

狭い鉛直長方形管内における気ほう流の流動特性

— ボイド率分布と二相摩擦圧力損失について —

松村 博久・井手 英夫・松川 宗由*
(受理 昭和62年 5月30日)

THE CHARACTERISTICS OF BUBBLE FLOW IN A VERTICAL NARROW RECTANGULAR CHANNEL

— On the void distributions and the frictional pressure drops —

Hirohisa MATSUMURA, Hideo IDE and Muneyoshi MATSUKAWA*

In a vertical narrow rectangular channel, the effect of flow patterns on two-phase frictional pressure drop has been cleared so far, especially the frictional pressure drop in bubble flow has showed the extreme value.

In this report, the flow mechanism of bubbles in the narrow channel has been elucidated by using single and double resistivity probes. Statistical characteristics of the detected void signals have been revealed by using the micro-computer. Certain features have been elucidated for the variations of void fraction, bubble velocity and bubble length distributions which depend on the superficial gas and liquid velocities.

1. 緒 言

著者らは、長方形断面管路のアスペクト比、横長・縦長、水力相当直径などの幾何学的形状および傾斜角が気液二相流の摩擦圧力損失および流動現象に及ぼす影響について、これまでに検討した^{(1)~(5)}。その結果、とくにアスペクト比が大きく、短辺の小さい狭い長方形管内の二相摩擦圧力損失は、流動様式の影響がみられ、気ほう流で極大となり、スラグ流で極小になる傾向を示した。そして、狭い長方形管内の流動現象はアスペクト比が小さく、水力相当直径の大きい長方形管内および円管内の流動とはかなり異なっていた。

本研究は狭い鉛直長方形管内における気ほう流を対象として探針法を用い、気ほうの流動特性を解明するものである。探針より得られる気ほう信号の解析とサンプリングにおける統計的評価の方法を用いて気ほう流の特性を検討し、二相摩擦圧力損失とボイド率、気

ほう速度および気ほう長さ分布との対応を考察している。

2. 実験装置および方法

2.1 空気-水二相流について

実験装置の概略を図1に示す。実験に使用した測定管は透明アクリル樹脂で製作され、断面寸法40.0mm×4.0mm、アスペクト比10.0、水力相当直径7.3mm、管長2500mmの長方形断面管路であり、鉛直に設置されている。

実験に使用した流体は空気と水であり、その流動経路は次のとおりである。

水はオーバーフロータンクより導入され、水流量調節弁①、水流量計②を通過して気液混合部③に流入する。空気は、空気圧縮機④から供給され、ストレーナ⑤と減圧弁⑥を経て、空気流量調節弁⑦で制御され、空気流量計⑧を通過して気液混合部③の水の中に噴出される。気液混合部で二相流となった流体は、測定管⑨内に至り、気水分離器⑩から外部に排出される。

