垂直管内気液二相流の流動様式の一推定法[†]

松井 剛一*・日外 雅人**・井上 俊彦**・有本 卓**

An Estimation Technique of Flow-Pattern of Gas-Liquid Mixture in a Vertical Pipe

Goichi MATSUI*, Masato AGUI**, Toshihiko INOUE** and Suguru ARIMOTO**

In the design and operation of two-phase flow systems, it is essential to know the two-phase flow pattern, on which the hydro- and thermo-dynamic data such as pressure drop, void fraction and quality are dependent. It is therefore important to develop a technique to evaluate the invisible flow pattern in a pipe or duct.

Pressure signals generated by flowing are easily accessible to measurement and also they may contain sufficient information on peculiar features of the flow pattern and flow condition for the two-phase mixture. In this study we propose a technique of estimating the representative flow pattern of gas-liquid two-phase flow in a vertical tube, based on the processing of measurement data on four static pressure signals. Differential pressures are measured in order to eliminate the influence of pressure fluctuations occurring outside of the measurement section. Differential pressure signals at both small and large intervals are examined at the same time. Two small intervals are chosen to be respectively equal to the inside radius of pipe in order to discriminate a bubble (i.e. a spherical bubble) with a length half of the inside diameter of pipe. The large one is chosen to be about ten times the inside diameter in order to evaluate a fully developed gas slug.

Experimental results with vertical pipe flows of nitrogen gas-water mixtures show that in a regular flow pattern the differential pressures exhibit a characteristic statistical property

different from that of another flow pattern. Therefore it is possible to estimate the flow pattern from the configuration of probability density function, the presence of periodicities, the order of variance and the average value of differential pressures. The slug-length, rise velocity and characteristic frequency in slug-like flows are also obtainable.

1. 緒 言

気液二相流を含む各種のシステムやプラントの設計、運転および安全性の問題に関連して必要となる圧力損失、ボイド率、乾き度などの流体および熱力学的データに影響を及ぼす二相流の流動様式を検知することは重要である。それ故に、特に可視できない管内での流動様式を推定する技術の開発が一つの課題となっている。

従来、各流動様式におけるボイド率や圧力変動の統計的性質を調べた報告がいくつかあり、それらの結果は、流動様式の推定に有効である。

西川ら^{1),2)}は、静圧変動の統計的性質を詳細に調べ、流動様式によるその特徴を分類している。しかし、静圧信号は、測定点だけでなく測定区間以外で生じる圧力変動を含むため、これに基づいて流動様式を推定する場合には、誤差が生じやすいという欠点がある。赤川ら³⁾は、スラグ流について差圧の頻度分布を調べ、差圧測定区間の距離によりその分布が異なることを示している。このことは、測定の際、十分注意しなければならない。また、JonesとZuber⁴⁾は、X線吸収法によって測定したボイド率の確率密度関数の特性に基づき、気泡流、スラグ流、環状流を分類しているが、測定の困難さおよび経済性などの理由により、実際上は容易に利用できない。

それに対して、流れによって生じる圧力信号は、流れを乱すこともなく容易に検出でき、さらに、二相流の流動様式固有の性質を十分に含んでいると考えられるので、流動様式の推定に圧力信号が利用されるのは

[†] IMEKO Symposium on Flow Measurement and Control in Industry で発表 (昭 54・11)

* 筑波大学構造工学系 茨城県新治郡桜村

** 大阪大学基礎工学部 豊中市待兼山町 1-1

* Institute of Structural Engineering, University of Tsukuba, Niihari-gun, Ibaraki

** Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka

(Received March 25, 1980)

(Revised July 11, 1980)

自然である。よって、合理的な配置による圧力信号の検出および信号の統計的性質の抽出とによって、流動様式の推定が可能となるだろう。

そこで本論文では、測定区間以外で生じる圧力変動の影響を除去するために、同時に測定した四つの静圧信号を、長短の合理的な測定区間の差圧信号に変換し、それらをデータ処理することによって、垂直管内気液二相流の流動様式を推定する方法を提案する。

