染料の濃度差を利用する気液二相流の液相流量測定*

佐藤 泰生^{*1}, 佐田富 道雄^{*1}, 吉 永 俊 雄^{*2}Measurement of Liquid Flow Rate in Two-Phase Gas-Liquid Flow
Using Dye Solution

Yoshifusa SATO, Michio SADATOMI, and Toshio YOSHINAGA

The application of tracer technique to the measurement of the liquid flow rate of two-phase flow is tested. The principle of this method is as follows: A solution of a certain dye is introduced into the liquid continuously and next, at a far downstream distance, some additional fresh liquid is injected into the main flow. If the flow rate of this additional liquid is known, the rate of the main flow can be determined from the dye concentration in the liquid phase detected at the two positions, the upstream and downstream sections of the additional liquid injection. The results measured by this method agreed with true flow rates within $\pm 6\%$ regardless of flow pattern.

Key Words: Multiphase Flow, Flow Measurement, Flow Rate, Tracer Technique, Dye Solution, Spectroscope

1. ま え が き

流量測定は、流れの基礎情報を得る観点から気液二相流分野における重要な研究課題の一つであり、従来から研究が行われている。測定対象となる二相流系は多様であるから、測定方法もこれに対応できるように特性の把握されたいろいろなものが用意されていくことが望ましい。よく知られているように、二相流では一つの測定で気相と液相の流量（あるいは全質量流量とクオリティなど）のような二相流を特定できる一対のパラメータ）を推定することは困難であるから、二つのパラメータを求めるためには異なる二つの要素から情報を得る必要がある^{(1)~(4)}。仮に一つの要素からの情報は確保されるとして、流量に関する第2の情報を得る手段として実用性の高いものは、現在のところ、(1)絞り法、(2)タービンメータ、(3)動圧法、(4)トレーサ法、(5)直接質量流量測定法 (True Mass Flow Meter) であると見られている⁽¹⁾。

次に、二つの要素を組合せて測定システムを構成す

る際に重要なことの一つは経済性であろう。世古口ら⁽⁵⁾はオリフィス対による気液両相の流量測定を試みているが、これなどは安価な測定系の構成をねらったものである。ただし、彼らの方法は2要素のいずれもオリフィス差圧を利用するという同じ原理に基づいているため、測定精度の面で問題を残しているように思われる。

本研究は、二相流系の流量測定に適用可能な方法の一つ加えるべく、染料の濃度変化を利用する液相流量の測定法について調査したものである。本方法は、絞り法もしくは動圧法との組合せを想定し、全体として安価な測定システムの構成を目標としている。

2. 測 定 方 法

測定の原理を図1に示す。まず、気液二相流体の輸送管路の一点から濃度の高い染料液を連続的に導入する。染料が主流液相に十分混合した地点で流れの中に染料を含みぬ二次液を注入すれば、主流の染料濃度は薄められる。流れが定常であれば、染料濃度の変化と二次液流量から主流の液相流量を決定することができる。すなわち、二次液導入前後の染料濃度を C_1 , C_2 とし、二次液の流量を Q_{L2} とすると、主流の液相流量 Q_{L1} は染料の質量保存から

* 昭和62年11月28日 関西支部第247回講演会において講演、原稿受付 昭和62年5月25日。

^{*1} 正員、熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪2-39-1)。

^{*2} 正員、西日本工業大学 (〒800-03 福岡県京都市郡苅田町大字新津1633)。

$$Q_{L1} = \frac{C_2}{C_1 - C_2} Q_{L2} \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。ここで、濃度測定のためのサンプリング流量と染料液の注入流量は主流のそれに比べて無視されている。

本測定法は、原理的にはすでに単相流では実用に供されている塩水濃度法⁽⁶⁾に同じであり、前述の方法の中ではトレーサ法に属する。これは相分布（したがって流動様式）に依存しないという特徴を有すると同時に、濃度測定断面において染料濃度が一樣でなければならぬという条件をもつ。なお、気液二相流に対する類似の研究として Stothard⁽⁷⁾、Brown⁽⁸⁾らの報告がある。しかしながら、彼らは液相に塩水や放射性同位元素を注入し、その移動速度から液相速度を求めているのに対し、本測定法は濃度差から直接液相の流量を決定する点において彼らの方法と相違する。

3. 実験

3.1 染料濃度の測定 ランバート・ベールの法則⁽⁹⁾によれば、一定の長さの試料液層を単色光が透過する際の吸光度（Extinction）は溶液の濃度に比例する。この法則を利用した分光光度計を用いて液中の染料濃度を測定した。

実験に室温の清水を用いることにしたため、染料としては親水性があり（水に対する溶解度 50 kg/m³）、入手の容易なアシッドオレンジ II（粉末の酸性染料）を選んだ。この水溶液の吸光スペクトルは 482.5 nm においてピークを呈するから、この波長における吸光度 E （吸光度計の出力）を測定した。事前の検定の結果、アシッドオレンジ水溶液の濃度が $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-1}$ kg/m³ の範囲で吸光度計出力に再現性があり、かつ濃度と吸光度の間に正比例の関係のあることが確かめられた。

