水平管内気液環状二相流におけるホールドアップ変動と 差圧変動の統計的性質と流動様相^{*}

Relationships between Flow Configuration and Statistical Characteristics
of Hold-up and Differential Pressure Fluctuations
in Horizontal Annular Two-Phase Flow

逢坂 昭 治^{**}
OUSAKA Akiharu

仮屋崎 侃^{***}
KARIYASAKI Akira

濱 野 成 敏[†]
HAMANO Shigetoshi

深 野 徹^{††}
FUKANO Tohru

Abstract Horizontal annular flow was classified in detail into the following three flow configurations: the slug-like flow with frothy liquid lumps, disturbance wave and ripple flows. In this paper, it was shown that the kurtosis and skewness of the probability density function of time-varying hold-up depended on these flow configurations. However, successful results were not obtained for the pressure difference data. Relations between the kurtosis and volume flow quality are proposed for the criteria of boundaries between these flow configurations of annular flow.

Keywords: Statistical Characteristics, Flow Configuration, Hold-up, Differential Pressure, Annular Flow, Horizontal Tube, Experiment

1. 緒言

水平管内気液環状二相流は、管底部の液膜がフロス流に見られる液体スラグの特徴を持った流れ、じょう乱波を伴ったじょう乱波流れ、じょう乱波の存在しないリップル流れに分類できる。これらの流れは、流動様式が同一であっても流動様相が大きく異なり、圧力損失や熱伝達係数に大きく関与しているため、流動様式のみ注目して流動様相を軽視した取り扱いでは環状流に関連した設計パラメータの正確な予測を行うことができない。そのほ

かに伝熱管の損傷と関連する重要な問題を引き起こす可能性もある。したがって流動様相の正確な把握は、環状二相流を取り扱う上での基本であるといえる。

これまでの流動様式の判別は、目視観察や、X線・ γ 線撮影法、電気計測法などによって行われてきた。最近ではその判定に主観の入らない方法が開発されてきており、各流動様式の特徴を表わす物理量、例えば静圧、差圧、ボイド率などに着目し、その信号からの統計的性質を利用する客観的判別法が種々試みら

* 1993.5.1 受付

** 徳島大学工学部 〒770 徳島市南常三島町2-1 TEL(0886)23-2311 FAX(0886)55-6549

*** 福岡大学工学部

† 徳島大学大学院

†† 九州大学工学部

れている[1-3]。さらに、ごく最近ではこれまでの確率論的な認識に基づく解析以外に、比較的自由度の低い決定論的な法則に従うと見なした立場からの解析も注目され始めている[4-6]。このように、手段の異なった流動様式の定量的判別の試みが進んできているが、環状流の流動様相判別に関する報告は見あたらない。

本研究はこのような背景から始められたもので、環状流におけるホールドアップ変動および差圧変動の統計的性質とその流動様相との関係について検討したものである。

2. 実験装置および実験条件

Fig. 1 は実験装置の概略図である。供試管は透明アクリル樹脂製円管である。ホールドアップは定電流法によって測定した。ここで用いた一組の電極は軸間距離が 5 mm で、管内壁面と同一面になるように環状に埋め込まれている。差圧は拡散型半導体差圧変換器(定格圧力 ± 30 kPa、一次共振周波数 6 kHz)によって測定し、その差圧測定区間は 2 種類($L=5D$ 、 $10D$)について検討した。実験条件および両相の実験範囲は次の通りである。供試管内径; $D=10$ mm、 16 mm、 26 mm、使用流体; 空気および水道水、見かけの空気流速; $j_G=10$ m/s ~ 60 m/s、見かけの水流速; $j_L=0.006$ m/s ~ 0.40 m/s。

Fig. 1 Experimental apparatus.