その方法は、差圧信号の統計的性質（確率密度関数 [PDF], パワースペクトル密度 [PSD], 相互相関関数 [ϕ_{xx}], 平均値および分散）により、各流動様式の特徴を抽出して分類するというものである。さらに、スラグ流およびスラグ状流れにおいては、スラグ長さ、上昇速度、スラグ通過周波数の推定が可能である。測定区間距離として、長短2種の区間を採用する。短区間は、管径の1/2の長さをもつ気泡（球帽状気泡を想定）を検出の分解能の限度とするように、管径の1/2の間隔 [R] にとる。一方、長区間は、発達したスラグ流を識別するために、管径の10倍程度の間隔 [L] にとる。こうすれば、R区間によって、単相流、気泡流、液滴（噴霧）流、環状流を、L区間によって、スラグ流、フロス流、環状流を識別することができる。実際には、両区間の併用によって、流動様式を判別する。

2. 実験装置と計測法

Fig. 1 Schematic of experimental device
(unit of dimension: mm)

(1) riser section, (2) upper level section, (3) downcomer, (4) lower level section, (5) nozzle section, (6) gas-liquid separator, (7) level, (8) mercury thermometer, (9, 11, 12, 17) throttle valve, (10) pump, (13) bomb, (14) pressure regulator, (15) accumulator, (16) pressure gauge, (18) piezoelectric pressure transducer, (19) amplifier, (20) low-pass filter, (21) A/D converter, (22) mini-computer, (23) float-type flow meter, (24) turbine-type flow meter, (25) electric capacitance-type void meter, (26) quick closing valve, (27) solenoid controlled valve, (28) air compressor

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。実験装置は Fig. 1(a) に示すように単一管閉ループで、流れに沿って上部水平部、下降部、下部水平部、上昇部、気水分離タンクからなる。上昇部は、Fig. 1(b) に示すように内径 22 mm の透明なパンライト管からなる垂直なテスト部を含む。作業流体として窒素ガス-水二相流を用いる。

窒素ガスは、ノズル部から上昇部に注入され、二相流を形成し、大気圧開放下の気水分離タンクで分離される。ノズル部は、直径 0.4~22 mm の注入孔が1個もしくは数個あけてある。また、液体流量は、上部水平部に設置されたポンプや下降部のバルブによって調節される。適切なノズルを用い、ガス流量、液体流量を調節して、所定の二相流を留意して作る。

この装置では、自然循環、強制循環および循環させない場合の3条件における実験が実施できる。

噴霧流の実験の際、上昇部を気水分離タンクから切り放し、上端において液滴を拡散させるため、流れは上昇部の上端から下端へ流れる。

静圧 p_i ($i=1\sim4$) は、上昇部管壁に流路に沿って下（上流側）から 1~4 の位置で、拡散形半導体圧力変換器によって測定する。測定区間は、 $R=\overline{12}=34=11$ mm, $L=\overline{13}=24=200$ mm である (Fig. 1(b) 参照)。

検出した圧力信号は直流増幅器で増幅され、20 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：25 μ s）を通してミニコンでオンライン処理する。また、サンプリング間隔は10 ms、サンプル数は3,000である。

まず、四つの静圧データから測定区間の短い場合の差圧 $\Delta p_a (=p_1-p_2)$, $\Delta p_b (=p_3-p_4)$ (およそ $-0.6\sim1.3$ kPa), および長い場合の差圧 $\Delta p_c (=p_1-p_3)$, $\Delta p_d (=p_2-p_4)$ (およそ $-3.0\sim7.0$ kPa) を算出した後、それらの統計的性質を求める。

また、差圧による流動様式の推定結果を確かめるため、気相流量や液相速度は、浮子式流量計およびタービン流速計によって測定し、ボイド率は、締切弁法や静圧 p_i のデータから求める。さらに、流動様式、気泡上昇速度およびスラグの通過周波数は、可視観測やストロボ連続写真により確認する。

3. 推定法

3.1 流動様式

後述する各流動様式に対する差圧信号のPDFの特徴、差圧の平均値および分散の程度

を比較、分類して、流動様式を区別し推定することを考える。

いま、時刻 t において、ある基準断面から l だけ離れた断面の静圧を $p(t, l)$ とすると、 $p(t, l)$ はその時間平均値 $\bar{p}(l)$ と変動成分 $p'(t, l)$ の和として表わせる。ここで、 $p'(t, l)$ を、系全体に及んでいる攪乱 $p'_{ys}(t)$ と測定区間内での局所的な気泡の運動等起因する圧力変動 $p'_{loc}(t, l)$ に分けて考え、2点間 $[0, l]$ の差圧を求めれば、

