

垂直上昇気液二相流における液体塊の挙動パターン*

世古口 言彦*¹, 武石 雅之*¹, COGNET, G.*²
石松 隆和*³, 八尋 和広*⁴

Patterns of Liquid Lump Behaviors in Upward Gas-Liquid Two-Phase Flow

Kotohiko SEKOGUCHI, Masayuki TAKEISHI, COGNET, G.,
Takakazu ISHIMATSU, and Kazuhiro YAHIRO

The results of an experimental investigation of liquid lump behaviors are presented for vertical upward gas-liquid two-phase flow. Liquid lumps were classified into liquid slug, huge wave, disturbance wave and ephemeral large wave by analysing time-spatial signals of cross-sectional averaged liquid holdup, which were detected at twelve locations along a 25.8 mm inside diameter tube. Two types of behaviors were found for liquid slug and huge wave: one shows axially steady movement, and the other is transient as a liquid slug rapidly disappears or drastic deformation of a huge wave occurs with time. An evaluation method for the development of cap bubble flow in liquid slug coalescence is proposed. There exist various behaviors of ephemeral large waves such as forward, backward and complicatedly direction-changing movement depending on the flow conditions. It is shown how these behaviors correspond to reverse flow length of liquid film and averaged gas length.

Key Words: Multiphase Flow, Thermal Engineering, Flow Pattern, Behavior of Liquid Lumps, Ephemeral Large Wave, Liquid Slug, Huge Wave, Disturbance Wave

1. 結 言

気液の相分布特性がその流動機構と密接な関係にあることについては、すでによく知られている。しかし相分布の特徴をどのようにとらえるかについては、十分に議論がなされているとはいえない。近年、相分布のうち液体塊に関する液体ホールドアップ信号の分析法^{(1)~(5)}と超多点点電極プローブによる新しい測定技術の開発⁽⁴⁾、さらには電気化学的方法によって測定した壁面せん断応力の時間的変化と液体スラグとの関係の調査⁽⁵⁾など液体塊に関係した研究を著者らは推進してきた。これらの一連の研究の中で、本研究は特に流動方向に液体塊がどのように形状と速度を変えていくかに着目してその挙動パターンの抽出を試み、合わせてこれに関連した事項を論議することを目的としている。

2. 記 号

D : 供試管内径 m, mm

DW: じょう乱波

EW: 浮遊波

EW-B: 負の速度を有する浮遊波

EW-F: 正の速度を有する浮遊波

EW-I: 挙動の複雑な浮遊波

HW: 団塊波

HW-S: 定常的挙動の団塊波

HW-T: 過渡的挙動の団塊波

j_a : みかけの空気速度 m/s

j_l : みかけの水速度 m/s

L : 液体スラグ長さが l_u から l_l まで減少するに要する移行距離 m, mm

L_c : 液体スラグ長さが l_u から零になるまでに要する移行距離 m, mm

l_g : 気体スラグの長さ m, mm

l_l : 液体スラグの長さ m, mm

l_u : ある時点における液体スラグの長さ m, mm

l_g : 気体スラグの長さ m, mm

l_l : 液体スラグの長さ m, mm

* 昭和59年11月29日 関西支部第5回シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和61年11月28日.

¹ 正員, 大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘2-1).

² ロレーヌ工科大学 (Institut National Polytechnique de Lorraine et Université de Nancy, B.P. 850, 54011 Nancy Cedex, France).

³ 正員, 長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町1-14).