3. 統計パラメータの定義

等時間間隔 Δt の i 番目で測定された信号 $x(t)$ の値が、等分割された幅 Δx の K 番目 Δx_K に入るとし、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、それぞれの統計量は次のように定義される。

確率密度関数:

$$P(x) = \lim_{\Delta x_K \rightarrow 0} \frac{n_K/N}{\Delta x_K} = \lim_{\Delta x_K \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x_K} \sum_{i=1}^{n_K} \frac{\Delta t_i}{T} \quad (1)$$

標準偏差:

$$\sigma = \left\{ \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2 / N \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{歪度: } SK = \mu_3 / \sigma^3 \quad (3)$$

$$\text{尖度: } KU = \mu_4 / \sigma^4 - 3 \quad (4)$$

$$\text{ただし, } m = \sum_{i=1}^N x_i / N, \\ \mu_n = \sum_{i=1}^N (x_i - m)^n / N \quad \text{である。}$$

なお、データ処理にあたってはサンプリング周波数を 200 Hz、サンプリング時間を 15 秒とした。

4. 実験結果および考察

本実験範囲で観察された流動様式は、Fig. 2 に示したように、環状流(A)、フロス流(F)および分離流(Sp)の三つに大別される。判別の際、管断面を閉塞する水塊が存在するものをフロス流とし、このような水塊がなく、管内壁面の全周が常時液膜で覆われているものを環状流とした。水塊の有無は点電極プローブで得た液体存在時間率から比較的容易に判定することができた。さらに Fig. 2 には環状流の流動様相の 3 つの代表例も示している。すなわち、管底部の液膜がフロス流に見られる液体スラグの特徴を有する流れ(A_F)、じょう乱波が顕著な流れ(A_D)、およびじょう乱

Froth Flow (F)

Separated Flow (S_p)

Annular Flow (A)

Fig. 2 Flow pattern and flow configuration.

波の存在しないリップル領域の流れ(A_R)である。

これらの流動様式、様相の判別の詳細およびその区分線については既報[7]に詳述しているので、ここでは省略する。

4. 1 ホールドアップの統計的性質

4. 1. 1 確率密度関数

Fig. 3は $D=26\text{mm}$ の場合のホールドアップの時間変動記録を、F、 A_F 、 A_D 、 A_R 、 S_p の場合について例示したものである。出力信号は値が大きい程水膜厚さが薄いことを意味しているので気液界面の液膜の形状は上下を逆さにしたものに近い。またこれらの記録の出力感度は必ずしも同じでないから、この図

では膜厚の絶対値に関する比較はできない。これらの出力信号をホールドアップに換算して得られた確率密度関数 $P(x)$ をFig. 4に示

Fig. 3 Time variation of the hold-up.

Fig. 4 Typical examples of the probability density function for the hold-up.

す。図からわかるように確率密度関数の分布形状はそれぞれの流動状態において特徴を持つ。すなわち、フロス流(Fig. 4 (a))は幅の広いなだらかな分布を示し、環状流のフロス流的な A_F 領域(Fig. 4 (b))でもなだらかな分布を示すがピークより右側のすそが広い。じょう乱波の顕著な A_D 領域(Fig. 4 (c))では前二者に比較してホールドアップの変動幅がかなり狭い分布となりその右側にすそを持つ。リップル領域(Fig. 4 (d))でも幅の狭い単峰性を示す。分離流の j_G が小さい領域(Fig. 4 (e))では幅のやや広い単峰性を示し、 j_G が大きくなると(Fig. 4 (f))変動幅が小さくなる。管径が異なっても同様の特徴が見られた。図中、環状流の場合のすその部分は、 A_F の場合には管底部のフロス流に見られる液体スラグを、 A_D の場合にはじょう乱波をそれぞれ示している。また、管上部の液膜が剥がれた分離流で分布形状が異なるのは、Fig. 4 (e) の場合には液膜が開水路に似た流れで界面には振幅の比較的大きい二次元波が存在し(この時の出力信号は Fig. 3 (e))、Fig. 4 (f) の場合にはリップル領域の環状流に似た流れ(Fig. 3 (f))が存在する[8]からである。

このように F、A、Sp によって確率密度関数の分布形状に差異が見られるが、環状流領域内で細分化された流動様相 A_F 、 A_D 、 A_R の判別をその分布形状から行うことは困難である。したがって、これらの流動様相を定量的