*三菱重工株式会社

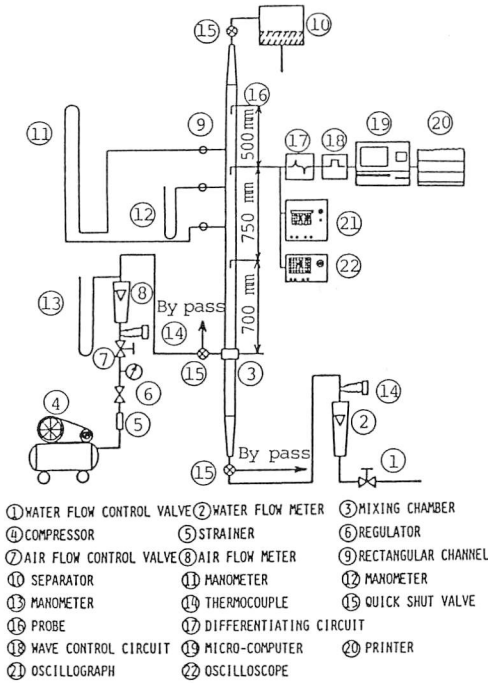


図1 実験装置の概略

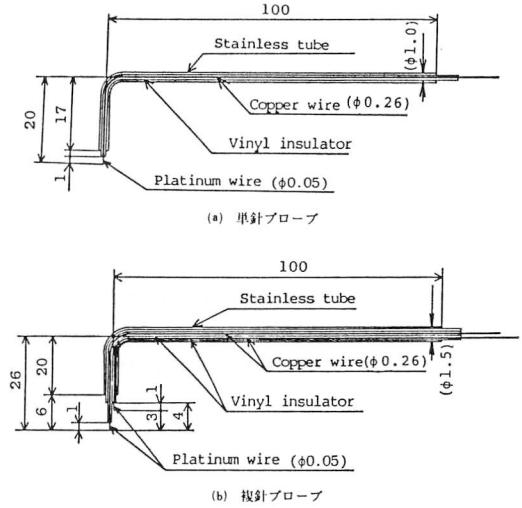


図2 プローブ

ある二進化変数 $E(y, t)$ によって定義することができる。すなわち、プローブ先端が液相内にある場合、 $E_l(y, t) = 1$ 、気相内にある場合、 $E_g(y, t) = 0$ である。断面内の任意点のポイド率は、その点が気相内にある確率として定義される。

ここで、気液二相流は十分に発達した定常確率過程にあり、流れのエルゴード性が成立すると仮定すると、時間平均と空間平均は等しい⁽⁶⁾。すなわち、十分に大きい観測時間において、断面内の任意点が気相であるときの気相存在時間率の時間平均は、プローブ先端を中心とした半径 r の微小面積 F 内に存在する気体の占有面積 F_{gi} の比として表わした断面内の任意点のポイド率 E_g に等しい。これより、次式が成立する。

$$E_g = \frac{\sum F_{gi}}{F} = \frac{1}{T} \int_0^T E_g(y, t) dt = \sum \frac{t_{gi}}{T} \quad (1)$$

ここに、 t_{gi} は気相存在時間であり、 T は十分に大きな観測時間である。この E_g を断面全体にわたった積分から、局所ポイド率 E_{gs} は次式で表わされる。

$$E_{gs} = \frac{1}{F} \int_F E_g dF \quad (2)$$

なお、締切法による平均ポイド率 f_g と局所ポイド率 E_{gs} は、上述した仮定とともに、検査空間内の流動様式が一樣であり、短い検査空間が設定できる場合に一致すると考えられ、3.3節で検討した。

図3は計算機による気ほう信号の統計的処理の流れ図であり、ポイド率計測の例である。

図4は気ほう信号の検出波形(原波形)と整形波形

管内の静圧は水銀マンオメータ⁽¹²⁾と逆U字マンオメータ⁽¹¹⁾により計測され、0.11~0.18MPaの範囲であった。水および空気は銅-コンスタンタン熱電対⁽¹⁴⁾を用い、水は18~24°C、空気は18~28°Cの範囲であった。

管内を水のみが満して流れるとした水のみかけ速度 U_{w0} は0.5~1.5m/s、空気のみが管内を満して流れるとした空気のみかけ速度 U_{g0} は0.2~1.1m/sであり、この範囲において二相流の流動様式は気ほう流であった。

2.2 気ほう信号の統計的処理について

気ほうの流動特性を解明するために、本実験では、図2に示したプローブ(単針および複針プローブ)を気液混合部から700mm, 1450mm, 1950mmの下流位置に挿入した。

管路断面内の任意の点に置かれたプローブによって、気液のコンダクタンスの差から、気ほうの流れは確率事象の時系列に変換される。

図2(a)の単針プローブは、その先端が直径50μmの白金線を用い、先端以外の部分は絶縁され、ステンレス細管に収めたものである。このプローブにより得られる時系列は流れ内の位置 y と時間 t の両方の関数で

