の気液界面の構造には大きな相違の現われるのが普通である。このことは、それぞれの流れに対して作成された流動様式線図にも端的に現われており、環状流領域を除いてはかなり相違していることが知られている⁽¹⁾。

代表的な流動様式の1つである気泡流では、上昇流で観察される滑走気泡(壁面に沿って流動する気泡)は、下降流では出現しない⁽²⁾。この結果、流路内の相分布において上昇流では壁面近くにボイド率のピークが現われることがあっても、下降流では全くみられない。

プラグ流と団塊波流については、これらの流れが有する界面構造を計測し、これに及ぼす重力の作用する方向の影響については、まだほとんど論じられていないのが現状である。しかし、下降流のプラグ流領域において、界面構造の遷移過程に特異な領域の存在する

ことが最近見出されている⁽³⁾。つまり、下降流のプラグ流領域は、上昇流では出現しないフォーム流と称される領域によって2つの部分に分割されている、という知見が得られている。この新事実は流動方向の相違がプラグ流の界面構造に顕著な影響を与えていることを示唆するものであり、これに関する認識を得るためのより詳細な研究が必要である。

本研究は、上記の状況を勘案し、プラグ流の界面構造に及ぼす重力の影響に関する理解を深めるために、垂直上昇流と下降流のプラグ流領域に対して著者らが開発してきた相分布測定装置を適用し、収集した情報から得られた気液界面のプロフィール図を提示すると共に、その分析の結果を報告することを目的としている。

本研究で使用する相分布測定装置は、流路である管の一直径上に67点の位置で同時にボイド信号を検出する準超多点点電極プローブと信号処理系から成っている。この装置によって得られた信号から気液界面のプロフィール図を描出し、これにみられる特徴を明らかにする。

プロフィールに関する情報を更に詳しく分析した結果から、気体スラグと液体スラグ内に見出された新たな

* 原稿受付 1996年1月23日。

^{*1} 正員、大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘2-1)。

^{*2} 大阪大学大学院。

^{*3} 正員、宇部工業高等専門学校 (〒755 宇部市常盤台)。

区間の存在とそれらの長さについて論述するほか、液体スラグにおける半径方向の気相の分布特性についても言及する。

2. 記号

j_g	: みかけの空気流速	m/s
j_l	: みかけの水流速	m/s
L_{SW}	: 隆起頭ゾーンの長さ	m,mm
L_{WK}	: 後流ゾーンの長さ	m,mm
u_{gf}	: 気体スラグ周辺の液膜の速度	m/s
u_{ls}	: 液体スラグ内の液体の速度	m/s
α_{ls}	: 液体スラグ内の局所のボイド率

A:Annular flow, B:Bubble flow,
H:Huge wave flow, P:Plug flow

Fig.1 Flow pattern map for upward flow.

3. 実験

上昇流及び下降流における実験装置と測定装置の詳細はそれぞれ既報^{(3),(4)}に示されているため、ここでは概略を述べるに留める。

実験装置は内径 25.8mm のアクリル管で、全長は上昇流が 9310mm, 下降流は 9850mm である。この流路に準超多点電極センサを設置した。

このセンサは 1 つの管直径上に 67 本の点電極を配置したものである。点電極の間隔は管中心から 11.5mm の範囲では 0.5mm 間隔であり、これよりも壁面側では壁面に近づくに伴って間隔が狭くなり最小で 80 μ m である。このセンサを用いることによって、管内の気液相分布に関する情報を収集した。また気体スラグの移行速度を求めるために、準超多点電極センサの上流側に複数の液体ホールダップセンサを設置した。

使用した流体は空気と水である。実験条件は圧力が 0.2MPa, 流体温度は 20 $^{\circ}$ C である。気液の流量条件は後出の図 1 及び図 3 の流動様式線図上に丸印で示されている。

4. 気液界面のプロフィールにみられる特徴

4・1 上昇流 図 1 に流動様式線図を示す。図中の黒丸は以下の議論においてプロフィール図を提示する条件である。上昇流におけるプラグ流の代表的なプロフィール図を図 2 に示す。図中の黒色部は液相、白色部は気相を表している。また、図中における長さのスケールは、気体スラグの速度を用いて、時間を距離に換算したものである。

図 2 (a) は気液の流速が小さい場合であり、気体スラグはテラ気泡と類似している。気体スラグの界面は

Fig.2 Typical examples of interfacial profiles for upward flow.