$$\Delta p(t, l) = \bar{\Delta p}(l) + \Delta p'_{loc}(t, l) \quad (1)$$

のように、系全体の要素 $p'_{ys}(t)$ は除去でき、測定区間内での圧力変動のみが取り出せる。よって、差圧信号を推定に利用する。以下では、静止液圧 $\Delta p_0 = \rho_l g l$ (ρ_l : 液体の密度) で正規化した差圧 ΔP^* を用いる。

$$\Delta P^* = \frac{\Delta p}{\Delta p_0} \quad (2)$$

いま、等時間間隔 δt の j 番目 δt_j で測定した差圧 ΔP^* が等差圧間隔 $\delta(\Delta P^*)$ の i 番目 $\delta(\Delta P^*)_i$ に入るものとして、全測定時間 T の間に N 回測定して、そのうち n_i 回が $\delta(\Delta P^*)_i$ に入っているとすれば、

$$\begin{aligned} \lim_{\delta(\Delta P^*)_i \rightarrow 0} \frac{n_i N}{\delta(\Delta P^*)_i} \\ = \lim_{\delta(\Delta P^*)_i \rightarrow 0} \frac{1}{\delta(\Delta P^*)_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{\delta t_j}{T} \rightarrow PDF^*(\Delta P^*) \end{aligned} \quad (3)$$

は、 k 回目の測定結果の $PDF^*(\Delta P^*)$ を与える。測定を K 回繰り返して行い、平均した $PDF(\Delta P^*)$ の値を用いる。

差圧信号の PDF を用いた本実験の結果は、Jones ら⁴⁾ のボイド率信号による結果と類似の PDF 分布を示すことがわかった。このことは、差圧がボイド率に強く支配されていることを示唆している。

3.2 平均ボイド率

定常流について、距離 l の区間の差圧の平均値を $\bar{\Delta p}$ (または $\bar{\Delta P}^*$) とすれば、その区間の平均ボイド率は、

$$\alpha = \frac{\Delta p_0 - \bar{\Delta p}}{\Delta p_0} = 1 - \bar{\Delta P}^* \quad (4)$$

のように表わせる。ただし、 $\Delta p_0 = \rho_l g l$ 、 $\rho_g / \rho_l \ll 1$ (ρ_g : 気体の密度)。速度損失および摩擦損失が、 $(\Delta p_0 - \bar{\Delta p})$ に比べて無視できるほど小さい場合に限る。滑らかな流路で、異常に大きな流速でない限り、(4)式の関係を用いることができる。高流速あるいは高粘性の場合には補正を要する。

3.3 気泡塊上昇速度

気泡塊とは、形が整っていないくてもよく、小気泡の

かたまり、球帽状気泡、気体スラグを意味する。気泡塊を含むスラグ流的流れの場合には、気相の多い部分と液相の多い部分が交互に流れ、ボイド率は脈動的に高低を繰り返す。差圧はこのボイド率の脈動的变化を検出することができる³⁾。

距離 L だけ離れた2組の差圧信号 ΔP_a^* 、 ΔP_b^* の相互共分散関数 ϕ_{ab} は、 T を測定時間、 τ を時間遅れとすると、

$$\phi_{ab}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_a^*(t, 0) \Delta P_b^*(t + \tau, L) dt \quad (5)$$

で表わされ、流動状態が距離 L の間で変化せず、流れが不均一あるいは粗密であれば、 ϕ_{ab} は $\tau = \tau_m$ で最大値をもつ。この τ_m は、気泡塊が距離 L を流れる流動時間と考えられるので、気泡塊の平均上昇速度は、

$$u_{gE} = \frac{L}{\tau_m} \quad (6)$$

により、推定できる。ここで、添字 E は推定値を示す。

3.4 気泡塊通過周波数

差圧信号のパワースペクトル密度関数 (PSD) を FFT 法を利用して求め、周期性の有無および気泡塊通過周波数を推定する。

3.5 スラグ長さ

定常二相流が、脈動による周期性を示し、スラグ流的流れと推定されるとき、気体スラグと液体スラグが分離して流れていると仮定すると、スラグ長さは、

$$L_{gE} = \frac{\alpha u_{gE}}{f_{gE}}, \quad L_{lE} = \frac{(1 - \alpha) u_{lE}}{f_{lE}} \quad (7)$$

