統計的特徴量の相関マッピングによる
気液二相流各相流量の計測法*峯村吉泰^{*1}, 竹岡敬晃^{*2}, 正田伸次^{*3}
江頭和幸^{*3}, 小川 胖^{*4}Correlative Mapping Method for Measuring Individual Phase
Flow Rates of Air-Water Two-Phase Flow Based on Stochastic FeaturesKiyoshi MINEMURA, Takeaki TAKEOKA, Shinji SHODA,
Kazuyuki EGASHIRA and Yutaka OGAWA

We present a correlative mapping method for measuring individual phase flow rates of an air-water two-phase flow. First, we extract stochastic features of a fluctuating pressure difference in a Venturi tube placed just downstream of an eccentric elbow, and second, we evaluate its individual phase flow rates based on pattern recognition for a data base, which is constructed beforehand. Experiments in an air-water loop showed that individual phase flow rates can be measured within an accuracy of 4.7% for the air phase and 4.0% for the water phase, and that the method is applicable to the measuring management for production rate at well heads in offshore oil fields.

Key Words: Flowmeter, Flow Measurements, Multiphase Flow, Air-Water Two-Phase Flow, Stochastic Features, Venturi Tube, Pattern Recognition, Offshore Oil Field

1. ま え が き

気液二相流の流量計測には、気相と液相に分離できない場合には各相ごとに従来からの各種測定法を適用すればよい。気液二相流を分離せずに測定するには、 γ 線密度計や静電容量計による密度の測定と超音波流速計との併用法などが適用できる⁽¹⁾が、経済性あるいは操作性などの面からこれとは別の計測法を必要とする場合も多い。とりわけ、将来的な開発対象として予想される大水深・小規模の海底油・ガス田には、坑口からのガスを含んだ原油をそのまま輸送するのが経済的とされ、各坑口における流量の正確な把握のため、安価で保守や耐久性に優れた流量計測法の開発が進められている⁽²⁾⁽³⁾。このため、著者らはタービン流量計を用いた各相体積流量の同時計測法⁽⁴⁾⁽⁵⁾を示した。この方法では流体中をセンサである羽根車が回転するので摩耗などによる耐久性には問題もあり、センサ部が流

路内に突き出していない方式のほうがより理想的である。

管内気液二相流の流動様式は、Jones-Zuberによるボイド率の確率密度⁽⁶⁾や松井らによる圧力変動の統計的性質⁽⁷⁾⁽⁸⁾に注目することにより把握できることが知られている。この性質を利用して、Darwichら⁽⁹⁾は、水平管の軸方向に異なる位置における絶対圧力計2個、差圧計3個、静電容量形および触針式のボイド率計各1個、合計7種のセンサ出力の統計的特徴変数の強度を気相と液相流束に対して等高線により区分けした図形データベースをつくり、このデータベースを利用した各相流量の同時計測法を示している。この方法は、後に、オリフィス前後の差圧と下流の絶対圧力を用いた流動様式の同定法⁽¹⁰⁾にも拡張されている。一方、杜河内⁽¹¹⁾⁽¹²⁾は円形細管から矩形流路に放出される流れの発振現象に注目して二相流各相流量の同時計測法を提案している。しかし、これらの方法は測定部での整定された流れを得るためその上流にかなり長い直管部を必要とし、かつ、この直管の設置状況やここでの流動状態が変化するとその影響を受ける可能性が高い。

そこで、本研究では、測定管路を著しく短縮化して、普通の計測器のように取付け・取外し可能な独立の測

* 原稿受付 1996年11月19日。

^{*1} 正員、名古屋大学情報文化学部(〒464-01 名古屋市千種区不老町)。^{*2} (株)東芝(〒105 01 東京都港区1-1-1)。^{*3} 石油公団石油開発技術センター(〒261 千葉市美浜区浜田1-2-2)。^{*4} (株)オーバル横浜事業所(〒236 横浜市金沢区福浦1-9-5)。