的に判別するため、ここでは以下に述べる統計パラメータに着目して解析を行った。

4. 1. 2 標準偏差

Fig. 5 にホールドアップの時間変動値から求めた標準偏差 σ を j_G に対して示した。パラメータは j_L である。 σ はホールドアップの時間的変化の散らばりの程度を示し、界面に振幅の大きい波が存在していればこの値は大きくなる。図から、ホールドアップの変動量は j_L の減少、 j_G の増加にしたがい減少することがわかる。この傾向は管径が異なっても同じである。図中の破線は、既報[7]の判別法によって得た流動様式および様相の境界線である。Fig. 5 からわかるように、 A_F から A_D あるいは A_D から A_R へと移るにつれて界面の変動が徐々に小さくなっており、このような表示においても A_F 、 A_D 、 A_R を定量的に区分することは困難である。

4. 1. 3 歪度と尖度

Fig. 6 にホールドアップの時間変動値から求めた歪度 SK を j_G に対して示した。パラメータは j_L である。管径が10mmおよび16mmの場合、 j_G の増加あるいは j_L の減少に対して j_L が0.04m/s~0.4m/sの領域では歪度は増加するが、 j_L が0.02m/s以下の領域では減少する傾向を持つ。しかしながら、管径が26mmの場合で j_G の小さい領域では、Fig. 5 からわかるように分離流の場合が多く、 j_L による顕著な差異はみられずほぼ一定($SK=2$

Fig. 5 Standard deviation of the hold-up.

Fig. 6 Skewness of the hold-up.

Fig. 7 Kurtosis of the hold-up.

～3)となっている。

Fig. 7 にホールドアップの時間変動値から求めた尖度 KU を j_G に対して示した。パラメータは j_L であり、 j_L 、 j_G および管径の KU に対する傾向は SK の場合とよく似ている。さらに、Fig. 4 に示した分布形状と Fig. 7 の KU の値との比較からわかるように、流動様式が異なっても KU の値が同じ場合があるが、環状流の中では様相が異なると違った値をとる。このことは Fig. 3 の (a) と (e) に示されているように、フロス流と分離流の場合であるが、出力信号の振幅が異なっても形状がよく似た場合には KU 、 SK はそれぞれほぼ同じ値をとり、それにも拘らず Fig. 4 では分布形状が大きく異なっていることからわかる。

Fig. 8 は歪度 SK を尖度 KU に対してパラ

メータに j_L をとり示したものである。この表示による流動様式の判別については、Lee [3] らがオリフィスを通る二相流体について差圧に基づいた検討をした。彼らの結果によればこの表示で流動様式の判別ができているが、環状流のデータがスラグ流や波状流のデータと重なっており、またそのデータ数も非常に少ないために信頼性がほとんどない。図からわかるように、いずれの管径の場合にもデータは右上がりの曲線上に乗り、歪度は尖度の増加と共に急激に増加した後、緩やかに増加する傾向がある。すなわち歪度および尖度は j_L の減少および j_G の増加にしたがい、 j_L が大きい ($j_L = 0.04 \text{ m/s} \sim 0.4 \text{ m/s}$) 領域ではともに増加するが、 $j_L = 0.006 \text{ m/s} \sim 0.02 \text{ m/s}$ の領域では逆に減少する。例外的

Fig. 8 Relation between flow configuration, and coefficients of skewness and kurtosis for the hold-up.

に、管径が10mm、16mmでは j_L が小さい領域のデータの一部分が j_L の大きい領域に示した曲線の右側に隣接し、26mmの時にはそれに重なっている。流動様相との対応を考えると j_L の大きい領域はじょう乱波の存在する A_F と A_D で、 j_L の小さい領域はじょう乱波の存在しない A_R であることから、じょう乱波が歪度および尖度に与える影響は大きく、またそれが流れを区別する大きな特徴であることが確認された。

歪度および尖度の値は環状流領域に限ってみても両相の流量によって複雑に変化しており、これらの関係をじょう乱波の波高と通過頻度に関連づけて述べることにする。

既報[8]で述べているように、じょう乱波の波高と通過頻度は j_L の増加と共にいずれも増加するが、 j_G の増加に対しては波高は減少し通過頻度は増加する傾向がある。 A_F と A_D の領域では、じょう乱波の波高と通過頻度が減少するにしたがい歪度は増加する。また、尖度は基底液膜の波高とじょう乱波の波高との差が大であるほど大きくなるが、通過頻度による影響はほとんどない。一方、じょう乱波のない A_R 領域では、 j_L が減少し j_G が増加するにしたがい、歪度および尖度が減少する。これはじょう乱波が消滅し、波長および波高の揃ったリップルが界面に存在したため、やがては、歪度および尖度の両値とも