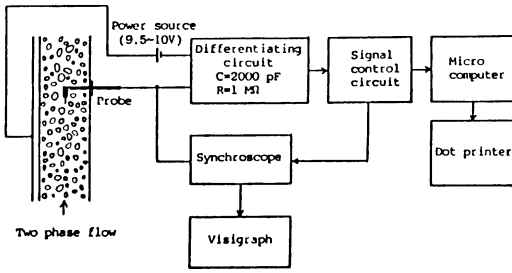


図3 ボイド率計測の流れ図

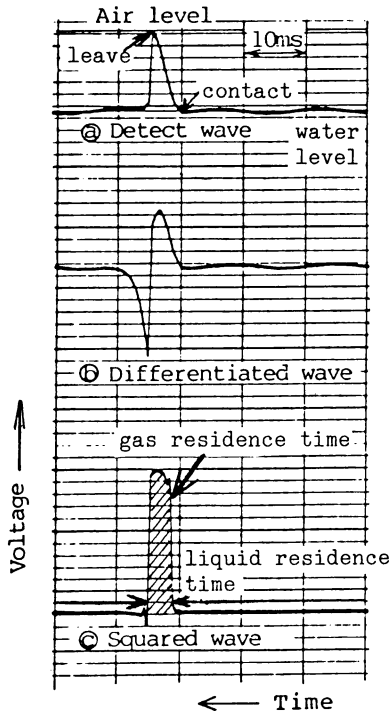


図4 気ほう信号の検出波形と整形波形

の例である。①はプローブを単一気ほうが通過した場合の例である。水レベルと記した図面右から左に気ほうが進行し、プローブに接触 (contact)、通過中に空気レベルに達し、プローブから離脱 (leave) した後、水レベルに復帰する状態を示している。気ほう信号の立下がりおよび立上がり時定数は種々の気ほう径の分布、プローブと気ほうの接触状況、水質等の変化によって、分散することが考えられる。ここでは、気ほうがプローブに接触と離脱の瞬間 (立上がり時と立下がり時刻) を明確に分離するために、原波形を②図のように、1階微分した後に、③図の矩形波に波形整形した。③図の気ほう存在時間および液体存在時間は計算機の内

部クロック (8 MHz) により計数され、式(1)で定義されるボイド率を統計的に算出した。

図5は気ほう速度の検出波形の例であり、図2(b)の複針プローブを用いて得られる。図5の下部の波形は複針先端部の第1プローブ波形、上部の波形は第1ブ

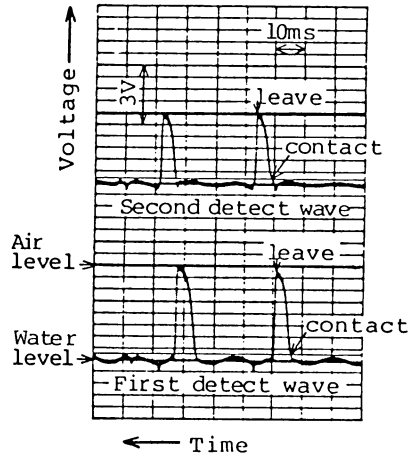


図5 気ほう速度検出波形

ローブから距離 3 mm 下流の第2プローブ波形である。気ほう速度はこれらの信号の遅れ時間とプローブ間距離により算出し、プローブが気ほうを鉛直に貫通するときの気ほうの長さは、気ほうが第1プローブを通過する際の気ほう存在時間と気ほう速度の積から算出した。

なお、結果を整理するにあたり、座標軸は気液混合部より鉛直上方にX軸、これに直交し、管中心から長辺方向にY軸をとり、長辺の半幅をHで表わしている。

3. 実験結果および考察

3.1 気ほう存在時間のひん度分布

気ほうがプローブに接触し、離脱するまでの気ほう存在時間のひん度 f_b について、図6および図7にその一例を示している。

図6は気液混合部から1450mmの位置での空気および水のみかけ速度が小さい場合のひん度分布である。図7は同じ位置で空気および水のみかけ速度が大きい場合のひん度分布である。本実験では統計的に母集団として十分な気ほう数を12000個 (これはサンプリング時間にして、20~60秒間に相当する) として、断面内の3点 (管中心、管壁側およびその中間位置) を代表して調べた。

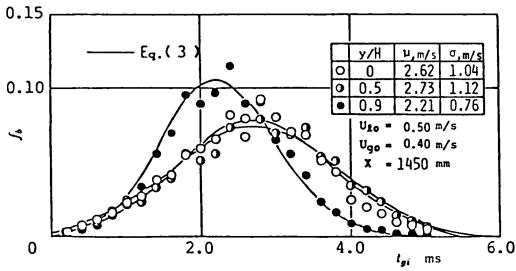


図 6 気ほう存在時間のひん度分布

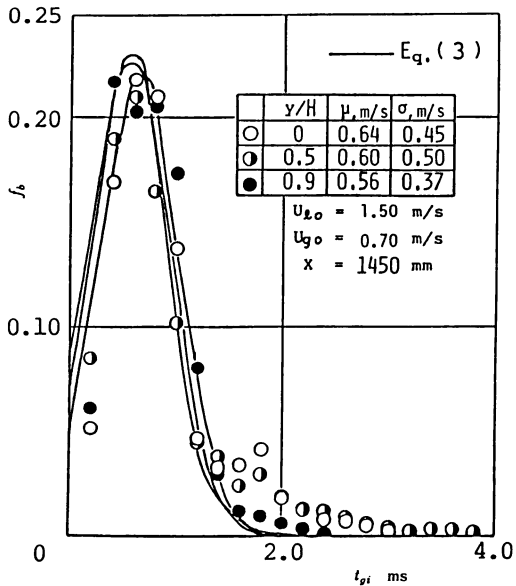


図 7 気ほう存在時間のひん度分布

気ほう存在時間の分布が正規分布であると仮定すれば、分布はつぎの確率密度関数で表わされる。

$$f_b(t_{gi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left\{-\frac{(t_{gi}-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