⁴ 川崎製鉄(株) (〒712 倉敷市水島川崎通り1).

l_{li} : ある時点における液体スラグの長さ m, mm

LS: 液体スラグ

LS-S: 定常的挙動の液体スラグ

LS-T: 過渡的挙動の液体スラグ

l_{rf} : 気体スラグ周辺の液膜流の逆流開始点からその流下端までの長さ m, mm

m_{li} : 長さ l_{li} の液体スラグの通過累積ひん度

$n_{li,z}$: z 断面における液体スラグの合体ひん度

u_g : 気体スラグの速度 m/s

u_{gd} : 後続の気体スラグの速度 m/s

η : 液体ホールドアップ

3. 実験

本実験ループと液体ホールドアップの測定系の概要は既報⁽¹⁾にみられるとおりであるが、本報のホールドアップ検出プローブは管軸方向に12対配置された。各プローブは厚さ0.5 mm、内径が管内径(25.8 mm)と同一の一对の環状電極で構成され(電極中心距離5 mm)、プローブ相互の間隔は、No.1~5が25 mm、No.5~12が50 mmである。したがって、プローブNo.1から12までの全体の距離は450 mmである。参考のためにプローブNo.1~5を含む125 mmの区間の圧力差も同時に測定した。

使用した空気と水の両相の流量範囲は、みかけ速度で気相は $j_g = 0.3 \sim 30$ m/s、液相は $j_l = 0.05 \sim 2$ m/s であるが、詳細は後出の図9のとおりである。

4. 液体塊の挙動パターンの分類

液体塊の挙動は、液体塊の種類に応じて検討するのが便利がよいと思われる。ここでは、これを液体スラグ、団塊波、じょう乱波および浮遊波の四つに分けて考える。

4.1 液体スラグ

(LS)

(1) 定常的挙動 (LS-S) 形状と速度がともに流動方向にほとんど変化しない場合である。図1にその典型的な例を示す。図1は最下段に圧力差を示し、順次上の方向に液体ホールドアップ η の信号がプローブ1から12まで記されている。

る。本節では分類された液体塊のみを抽出して示すために、時間帯を限定している。

図1にみられるように、液体スラグの形状はほとんど変化しないが、その前面の形は微細ながら常に変化している。図1(b)のように逆流する波の合流によって一時的になだらかな斜面になる。液体スラグ中の気泡は複雑に運動するほか、生成・消滅が繰返されているが、断面平均ホールドアップでみるとこの範ちゅうに入るものでは比較的变化が小さい。図1(b)にみられるキャップ気泡も、液体スラグの中で安定した形状と位置をとることがわかる。

(2) 過渡的挙動 (LS-T) 液体スラグの形が著しく変化して、最終的には消滅することがある。ここでは、二つの形に分けて説明する。

(i) スラグの合体 キャップ気泡相当の比較的小さい気体スラグから成る流動領域にその典型的例が見いだせる。図2(a)にその一例を示す。気体スラグの合体についてはすでに論ぜられているように⁽⁶⁾、後続の気体スラグが先行スラグに近づくにつれて速度を増し、合体に至る。これについてはあとで考察する、合体直後の液体スラグの前面は急斜面でなく、緩やかな丸味をもった凹面となる性質がある。したがって、ある測定断面の η の信号にこのような液体スラグが存在するときは、その断面に近い上流側で合体があったと判断できる。このように丸味をもった前面は流動方向に変化して行って、元の急峻な斜面となる。

(ii) 液体スラグの崩壊 図2(b)のように、十分に大きな二つの気体スラグを隔てている液体スラグが流動方向に急速に崩壊していく場合がある。崩壊はまず液体スラグの後部が下方に伸長し、大きな隆起を生じる。この隆起からさらに波を排出するとともに、液体スラグの母体を吸収するような様相を呈しつつ後続の液体スラグに接近し、それ自身も収縮に転じたあ

