気液二相流の流動様式の定量判別[†]

井上俊彦*・日外雅人*・松井剛一**・有本卓*

Quantitative Flow-Pattern Discrimination of Gas-Liquid Two-Phase Mixture

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

To classify gas-liquid two-phase mixtures according to their "flow patterns" helps qualitative understanding of the flow and leads us to a better prediction of two-phase flow parameters such as pressure drop, quality, and heat-transfer coefficient. Accordingly it is important to develop some technique to discriminate the two-phase flow pattern in a pipe quantitatively.

In this study we propose two kinds of techniques, which are applied to data in the range of 0.0–10.0 m/s mixture velocity. In the first technique, measurement data of normalized differential pressures at four locations along the flow direction are used for flow pattern discrimination. In the second technique, the transit length of a bubble, which is measured at the center line of a tube by the use of a miniature optical probe, is chosen. The set of statistical parameters such as average, variance, and skewness factor of the measurement data is adopted as the set of key indexes, in order to establish objective and quantitative standards of flow pattern discrimination among the five dominant flow patterns namely, the bubbly flow, the hemispherical bubble flow, the slug flow, the froth flow, and the annular flow. All key indexes can be obtained by processing directly the measurement data without calculating the PDF (probability density function).

It is shown that the set of these statistical parameters is sufficient for characterizing the flow pattern and gives satisfactory results on the flow pattern discrimination in spite of the short sampling time and the simple data-processing.

1. ま え が き

気液二相流では、その気液界面が空間的に種々の分布をなし、多様な流れの状態が起こるため、取扱いが複雑になる。そこで、実用的にはそれらを流動様式 (Flow Pattern) と呼ばれる数種類に分類して、取り扱いやすくすることが行われる。流動様式は、圧力損失・熱伝達係数などのプラントの設計パラメータとも密接な関係があり、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をより正確に予測することができる。

従来流動様式の判別に関しては、視覚および高速写真の観察による方法、X線吸収法によるボイド率 (気体体積比) 変動の確率密度関数 (PDF) の形から判断する方法¹⁾、大小二つの測定区間における差圧信号の統計的性質 (PDF やパワー・スペクトル) によって判別する方法²⁾、微小電極を用いて測定された気泡の大きさによる方法³⁾などが提案されてきた。しかし、これらの方法のほとんどが定性的で、判断の際に研究者の主観が入る恐れがある。また、装置が大規模であり、実際には容易に実用できない場合もある。それゆえに、実際に生じている流動様式を、簡単に検出できる信号のデジタル処理によって、定量的にとらえる測定法が望まれる。

そこで本研究では、垂直管内二相流の流動様式を定量判別する二つの方法を提案する。

一つは、大小二つの測定区間の無次元差圧を同時に測定し、それらの PDF の分布の特徴を表わす統計的パラメータ (平均、分散およびひずみ度) を判定基準とする方法である。他方は、管中心軸上に定置された小型プローブ (微小電極³⁾ や Optical Probe⁴⁾) で気泡通過長さを測定し、その分布に上述した統計的パラメータを適用し、流れの微視的構造をもとに定量判別を行う方法である。ここで用いた統計的パラメータは、いずれもデータ系列より直接、簡単に計算できるという利点をもつ。

† IMEKO Symposium で一部発表 (昭 54・11)

* 大阪大学基礎工学部 豊中市待兼山町 1-1

** 筑波大学構造工学系 茨城県新治郡桜村

* Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka

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

(Received April 30, 1980)

(Revised June 20, 1980)

2. 無次元差圧を用いた流動様式判別

2.1 判定の基準となる統計的パラメータ

(1) 差圧の無次元化

流れによって生じる圧力信号は、二相流の流動様式固有の情報を十分に含んでいて、さらにこれらを差圧信号に変換することで、測定区間以外で生じる圧力かく乱成分を除去することができる²⁾。本論文では、異なる幾何学形状をもつ流路にも適用できるよう、差圧を無次元化して取り扱うことにする。

