水平管内気液二相流の差圧変動の統計的性質と流動様式* (流路断面上下差圧の場合)

松井 剛一**, 逢澤 俊彦***, 森田 章靖†

Statistical Properties of Differential Pressure Fluctuations and Flow Patterns in Horizontal Gas-Liquid Two-Phase Flow (Differential Pressure between the Top and the Bottom of a Tube Cross-Section)

by Goichi MATSUI, Toshihiko AIZAWA, and Akiyasu MORITA

Differential pressure fluctuations are used to measure flow patterns of horizontal two-phase flow because the fluctuations seem to be closely connected with the flow structure. The differential pressure is used to eliminate the effect of pressure fluctuations occurring outside the test section and is measured at the interval between the top and the bottom at a cross-section of a tube to detect a local and instantaneous flow change. The experimental results show that the horizontal flow of nitrogen gas (or air)-water mixture exhibits peculiar features of statistical properties such as the probability density function, the power spectral density and the cross-correlation, and its flow patterns can be classified by using the features. The results suggest that it is possible to identify the flow patterns of horizontal two-phase flow.

Key Words: Multiphase Flow, Flow Patterns, Horizontal Gas-Liquid Flow, Statistical Properties, Differential Pressure Fluctuations, Experimental Study

1. 緒 言

気液二相流の流動様式は、圧力損失や熱伝達係数などのプラントの設計パラメータと密接な関係があり、流動様式を知ることによって、流れの理解が深まるばかりでなく、二相流に関連した設計パラメータの正確な予測やプラントの合理的かつ安全な運転を行うことができる。それゆえに、流動様式の正確な把握は、二相流を取扱う上での基本であるといえる。

従来、流動様式は目視観察によって判別され、流動様式線図にまとめられてきた⁽¹⁾。線図を描くためのパラメータについて、できるだけ一般性をもたせるように研究されてきたが、簡便さの理由で、液体流量（体積流束）と気体流量（体積流束）を座標軸にするものが多い^{(2)~(5)}。しかし、従来の流動様式判別は、視察や写真によっているために、定性的であり、判別の際に観測者の主観が入る恐れがある。また、同じ運転条件でも、測定位置によって流動様式が異なる場合がある

ことも知られている。

そこで、近年、測定位置に特に配慮せず、判別の際に観測者の主観の入らない方法が開発されつつある。例えば、 γ 線⁽⁶⁾、X線⁽⁷⁾、中性子⁽⁸⁾⁽⁹⁾、圧力変動^{(10)~(13)}を利用する方法が報告されている。これらの検出信号の統計的性質を利用する方法も多い。しかし、利用の経済性、安全性、簡便性を考えるとき、實際上容易に実用できない場合もある。いずれにしても、実際に生じている流動様式を、局所的にかつ客観的に、しかも簡便に測定する方法が望まれている。

この要請を満足する方法の一つとして、圧力変動を利用する方法が挙げられる。Hubbardら⁽¹⁰⁾は、水平管内の流動様式測定を、壁面圧力変動のパワースペクトルの特徴によって行うことを提案した。静圧は、測定点以外の圧力変動に影響されやすいので Hubbard らは、細心の注意を払って実験を行った。また、Weismanら⁽⁹⁾は、流れ方向 15 cm 間隔の差圧の変動周波数と振幅の特徴を利用して、流動様式を分類して、判別の手がかりを得た。この場合、差圧区間の取り方によって、流動様式測定結果に、微妙な違いが現れる恐れがある。

そこで、本研究では、客観的かつ局所的な流動様式測定法の開発研究の一環として、測定部以外の圧力

* 昭和 61 年 4 月 3 日 第 63 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 7 月 2 日。

** 正員、筑波大学構造工学系 (〒305 茨城県新治郡桜村)。

*** 筑波大学大学院。

† (株)神戸製鋼所機械研究所 (〒361 神戸市中央区脇浜町 1-3-18)。

変動の影響を除くことができる差圧を利用することを考える。そして、水平管内気液二相流を測定対象として、同一流路断面の上下差圧の変動の統計的性質と流動様式との関係を明らかにすることを本研究の目的とする。差圧変動を利用する方法は、垂直管内気液二相流について報告されている^{(11)~(13)}。本研究では、基本的にその測定概念を利用するものであるが、測定の幾何学的配置は異なっている。