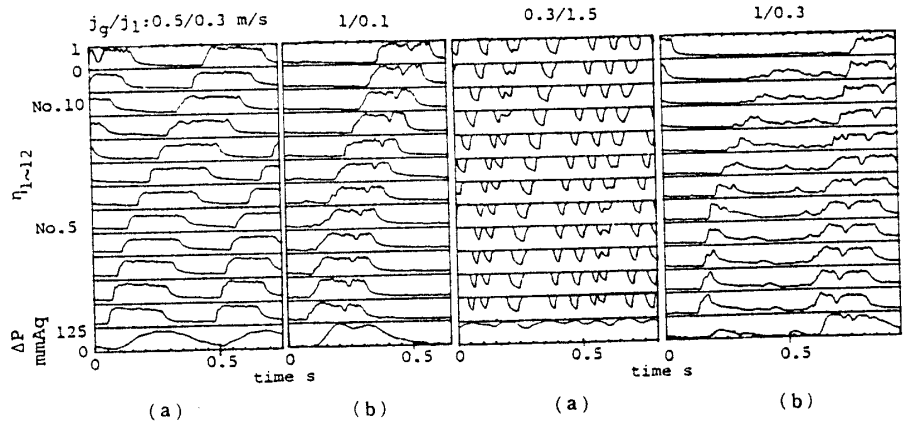


図1 液体スラグ(定常的挙動)

図2 液体スラグ(過渡的挙動)

とに急速に消滅する。崩壊の開始から消失し終わるまでに移行する距離は図の例では0.5~1 m程度で、時間にして0.25~0.5 sである。この種の挙動は、フロス流領域を経て団塊波領域に至るまでの広い領域で起こっていると考えられるが、スラグ流からフロス流への遷移域に典型的なものを見いだすことができる。

4.2 団塊波 (HW)

(1) 定常的挙動 (HW-S) 気体スラグの中央に気柱が形成されたものを団塊波という。流動方向に形状と速度とがほぼ一定のものを定常的挙動の団塊波と称することにす。この範ちゅうに属する例を図3のAで示す。通常、団塊波の前面は急峻で、背面は緩やかな傾斜となっている。後述のように、浮遊波を排出する際に背面が隆起する。液体塊の速度に関する別報の研究結果⁽⁷⁾が示すように、団塊波領域では個々の液体塊の速度に大幅な相違が生じうる。その一因をなしているのは浮遊波の存在であるが、団塊波は主として高流速側の変化幅をもたらすものである。

(2) 過渡的挙動 (HW-T) 図3のBのように団塊波が浮遊波を吸収して著しくその形を変化させる場合であるが、速度の変化は顕著ではない。形状の変化パターンは一定ではなく、鋭い頂部を有していたものが小さな起伏のある長い丘状になる場合、緩やかな傾斜の前面が急斜面となる場合など、多様な変化がみられる。これらの挙動を体系的に理解するには、さらに長い区間にわたって調査することが望ましい。

4.3 じょう乱波 (DW) 図4に典型的なじょう乱波の例を示す。じょう乱波の前面は急峻で背面は緩やかに傾斜しているのが普通である。速度は多少ばらつきがあるが、比較的そろっている点で Wispy-annular flow の団塊波と性質を異にしている⁽⁷⁾。浮遊波を吸収あるいは排出する際に、形状変化をもたらすことがあるが、急速にほぼ元の形に戻る。じょう乱波の実際の形状は三次元的に変化してはなはだ複雑である⁽⁴⁾。しかし、断面平均ホールドアップの時間的変化にみられるじょう乱波の形状は、単純な三角形状である。この事実を、今後、じょう乱波の挙動解析を進めるうえにおいて重要な基点を与えるものと考えられる。

4.4 浮遊波 (EW) 浮遊波は次のように定義されている⁽⁴⁾。：断面平均ホールドアップの時間変動波形において、生成または消滅の過程が探索できる程度に大きな波で、一对の液体スラグ、一对の団塊波あるいは、一对のじょう乱波の間において存在寿命の短い波をいう (Ephemeral large wave)。

(1) 正の速度を有する浮遊波 (EW-F) 浮遊波の速度はその前後に存在する液体スラグ、団塊波、およびじょう乱波よりも小さい。典型的な生成・消滅のパターンは、先行の液体塊の背面が隆起し、そこから分離して浮遊波となる。速度が遅いため、後続の液体塊に吸収される。じょう乱波領域での一例を前出の図4に見いだすことができる。図4においてAはじょう乱波の背面が隆起しはじめている状態、Bは浮遊波が生成した直後、CからC'にかけては発達段階である。Dにおいて、発達し終わった浮遊波は、後続のじょう乱波に接近し、吸収される(状態E)。浮遊波の大きさも速度