二相流が上向きに流れる場合に、測定区間 Δz で測定される差圧 ΔP は、次式のように重力項、壁面との摩擦損失項 ΔP_{fr} 、加速損失項 ΔP_a および慣性項の和として表わせる。

$$\Delta P = \rho_m g \Delta z + \Delta P_{fr} + \Delta P_a + \frac{d}{dt} \int_0^{\Delta z} \rho_m u dz \quad (1)$$

ただし、 ρ_m は混合密度、 g は重力加速度、 u は平均流速、記号 $\bar{}$ は区間内平均値である。 α を断面平均ボイド率、 ρ_g, ρ_l をそれぞれ気相、液相の密度とすると、 $\rho_m = \alpha \cdot \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l$ 。

一般に ΔP_a は小さいから省略でき、測定区間内に静止した液相のみが存在する場合の差圧 $\Delta P_{i0} (= \rho_l \cdot g \cdot \Delta z)$ を用いて次式のように無次元差圧 ΔP^* を定義する。

$$\Delta P^* = (\Delta P_{i0} - \Delta P) / \Delta P_{i0} \quad (2)$$

ΔP の成分のうち重力項を除いた成分を ΔP_f で表わすと、(2)式は次式のように表わせる。

$$\Delta P^* = \hat{\alpha} - \Delta P_f^* \quad (3)$$

ただし、 $\rho_g / \rho_l \ll 1$ 、 $\Delta P_f^* = \Delta P_f / \Delta P_{i0}$ 。

ΔP^* が無視できるおだやかな流れの場合、 ΔP^* は測定区間内平均ボイド率 $\hat{\alpha}$ に一致する。

差圧の測定区間長は長区間 $[L]$ 、短区間 $[R]$ の2種類を用いる²⁾。R区間では、ボイド率 $\hat{\alpha}$ は0および1の値をとる確率が大きく、R区間での無次元差圧 ΔP_R^* は大きく変動する。一方L区間では、 ΔP_f^* は比較的小さく、ボイド率も長い区間にわたって積分された量が検出されるため、L区間の無次元差圧 ΔP_L^* の時間変動は、 ΔP_R^* の時間変動に比べはるかに小さい。

(2) 統計的パラメータ

ΔP^* のPDFの分布形状や分散の大小などから各流動様式を推定できることはすでに報告されているが²⁾、PDFをいちいち描く必要があり、しかも乱れの激しい流れでは、PDFを見ただけでは判別しにくいことがある。そこで、各流動様式でのPDFの特徴を表わす統計的パラメータを導入する。

① 平均 ΔP_i^* の平均値 $\overline{\Delta P_i^*}$ を次式のように定義する。

$$\overline{\Delta P_i^*} = \langle \Delta P_i^* \rangle \quad (4)$$

ただし、記号 $\langle \rangle$ は時間平均を表わす。L区間では、 $\Delta P_R^* \approx 0$ のため、 $\overline{\Delta P_L^*}$ を用いて測定区間での時間平均ボイド率を推定できる。このことは実験結果からも確認されている。

② 分散 ΔP_i^* の分散 $\text{Var}(\Delta P_i^*)$ は次式で定義され、圧力変動の強さ、PDFの広がりを示す。

$$\text{Var}(\Delta P_i^*) = \langle (\Delta P_i^* - \overline{\Delta P_i^*})^2 \rangle \quad (5)$$

測定区間長さが短いほど、流れがフロスト流に近いほど、この量は大きくなる。

③ ひずみ度 ΔP_i^* のひずみ度 $\text{SF}(\Delta P_i^*)$ は、

$$\text{SF}(\Delta P_i^*) = \langle (\Delta P_i^* - \overline{\Delta P_i^*})^3 \rangle / \text{Var}(\Delta P_i^*)^{3/2} \quad (6)$$

で定義される無次元量で、平均値に対するPDFの分布の対称性を表わす。つまり、PDFが左右対称の分布を示せば $\text{SF} = 0$ 、 ΔP_i^* の正方向に裾が広がっていれば $\text{SF} > 0$ 。逆の場合には $\text{SF} < 0$ となる。