二相流の局所的な流動変化を適確に把えるために、流路断面の上下差圧変動を利用し、検出された差圧変動のデータ系列からこの統計的性質すなわち、確率密度関数 (PDF)、パワースペクトル密度 (PSD)、相互相関関数の各流動様式に対する特徴を求める。その結果、PDF および PSD の形状が、主な流動様式に対して顕著な特徴を示すことが明らかとなり、分布形状を表す統計パラメータ (標準偏差, ゆがみ係数, とがり係数) の特徴によって、主な流動様式 (とくに気泡流, 間欠流, 分離流) の分類が可能であることがわかった。

2. PDF, PSD と統計パラメータの定義

PDF 等時間間隔 Δt の i 番め Δt_i で測定された信号 $x(t)$ の値が, 等分割された幅 Δx の k 番め Δx_k に入るとして, 全測定時間 T の間に N 回測定して, そのうち n_k 回が Δx_k に入るとすれば,

$$\lim_{\Delta x_k \rightarrow 0} \frac{n_k/N}{\Delta x_k} = \lim_{\Delta x_k \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x_k} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta t_i}{T} \quad \dots\dots\dots (1)$$

は, PDF (x)_k を与える。

PSD $|t| \leq T_p (< T)$ で $x(t)$ に一致し, それ以外で零となる一つの標本信号を $x^{(k)}(t)$ とすると,

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left\{ \lim_{T_p \rightarrow \infty} \frac{|X^{(k)}(j2\pi f)|^2}{2T_p} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし,

$$X^{(k)}(j2\pi f) = \int_{-\infty}^{\infty} x^{(k)} e^{-j2\pi f t} dt \quad (k=1, \dots, K),$$

$$j^2 = -1$$

は, PSD (x) を与える。

統計パラメータ N 個の信号列 $\{x_i\}$ に対して,

$$\text{標準偏差 } \sigma = \left[\sum_{i=1}^N (x_i - m)^2 / N \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ゆがみ係数 } \gamma_1 = \mu_3 / \sigma^3 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{とがり係数 } \gamma_2 = \mu_4 / \sigma^4 - 3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし,

$$m = \sum_{i=1}^N x_i / N, \mu_n = \sum_{i=1}^N (x_i - m)^n / N$$

3. 実験装置と計測法

実験装置の概略を図 1 に, 測定の配置図を図 2 に示す。実験装置は, ループ式で, 上部水平部は流量計, 混合部, テスト部で構成され, 気液分離タンクに接続されている。テスト部は, 内径 20 mm の透明アクリル管であり, 圧力測定位置は, 図 2 に示す通りの配置で合計 4 点である。作動流体として, 窒素ガス (または空気)-水二相流を用いた。

水とガスは, 混合部 (100 μ メッシュの焼結合金または ϕ 4.8 mm のノズル使用) で混合されて二相流を形成し, 大気圧開放下の気液分離タンクで分離される。水流量は, タービン流量計で測定され, 気体流量は, 浮子式面積流量計と流量計出口の精密ブルトン管圧力計の読みから算出される。水流量とガス流量を調節して所定の二相流を作る。

静圧 $p_i (i=1 \sim 4)$ は, 図 2 に示すように, 上流側流路断面で, p_1, p_2 を, 下流側断面で, p_3, p_4 を, 拡散形圧力変換器 (定格圧力 ± 30 kPa, 一次共振周波数 600 Hz) によって測定する。測定区間は, 上下方向 $D=20$ mm であり, 流れ方向 $L (=10D)=200$ mm である。検出した信号は, 直流増幅器 (DC ~ 10 kHz) で増幅され, 20 $\sim$ 40 Hz のローパスフィルタおよび 12 ビットの A/D コンバータ (変換時間 20 μ s) を通ってミニコンでオンライン処理される。サンプリング数は, 各圧力変換器で 2048 であり, サンプリング間隔は, 10 ms あるいは一部の高流量域で 3 ms とした。これらのサンプリング条件は, 本実験範囲で, PDF と PSD の形状の特徴が把えられるように決められた。そして, PSD は, Hamming のラグウィンドウによって平滑化され, また, ローパスフィルタによってエイリアシングの影響が除かれている。