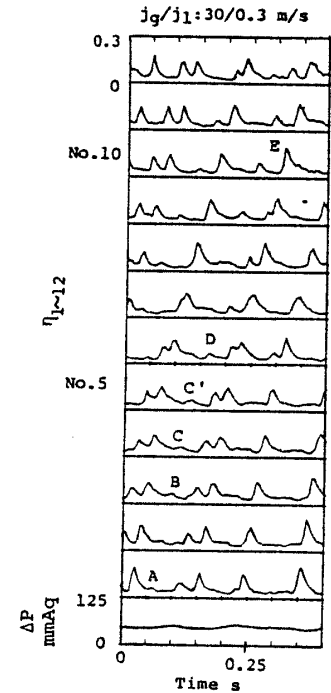


図4 じょう乱領域におけるじょう乱波と正の速度を有する浮遊波の生成、消滅

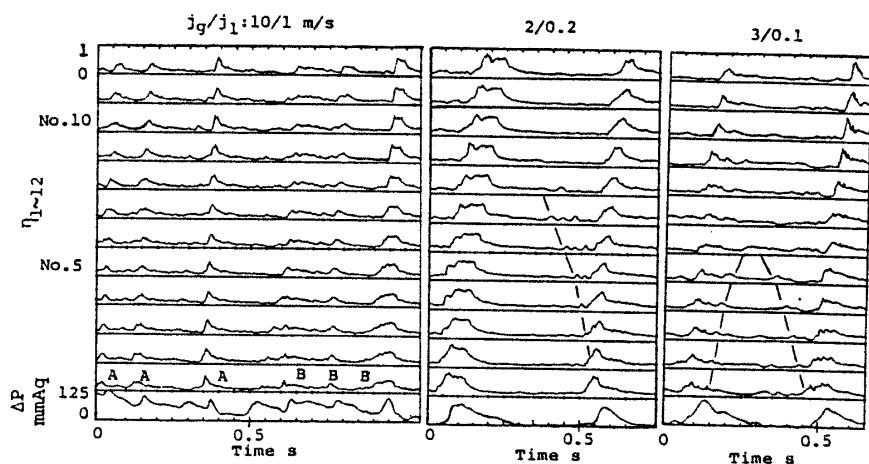


図3 団塊波 (A: 定常的挙動, B: 過渡的挙動)

図5 浮遊波 (逆流)

図6 浮遊波 (複雑な挙動)

と同じように、液体スラグはもちろん、団塊波またはじょう乱波よりも小さくなる傾向があるが、まれには団塊波やじょう乱波と同等の大きさになることがある。

(2) 負の速度を有する浮遊波 (EW-B) 逆流する浮遊波で、その形状は変化に富んでいる。図5にその一例を示す。図5によれば、まず気体スラグ周辺の液膜流のうち、上部の比較的なめらかな界面を有する液膜が次第に厚さを増し、下部の液膜との間に段差を生ずる。次いで、段差のついている箇所から浮遊波が発生する。この逆流する浮遊波は、液膜の段差が存在する間は、継続して排出される。このような発生プロセスとやや趣を異にしている事例として、液体スラグの崩壊時に多数の逆流浮遊波を排出する場合がある〔図2(b)参照〕。

(3) 挙動の複雑な浮遊波 (EW-I) 流動方向が正流から逆流に転じたり、一時的に停滞するものがこの範ちゅうに入る(図6)。停滞後に消滅するものもある。したがって、その挙動の追跡調査が最も困難な場合であるといえる。

前節で分類した液体塊の挙動を種々の気液流量について系統的に吟味できるよう実験データを整理し、これを提示する。しかし、ここでは紙幅の関係で j_i が 0.3 m/s 一定のものに限る。結果を図7に掲げる。