これらのパラメータは、いずれも測定データ系列から直接、簡単に計算できる量である。

これらを流動様式の判別基準として、垂直管内を流れる沸騰および非加熱気液二相流の流動様式の定量判別を行った。

2.2 実験装置と計測法

実験装置の詳細は論文^{5), 6)}に譲って、圧力測定部の概略をFig. 1に示す。作業流体は非加熱の場合は水、窒素ガス、加熱の場合にはR-113を用いた。いずれの場合も、測定部で気液二相流が形成される。静圧信号 $P_i (i=1 \sim 4)$ は視覚観察および写真撮影可能なガラス管の管壁において、上流側から上向きに流路に沿っておのおの $z_i (i=1 \sim 4)$ の位置で半導体圧力変換器により測定される。

圧力測定点の間隔は、短区間を $R = z_1 z_2 = z_3 z_4 = (\text{管半径})$ 、長区間を $L = z_1 z_3 = z_2 z_4 = (\text{管径の10倍程度})$

Fig. 1 Schema of pressure measuring section

と定めた。ミニコンでサンプリング（測定間隔 10 ms, サンプル数 3,000）された P_i は, R および L 区間の差圧に変換される。本実験では, Fig. 1 に示す R 区間の差圧 ΔP_a^* と ΔP_b^* , L 区間の差圧 ΔP_c^* と ΔP_d^* の PDF の分布が同一傾向にあったので, $\Delta P_R^* = \Delta P_b^*$, $\Delta P_L^* = \Delta P_c^*$ として, 各統計的パラメータを計算した。

非加熱, 沸騰いずれの場合も約 70 種類の流動条件について実験を行った。一方, 差圧データから求めたパラメータのみで推定した流動様式と比較できるように, 実際に生じている流動様式を視覚あるいは連続写真（時間間隔 1/30 s あるいは 1/60 s）によって確認した。

2.3 流動様式の定量判別

非加熱の場合の結果は論文^{5), 6)}に譲って, 沸騰二相流の定量判別について以下に示す。

沸騰管内の二相流は, 流動方向に乾き度（気体重量流量比）が増加するにつれ流動様式が遷移するため流動様式を分類することは困難である。しかし, 実用上は流れを数種類の流動様式（気泡流, スラグ流, フロス流および環状流）に分類すれば十分である。さらに非加熱二相流では, 気泡流とスラグ流との遷移領域で球帽状気泡流が観察されたが, 沸騰二相流の場合には流れが遷移していることもあり観察されなかった。

なお, 本実験では加熱部出口に Fig. 1 に示した圧力測定部を設けたが, 加熱部出口と測定部との距離が短いため, 加熱部付近の流れ, すなわち加熱部内で最も発達した流れがそのまま再現されていると考えられる。

○: bubbly flow, □: slug flow, ■: froth flow, △: annular flow, working fluid: R-113, $D=1$ cm, heater length=1.5 m, $T_{sat}-T_{in}=6\sim 9^\circ\text{C}$, where T_{sat} and T_{in} are saturated and inlet temperature of liquid, respectively

Fig. 2 Flow map of boiling two-phase flow observed at the exit of the heater

実験条件ならびにその条件のもとで観察された流動様式を, Fig. 2 に示す Flow Map で整理した。実験のパラメータは液相流入速度 j と加熱量 Q である。実験条件から求めた熱平衡乾き度 X も合わせて記した。 X は G を質量流量, Δi を気化潜熱, i_{in} , i' をそれぞれ加熱部入口エンタルピー, 飽和液のエンタルピーとすると, 次式で定義される。

$$X = (Q/G + i_{in} - i') / \Delta i \quad (7)$$

Fig. 2 から明らかなように, 流動様式と X とは密接な関係がある。しかし実験装置や作業流体によって両者の対応が異なるため, X の値のみから流動様式を定量的には判別できない。