静圧信号には測定部以外の圧力変動も含まれるためこれらの影響を除去するために差圧がとられる。まず,

図 1 実験装置の概略図

図 2 測定配置図

四つの静圧 $p_i (i=1\sim 4)$ から、差圧 $\Delta p_a (=p_1-p_2)$, $\Delta p_b (=p_3-p_4)$ を算出する。高さ D の静止液圧 $\rho_L g D$ (ρ_L : 液体密度) からこの差圧を引いたものを $\rho_L g D$ で正規化した量

$$\Delta P_i = 1 - \Delta p_i / \rho_L g D \quad (i=a, b) \dots \dots \dots (6)$$

は、ゆるやかな流れでは流路断面における気相部の高さに相当する値を示すので、 ΔP_i を統計変数として用いるのが便利であると思われる。ここで、 $\Delta P_i=0$ の側は液相、 $\Delta P_i=1$ の側は気相を示している。

また、実験結果を従来の流動様式と対比させるため、被測定流動様式は、視察および写真観測によって確認した。

測定は、体積流束で表して、水 $U_L=0.03\sim 3$ m/s, ガス $U_G=0\sim 40$ m/s の範囲で行われ、流動様式は、気泡流、プラグ流、スラグ流、環状流および分離流を観測することができた。結果は、図3に示されている。この線図は、世古口⁽²⁾、坂口ら⁽³⁾、Mandhane ら⁽⁴⁾、Weisman ら⁽⁵⁾の線図と類似である。

4. 差圧利用の検討

まず、圧力信号を利用して流動様式の特徴を見出す場合の望ましい信号の検討を、特異な特徴を示す間欠流の場合について行った。

図4に、一例としてプラグ流(図7)の場合の静圧信号 p_1 (下部)、 p_2 (上部)、流れ方向差圧信号 $\Delta p_{13} (=p_1-p_3)$ および断面上下差圧 $\Delta p_{21} (=p_2-p_1: \Delta P_a$ に相当)の圧力信号とそのPDFを示す。間欠流の特徴をよく表すPDF形状を示すのは、 Δp_{21} であり、ついで Δp_{13} であるといえる。また、ここに示さないが、PSD はいずれの信号も約8 Hz にピークを示す分布であ

る。しかし、スラグ流(図8)の場合、PSDの分布は、差圧と静圧では異なり、差圧のPSDは約2.5 Hz にピークを示すのに対して静圧のPSDは約1 Hz にピークを示す分布となって分離流の場合のそれに似かよっている。したがって、プラグ流、スラグ流の場合の圧力信号は、いずれも間欠流の特徴を捉えているが、スラグ流の場合には静圧信号のPSDのピークは必ずしもスラグの通過周波数を示しているとはいえない。よって、静圧信号は、一般に測定部以外の圧力変動の影響を受けて、測定部の流動状態の特徴を捉えそこなう恐れがある⁽¹²⁾。ゆえに、差圧信号を利用するのが好ましいといえる。

流れ方向差圧信号 Δp_{13} は、測定区間の流動状態の特徴を表すが、差圧区間の長さに比べて気泡やプラグが小さい場合には、その特徴を捉え難く、より詳細に流動様式と対応させる場合には注意を要する。すなわち、長い差圧区間の場合には、空間分解能が劣ると考えられる。ちなみに、図4(a)に示した例は、 Δp_{13} の変動を利用する Weisman らの判定規準⁽⁵⁾では、プラグ流ともスラグ流とも判断できない。

断面上下差圧 Δp_{21} の場合には、上述のように測定

図3 流動様式線図

(a) 各種圧力信号

(b) 各信号のPDF

図4 各種圧力信号の比較

部以外の圧力変動の影響を除去して、流れの特徴をもっともよく表す PDF を示す上、流れの方向に対しては、点と考えられる測定であるから、空間分解能を低下させることなく流動状態を把握されることが期待できる。それゆえに、本研究では、この断面上下差圧を利用するのが好ましいと判断した。しかし、流れ方向差圧もまた流動様式の特徴を把握できるので、これの統計的性質については、別に報告する予定である。