により推定できる。ここで、添字 g, l はそれぞれ気相、液相を示す。

3.3~3.5 節の方法によって得られたデータを用いて、スラグ流的な流動のパターンを図示することが可能となる。

4. 実験結果と考察

実験は、垂直管内でみられる代表的な流動様式の二相流 (気泡流、球帽状気泡流、スラグ流、フロス流、環状流、噴霧流) と水単相流、窒素ガス単相流について行い、各流動様式の典型的な実験結果を Fig. 2~9 に示す。実際の流れは、互いに他と明確に異なるよう留意して作った流動様式の二相流であり、この流動様式は、写真および可視観測によって確認した。各例の流動状態から少し気相を増減させた結果の PDF の変化についても調べた。各流動様式の分類は、差圧データの平均値、分散と ΔP_i^* ($i = a, b, c, d$) の PDF 形状を用いて行い、 PSD の特徴により補足説明する。

Fig. 2 Statistical properties of bubbly flow

ここで、長い測定区間 $\overline{13}$, $\overline{24}$ の場合を L スケール、短い測定区間 $\overline{12}$, $\overline{34}$ の場合を R スケールと呼ぶことにする。なお、ここに示した例は、すべて ΔP_a^* と ΔP_c^* の PDF が同じ分布特性を示すものであり、テスト区間で流れが定常であると考えられるものである。また、 $\Delta P_c^* = 1$ はボイド率 0, $\Delta P_c^* = 0$ はボイド率 1 に対応している。それ故に、 PDF の横軸 ΔP_c^*

Fig. 3 Statistical properties of spherical bubbly flow

の数値は、左側を 1, 右側を 0 とした、図中に示された実験パラメータ U_g, U_w は、それぞれ管内を気体または液体だけが流れるとみなした場合の仮想的な流速である。

4.1 気泡流 (Fig. 2 参照)

本例の気泡流は、液相中に一様に分散した小気泡の流れである。

ΔP_a^* の PDF は $\Delta P_a^* = 1$ の付近で一つの高いピークを有する正規形分布を示す。 PDF が正規形分布を示すということは、 R スケールで測定して流れが一樣であるとみなせることである。流れが一樣でなくなってくると (たとえば、気相を増加させて気泡のかたまりや合体気泡が生じると)、分布は正規形からくずれる。流れが周期性をもつ場合はこれに該当する。

4.2 球帽状気泡流 (Fig. 3 参照)

本例は、小気泡が合体してできた球帽状の形をした気泡を含む小気泡の流れである [Fig. 10(a) の実流動のスケッチ図参照]。

R スケールでの測定 (ΔP_a^*) で球帽状気泡を感知することができ、流れは一樣とみられなくなり、その PDF は正規形から少しくずれ、Fig. 3 に見られるように、右側 (ボイド率の高い側) のすそが広がる分布となる。また、 ϕ_{ab} と Δp_a の PSD は、気泡塊の通過時間と通過周波数を示す。一方、 L スケール (ΔP_c^*) の PDF は、依然として正規形分布を示す。このことは、 L スケールで流れを見れば一樣であることを表わしている。 $\Delta P_a^*, \Delta P_c^*$ の分散は、気泡流の場合に比べて 10 倍程度である。

Fig. 4 Statistical properties of slug flow

Fig. 5 Statistical properties of froth flow

4.3 スラグ流 (Fig. 4 参照)

本例は、周囲に液膜のある砲弾形の大気泡と小気泡の分散した液相部が交互に存在する流れである (Fig. 10(b) の実流動のスケッチ図参照)。

ΔP_a^* の PDF は二つのピークを有する特異な分布を示し、ボイド率の低い気泡流とボイド率の高い環状流とで構成される流れであると考えられる⁴⁾。気体スラグが液体スラグに比べて短い場合は、 $\Delta P_a^* = 1$ 側のピークが高く、逆の場合には $\Delta P_a^* = 0$ 側が高くなる。したがって、 ΔP_a^* の二つのピークの高さの比は、気液のスラグ長さに関係すると考えられる⁴⁾。一方、 L スケールで見ると、この図の場合、流れは一樣であ

Fig. 6 Statistical properties of annular flow

るかのように思われる。しかし、気体スラグ長さが L スケールと同程度に大きくなると、正規形分布からずれてくる。 ΔP_a^* 、 ΔP_c^* の分散は、球帽状気泡流の 10 倍程度である。

4.4 フロス流 (Fig. 5 参照)