比較的なめらかで、周辺の液膜には小気泡がほとんど存在せず、形状は軸対称性を有している。気体スラグがテーラ気泡と類似の形状を示す条件は j_g が約0.7m/s以下である。液体スラグ内の気泡の分布は、液体スラグの下流端に密度の高い部分が存在するが、その他の部分は比較的均一に分布している。図2(b)は j_l を増加させた場合であるが、液体スラグ内の気泡は(a)と比較して小さくなっている。また、気泡は管壁側に比較的多く存在している。

図2(c),(d)は(b)と同一の j_l で、(b)よりも j_g が大きい場合である。図(b)～(d)から以下の特徴が見出せる。先ず(d)に着目する。液体スラグの下流端において、気体スラグ内に隆起した部分が存在することが確認できる。これを隆起頭(Swelling liquid front)と称することにする。また、隆起頭より上流側では、多くの気泡を含有し、ボイド率の高い領域が存在している。これらの様子を明確にするために、図2(d)の一部を拡大した図3で説明する。

図3から120mm程度の隆起頭が存在し、隆起頭の上流端から上流側に約130mmの区間において多くの気泡を含有する領域が存在している。これよりも上流側では、上流に向かって気泡の密度は減少すると共に、気泡は壁面近傍にのみ存在するようになる。液体スラグの下流端部において多くの気泡を含有する機構は次のように考えられている⁽⁵⁾。すなわち、気体スラグ周辺の液膜が液体スラグに流入する際に気体スラグから気泡を生成し、これらを同伴しながら液体スラグ内に拡散していく。この拡散の過程で気泡は気体スラグの後流部に取り込まれる一方、より下方にまで達した気泡も浮力によって浮上し、気体スラグの後流部に集まり、後流

Fig.3 Four zones in a pair of gas and liquid slugs.
($j_g=3\text{m/s}$, $j_l=1\text{m/s}$)

部の気泡密度を高めることになる。ただし、後流部内の気泡は更に浮上して気体スラグの底面を経て気体スラグに環流するため、後流部の気泡密度はある程度まで高くなった状態で平衡している、と考えられている。

以下ではこの領域を後流ゾーン(Wake zone)と称することとする。また後流ゾーンの上流側に存在する気泡が少ない区間を低ボイド率ゾーン(Low void fraction zone)、気体スラグの先端(下流端)から隆起頭の先端までを気体スラグの主体を構成するゾーン(Main body zone of gas slug)と呼ぶことにする。隆起頭ゾーン及び後流ゾーンの長さについては次章において議論する。

図2(b)～(d)から上記の隆起頭ゾーン及び後流ゾーンの長さは j_g の増加と共に増加することが分る。また、隆起頭は j_g の増加に伴って多くの気泡を含むようになる。

気液の流速が共に大きい場合の例を図2(e)に示す。気液界面には大きな波立ちが存在し、気体スラグの下流端部に大きくびれを生じている場合が高い頻度でみられるようになる。また、液体スラグ内部に大きな気泡が形成されて液体スラグが分割されているものも観察される。

A: Annular flow, B: Bubble flow, F: Foam flow;
H: Huge wave flow, P: Plug flow
P_L: Low slip velocity region
P_LT: Taylor bubble and Taylor bubble like gas slug
P_LS: Gas slug with similar shapes at leading and trailing ends
P_LU: Unaxisymmetrical gas slug
P_LF: Fluctuating gas slug
P_H: High slip velocity region

Fig.4 Flow pattern map for downward flow.

Fig.5 Typical examples of interfacial profiles for downward flow.