5. 実験結果および考察

実験は、水平管内でみられる代表的な二相流の流動様式(気泡流、プラグ流、スラグ流、環状流および分離流)について行った。図5～図10に各流動様式の典型的な実験結果を示す。各例について、流動状態の写真、PDF、PSD、相互相関関数 ϕ_{ab} および両相の体積流速 U_L , U_G 、標準偏差 σ 、ゆがみ係数 γ_1 、とがり係数 γ_2 の値、さらに、PSD 分布に対する統計パラメータ σ_s , γ_{1s} , γ_{2s} の値が示されている。なお、PDF, ϕ_{ab} は、作図の都合上、最頻値または最大値で正規化してある。結果は ΔP_a を用いている。ここに示した例は、 ΔP_a と ΔP_b の PDF が同じ形状を示すものであり、流れは定常であるとみなされるものである。

5.1 各流動様式における PDF の特徴

5.1.1 気泡流(図5) 写真にみられるように液相中の小気泡が管内上部に分散している流れ。 ΔP_a の PDF は、気泡の分散により正規分布とみられる形状を示す。 σ は一般に小さく、 γ_1, γ_2 は零に近い値を示す。大流量の場合には σ の値は大きくなる傾向がある。

5.1.2 プラグ流(図6, 図7) 写真にみられるように、流路上部に列をなした気泡が、ある間隔をもって流れている。ガス流量の少ない場合(図6)、 ΔP_a の PDF は、全測定時間に対する気相の存在時間の割合と気相高さに応じて、正の側にすそをひく幅の狭い単峰性を示す。 σ は小さく、 γ_1, γ_2 は正の値を示す。ガス流量を増加させると、気泡は大きくなり、PDF は正側にもピークを有する双峰性を示す。 σ は大きくなり、 γ_2 は負となる。さらに、ガス流量を増加させると($U_G = 0.05$ m/s 前後)、二つのピークは同程度の高さになるが、気相部の幅のほうが広い。 σ はさらに大きく、 γ_1 は負となる。さらに、ガス流量を増加させると、いったん負側のピークが低下するが、再び両ピークが同程度の高さを示す(図7)。 σ はさらに大きく、 γ_1, γ_2 はともに負である。さらに、ガス流量を増加させると、負側のピークが低くなっていく。二つのピークの高低は、

気相の速度の増加と長さに応じて現れるものと解釈される。

5.1.3 スラグ流(図8) 写真にみられるように、大気泡間の液相部に多数の小気泡を含む流れである。PDF は、幅の広い著しく負側にすそをひく単峰性を示し、プラグ流にみられたような顕著な双峰性は示さず、プラグ流の場合より σ は大きく、 γ_1 は負、 γ_2 は正の値を示す。

5.1.4 環状流(図9) 写真にみられるように、管壁に液相、管中央に気相が流れる流れで、PDF は、幅の広い正規分布とみられる形状を示し、 σ は大きい。スラグ流のそれより小さい。 γ_1, γ_2 は零に近い値を示す。

5.1.5 分離流(図10) 写真にみられるように管内の上部に気相、下部に液相が流れる流れで、PDF は著しく幅の狭いのがった形状を示し、 σ は著しく小さく、 γ_1 の値は零に近く、 γ_2 は正の値を示す。

$\sigma, \gamma_1, \gamma_2$ の二相流における物理的意味を実験結果と照合して考察すると以下のように解釈される。

σ 断面上下間における気相の時間的変化の散らばりの程度を表す。 σ の値が大きいほど変化の範囲が大きい。

γ_1 平均的な気相割合の流れに加えて、 γ_1 が正であれば、大きな気相割合の流れの存在、負であれば、小さな気相割合の流れの存在を示唆する。

γ_2 正であれば、ピーク近くの気相割合の流れに加えて、広範囲にわたるが、出現率の低い気相割合の流れの存在を示唆する。負であれば、小さな気相割合の流れ(例、気泡流)と大きな気相割合の流れ(例、環状流)の両方からなる流れを示唆し、高いピークをもつ流れのほうが出現率が高い。

なお、 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ であれば、気相割合が極端には変化しない層状的な流れである。