5. 考 察

5.1 液体スラグの発達について 図2(a)にみられる液体スラグの合体が流動方向の単位長さ当たり

発生するひん度は、流れの発達を示す一つの指標になると考えられる⁽⁶⁾。気体スラグの上昇速度は、先行する気体スラグとの距離が短くなるにつれて増加する⁽⁶⁾。このことは、ある長さ以下の液体スラグは供試管路を流出するまでに後続の液体スラグに吸収されることを示唆している。いま、先行する気体スラグの速度を u_g 、後続のそれを u_{gd} 、その間の液体スラグの長さを l_i とすると、 l_i の時間的変化は次のように表される。

$$dl_i/dt = u_g - u_{gd} \dots\dots\dots(1)$$

Moissis⁽⁶⁾によれば、上式の右辺は次のように表される。

$$dl_i/dt = -2.8\sqrt{gD} \exp(-1.06l_i/D) \dots\dots\dots(2)$$

したがって、液体スラグの長さがある時点における l_i の大きさから l_i まで減少するに要する移行距離を L とすると、次式で表される。

$$L/D = \{u_g/(2.97\sqrt{gD})\} \{ \exp(1.06l_i/D) - \exp(1.06L_i/D) \} \dots\dots\dots(3)$$

さらに、 $l_i=0$ となるまでの距離を L_c と書くと、

$$L_c/D = \{u_g/(2.97\sqrt{gD})\} \times \{ \exp(1.06l_i/D) - 1 \} \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる。

ある観測断面において、長さ l_i に対する液体スラグの通過累積ひん度 n_{ii} が得られると、式(4)を用いて単位長さ当たりの液体スラグ消滅ひん度が予測される。図8は上式で計算した L_c/D 対 l_i/D の関係と、 n_{ii} の一例を示す。 $L_c=0.45$ m に対する l_i は、 n_{ii} の実験例 ($j_g=0.3$ m/s, $j_i=1.5$ m/s) でみると、約 56 mm と