4・2 下降流 図4に流動様式線図を示す。図中の丸印は計測条件であり、その中の黒丸は後出のプロフィール図に対応した流動条件である。

下降流におけるプラグ流は気体スラグの形状から5つの領域に細分類されている⁽³⁾。上昇流との比較のために、それぞれの領域の特徴を要約し、代表的なプロフィール図を図5(a)～(e)に示す。

領域 P_{LT} (図5(a))：気体スラグは上昇流のテラ気泡と類似している。液体スラグ内の気泡は下流側が多く、上流側に向かって少なくなる。

領域 P_{LS} (図5(b))：気体スラグの形状は上流側と下流側で類似しており、管の中央部は平坦で、管壁付近では丸みを帯びている。液体スラグ内の気泡は管中心に多く存在している。液体スラグ内の気泡の数は P_{LT} の領域でみられる液体スラグと比較して多い。

領域 P_{LU} (図5(c))：気体スラグが顕著に偏心し、複雑に形状を変化させながら移行する気体スラグが観察される領域である。気体スラグの長さは他の領域でみられるものと比較して短く、管径の数倍程度のものが多い。また、気泡の数も他の領域における液体スラグと比較して最も少ない。

領域 P_{LF} (図5(d))：種々の形状の気体スラグが混在している。気体スラグ周辺の液膜は激しく波立っている。

領域 P_H (図5(e))：下流側に凸の形状を有する気体スラグが出現する。液体スラグ内には気泡が多く存在し、比較的均一に分布している。気体スラグの後端(上流端)において、長い隆起頭がみられる。

気体スラグの形状に関する上記の特徴は、気体スラグと液体スラグ内の液体の速度差に関係している。上昇流及び下降流において、流動方向を速度が正の向き

とする。図5中の(a),(c)及び(d)は液体スラグ内の液体の速度 u_{ls} が気体スラグの速度 u_{gs} よりも大きい。また(b)は u_{gs} の方が u_{ls} よりもわずかに大きく、(e)では u_{gs} は u_{ls} よりも十分大きいことが明らかにされている⁽³⁾。

P_H を除く各領域において、プロフィール図における気泡の分布から視察によって後流ゾーンと低ボイド率ゾーンを明確に判別することが困難な液体スラグが多く出現する。例えば図5(a)の条件では $u_{ls} > u_{gs}$ であるため、気体スラグ周辺の液膜は先行する液体スラグ内に流入して液体スラグの上流端に後流を生じさせていると考えられるが、液体スラグの上流端には気泡の密度が大きい領域は見られない。この理由は5章で詳細に考察するが、下降流では気体スラグ周辺の液膜と液体スラグ内の液体の相対速度が上昇流と比較して小さいために、気体スラグから巻き込む気泡が少ないことに起因していると考えられる。

4・3 上昇流と下降流の比較 上昇流の気体スラグの形状は基本的には流動方向に凸であるが、下降流では必ずしもそのようなにはなっておらず、逆の場合が出現する。この点において、両者の間に顕著な相違がある。また、液体スラグ内の気泡は上昇流では管壁付近に多く存在し、下降流では管中央部に集まる傾向がある。これに関連する議論は6章で行う。

5. 隆起頭ゾーンと後流ゾーンの長さ

5・1 隆起頭ゾーンの長さ 図6に上昇流の隆起頭ゾーンの長さ L_{sw} を示す。 L_{sw} は界面のプロフィール図から決定した隆起頭の通過時間と気体スラグの速度から算出した。

L_{sw} は j_g の増加に伴って増加しており、 L_{sw} は最大で

200mmにも及んでいる。また図の傾きはほぼ1であることから、 L_{SW} は j_g に比例するといえる。 j_l の違いによる L_{SW} の差は小さい。

下降流では P_H の領域において隆起頭が観察された。この領域における L_{SW} を図6中に■及び●で併記した。図6から下降流の L_{SW} は、上昇流における L_{SW} と j_g の関係の延長上に存在し、同一の流量条件における上昇流と下降流の L_{SW} にみられる差は小さい。また、下降流において、 L_{SW} が300mmを超えるきわめて長い隆起頭が存在していることが判る。

5・2 後流ゾーンの長さ 後流ゾーンの長さ L_{WK} は準超多点電極センサの信号から算出されるボイド率の管軸方向分布から決定した。図7はプロフィール図にボイド率の管軸方向分布を併記したものである。ボイド率は隆起頭の下流端から上流側に向かって減少していくが、気体スラグ先端からの距離が約0.58m以上ではほぼ一定に変化している。後流ゾーンは隆起頭ゾーンの上流端からボイド率がほぼ一定になるまでの区間とした。