ここに、 t_{gi} は気ほう存在時間であり、 μ および σ は、それぞれ平均気ほう存在時間および標準偏差である。図中の実線は、実験によって得られた平均気ほう存在時間および標準偏差を式(3)に代入し得られたものである。これらの図から式(3)と気ほう存在時間のひん度分布はよく一致しており、これらは正規分布であることがわかる。図8および図9は正規確率紙上での気ほう存在時間の累積Crの分布である。分布はほぼ直線関係で表わされ、正規分布であることがわかる。

また、図6および図7より、水および空気のみかけ速度が小さい場合の気ほう存在時間率分布は、みかけ

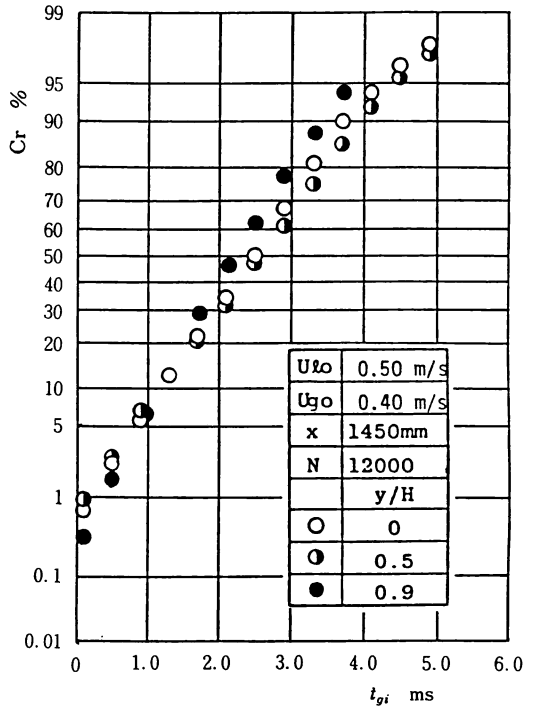


図 8 気ほう存在時間の累積分布

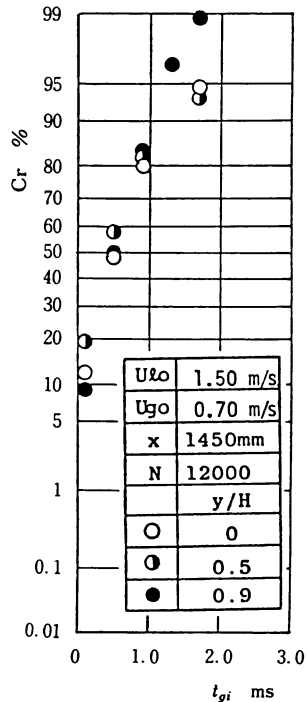


図 9 気ほう存在時間の累積分布

速度が大きい場合の分布に比べ、標準偏差が大きく、尖度が低い分布となっており、流動気ほうは種々の気ほう寸法で構成されていることが考えられる。

3. 2 気ほうサンプル数について

母集団の気ほう数Nを推定するのに必要最小限の気ほうサンプル数nは、つぎの関係式によって表わされる⁷⁾。

$$n \geq \left[\left(\frac{\delta}{2C} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{N} \right) + \frac{1}{N} \right]^{-1} \quad (4)$$