大流量や激しい流れの場合には、PDF は、 ΔP_a の値にして $[0, 1]$ の外に分布することが起こる。これは、圧力変換器の零点が水単相流時にとられており、二相流時には、気相が断面一様に分布せず上部に片よるため、両相の密度と流速の違いによる上下圧力検出位置での動圧のかかり方が異なることや、上下壁面での液膜厚さの違いによる界面張力のかかり方が異なることなどの影響を受けるためと考えられる。それにもかかわらず本実験の範囲では、PDF 形状は、流動様式の特徴を表しているので、以上の結果は、十分利用できる。ただし、激しい流れの場合などの ΔP_a の平均値が正しく得られないことがあるので、ここでは平

均値については言及しない。

以上の結果をまとめると表1のようになる。これから断面上下差圧の変動のPDF形状およびPDF形状を定量的に表す統計パラメータ σ , γ_1 , γ_2 は、水平二相流の主な流動様式に対して、その特徴をよく表していることがわかる。したがって、PDFの特徴を利用して、各流動様式の分類が可能であるといえる。一般に、気泡流の場合の σ の値は、環状流の場合のそれに比べて小さいが、大流量になると大きくなる傾向があるので、環状流と気泡流の区別がつけにくい場合があるこ

とに注意を要する。

5.2 各流動様式におけるPSDの特徴

5.2.1 気泡流 (図5) ΔP_a のPSDは、白色雑音とみられる一様な分布を示し、パワーの値は小さい。この分布の標準偏差 σ_s は大きな値を示し、ゆがみ係数 γ_{1s} は小さく、とがり係数 γ_{2s} は負の値である。

5.2.2 プラグ流 (図6, 図7) PSDは、零以外の振動数にピークを有する分布を示している。このピーク振動数は、プラグの平均通過振動数に対応している。流量の低い場合(図6)は、幅の広い分布を示すの

図5 気泡流の統計的性質

図6 プラグ流の統計的性質

図7 プラグ流の統計的性質

図8 スラグ流の統計的性質

図9 環状流の統計的性質

図10 分離流の統計的性質

で、プラグの通過がかなり不規則的であることがうかがえる。流量が増えるにつれて（例えば図7）通過振動数の変動の幅が狭くなり、周期性が顕著になることがわかる。

パワーは、流量が増えるにつれて大きくなる。ガス流量の少ない場合のPSD分布の σ_s は中位の値を示し、 γ_{1s} は小、 γ_{2s} は負の値を示す。ガス流量が多い場合には、 σ_s は他の流動様式に比べて小さな値となり、 γ_{2s} は正の値を示すが、 γ_{1s} の値は種々の値と両符号をとるため不定である。それは、流量によってピーク振動数が異なるために、PSD分布のすそのひき方が定まらないからである。

5・2・3 スラグ流(図8) スラグ流の場合のPSDの特徴は、ガス流量の多いプラグ流の場合と類似であって、より明らかなピークを有するように見える。パワーは、プラグ流より大きい。また、 σ_s は小、 γ_{2s} は正の大きな値を示す。 γ_{1s} は不定である。

5・2・4 環状流(図9) PSDは、幅の広いなだらかなピークを有する分布を示すが、一様な分布と解釈できないこともない。ガス流量の少ないプラグ流に対応して、不均一な気液界面の通過が不規則的であることがうかがえる。図9の場合、写真による判別からは

「環状流」と判断したが、PSDからは明確ではないが周期性を有する流れと解釈される。

PSD分布の σ_s は、気泡流と同程度の大きな値、 γ_{1s} は小、 γ_{2s} は負の値を示す。パワーの値はスラグ流のそれより小さいが、気泡流のそれより大きい。

5・2・5 分離流(図10) PSDは、零近傍の振動数にピークを有する特異な分布を示す。パワーは他の流れに比べて最も小さい。PSD分布の σ_s は最も大きな値を示し、 γ_{1s} は正の値、 γ_{2s} は負の値を示す。波状の顕著な流れの場合には、それに対応するピーク振動数を示すと思われるが、そのような流れを作ることができなかったため、別の機会に調べることにする。