Fig. 3 に各流動様式の PDF と流れの連続写真の一例を示し, それぞれの流れとパラメータの特徴を述べる。

① 気泡流 (Fig. 3 (a)) さまざまな径の小気泡が連続媒体である液相中を流れる。PDF に関しては, 非加熱の場合と同様に R 区間, L 区間ともに, 一つの高いピークを有す正規形分布をなし, 分散も非常に小さい。

② スラグ流 (Fig. 3 (b)) 砲弾状の気泡が管中央を流れ, その周囲の液膜中や上下の液体スラグ中では核沸騰を生じる。スラグの形状は複雑で, 長さも比較的長い。そのために L 区間では, 気液両スラグに相当する二つのピークを有す特徴ある分布をなし, 流れがフロス流に近くなるにつれ, $\Delta P_L^* = 1$ 側のピークが高くひずみ度は小さくなる。

③ フロス流 (Fig. 3 (c)) 気体スラグが上流, あるいは下流のと合体して, さらに長くなる。沸騰によって増加した気体が上方へ抜けようとするため, 液体スラグが気体スラグ周囲へ流入し, 液膜は一瞬よどんで脈動現象を呈する。そのため L 区間では, $\Delta P_L^* = 1$ 付近に鋭いピークを有し ΔP_L^* の負方向に裾の広がる分布をなし, ひずみ度がほかの流動様式よりも小さな負値をとる。

④ 環状流 (Fig. 3 (d)) 乾き度が大きくなり, 気相は管中心を液相は管壁を安定に流れるが, 液膜は複雑に波立つ。 L 区間では, $\Delta P_L^* = 1$ 付近にピークを有す分散の小さな正規分布となる。

R 区間では, スラグ流, フロス流, 環状流の特徴を捕えられず, いずれの流れでも分散の大きな正規形分布を示した。

流動様式の判定基準を, Fig. 2 に示す Flow Map 上に書かれた各パラメータの分布, 流動様式の観察結果を比較対照して求め, Fig. 4 に示す流動様式判別のための流れ図を作成した。この流れ図は, 非加熱二

Fig. 3 Typical serial photographs (taken at intervals of 1/30 s or 1/60 s) and PDF's of ΔP^* for each boiling two-phase flow pattern

相流の場合の流れ図^{5),6)}から球帽状気泡流を除いたのとはほぼ同様である。

まず $\text{Var}(\Delta P_R^*)$ を用いて、流れの穏やかな気泡流を判別する。フロスはスラグ流と遷状流との遷移領域と考えられ、ボイド率の大小、つまり $\overline{\Delta P_L^*}$ の大小からスラグ流的流れと環状流的流れを区別する。最後に、 $\text{SF}(\Delta P_L^*)$ を用いてスラグ流とフロスを、 $\text{Var}(\Delta P_L^*)$ を用いてフロス流と環状流を判別した。

Fig. 4 Flow chart for flow pattern discrimination of boiling two-phase flow in a vertical pipe by the use of ΔP^*

この方法を用いて沸騰二相流の流動様式の定量判別を行った結果、約 80% の確率で視覚観察による判別結果と一致した。

3. 小型プローブを用いた流動様式判別

2章では、流れを巨視的に捕え、その差圧変動を利用した方法を述べた。一方、飯田³⁾によって管中心軸上の局所ボイド率変動の統計的性質を利用する方法が提案されたが、まだ定量的であるとはいえない。

そこで、本研究では2章で用いた統計的パラメータを、小型プローブで測定した管中心軸上の気泡通過長さの分布に適用して定量判別を行う。

3.1 二相流の局所的性質

小型プローブは、その先端に気相が存在すれば1、液相が存在すれば0という2値信号を出力する局所ボイド率測定器である。たとえば、管中心軸上に短い距離を隔てて2本の小型プローブを配置し、それらの出力信号の時間遅れを計って平均することで、界面移動速度の平均値 u_g が求まる。特別な作業流体でない限り、気液両相が u_g で動いていると考えてもよい³⁾。j番目に検出された気泡通過時間を t_{gj} とすると、気泡通過距離 X_{gj} は次式で与えられる。