零に近づく。このようにじょう乱波の波高や通過頻度が歪度と尖度に及ぼす影響が定性的に明かになった。

Fig. 8に示した整理では、環状流の細分類については明確な区別ができず、流動様式線図としても望ましくないことがわかる。前述したように、流動様相は主にじょう乱波の波高と通過頻度に支配されており、この特徴はホールドアップの確率密度関数から求めた KU の方に強く表れている。Fig. 9は環状流の流動様相を、偏平度($KU+3$)と水の容積流量比($1-\beta$)を両座標にとって、示したものである。すなわち、前記の方法で環状流を A_F 、 A_D 、 A_R に細分類し、これらが($KU+3$)と($1-\beta$)に対してどのような関係になるのかを検討したものである。図からわかるように、両者の関係は A_F 、 A_D 、 A_R 領域において特徴ある傾向を示し、それぞれ以下の近似式で示される。図中にはそれらを太い実線で示した。

$$A_F \text{ 領域: } 26\text{mm } KU+3=5.93 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_D \text{ 領域: } 10\text{mm } KU+3 &= 0.16 \times (1-\beta)^{-0.82} \\ 16\text{mm } KU+3 &= 0.16 \times (1-\beta)^{-0.80} \\ 26\text{mm } KU+3 &= 0.16 \times (1-\beta)^{-0.75} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 9 Relation between flow configuration, kurtosis and volume flow quality (hold-up).

$$\begin{aligned}
 A_R \text{ 領域: } 10\text{mm } KU+3 &= 10^{5.5} \times (1-\beta)^{1.4} \\
 16\text{mm } KU+3 &= 10^{5.0} \times (1-\beta)^{1.2} \\
 26\text{mm } KU+3 &= 10^{4.6} \times (1-\beta)^{1.1}
 \end{aligned}
 \quad (7)$$

上式からわかるように管径が小さくなると A_R 領域では係数と指数が共に大きくなり、 A_D 領域では指数が大きくなる。すなわち、流動様相が異なるとそれぞれの近似式の傾きの差は管径が小さいほど大きくなる傾向にある。 A_R のデータが $KU+3 \div 10$ 近傍と $KU+3 \div 3$ 近傍の2箇所に分かれて存在しているが、前者は $j_L = 0.02 \text{ m/s}$ のように A_R でも比較的水流量の多いもの、後者は $j_L = 0.01 \text{ m/s}$, 0.006 m/s のように水流量の小さな液膜破断寸前の A_R に相当している。また、図を見て明らかに、管径が大きくなるほどデータのバラツキが大きく、特に $D=26 \text{ mm}$ において顕著である。 $D=26 \text{ mm}$ の場合 A_F 領域では、 j_L 一定で j_G を増加させると KU は減少し、そ

の傾きは j_L の減少にしたがい小さくなる傾向があるが、概して式(5)に示されるような定数となる。なお、 $D=16 \text{ mm}$ および 10 mm の場合には A_F のデータが少なく、それについての近似式を得ることが出来なかったが、それぞれの図には参考のために式(5)を併記した。

これらのことから、環状流の流動様相はホールドアップの時間変動値と両相の流量比が既知であれば判別可能であり、本実験範囲内の異なった管径の場合にも推測できる。

4. 2 差圧の統計的性質

各種統計パラメータの検討に用いた管軸方向の差圧は、圧力タップを管底部に設けた場合と管頂部から 90° おきの4個の管周方向に設けた場合ではほぼ同じ結果が得られたので、ここでは簡便さから管底部における測定値を使用した。また差圧の測定区間(L)については、その区間が長いほど空間分解能が劣るので、環状流に主眼を置いた本実験では管径の5倍と10倍の場合について検討した。

4. 2. 1 差圧変動の確率密度関数

Fig. 10に $L=10D$ の場合の差圧の時間変動記録を、F、 A_F 、 A_D 、 A_R 、Sp の場合につ

Fig. 10 Time variation of the differential pressure.