σ_s , γ_{1s} , γ_{2s} の二相流における物理的意味は、実験結果と照合して考察すると以下のように解釈される。

σ_s 大きな値をとる場合は、同一断面上下間における気相割合が極端に変化しない流れであり、小さな値をとる場合は、気相割合の変化に周期性がみられる流れを示唆する。

γ_{1s} 小さな正の値の場合は、気相割合が極端に変化しない流れを示唆する。負の場合は、周期性を有する流れ。

表1 各流動様式におけるPDFの特徴

Flow Pattern	PDF	σ	γ_1	γ_2
Bubble	unimodal	small	nearly equal to zero	nearly equal to zero
Plug(U_G : small)	unimodal with trail on the positive side	small ↓	positive	positive
(U_G : middle)	bimodal		positive	negative
(U_G : large)	bimodal		negative	negative
Slug	unimodal with trail on the negative side	large	negative	positive
Annular	unimodal	large	nearly equal to zero	nearly equal to zero
Separated	unimodal	very small	nearly equal to zero	positive

表2 各流動様式におけるPSDの特徴

Flow Pattern	PSD	σ_s	γ_{1s}	γ_{2s}
Bubble	more or less uniform distribution	large	small and positive	negative
Plug(U_G : small)	gently-sloping peak at frequency other than zero	middle	small and positive	negative
(U_G : middle)	peak at frequency other than zero	small	-	positive
(U_G : large)	peak at frequency other than zero	small	-	positive
Slug	peak at frequency other than zero	small	-	positive
Annular	more or less uniform distribution with gently-sloping peak	large	small and positive	negative
Separated	distribution centered about zero	large	positive	negative

γ_{2s} 正の場合は、気体スラグの出現に周期性のある流れを示唆し、負の場合は、広い周波数域にわたって同程度の乱れが存在し、気相割合の極端な変化のない流れを示唆する。

以上の結果をまとめると表2のようになる。これから、断面上下差圧の変動のPSDおよび分布形状を表すパラメータ $\sigma_s, \gamma_{1s}, \gamma_{2s}$ は、水平二相流の主な流動様式に対して、その特徴をよく表していることがわかる。したがって、PSDの特徴を利用して、少なくとも分散流（気泡流）、間欠流（プラグ流、スラグ流）、分離流の分類が可能であるといえる。しかし、環状流は、気泡流との著しい差異が認められないので、その区別が困難であるが、環状流の場合には、気泡流に比べてパワーの値が大きいことおよび零振動数におけるパワーの値とパワーの最大値の差の絶対値が大きいという特徴から、区別が可能であるかもしれない。なお、PSDを用いて三つの流動様式に分類できるという結果は、Hubbardら⁽¹⁰⁾の壁面圧力変動のPSDを用いた結果と全く類似である。

5.3 各流動様式における相互相関関数の特徴

凹凸状や粗密な相分布の流れのように、流れに不均一さがあれば、流れ方向の二点間の差圧の相互相関関数 ϕ_{ab} は、最大値をもつ。この最大値をとる遅れ時間(τ_m)は、不均一さの二点間(L)の輸送時間に対応するので、この値を用いてプラグやスラグの平均速度($\bar{u}_G$)を推算することができる（推算した速度を u_{GE} とする）⁽¹¹⁾。図5～図10には、 ΔP_a と ΔP_b の間の ϕ_{ab} が示されている。流れに周期性がなくても ϕ_{ab} は最大値をもちうる。 τ_m は、プラグ流やスラグ流の場合（図

6～図8）には、気相の流動時間を与える。同図には、 $\bar{u}_G, \tau_m, u_{GE}$ が示され、 $\bar{u}_G$ と u_{GE} のよい一致がみられる。気泡流の場合には、測定区間が気泡長さに比べて長いために、最大値をとる遅れ時間は同一気泡の流動時間を与えているとは限らない。分離流の場合も同様である。環状流の場合は、流れ方向の気液界面のくびれの流動時間を示していると考えられる。

5.4 流動様式遷移域におけるPDFとPSD

流動様式の遷移域におけるPDFとPSDについて考察するために、図11にプラグ流からスラグ流への遷移過程の、図12にスラグ流から環状流への遷移過程のPDFとPSDの変化を例として挙げる。これらは、水流量をほぼ一定にしてガス流量を増加させたものである。