定器として利用できるようにし、かつ、上流の流動状態によらず各相流量に応じて一定の流れをつくりだすため、偏心エルボにより流れに旋回を与え、これをベンチュリ管に導いて、その圧力変動量の統計的性質を利用する方法を検討した。本論では、その第1段階として、統計的特徴量の強度を求めて図形データベース化し、二相流の各相体積流量の同時計測の可能性を測定精度の面から検討し、本方法が石油生産現場での流量計測に適用できることを示す。

2. 記 号

- A : 管の断面積
 D : 管内径 (=50 mm)
 e : 流束の測定誤差
 f : パワースペクトル密度のピーク周波数
 G : パワースペクトル密度関数
 j : 容積流束 $= Q/A$
 J : 相関マッピングによる流束 j の同定値
 p : 静圧
 Δp_i : 差圧 $= p_i - p_0$
 Q : 体積流量
 R : 相関係数
 $\mathcal{R}$: 特徴変数 s のある階調のビット領域
 s : 統計的特徴変数
 ε : 相対誤差
 γ : ゆがみ係数
 δ : とがり係数
 σ : 標準偏差

添 字

- g : 気相
 i : 圧力測定位置 ($i=0, 1, \dots, 6$)
 l : 液相

Fig. 1 Schematic of measuring system

3. 計測法の原理

3.1 相関マッピング法 測定法の概略を図1に示す。圧力信号を直流増幅器、A-D変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込み、その変動波形の離散化数値データより統計的特徴変数の強度を求め、パターン認識の方法によりデータベースを参照して各相の容積流束 $j_g (= Q_g/A)$, $j_l (= Q_l/A)$ を同時に同定する方法である。

データベースは、あらかじめ、測定流量領域を網目状に分割した各格子点に相当する流束 (j_g, j_l) に対して圧力波形を測定・記録させ、これを解析して作成しておく。そのデータベースを概念的に示すと、図2に示すように、種々の統計的特徴変数 $s_1, s_2, \dots, s_n$ ごとにその強度を j_g, j_l に対して等高線で区分けして領域表示した二次元図形からなる。本論では、これら図形データを画素にしてそれぞれ 500×500 のビットマップとし、各 bit には対応する強度に応じた最大 5 bit (32 段階) の輝度階調をもつデータベースとした。

このデータベースを用いて二相流の各相流量を計測するには、観測点に対する測定波形をもとに各特徴変数の強度を求める。ついで変数 s_1 と s_2 の強度に相当する輝度階調のビット領域 $\mathcal{R}(s_1)$, $\mathcal{R}(s_2)$ をデータベースから読み出し、これら領域の論理積 $\{\mathcal{R}(s_1) \cap \mathcal{R}(s_2)\}$ をとり、この操作を全変数に対して繰返すことにより、観測値がもつ全特徴変数の強度に共通な領域を求める。この、いわゆる相関マッピングにより得られたビット領域は一つの有限の広がりをもつので、その重心の座標を求める容積流束 J とする。すなわち、

$$J = \sum_{m=1}^M J_m / M \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 J_m は該当する網目内に含まれる第 m 個めの画素の番地に相当する流束、 M はその領域に含まれる全画素数である。

気液各相に対し、 J からその領域に含まれる最も遠い画素までの距離に相当する流束の差 e をその点に

Fig. 2 Schematic of data base and logical products

Stochastic feature	Discretized function
Difference of averaged pressures	$\overline{\Delta p_i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_i(n) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_0(n) = \overline{p_i} - \overline{p_0}$
Standard deviation	$\sigma = \left[\sum_{n=1}^N \{ \Delta p_i(n) - \overline{\Delta p_i} \}^2 / N \right]^{1/2}$
Coefficient of skewness	$\gamma = \sum_{n=1}^N \{ \Delta p_i(n) - \overline{\Delta p_i} \}^3 / N \sigma^3$
Coefficient of kurtosis	$\delta = \sum_{n=1}^N \{ \Delta p_i(n) - \overline{\Delta p_i} \}^4 / N \sigma^4$
Density of power spectrum	$G(k/N\Delta t) = \frac{2\Delta t}{N} \left \sum_{n=0}^{N-1} \Delta p_i(n) \exp \left(-j \frac{2\pi k n}{N} \right) \right ^2$ $j^2 = -1, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1$
Correlation coefficient	$R = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ p_i(n) - \overline{p_i} \} \{ p_0(n) - \overline{p_0} \} / \sigma_i \sigma_0$ $\sigma_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ p_i(n) - \overline{p_i} \}^2 \right]^{1/2}$