後流ゾーンの長さ L_{WK} は液体スラグ内の液体と気体スラグ周辺の液膜との相対速度 $u_{ls} - u_{gf}$ と密接に関係していると考えられる。上昇流及び下降流における L_{WK} と $u_{ls} - u_{gf}$ の関係を図8に示す。なお、下降流は図3における P_H の領域について求めたものである。ここで、 u_{ls} と u_{gf} はそれぞれ液体スラグ内の平均ボイド率と気体スラグが主体を構成するゾーンにおけるボイド率から連続の関係を用いて算出した。気体スラグが主体を構成するゾーンにおけるボイド率は、気体スラグ周辺の液膜厚さがほぼ一定の区間を有する場合にはこの区間における平均のボイド率とし、この区間を有しない場合には液膜が液体スラグに流入するところにおける液膜厚さからボイド率を求めた。図8から L_{WK} が $u_{ls} - u_{gf}$ の増加と共に増加する領域と、 L_{WK} が $u_{ls} - u_{gf}$ の増加と共に減少する領域が存在する。これらの領域はそれぞれ典型的なプラグ流領域とプラグ流から団塊波流への遷移領域に対応している。

典型的なプラグ流領域における L_{WK} は $u_{ls} - u_{gf}$ の増加と共にほぼ比例的に増加しており、相対速度が L_{WK} の長さに関与していることが分る。しかし、 j_l が大きいほど L_{WK} は増加していることから、 L_{WK} は $u_{ls} - u_{gf}$ だけで決定されているわけではなく、 j_l と共に液体スラグの速度が大きくなり、その内部の乱れの規模の増大が L_{WK} を増加させているものと考えられるが、詳しくは今後の検討課題である。

上昇流と下降流における L_{WK} を比較すると j_g の変化に対する $u_{ls} - u_{gf}$ の傾向は類似しているが、 L_{WK} の大き

Fig.6 Lengths of the swelling liquid front zones for upward and downward flow.

Fig.7 Method of determining the wake zone.
($j_g=2\text{m/s}$, $j_l=1.5\text{m/s}$)

Fig.8 Relations between lengths of the wake zones and velocities of liquid in liquid slugs against liquid film around gas slugs.

さは下降流の方が10～20%程度小さい。

ところで、下降流において P_H 以外の領域では気泡の分布から後流ゾーンと低ボイド率ゾーンの分離が容易でなかった。下降流において、 P_H 以外の領域における $u_{ls} - u_{gf}$ は大半が0.5m/s以下であり、最大でも0.97m/s ($j_l=0.5$ m/s)である。これらの値は上昇流において、各 j_l における $u_{ls} - u_{gf}$ の最小値よりも小さい。従って下降流の P_H 以外の領域において、液体スラグの上流端($u_{ls} > u_{gs}$ の場合であり、 P_{LT} , P_{LU} , P_{LF} 及び P_{LS} の一部の領域に対応する)あるいは下流端($u_{ls} < u_{gs}$ の場合であり、 P_{LS} の一部の領域に対応する)に高い気泡密度を有する領域がみられなかった理由の一つとして、下降流のこの領域は、気体スラグから気泡を巻き込むと共に安定的に多くの気泡を含有する領域を形成するのに必要な相対速度を有していないためであると考えられる。

6 液体スラグにおけるボイド率の半径方向分布

6・1 上昇流 次の3つの形式に分類できる。

- (1)くら型分布(図9(a)):管壁付近に気泡が多く存在している場合
- (2)台型分布(図9(b)):壁面のごく近傍を除き比較的に気泡が分布している場合
- (3)砲弾型分布(図9(c)):管の中央部が顕著に大きなボイド率を示す場合

以上の3つの形式が出現する領域を流動様式線図に示したものが図10である。図10からくら型分布と台型分布が広い流動条件で現われているのに対し、砲弾型分布はプラグ流から気泡流及び団塊波流への遷移領域(ただし、気泡流へは j_l が1m/sを下回る領域、団塊波流へは1m/s以上の領域)に限られる。多くの場合、3つの形式の液体スラグが共存しているが、各実験条件において最も多く出現する形式を代表させて区分し、図10中で P_{SA} , P_{TR} 及び P_{BU} で示すと共に、破線でその境界を示した。台型分布が多数を占める領域 P_{TR} は、 j_g の低い領域と高い領域との2つに分れて存在する。これらの2つの領域の間にくら型分布が多数を占める領域 P_{SA} が存在する。 P_{BU} はプラグ流と団塊波流の境界付近に存在する。これはコア部に多くの気泡を含み、気相で貫通される直前の液体スラグが多く出現するためである。