ここに、 δ は危険率であり、本実験では0.05とした。また、Cは変動係数(=σ/μ)である。

式(4)は母集団の気ほうが大きいと、変動係数のみに依存し、変動係数が大きいとサンプル数も多くとる必要があることを示している。

図10は気ほうサンプル数の推定の例である。これに

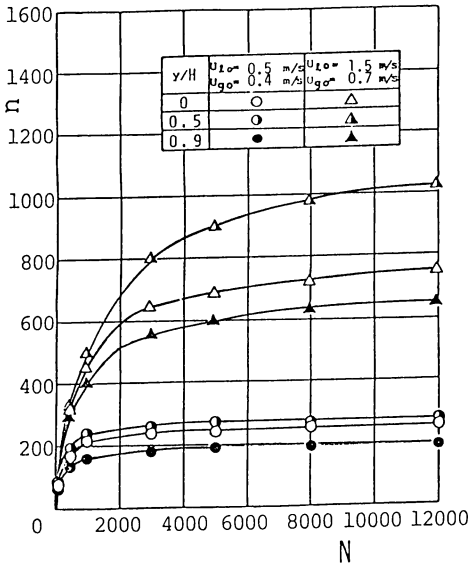


図10 気ほうサンプル数の推定

よれば、母集団の気ほうが増加すると気ほうサンプル数は一定値に近づくことがわかる。本実験の場合、水および空気のみかけ速度が大きく、管中心と管壁との中間位置で、変動係数が大きいいためサンプル数が大きくなっている。本実験範囲では、気ほうサンプル数が1020個以上の計測時間をとれば、母集団を推定できることがわかる。

3. 3 ボイド率分布について

図11, 図13および図15は気液混合部から700mm,

1450mm, 1950mmの下流位置における断面でのボイド率分布である。図中の E_{gs} は局所ボイド率である。また、図中の断面内の任意点のボイド率 E_g は、3.2節で定義した気ほうサンプル数2000のアンサンプル平均である。これらの図により、水および空気のみかけ速度による分布の変化について、また、流動方向での分布の変化について考察する。

図11は空気のみかけ速度が一定で、水のみかけ速度が大きい場合の例である。この場合のボイド率分布は、

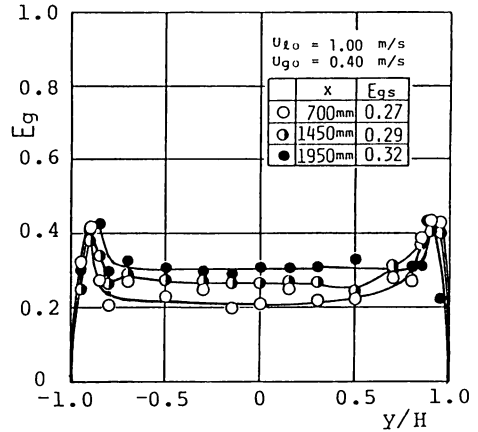
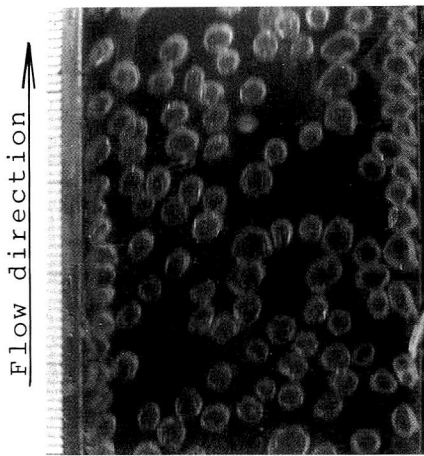


図11 ボイド率分布

管壁付近のボイド率が管中心より大きく、管中心ではほぼ一様な分布になっている。これは従来、円管内の気ほう流で報告されているくら形分布⁸⁾と同様の分布である。また、分布の流動方向での変化について、下流側の局所ボイド率およびボイド率分布は、わずかであるが大きくなっている。図12はこの分布を示す場合の流動写真の一例である。この流動写真結果と後述する(図18と図19において)気ほう速度分布および気ほう長さ分布が断面内でほぼ一様な分布であったことから、管壁近くのボイド率のピークは主に気ほう通過ひん度が高いことによると思われる。

図13は水のみかけ速度が図11と同一で空気のみかけ速度が大きい場合のボイド率分布の例である。図より上流において、くら形分布であるが、下流では円管内スラグ流の分布⁹⁾と同様の分布を示した。しかし、流動現象の面で円管の場合とはかなり異なっている。この場合、肉眼および流動写真(図14はその一例である)によれば、気ほうの流動は、下流側で管中心付近に気ほうが密集し、塊状の気ほう群を形成し、一部は長辺方向にふれながら上昇するのが観察された。これは狭

い長方形管内での特徴的な流れと考えられ、表面張力の効果が考えられる。図15は水のみかけ速度が図11の場合より小さい場合の例である。図15と図11より、空気のみかけ速度が一定で水のみかけ速度が小さくなると図中の黒丸の記号が示すように、分布はくらし形分布から管中心付近のポイド率が大きい分布に変化することを示している。なお、図15の場合の水および空気のみかけ速度は図13および図14の場合と異なるが、ポイ



X=1450 mm
Shutter speed 1/2000s

$$\begin{pmatrix} U_{\ell 0} = 1.00 \text{ m/s} \\ U_{g 0} = 0.40 \text{ m/s} \end{pmatrix}$$