N : Number of sampling data, Δt : Time interval of sampling

3.2 統計的特徴変数

4. 実験装置と実験方法

Atomosphere

Reservoir tank

Venturi tube

Eccentric elbow

Compressor

Reservoir tank

Air injector

Orifices

Air

Water

Booster pump

Flow meter

Fig. 3 Test apparatus of two-phase flow loop

Fig. 4 Shape of Venturi tube and eccentric elbow

ベンチュリ管(入口内径 $D=50$ mm)には、いわゆる低損失管⁽¹³⁾と呼ばれる図4に示す形状を用いた。その絞り面積比は0.25、広がり角度は 10° である。ベンチュリ管部は透明とし、流動状態の観測を可能にした。変動圧力は半導体圧力センサにより測定し、その位置はベンチュリ管の入口直前のよどみ部①、のど部②、拡大管部③～④、出口直管部⑤～⑥である。ベンチュリ管上流のエルボは、上流と下流の軸心を $1.3D$ 偏心させた偏心エルボである。この偏心により流れに旋回を与えて混合させ、エルボ上流の垂直直管部の流動状態にかかわらず各相の流束によって定まる流れ場を生じさせるためのものである。ベンチュリ管の軸から気液混合装置までの高さは $17D$ 、ベンチュリ管出口から下流の背圧調整弁までの距離は $25D$ である。

4・2 実験方法 水流量計測用電磁流量計および空気流量計測用オリフィスの差圧は、直流増幅器および A-D 変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込み、3 s の時間平均値を求め、各相の体積流量とした。この空気流量を、等エントロピー変化を仮定して偏心エルボ直前の断面における平均圧力 p_8 に換算し、ベンチュリ管を通る気相流量の代表値とした。

Fig. 5 Flow regime map and measured points

ベンチュリ管の各部圧力(①, …, ⑥)は8チャンネルA-D変換器を介して, 3sの変動波形を磁気記録装置におとし, 後にまとめてその統計的性質を調べた。この際, 圧力変動波形の特徴を充分とらえられるよう周波数分解能は5 Hzとし, 全流量領域における圧力変動波形の最大周波数が1.8 kHz程度であることから解析を行う周波数の上限を2 kHzとした。

実験は, 液相容積流速 j_l が0.4~2.5 m/s, 気相容積流速 j_g は0.05~5.0 m/sの範囲で行った。この測定範囲に対して, 気相流速をほぼ12等分, 液相流速をほぼ7等分した, 合計12×7点に対して, j_l をほぼ一定にしたまま j_g を順次増したときの圧力変動量を測定した。これら測定点をTaitel-Dukler⁽¹⁴⁾の水平管に対する流動様式線図5に, 各 j_l ごとに記号を変えて示してある。測定範囲は水平管におけるスラグ流に相当するが, 流れに旋回を与えているため, 流動状態は j_g, j_l の値によりかなり異なる。ベンチュリ管のど部の流動状態を目視により観察した結果, この流動状態に応じて, 図6に示すように, 圧力も特徴的な挙動を示した。いずれの図も圧力 p_0 と p_1 の変動波形の例であるが, j_g と j_l がともに小さい範囲では波状流 [図6(a)], j_g が大きく j_l が小さい範囲ではスラグ流 [図6(b)], j_g が小さく j_l が大きい範囲では気泡流 [図6(d)], それ以外の範囲では環状流 [図6(c)] 状の旋回流であった。図5にはこれらの境界を細線で示してある。ただし, エルボ直前の圧力 p_s は j_l が増すほど大になり, 実験の範囲では150~220 kPaの範囲で変化した。

5. 実験結果と考察

5.1 統計的特徴変数の線図 圧力変動量 Δp_i の統計的性質を表すデータベースの二次元マップは, 流動様式線図5で見たように12×7の測定点をもとに求

(a) Wavy flow ($j_g=0.07$ m/s, $j_l=0.42$ m/s) (b) Slug flow ($j_g=4.17$ m/s, $j_l=0.51$ m/s) (c) Annular flow ($j_g=3.59$ m/s, $j_l=2.01$ m/s) (d) Bubbly flow ($j_g=0.11$ m/s, $j_l=2.52$ m/s)Fig. 6 Fluctuations of pressures p_0 and p_1