例示した。これらの記録の出力感度は必ずしも同じでないから、この図から差圧の絶対値に関する比較はできない。差圧変動の特性は測定区間に存在する液体スラグの長さおよびその頻度に支配され、本実験範囲では特にフロス流および A_F 領域において $5D$ と $10D$ による影響が表れている。しかしながら、この程度の差圧測定区間であれば両相の流量に対する定性的傾向は同じであった。

差圧変動と流動様式、様相との関係は以下の通りである。フロス流 (Fig. 10(a)) では大きな液体スラグが存在し、その通過頻度は不規則で大きさも種々のものが存在していることがわかる。 A_F 領域 (Fig. 10(b)) では環状流に見られるじょう乱波の他にもフロス流で見られたような液体スラグが通過している。そしてこのような大きい波が通過した場合にはその振幅もかなり大きい。 A_D 領域ではじょう乱波の通過がかなり規則的になっており、その大きさも均一化してきている。 A_R では界面はかなり滑らかになっているが、それでもまだ時にはじょう乱波に似た波が通過している。前にも述べたように分離流の流れには開水路に似た流れと環状流の膜厚分布に似た流れが観察されたが、いずれの場合にも差圧変動が小さくこれらの信号からそれらを区別することは難しい。

Fig. 11は差圧信号から得られた確率密度関数 $P(x)$ を示したものである。図からわかるように、概して差圧変動の確率密度関数の分布形状はホールドアップのそれに比較して左右が対称に近い分布形状となっている。空気流量 j_G が増大し、水流量 j_L が減少するにつれて界面には大きな波が少なくなり滑らかになるので差圧変動幅は狭くなる。フロス流の場合には Fig. 11(a) に示したように、特に空気流量が小で水流量が大きい領域では、気体および液体スラグの流速の違いによる動圧のかかり方が各圧力タップで異なるなどのために ΔP が負になることがある。 A_R の場合には確率密度関数は狭い範囲に分布し、開水路に似た流れ (Fig. 11(e)) と環状流に似た流れ

Fig. 11 Typical examples of the probability density function for the differential pressure.

(Fig. 11(f)) の場合にも著しく幅の狭い分布を示し、これらの間には差異が見られない。つまり、差圧変動の確率密度関数の分布形状はフロス流、環状流、分離流とは相関があり判別可能であるが、環状流や分離流の流動様相に対しては相関がほとんど見られなかった。

4. 2. 2 差圧変動の標準偏差

Fig. 12に標準偏差を $L=5D$ と $10D$ の場合について示した。 $j_L=0.4\text{m/s}$ の場合には空気流量の増加にしたがって両者の σ はやや減少しているが、 $j_L=0.04\text{m/s} \sim 0.2\text{m/s}$ の A_D 領域では、空気流量の増加にしたがい σ は増加している。これは、じょう乱波の波高が空気流量の増加にしたがい小さくなり、その通過頻度が増えるためである。 A_F 領域、特に $j_G=30\text{m/s}$ 付近では波形の変動が大きくなり σ が大きな値をもつ。また $j_L=0.1\text{m/s}$ 以下では σ は水流量よりも空気流量に強く影響されている。分離流 Sp では差圧変動が非常に小さいため j_G 、 j_L の変化に影響されず標準偏

Fig.12 Standard deviation of the differential pressure.

差はほぼ一定で、小さい値をとる。このように、差圧の場合の標準偏差も特徴ある性質を示すが流動様式による特徴は見られず、ホールドアップの場合の Fig. 5 に比較してもその変化量が小さいので、Fig. 12から流動様式の判別をすることは難しい。

4. 2. 3 歪度と尖度

Fig. 13は歪度 SK を、パラメータに j_L をとり、尖度 KU に対して示したものである。図中のデータに流動様式と流動様相の記号を付けることは、Fig. 8 の場合よりも複雑になり、繁雑になるので省略したが、F から A_F へ変化するようにしたが歪度、尖度がともに小さくなり、 A_D 、 A_R 、 Sp においては、両値とも零近傍に集中している。すなわち、流動様式と流動様相の判別にはこの図に採用した表示が有効でないことを示唆している。なお、このような傾向は $L=5D$ の場合に強く表れている。