図12 流動写真 (くらし形分布の例)

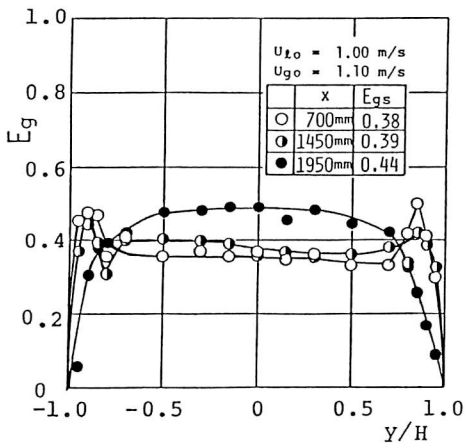
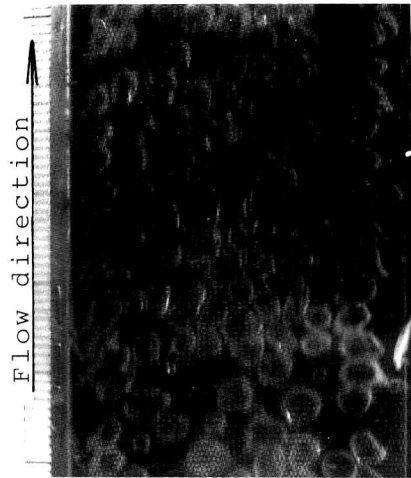


図13 ポイド率分布



X=1450 mm
Shutter speed 1/2000s

$$\begin{pmatrix} U_{\ell 0} = 1.00 \text{ m/s} \\ U_{g 0} = 1.10 \text{ m/s} \end{pmatrix}$$

図14 流動写真 (塊状気ほうの例)

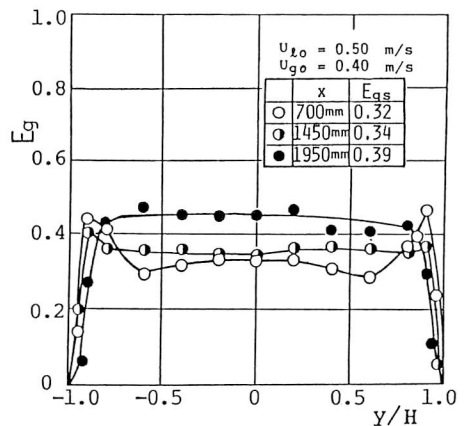


図15 ポイド率分布

ド率分布は図13および図14の場合と同様であり、上流でくらし形分布、下流で管中央のポイド率が大きい分布である。これより、図15における流動現象は図13および図14の場合と同様のことが考察される。

図16は局所ポイド率と縮切法から得られた平均ポイド率 f_g の関係を表す。これより、平均ポイド率と局所ポイド率の一致する位置は気液混合部より1450mmから1950mmの下流区間に存在していると考えられる。

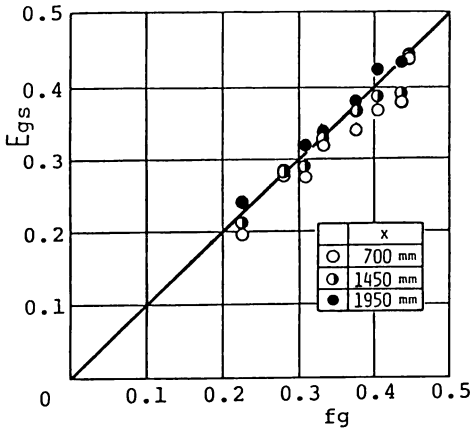


図16 局所ポイド率と縮切法の平均ポイド率

3.4 気ほう速度分布と気ほう長さ分布について

気ほう速度および気ほう長さについてもポイド率の算定と同様にサンプル数の評価を行ない、本実験範囲では約100個の標本で母集団を推定できることがわかった。

図17は気ほう速度のひん度 f_v の分布を表わしている

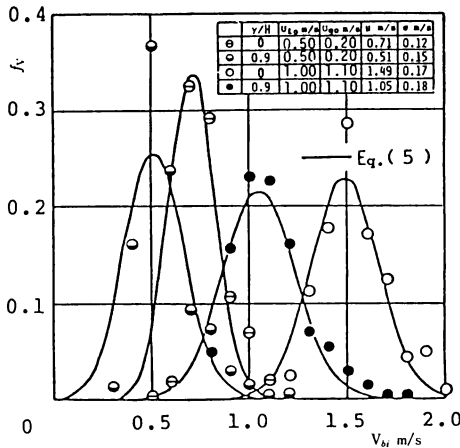


図17 気ほう速度ひん度分布

る。気ほう速度のひん度分布が正規分布であると仮定すれば、分布は式(3)と同様の確率密度関数である式(5)で表わされる。

$$f_v(V_{bi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v} \exp\left\{-\frac{(V_{bi} - \mu_v)^2}{2\sigma_v^2}\right\} \quad (5)$$