めた。全測定領域をこれら測定点を頂点にもつ三角形要素の重なりのない集合として表した網目状格子に対し, 各格子点における特徴変数の強度をもとに線形補間して強度に関する等高線を求めることができ⁽¹⁵⁾, 図7のようになる。強度の最大値と最小値を最大32等分した32段階の輝度階調としたが, 領域に飛び地ができたりして複雑な線図にならない程度に, 等分数は

Fig. 7 Contour maps of stochastic features

適宜減らした。図7は、視覚的にわかりやすく図示するため、強度を10階調程度の等高線で表示し直してある。

図7(a)は、差圧 Δp_1 の強度を示す。 j_l が増すほど Δp_1 が大になるが、等高線は j_g の増加に対して右下がりであり、 j_g が増すほど同じ差圧では液相流量が減ずることを示している。なお、 $\Delta p_2, \dots, \Delta p_6$ に対する線図は Δp_1 の場合と非常によく似ていて、かつ等高線の移動量も少ないので、これらをデータベースとしての統計的特徴変数に含めることはやめた。測定精度さえ確保できれば、特徴変数の数が少ないほうが計測時間の短縮にもなり望ましいからである。同じことは、他の特徴変数に関してもいえるので、結局、本論で扱う統計的特徴変数としては、 Δp_1 に対する $\Delta p, \sigma, \gamma, \delta, G, R$ の6個である。

図7(b)は標準偏差 σ の強度を示す。 j_g と j_l が増すほど、 σ が大になり、 Δp_1 の変動が大きくなることを示している。図7(c)はゆがみ係数 γ を示す。 j_g が小さく、 j_l が大きくなるほど、 γ が増し、変動波形が極端に変化しない安定化の傾向を反映している。図7(d)のとがり係数 δ の分布は複雑であるが、 j_g が大きく j_l が小さい領域、および、 j_g が小さく j_l が中くらいの領域から j_g が中くらいで j_l の大きい領域にかけての領域で δ が大きい。前者はスラグ流から、後者は

気泡流から環状流への遷移域に相当(図5)し、 Δp_1 の周期的な変動量のピークが時間により大きく変化する流動状態の不安定性を反映している。図7(e)のパワースペクトルのピーク周波数 f は j_l が減ずるほど低下する傾向が見られるが、 j_g が小さく j_l の大きい領域でも局所的に f がかなり低下する。 f の低下は旋回流の安定化を示しているものと考えられる。図7(f)の相関係数 R は、 j_g の増加とともに減ずる傾向が見られ、また、 j_g が小さくて j_l が大きい領域でも R が低下する。ベンチュリ管の絞りによる圧力変動の相関性の低下を示している。このように、それぞれの特徴変数は、 j_g, j_l に対しそれぞれ特異な分布形状を示す。

5・2 測定精度 6個の特徴変数に対する線図を重ね合わせることで、測定領域は細かい網目状となり、図8が得られる。ただし、図をわかりやすいものとするため、図8は単に図7の各図を重ね描きしたものにとず、最終的に求めた図に対するものではない。図8での個々の網目ごとに6種の特徴変数の強度が異なり、測定で解析される特徴変数はこれら網目のどれか一つに該当することになる。3・1節で述べたように、網目の重心の座標 (j_g, j_l) がその観測点に対する流束、この点から同じ網目内に属する最も遠い画素までの距離に相当する流束の差 (e_g, e_l) がこの観測値に対する誤差であるから、誤差の評価として図5に示

Fig. 8 Contour maps overlaid

した実験点のうち図8に示した図の内部に含まれる全観測値に対する相対誤差の平均値 $\varepsilon = [\sum(e/f)]/N_d$, N_d : データの個数] を求め、結果を比較してみる。