$$X_{gj} = u_g \cdot t_{gj} \quad (8)$$

X_g を確率変数にとり、次式のように管直径 D で無次元化する。

$$X_g^* = X_g/D \quad (9)$$

X_g は 0 から最大気泡通過長さに相当する値までとるから、これを m 群にわけ、代表通過長さ X_{gk}^* をもつ k 群の個数を n_k 、全気泡測定数を N とすれば、 k 群の気泡が通過する確率は、

$$Pr(X_{gk}^*) = n_k / \sum_{k=1}^m n_k = n_k / N \quad (10)$$

となる。しかし、たとえばスラグ流の場合、大きな気体スラグと液体スラグ中の小気泡が、同じ重みで評価されるので都合が悪い。そこで、飯田⁹⁾に習って気泡通過長さを重みとすれば、 k 群の気泡の通過する確率は、

$$E(X_{gk}^*) = X_{gk}^* \cdot n_k / \sum_{k=1}^m (X_{gk}^* \cdot n_k) \quad (11)$$

で表わせる。この確率は、物理的には、全気泡通過長さのうち、通過長さ X_{gk}^* の気泡の存在割合を表わす。

つぎに、2章で用いた ΔP^* の代りに X_g^* を用いて各パラメータを計算し、それらを判別基準とすることで、垂直管内非加熱二相流の流動様式判別を試みた。ただし、パラメータの定義の中の記号 $\langle \rangle$ は、期待値を表わすものとした。

3.2 実験装置と計測法

Fig. 5 に実験装置の概略を示す。これを用いて、2章の非加熱二相流の実験も行った。上昇部は内径 22 mm のアクリル管で、作業流体として水と窒素ガスを用いた。窒素ガスは、ノズル部より水で満たされた上昇部に注入され、上昇部で気液二相流を形成する。

本研究では、小型プローブのうち Optical Probe を

(A) riser section, (B) gas-liquid separator, (C) upper level section, (D) downcomer, (E) lower level section. (1) gas injector, (2) piezoelectric pressure transducer, (3) optical probe, (4) water level meter, (5) pump, (6) turbine flow meter, (7) N_2 -bomb, (8) pressure regulator, (9) rotameter, (10) phase indicator unit, (11) synchroscope, (12) counter, (13) void fraction unit, (14) DC amplifier, (15) low-pass filter, (16) A/D converter, (17) minicomputer, (18) X-Y plotter

Fig. 5 Schema of experimental device for adiabatic two-phase flow (unit of dimension: mm)

Fig. 5 に示す位置に取り付けた。プローブは 2 本用い、プローブ先端は 6.3 mm の距離を隔てて管中心軸上にある。Optical Probe の信号は、A/D 変換器 (変換時間 25 μ s) でサンプリングし、ミニコンで処理した。測定時間は、 X_g^* のパラメータがほぼ一定値に落ち着く 150~300 秒とした。 u_g はプローブ信号から求まるが、流れの変動が激しいフロース流では正確さに欠ける。そこで、気液両相のみかけの速度 j_g , j_t が計れ

(a) bubbly flow

(c) slug flow

(b) hemispherical bubble flow

(d) froth flow

Fig. 6 Typical serial photographs (taken at intervals of 1/60 s) and distribution chart of X_g^* for each adiabatic two-phase flow pattern

る場合には, u_g を j_g , j_l の関数として表わした実験式,

$$u_g = 1.2(j_g + j_l) + u_0 \quad (12)$$

から求めた。ただし, u_0 は静止液柱内で測定した小気泡の上昇速度である。

3.3 流動様式の定量判別

非加熱二相流の各流動様式 (気泡流, 球帽状気泡流, スラグ流およびフロス流) に関して, 管中心軸上における気泡通過長さの分布と流れの連続写真を Fig. 6 に示す。ここで, 管中心軸上の結果のみを示したのは, 気体スラグが一般に軸対称であり, 小気泡はほぼ一樣に分散しているため, 中心軸上の測定で流れの概略が把握できると考えられたからである。