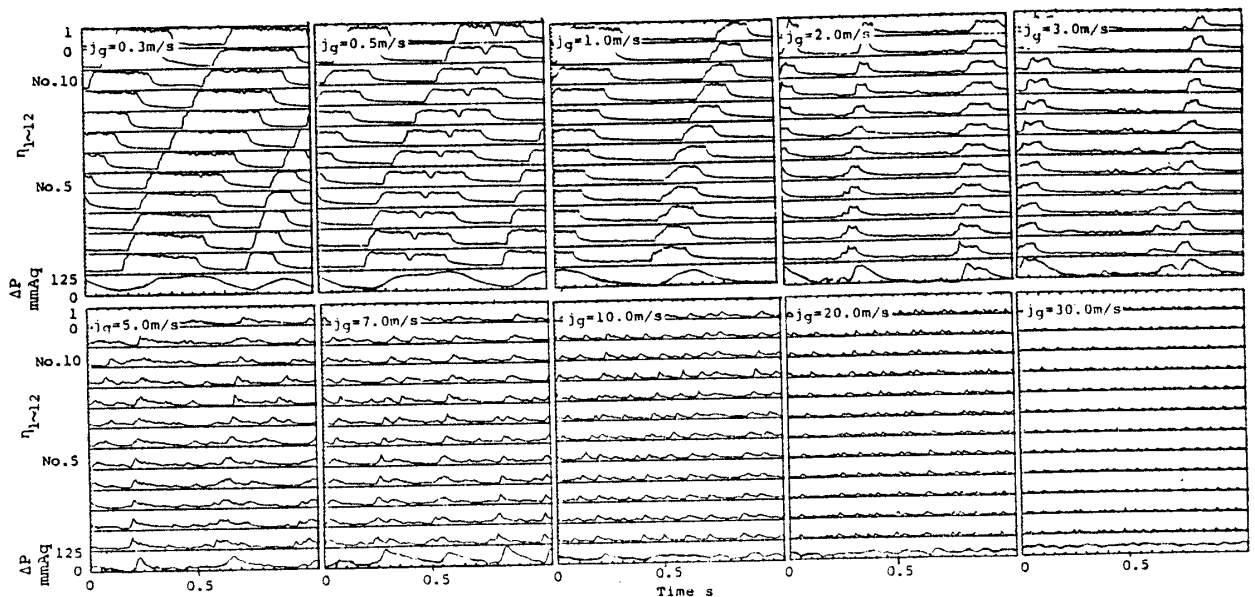


図7 液体ホールドアップ-時間-距離(プローブNo.)の関係と j_g (図7中の数字は j_g , m/s), $j_i=0.3$ m/s

なり液体スラグの通過個数は約7%減少すると予測される。0.45 m 下流の実測では、6.9%の減少となっており、推定値との一致はよい。

いま、単位距離として1 m をとり、その間の液体スラグ合体の発生ひん度を考えると、上例では13%/m となる(図8参照)。このような値は、流れの発達を評価するうえで役立つものと思われるが、十分発達したとみなしうる判定基準値の設定は、今後の課題である。

次に、観測断面から z m 下流での発達の程度を考える。 z 断面における合体ひん度 n_{iz}^* は図8を参照して得られる次式が用いられる。

$$n_{iz}^* = (n_{iz+1} - n_{iz}) / \left(1 - \frac{1}{2} n_{iz}\right) \dots \dots \dots (5)$$

$z=1$ m と考えたときの上記の実験例で評価すると、約6%/m となり、合体のひん度は半減すると推定される。

5.2 浮遊波の挙動と領域について すでに指摘したように、浮遊波の挙動は三つの形に大別できる。流動条件とこれら3種類の浮遊波の関係を示すと、図9のようになる。図9には本実験点のすべてが示されている。また、図9中の曲線群は下記の意味を有する。

(1) 気体スラグの平均長さを l_g と書き、 $l_g=0.1, 0.2, 0.4$ および 1.0 m に対する曲線が描かれている。これらは本実験データに基づいて求めたもので、次式で相関される。

$$l_g = 0.43 j_g / (0.30 + j_i) \dots \dots \dots (6)$$

(2) 気体スラグ周辺の液膜流の逆流開始点からその流下端までの長さ l_{rf} が、0, 0.2, 0.5 および 1.2 m に対する曲線群で、気体スラグ先端から逆流開始点までの長さの算定には液膜の流れをポテンシャル流れとしている⁽⁹⁾。ただし、気体スラグの長さには上記の式を用い、速度には Nicklin らの式⁽¹⁰⁾を用いている。 j_g の大きな領域では実線から破線に変わっているが、これは液体スラグが団塊波に遷移した後の領域を示している。

(3) 一点鎖線は壁面せん断応力の時間平均値が零になる流動条件を示している。こ

のデータは窒素ガスと塩化カリウム-フェリフェロシアン化カリウム水溶液の二相流で、表面張力が約20%低い、各相の密度と動粘性係数は空気-水系とほぼ等しい。ただし、供試管内径が44 mm であるため、本実験の25.8 mm のデータとの厳密な対応関係を論ずることは無理と思われるが、比較材料として描いたものである。