PDF、PSDともに、流量の増加に応じて徐々に連続的に変化してゆく、すなわち、プラグ流からスラグ流への遷移では、PDFが徐々に双峰性を失うのがみられ、スラグ流から環状流への遷移では、PSDから、流れがゆるやかに周期性を失っていくのがみられる。しかし、残念ながら、流動様式の遷移点を特定することは困難であることがわかる。統計パラメータについても徐々に変化するが、流動様式の遷移が狭い流量域で起これば極端に変化する場合もある。また、流動様式遷移によるパラメータの符号の反転は、値が零をとってから起こる。同符号で変化する場合は、パラメータの値は、流量変化に応じて連続的に変化するが、増加方向または減少方向とは限らない。このことは、同じ流動様式の領域内についてもみられ、統計的性質は流量の増減に応じて微妙に変化することが観察され

図11 プラグ流-スラグ流遷移域の例 ($U_L \approx 0.27$ m/s)

図12 スラグ流-環状流遷移域の例 ($U_L \approx 0.33$ m/s)

た。

ところで、遷移域では、目視によって流動様式を特定することは難しい上、表1と表2に示した典型的な流動様式の特徴の分類に従って、流動様式を判別しても、目視による結果と一致しないこともある。それゆえに、このような場合は無理に典型的な流動様式の分類の中に入れずに、遷移域(図3参照)として認識するのがよいだろう。

6. 結 言

水平管内気液二相流の流動様式測定の開発研究の一環として、簡便に検出できる圧力信号のデジタル処理によって得られた圧力変動の統計的性質と流動様式との相関関係を明らかにすることを目的として実験を行い、その結果が定性的な流動様式測定に利用できることを示した。しかし、統計パラメータの値が流量の増減などにより複雑に変化するので定量的な判別を行うためには、さらに詳細に調べなければならない。定量的判別手法については、別に報告する予定である。

測定部以外で生じる圧力かく乱の影響を除去するために差圧を利用し、局所流動様式を検出するために同一流路断面の上下差圧をとる。内径20mmの透明アクリル管に、窒素ガス(または空気)-水二相流を流して実現できた主な流動様式(気泡流、プラグ流、スラグ流、環状流、分離流)について測定した。断面上下差圧変動の統計的性質(PDF, PSD, ϕ_{ao})は、各流動様式に対してそれぞれ顕著な特徴を示し、統計的性質と流動様式の関係が明らかになった。主な結果は次のとおりである。

(1) 断面上下差圧変動のPDFの特徴は表1に示され、その特徴によって各流動様式を分類することが

できる。

(2) 差圧変動のPSDの特徴は表2に示され、その特徴によって、少なくとも、分散流(気泡流)、間欠流(プラグ流、スラグ流)、分離流を分類することができる。

(3) 差圧変動の相互相関関数を利用して、プラグや気体スラグの平均速度を推算することができる。

(4) 流動様式測定に差圧変動のPDFもPSDも利用できる。これらの統計的性質は、データ系列から直接、簡単に算出されるという利点をもつ。

文 献

- (1) Baker, O., *Oil and Gas J.*, 53 (1954), 185.
- (2) 世古口, 伝熱工学の進展 I (気液二相流), (昭48), 173, 養賢堂.
- (3) Sakaguchi, T., ほか4名, *Memories of the faculty of engineering Kobe Univ.*, 25 (1979), 190.
- (4) Mandhane, J. M., ほか2名, *Int. J. Multiphase Flow*, 1 (1974), 537.
- (5) Weisman, J., ほか3名, *Int. J. Multiphase Flow*, 5 (1977), 437.
- (6) Chan, A. M. C., *IUTAM Symp. Nancy/France 1983 (Measuring techniques two-phase flows)*, (1983), 281, Springer-Verlag.
- (7) Jones, O. C. and Zuber, N., *Int. J. Multiphase Flow*, 2 (1975), 273.
- (8) Albrecht, R. M., ほか4名, *Proc. 2nd Japan-U. S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics*, (1984), B-9.
- (9) Lin, T. F., ほか4名, *Proc. Japan-U. S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics*, (1984), B-6.
- (10) Hubbard, M. C. and Dukler, A. E., *Proc. 1966 Heat Transf. and Fluid Mech. Inst.*, 12 (1966), 100.
- (11) 松井・ほか3名, 計自学会論文集, 17-1 (1981), 85.
- (12) Matsui, G., *Int. J. Multiphase Flow*, 10 (1984), 711.
- (13) Matsui, G., *Proc. 2nd Japan-U. S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics*, (1984), B-8.