6・2 下降流 図11(a)に示す台型分布と、同図の(b)に示す砲弾型分布の2つの形式に区分できる。これらの形式が観察される流動領域を図13に示す。上昇流で存在したくら型の分布は、下降流ではみられない。同様のことは、既に下降気泡流で経験されていることである⁽²⁾。

$j_g \geq 3$ m/sでは図5(e)で述べたように、液体スラグ内は気泡がほぼ均一に分布しているため、台型分布のみが存在する P_{TR} 領域になっている。一方、 $j_g \leq 1$ m/sの領域においては、 j_l の低いところでも P_{TR} 領域が現われ、 j_l が高くなると砲弾型分布が多数を占める P_{BU} 領域となっている。

Fig.9 Three types of radial distributions of void fraction in liquid slugs for upward flow.

- A: Annular flow, B: Bubble flow,
H: Huge wave flow, P: Plug flow
 P_{SA} : Most frequently saddle-shaped
distribution appearing region
 P_{TR} : Most frequently trapezoidal
distribution appearing region
 P_{BU} : Most frequently bullet-shaped
distribution appearing region
+: SA, O: TR, .: BU

Fig.10 Flow regimes for upward plug flow.

Fig.11 Three types of radial distributions of void fraction in liquid slugs for downward flow.

A:Annular flow, B:Bubble flow,
H:Huge wave flow, P:Plug flow
P_{TR}:Most frequently trapezoidal
distribution appearing region
P_{BU}:Most frequently bullet-shaped
distribution appearing region
○:TR, ●:BU

Fig.12 Flow regimes for downward plug flow.

図4に示した気体スラグの形状の分類結果との対応をみると、 P_{LT} 領域の多くの条件は P_{TR} 領域と、また P_{LS} 及び P_{LF} 領域は P_{BU} 領域と比較的よく一致している。

上述の議論において、上昇流ではくら型分布、下降流では砲弾型分布が多く観察されたが、これは液体ス

ラグ内の気泡の分布、すなわち気泡は上昇流では管壁付近に多く存在し、下降流では管中央部に集まることに起因していると考えられる。

7. 結 論

垂直上昇流及び下降流のプラグ流領域において、準超多点電極センサを用いて気液界面のプロフィールに関する情報を収集した。この情報から気液界面のプロフィール図を描出し、これらにみられる特徴を議論した。また、液体スラグにおけるボイド率の半径方向分布を算出して分布形状に関する議論を行った。得られた新知見は以下のとおりである。

- (1) 上昇流と下降流の高スリップ速度領域において、液体スラグの下流端に隆起頭が存在する。また、これらの流動領域において、一対の気体スラグと液体スラグは、気体スラグの主体を構成するゾーン、隆起頭ゾーン、後流ゾーン及び低ボイド率ゾーンの4つのゾーンに区分できる。
- (2) 液体スラグ内の気泡は、上昇流では管壁付近に多く存在するが、下降流では管中央部に集まる傾向がある。
- (3) 隆起頭の長さは j_g の増加に伴って大きくなり、最大300mmにも達する。また、 j_l の影響は小さい。上昇流と下降流では隆起頭の長さの差は小さい。
- (4) 後流ゾーンの長さは、液体スラグ内の液体と気体スラグ周辺の液膜との相対速度が大きくなるほど長くなる。また、上昇流の方が下降流よりも後流ゾーンの長さはわずかに長い。
- (5) 液体スラグにおけるボイド率の半径方向分布はくら型、台型及び砲弾型の3種類の形式に大別された。上昇流では3種類、下降流では台型分布と砲弾型分布の2種類が現われる。

文 献

- (1) 世古口、伝熱工学の進展、1巻、(1973)、179、養賢堂。
- (2) 佐藤・ほか3名、機論、43-370(1977)、2288-2296。
- (3) K. Sekoguchi、ほか4名、Chem. Eng. Comm. 141-142(1996)、415-441。
- (4) 森・ほか4名、機論、60-573B(1994)、1716-1723。
- (5) 世古口、伝熱工学の進展、1巻、(1973)、276、養賢堂。