図9において、浮遊波が観測されるのは l_g が約0.4

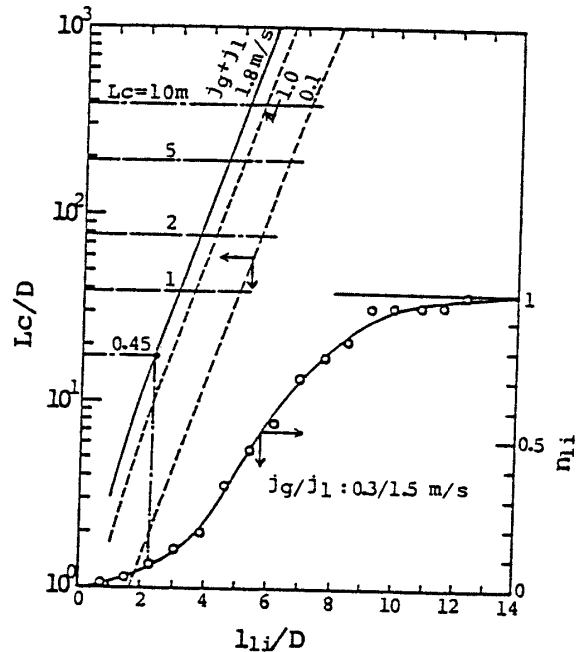


図8 $L_c/D-l_i/D-n_i$ の関係

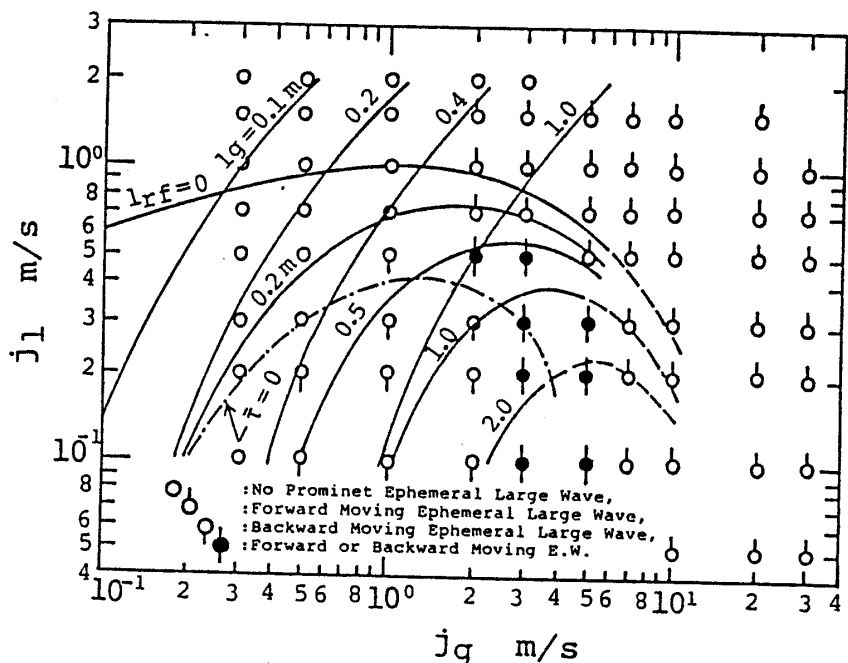


図9 観測点の中に見いだされた浮遊波の種類

m以上の領域であることがわかる。つまり、これ以下の l_0 の領域では波立ちが小さいことを意味している。

$l_0 > \sim 0.4$ mの領域のうち、 $l_{ff} < \sim 0.3$ mでは上向きの浮遊波、逆に $l_{ff} > \sim 0.3$ m/sでは下向き、もしくは上下両方向の浮遊波が出現する。