本例は、気体スラグが発達して液体スラグが短くなり、気体スラグと液体スラグの境が明確でなくなった流れである (Fig. 10(c) の実流動のスケッチ図参照)。

ΔP_a^* の PDF はほぼ正規形分布であるが、気泡流の場合に比べてピークが低く幅のある分布を示す。 R スケールでは流れは一樣に見えるが、圧力変動は気泡流よりも強く、 ΔP_a^* 、 ΔP_c^* の分散は気泡流の場合の 1,000 倍の程度である。一方、 ΔP_c^* の PDF は、Fig. 5 に示すように正規形分布から左側 (低ボイド率側) にすそが広がる分布を示す。気体スラグの長さが L スケール程度であれば、 ΔP_c^* の PDF も双峰性分布を示しうる。

4.5 環状流 (Fig. 6 参照)

本例は、フロス流の場合よりさらに気相が多くなって、管中央部を気相が、管壁に沿って液膜が流れる流れである。

ΔP_a^* の PDF はフロス流の場合に類似しているが、 ΔP_c^* 、 ΔP_a^* の分散は、フロス流の場合の 1/10 程度である。 ΔP_c^* の PDF は正規形分布を示すため、流れは周期性を示さず、一樣であるように見える。

4.6 噴霧流 (Fig. 7 参照)

本例は、気相中に液滴が含まれる流れで、管壁に液膜はない。

Fig. 7 Statistical properties of mist flow

Fig. 8 Statistical properties of flow of water alone

Fig. 9 Statistical properties of flow of gas alone

ΔP_a^* の PDF は環状流の場合と比べて、 $\Delta P_a^* = 0$ の付近でより高い一つのピークをもつ幅の狭い正規形分布を示す。 ΔP_c^* 、 ΔP_a^* の分散は、気泡流の場合と同程度である。

4.7 二相流と単相流との比較 (Fig. 8, 9 参照)

水および窒素ガス単相流の ΔP_a^* の PDF は二相流と比べて、より高く鋭いピークを示す。 ΔP_a^* の分散は、気泡流、噴霧流の場合の 1/10 程度である。また、単相流の場合の PSD は弱くて平坦である。

4.8 スラグ流的流れの流動状態推定 (Fig. 10 参照)

PDF, PSD および ϕ_{ab} のデータからスラグ流的流れにおいて、スラグ長さ、気泡塊上昇速度、気泡塊通

Fig. 10 Typical results of evaluation on flow conditions in slug-like flows

(a) spherical bubble flow shown in Fig. 3, (b) slug flow shown in Fig. 4, and (c) froth flow shown in Fig. 5

The estimated results are figured at the right side of each case. The sections indicated by hatching are liquid-dominant portions and the others are gas-dominant portions.

過周波数などの付加的な流動状態を推定することが可能である。気泡塊上昇速度 u_{gE} は、(6)式から求める。スラグ長さは、 u_{gE} を PSD の最大ピーク周波数 f_{sE} で除して求め、さらに(7)式より両相のスラグ長さ (L_{gE} , L_{lE}) が推定できる。

二つのピークをもつ PDF で、低いピークが不明瞭な場合には Jones と Zuber⁴⁾ によって提案されたように、PDF を気泡流と環状流に対応する二つの正規形分布に分解することにより高さを見つけることができる。

Fig. 3~5 の場合の流れに対する各種の推定結果を Fig. 10 に示す。これらの結果は、3種類の流動様式について、よく推定できていることを示している。

5. 結 言

垂直管内を流れる気液二相流の流動様式を推定する方法を提案した。その方法は、流れ方向に沿った合理的配置の4点で測定された静圧信号から計算して求めた、長短二つの測定区間の差圧信号の統計的性質の特徴を調べ、分類するというものである。これら差圧信号の特徴によって、流動様式を分類できること

が明らかになったので、かかる測定法によって、流動様式を推定することが可能であるといえる。また、測定区間内での流動状況の変化も検知可能であり、スラグ流的流れの流動状態を推定することも可能である。

参 考 文 献

- 1) 西川, 世古口, 池田, 深野: 気液二相流の脈動現象に関する研究, 日本機械学会論文集, **35**-271, 582/590(1969)
- 2) 西川, 世古口, 深野: 気液二相流の脈動現象に関する研究, 日本機械学会論文集, **35**-271, 591/596 (1969)
- 3) 赤川, 浜口, 坂口, 碓: 気液二相スラグ流の差圧脈動に関する研究, 日本機械学会論文集, **36**-289, 1520/1527 (1970)
- 4) O.C. Jones and N. Zuber: The Interrelation between Void Fraction Fluctuations and Flow Patterns in Two-Phase Flow, Int. J. Multiphase Flow, **2**, 273/306 (1975)