全測定範囲に対する ε の値は, j_g に対しては $\varepsilon_g = 7.2\%$, j_l に対しては $\varepsilon_l = 4.0\%$ であった。 ε_g の大きい領域は j_g の小さい領域に限定され, 特に j_l が小さいときにその傾向が強く現れた。このような流量域は, 図5で見たように, 流れが波状流の状態である。すなわち, j_l が小さすぎて絞り部でも二相が上下に分離し, 流れに旋回が生じない状態である。普通のベンチュリ管でも流量計測に可能な最低限界があるので, これを旋回流の生ずる下限の値(図8に破線で示す)とみなし, 液相の流量範囲を $j_l = 0.9 \sim 2.5$ m/s としてあらためて ε を求め直してみると ε_g は 4.7% であった。石油生産現場で二相流のまま流量測定する場合に要求される精度は $\varepsilon \leq 5\%$ であるから, 本方法はこの方面への用途に適用可能であることがわかる。

本論ではかなり少ない測定点をもとに試験的にデータベースを求めたが, この測定点数を増すことにより測定精度のかなりの向上が見込まれるので, 本法の他の分野への適用性も高いと考えられる。ただし, 本方法の実用化にはソフトウェア的な面での検討課題も多い。例えば, ある特徴変数の値が領域を区分する値にごく近い場合にはこの境界の両側の領域を該当領域として扱う必要もでてこよう。本論でのデータベースの大きさが 900 kB 程度にすぎないので, これによる精度低下は周波数領域の特徴変数である確率密度関数や

線形予測係数など, 特徴変数の数を増やすことなども必要となろう。また, 再現性や誤差評価のより完全なチェック, 偏心エルボ上流の流れの影響がどの程度解消できているか, 差圧を検出しているとはいえ上流圧力 p_0 の変動の影響など, 計測法として確立するのに検討すべき問題も多いが, これらについては次報で詳述したい。

6. 結 論

気液二相流の各相流量を同時計測する新しい方法として, 偏心させたエルボにより流れに旋回を与えてベンチュリ管に導き, その上流よみ部とどの部の差圧の変動圧力に対し音声認識の手法を適用して統計的特徴変数の強度を求め, これを気相および液相流束に対して等高線表示した図形データベースとすることにより, これらデータベースに対するパターン認識による各相流量の同定法を検討した。得られた相対誤差の最大値は気相に対しては 4.7% , 液相に対しては 4.0% 以下であり, 石油の二相流生産システムに対する流量計測に適用できることが知れた。

最後に, 本研究がカシオ科学振興財団より研究助成を受けて行なわれたことを付記し, 謝意を表する。

文 献

- (1) Reimann, J., ほか2名, *Int. J. Multiphase Flow*, **8**-1 (1982), 33-46.
- (2) Rajan, V. S. P., ほか2名, *Trans. ASME, J. Energy Resources Tech.*, **114** 3(1993), 375-382.
- (3) 峯村吉泰・古川博宣, ターボ機械, **22** 11(1994), 658-664.
- (4) 峯村吉泰・ほか4名, 機論, **62**-593, B(1996), 122-129.
- (5) Minemura, K., ほか4名, *Trans. ASME, J. Energy Resources Tech.*, **118** 1(1996), 29-35.
- (6) Jones, O. C. and Zuber, N., *Int. J. Multiphase Flow*, **2** (1975), 273-306.
- (7) 松井剛一・ほか2名, 機論, **52** 478, B(1986), 2337-2344.
- (8) 松井剛一・逢沢俊彦, 機論, **53**-485, B(1987), 144-148.
- (9) Darwich, T. D., ほか2名, *SPE Prod. Eng.*, **6** 8(1991), 265-270.
- (10) Cai, S., ほか3名, *Can. J. Chem. Eng.*, **72**-6(1994), 440-445.
- (11) 社河内敏彦, 機論, **57** 543, B(1991), 3647-3652.
- (12) 社河内敏彦, 機論, **60** 578, B(1994), 3359-3365.
- (13) Hooper, L. J., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, **84**-4(1962), 461-470.
- (14) Dukler, A. E. and Taitel, Y., *AIChE J.*, **22**-1(1976), 47-55.
- (15) 高澤嘉光, bit, **19** 2(1987), 149-157.