Fig. 14に流動様相を偏平度 ($KU+3$) と水の容積流量比 ($1-\beta$) に対して示した。この図においても $L=5D$ の場合に傾向がよく表れているが、Fig. 9 に示したような流動様相による特徴はここでも見られない。すなわち、差圧の時間変動値から得られた確率密度関数の統計パラメータの場合には環状流の流動様

Fig.13 Relation between flow configuration, and coefficients of skewness and kurtosis (differential pressure).

Fig.14 Relation between flow configuration, kurtosis and volume flow quality (differential pressure).

相を判別することは困難であると言える。

5. 環状流の境界線の整理

Fig. 15に、ホールドアップの検討結果から判別した流動様式および様相の境界を示した。これらの区分線は、流動様式については確率密度関数の分布形状から、環状流の中の A_F 、 A_D 、 A_R については式(5)、(6)、(7)によって、それぞれ得られたものである。破線、一点鎖線、二点鎖線は管径がそれぞれ10mm、16mm、26mmの場合の境界線である。

Fig.15 Flow configuration map of annular flow.

図中、太い実線は管径が26mmの場合に得られたAとSpとの境界を示す式(8)およびAとFとの境界を示す式(9)であり、これらが視察による結果とよく合っていることはすでに報告済みである[7]。

液相が層流の場合 $j_L = 11 \times j_G^{-7/4}$ (8)

液相が乱流の場合 $j_L = 10^8 \times j_G^{-7}$ (9)

言うまでもなく式(5)、(6)、(7)はそれぞれの流動様相の区分線を表示しているものではないが、これらの式によって得た環状流の中のA_F、A_D、A_Rの区分線は、図に示されているように、A_FとA_Dの場合については j_G に強く依存しており、A_DとA_Rについては管径および j_G にはほとんど依存せず $j_L = 0.02\text{m/s}$ なる条件によって分けられていることがわかる。

6. 結言

内径10mm、16mmおよび26mmの水平管において気液環状二相流の流動様相の定量的

判別を、ホールドアップと差圧変動の統計的性質に基づいて検討した結果、以下の結論を得た。

1) 環状流の流動様相を判別するには、差圧変動よりもホールドアップ変動に基づく統計的性質を利用した方が良い結果が得られた。すなわち、ホールドアップ変動による確率密度関数分布の歪度と尖度の方が、差圧を利用した場合よりも、環状流の流動様相との相関が大きい。

2) 確率密度関数の分布形状はそれぞれの流動様相において特徴をもつが、環状流の流動様相については差異が見られなかった。

3) 環状流における流動様相の境界を尖度と $(1 - \beta)$ で表示することができた。したがって、ホールドアップの時間変動値と両相の流量が既知であれば環状流の細分類が可能である。

Nomenclature

D	: inner diameter	[m]
j_G	: volumetric gas flux	[m/s]
j_L	: volumetric liquid flux	[m/s]
KU	: kurtosis	[-]
L	: length	[m]
$P(x)$	: probability density function	[-]
SK	: skewness	[-]
ΔP	: differential pressure	[Pa]
β	: volumetric flow fraction ($=j_G/(j_G + j_L)$)	[-]
η	: hold-up	[-]
σ	: standard deviation	[-]

参考文献

- [1] Jones, O.C. & Zuber, N., Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 4, 200 (1974).
- [2] 松井 他, 機論(B), 52-478, 2337 (1986).
- [3] Lee, J.P. et al., Proc. 2nd KSME-JSME Fluids Engng. Conf., Vol. 2, 398 (1990).
- [4] 萩原, 23回伝熱シンポジウム講論, 280 (1986).
- [5] 澤井 他, 8回混相流シンポジウム講論, 89 (1989).
- [6] 森 他, 28回伝熱シンポジウム講論, 193 (1991).
- [7] 深野 他, 機論(B), 48-436, 2589 (1982).
- [8] 深野 他, 機論(B), 51-466, 1807 (1985).