Fig. 6 から明らかなように, 気泡通過長さの分布形状と各流動様式には強い相関が認められる。特にスラグ流において, 写真観察から求めた気体スラグ長さと, プローブの信号を処理して求められた平均気泡通過長さ $\bar{X}_g^*$ は, ほぼ一致している。以下に各流動様式の特徴を示す。

① 気泡流 (Fig. 6(a)) $\bar{X}_g^*$ は 0.5 以下で分散の小さな正規形分布を示す。

② 球帽状気泡流 (Fig. 6(b)) 長さが管半径程度の球帽状気泡が存在するため, 気泡流と比較して分散が大きくなる。

③ スラグ流 (Fig. 6(c)) 液体スラグ内の小気泡と気体スラグに対応する二つのピークを有す分布を示し, $\bar{X}_g^*$ は 1 以上に, ひずみ度は負の値をとる。

④ フロス流 (Fig. 6(d)) $\bar{X}_g^*$ がほぼ 10 以上の値をとる。流れが乱れ, 落下する液滴が増加するため, 気泡通過長さも不規則となり分散が急増する。ひずみ度はスラグ流と比較して大きな値をとる。

Fig. 7 Flow chart for flow pattern discrimination of adiabatic two-phase flow in a vertical pipe by the use of X_g^*

以上の結果, $\bar{X}_g^*$, $\text{Var}(X_g^*)$ および $\text{SF}(X_g^*)$ を用いることで判別が可能と考え, 各パラメータの分布, 流動様式の観察結果をもとに Fig. 7 に示す流動様式判別の流れ図を作成した。環状流の判別については, 管中心を気相が連続して流れていること, すなわち中心軸上気相時間率 α_g がほぼ 1 であることを条件に組み込んだ。流動様式判別の手順を以下に示す。

まず環状流を判別した後, $\bar{X}_g^* < 1$ の気泡流に近い流れと $\bar{X}_g^* \geq 1$ のフロス流に近い流れを区別する。さらに前者では, $\text{Var}(X_g^*)$ を用いて気泡流, 球帽状気泡流を区別する。後者では, $1 \leq \bar{X}_g^* < 10$ の流れをスラグ流, $\bar{X}_g^* \geq 20$ の流れをフロス流とし, 両者の遷移領域 ($10 \leq \bar{X}_g^* < 20$) においては $\text{SF}(X_g^*)$ の大小をもとに判別した。

この方法を用いて, 非加熱二相流の流動様式の定量判別を行った結果, 約 90% の確率で視覚観察による判別結果と一致した。

4. あとがき

垂直管内を流れる気液二相流の流動様式を定量的に判別するための二つの方法を提案した。一方は, 流れに沿った 4 点で, 同時に測定された静圧信号から得られた大小二つの測定区間における無次元差圧変動の統計的性質, 他方は微小電極や Optical Probe などの小型プローブを用いて検出された, 管中心軸上での気泡通過長さの統計的性質を利用したものである。いずれも, 確率密度関数の分布の特徴を表わす統計的パラメータを判別の基準として用いている。

これらの方法はいずれも, 容易に検出される物理量をうまくデータ処理することによって, 実際に生じている流動様式を判別するもので, 実験室や実際のプラントにも簡単に適用できるものと思われる。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 松井, 他: 垂直管内気液二相流の流動様式の一推定法, 計測自動制御学会論文集, 17-1 85/91 (1981)
- 3) 飯田: 気液二相流におけるフローパターンの予測に関する研究, 日本機械学会論文集, 45-394, 895/903 (1979)
- 4) 松井, 他: Optical Probe によるボイド率および気泡速度の測定, 流れの動的計測シンポジウム講演予稿集, 208/211 (1978)
- 5) T. Inoue, et al.: Automatic Flow Pattern Recognition of Gas-Liquid Two-Phase Mixture in a Vertical Pipe, Proc. IMEKO Symp. on Flow Measurement and Control in Industry Tokyo, 251/256 (1979)
- 6) 日外, 他: 垂直管内気液二相流の流動様式の定量判別, 日本機械学会関西支部第 240 回講演会講演論文集, 63/65 (1979)