6. 結 論

(1) 液体塊を液体スラグ、団塊波、じょう乱波および浮遊波の四つに分類し、それぞれの特徴的な挙動を描出した。

(2) 液体塊の挙動と流動条件の関係を理解するに資すると思われる液体ホールドアップ-時間-距離の実験データを提示した。

(3) キャップ気泡領域に見いだされる液体スラグの合体と流れの発達程度を論じ、発達の評価法を提示した。

(4) 浮遊波には正流、逆流および流動方向が複雑に変化する3種類が見いだされたが、これらの出現す

る領域を明らかにするとともに、液膜の逆流長さ、気体スラグの平均長さなどの対応を示した。

終わりに研究の遂行に当たり岡田茂氏(当時九大院生)のご協力を得たことを明記し、謝意を表す。

文 献

- (1) 世古口・ほか4名, 機論, 49-437, B (昭58), 91.
- (2) 世古口・ほか3名, 機論, No. 824-11 (昭57-12), 53.
- (3) Sekoguchi, K., ほか3名, *Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flows*, (1984), 459, Springer.
- (4) Sekoguchi, K., ほか2名, *PCH Physico-Chemical Hydrodynamics*, 6, 1/2 (1985), 239.
- (5) Souhar, M., and Cognet, G., *Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flows*, (1984), 723, Springer.
- (6) Moissis, R., *Trans., ASME, J. Heat Transf.*, 85-4 (1963), 366.
- (7) 武石・ほか3名, 本論文集2800ページ.
- (8) 世古口, 伝熱工学の進展, 1 (昭48), 323, 養賢堂.
- (9) 文献(8)の281ページ.
- (10) Nicklin, D. J., ほか2名, *Trans., Inst. Chem. Eng.*, 40-1 (1961), 61.

討 論

〔質問〕 芹沢昭示〔京都大学工学部〕

以下の点につきお尋ねしたい。

(1) 団塊波につき定常的挙動、過渡的挙動に分類されておいてだが、本来的には定常的挙動は考えにくく、過渡的挙動の1こまにすぎないのではないかと考えるが、いかがお考えか。

(2) 観察では浮遊波の発生・消滅状況が見事にとらえられていて大変興味深く拝見した。浮遊波の挙動についてもその運動方向によって三つに分類されておられるが、この分類は便宜上のものなのか、あるいは流れの構造上独立して扱うべき本質的な違いがあるのか、お教え願いたい。

(3) 式(4)で L_c/D 対 l_{ff}/D を計算する場合、気体スラグ速度 u_g にどのような値をお使いになったのか。

(4) 図9の一点鎖線はどのような流動様式または流動様相に対して得られたものか。

(5) スラグ流が実現しないような口径の大きな流路でも団塊波領域は存在すると考えてよいものなのか。

〔回答〕 (1) 本文に示したように、A, B二種類の波は同じ団塊波に分類されてはいるが形状変化に関して明らかな違いがある。このことは、これら2種類の団塊波が異なった影響下にあることを示して

り、この機構を解明することは団塊波の流動特性を知ろううえで重要であると考えられる。本測定区間において定常的挙動を示している団塊波も観測区間外において過渡的挙動となっている可能性はある。それらの情報は今後さらに観測区間を延長して調査する必要があるが、団塊波の上述のような挙動の違いを説明する際に本観測区間から得られた知見が役立つと考えられるため、上記の二つの群に分けて比較を行ったものである。

(2) 正の速度を有する浮遊波も負の速度を有する浮遊波も先行する団塊波から見れば下向きに移動している点では同様である。しかしながら正の速度を有する浮遊波と負の速度を有する浮遊波の違いは壁面から受ける力が逆方向になっている点である。このことから、浮遊波内部における流動特性は異なっているものとして検討を行うのがよいと考えられる。したがってこの二つを分類した。次にEW-1に分類されている浮遊波は壁面から受ける力の方向が途中で逆転、あるいは波が静止したりするようなものを示しており、上記二つの群とは浮遊波内部の流動機構にも違いがあると考えて第3の群に分類した。

(3) Nicklinらの式： $u_g = 1.2(j_o + j_i) + 0.35\sqrt{gD}$ を用いた。

(4) 流動様式としては大部分がスラグ流およびフロス流に属しているが、 j_g の大きい領域で団塊波領域に入っている部分が含まれているものと考えられる。流動様相としての共通した特徴は、流下液膜部の存在であり、かつその存在時間割合の比較的大きい点にある。

(5) 団塊波は液体スラグが気相によって貫通され

た波であるから、少なくとも液体スラグが出現する管路においてはフロス流から環状流への遷移過程において団塊波が出現するものと考えられる。大口径管における液体スラグ出現の是非は整定区間の問題もあり、ここで論じることはできないが、液体スラグが出現しない管内流でも気泡流から環状流への遷移過程において団塊波が出現する可能性はあると考えられる。