ここに、 V_{bi} は個々の気ほうの速度であり、 μ_v および σ_v は、それぞれ平均気ほう速度および標準偏差で

ある。図中の実線は実験から得た μ_v と σ_v の値を式(5)に代入したものである。

図17は管路中心における気ほう速度が管壁付近より大きいことを示している。このひん度分布から得られる平均気ほう速度 V_b について、断面内の分布は図18に示し、平均気ほう長さ L_b について断面内の分布は図19に示した。

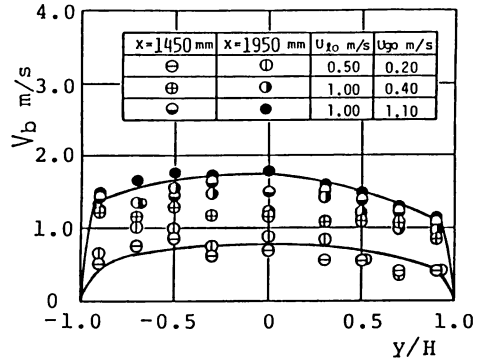


図18 気ほう速度分布

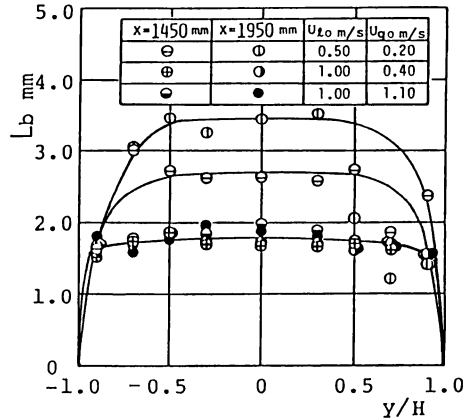


図19 気ほう長さ分布

図18より、気ほう速度分布は、ポイド率分布の上流から下流への変化の度合いに比べ、断面内で比較的一様な分布と考えられる。また、下流側の気ほう速度は上流側よりいくぶん大きくなっており、水および空気のみかけ速度が大きい管路中心の速度がわずかに大きくなっていることがわかる。

図19より、水および空気のみかけ速度が小さい場合の気ほう長さは長く、上流と下流での差異は大きいですが、水および空気のみかけ速度が大きい場合の気ほう長さは、断面内ではほぼ一定の分布を示している。

3.5 摩擦圧力損失について

図20は平均ボイド率と一致する局所ボイド率を用いて、二相流の摩擦圧力損失の実験結果を Lockhart-Martinelli の方法¹⁰⁾により整理したものである。

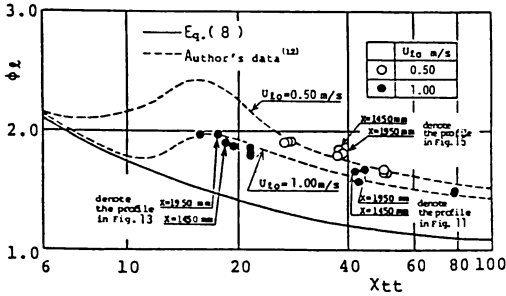


図20 二相摩擦圧力損失

縦軸は二相流と水単相流の摩擦圧力損失比 ϕ_e であり、式(6)で定義される。

横軸は気液を、それぞれ単独に流した場合の単相流の摩擦圧力損失比であり、式(7)で定義される気相および液相ともに乱流の場合のマルチネリ・パラメータ X_{tt} である。

$$\phi_e = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{tp} / \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{e0}} \quad (6)$$

$$X_{tt} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{e0} / \left(\frac{\Delta P_f}{\Delta L}\right)_{g0}} \quad (7)$$

ここに、 $(\Delta P_f / \Delta L)$ は単位長さ当りの摩擦圧力損失であり、添字 tp は二相流、 $e0$ は水単相流、 $g0$ は空気単相流を表わす。

図中の実線は円管における Chisholm-Laird¹¹⁾による実験式(8)を表わす。

$$\phi_e = \sqrt{1 + (21/X_{tt}) + (1/X_{tt})^2} \quad (8)$$

図中の破線は著者らによる狭い長方形管路内の二相摩擦圧力損失の実験結果¹²⁾を表わしている。

図20は狭い長方形管路内の二相摩擦圧力損失が円管の場合より大きく、水のみかけ速度が小さい場合に顕著となる流動様式の影響を示したものである。すなわち、 X_{tt} が小さくなるにつれて、二相摩擦圧力損失は増大し、気ほう流で極大、スラグ流で極小になった後、再び増大する傾向を示している。図中の白丸および黒丸の記号は局所ボイド率を用いて算出した本実験結果である。

二相摩擦圧力損失が極大を示す場合に対応するボイド率分布および流動写真は前述の図13および図14であ

り、くらは形分布の場合と狭い長方形管内に特徴的な塊状気ほう(密集気ほう)が形成される場合であった。

4. 結 言

狭い鉛直長方形管内の気ほう流の流動特性に関して探針法を用いて、気ほうの統計的処理を行ない、二相摩擦圧力損失とボイド率分布等との対応を検討したことから、つぎのようなことがわかった。

(1) 気ほう流における気ほう存在時間のひん度分布は正規分布である。

(2) 断面内の任意点のボイド率の計測時間は変動係数の大きさに依存し、本実験範囲において、気ほう数が1020個以上の計数時間をとればよい。

(3) 任意断面のボイド率分布は、水のみかけ速度が大きい場合、管壁付近にピークをもち管路中央でほぼ一様なくらは形分布である。水のみかけ速度が小さい場合にみられる円管内スラグ流に類似の分布、すなわち管中央のボイド率が大きい分布は、管路中央に集中する塊状気ほうの形成によるものである。

(4) 任意断面の気ほう速度分布は比較的一様であり、気ほうの長さ分布は、水のみかけ速度が大きい場合に一定であった。

(5) 局所ボイド率を用いて算出した二相摩擦圧力損失は従来の狭い長方形管内における結果とよく一致し、二相摩擦圧力損失の極大は、くらは形のボイド率分布と狭い長方形管路内に特有な塊状気ほうの形成がある場合に対応している。

あ と が き

本研究の遂行に対し、実験装置および気ほう信号と計算機のインターフェイス回路の製作等に多大な御援助を頂いた鹿児島大学工学部、中央実験工場：有馬武城氏、電子工学科：南竹 力氏、機械工学第二学科流体工学講座：十田正文氏に感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 松村・井手：長方形管内気液二相流の研究(第1報 水平管内における流動と圧力損失), 鹿児島大学工学部研究報告, 第17号(1975-9), 25.
- (2) 松村・井手：長方形管内気液二相流の研究(第2報 傾斜管内および鉛直管内の上向流における流動と圧力損失), 鹿児島大学工学部研究報

- 告, 第18号 (1976-12) 55.
- (3) 松村・井手：長方形管内気液二相流の研究 (第3報 水力相当直径の流動と圧力損失への影響), 鹿児島大学工学部研究報告, 第19号 (1977-11), 35.
- (4) 松村・井手：長方形管内気液二相流の研究 (第4報 摩擦圧力損失の整理方法の検討), 鹿児島大学工学部研究報告, 第20号 (1978-9), 35.
- (5) 松村・井手：長方形管内気液二相流の研究 (第5報 摩擦圧力損失の整理式についての一考察), 鹿児島大学工学部研究報告, 第20号 (1978-9), 43.
- (6) 添田・中溝・大松：信号処理の基礎と応用, (1979), 71, 日新出版。
- (7) 多賀：サンプル調査の理論, (1976), 98, サイエンス社。
- (8) 小林・飯田・鍾ヶ江：垂直管内における気液二相流のボイド比分布, 日本機械学会論文集, 35-280 (1969) 2365.
- (9) 赤川・坂口：気液二相流のボイド率変動特性に関する研究 (第2報 小気ほうを考慮した流動状況の解明), 日本機械学会論文集, 31-224 (1965), 594.
- (10) R. W. Lockhart and R. C. Martinelli : Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Component Flow in Pipes, Chem. Engng. Progr., 45-1 (1941-1), 39.
- (11) D. Chisholm and A. D. K. Laird : Two-phase Flow in Rough Tubes, Trans. ASME, 80-2 (1958-2), 276.
- (12) 井手・松村：長方形管内気液二相流の流動と圧力損失 (摩擦圧力損失の整理式についての一考察), 日本機械学会講演論文集, 810-15 (1981), 307.