3.2 配管系 2章に述べた測定原理の適用性を空気-水系水平管内二相流によって調査した。図 2 にその実験装置を示す。

流量の測定された空気と水を直径 25 mm の水平管路に導き、気水二相流を得た。約 2 kg/m³ の濃度のアシッドオレンジ水溶液を気水混合部の上流 80D の地

点で管路に導入した。染料溶液のためには一定の空気圧をかけ、これとコックによって一定流量の溶液を流れて注入した。その流量は主流の 1% 以下であった。気水混合部の下流 75D において既知流量の二次清水を異形 T 字継手を通して水平方向から導入し、二相流に合流させた。その後、二相流は 210D の管路を流れて大気に流出し、管路出口に置かれた量水槽によって液相流量の測定を行った。この量水槽による流量の測定値は、精度が 1% 以内であり、本提案の測定値の誤差を評価する際の基準値として用いた。

管路の各要素の配置は染料の混合に関する予備実験結果（付録）を参考にして決めた。付録に述べてあるように、二相流の液相中の染料濃度が断面内で一樣になるまでに要する最大距離は、気泡流とスラグ流の場合に約 100D、環状流の場合には約 200D に達することが推定された。実験室の寸法上の制約から直管路において混合が完了するように各要素を配置することは不可能であったので、上述のように気水混合部の上流で染料溶液を液中に注入する必要が生じた。

3.3 実験方法 染料濃度測定のための液相の抽出は、図 2 に示すように二次清水の導入部の上流 5D の地点と下流 180D の地点において同時に行った。サンプル液は管底部にあけた 0.7 mmφ の穴から抽出した。その流量は主流の 1% 以下に抑えた。それぞれの液相抽出断面において、染料の濃度が断面内で十分一樣であることを要する。そこで、あらかじめ図 2 のサンプリング地点における管壁の周方向の濃度分布を気泡流、スラグチャーン流、環状流の三つの流れについて測り、濃度が測定誤差の範囲で一樣であることを確かめた。

本研究における実験項目と実験条件を表 1 に示す。まず、(1) 主流の液相流量に対して二次液流量をどの程度に設定すべきか、(2) 一つの流れについて液相抽出を何回行えばよいか。この 2 点に関する調査を気泡流、スラグチャーン流、環状流の各一つの流れによって行った。次に、(3) 流量の測定精度はどの程度であるか、を調べるために気・液の見掛けの速度がそれぞ

図 1 測定の原理

図 2 実験装置

表 1 実験項目と実験条件

Experimental item	Experimental condition
(1) Accuracy vs. flow ratio Q_{L2}/Q_{L1}	j_G m/s j_L m/s • Bubble flow : 0.2 2.0 • Slug or churn flow: 2.0 1.0 • Annular flow : 30 0.3
(2) Minimum sampling times	
(3) Experimental error	$0.2 \leq j_G \leq 30$ m/s, $0.3 \leq j_L \leq 2.0$ m/s
(4) Examples of the application	For three unknown flows (bubble flow, slug or churn flow and annular flow)

図 3 二次液流量比と測定誤差の関係

れ $0.2 \leq j_G \leq 30$ m/s, $0.3 < j_L \leq 2.0$ m/s の範囲で 23 とおりの二相流をつくり、測定誤差を求めた。最後に、(4)実際の流れに本測定方法を適用する場合にどのような手続きを踏むべきか、の調査を行った。すなわち、第三者に気泡流、スラグチャーン流、環状流の各領域で一つの任意の流れをつくらせ、その流量の推定を試みた。

4. 結果と考察

4・1 二次液流量の影響 測定精度に及ぼす二次液流量の影響を図 3 に示す。横軸は主流に対する二次液の流量比 Q_{L2}/Q_{L1} 、縦軸は液相流量の相対誤差 ϵ (%) である。実験は $Q_{L2}/Q_{L1}=0.02 \sim 0.2$ の範囲で行われた。 $Q_{L2}/Q_{L1}=0.2$ の場合、液相流量の測定誤差 ϵ は $\pm 3\%$ に収まっている。そして、予想されるように二次液流量比を下げるにしたがって測定精度は徐々に落ち、 $Q_{L2}/Q_{L1}=0.02$ における誤差は最大 12% となっている。

精度の面から二次液流量比は高いほうが望ましいが、 Q_{L2}/Q_{L1} が高過ぎると、特に流れが流動様式の遷移域にあるような場合には、主流の流動状態が変わる恐れがある。このことを考えに入れて、他の項目に関する実験は二次液流量比を $Q_{L2}/Q_{L1}=0.1$ に設定して行った。

図 4 測定誤差のヒストグラム

4・2 試料の抽出回数 図 4 は気泡流、スラグチャーン流、環状流のそれぞれ一つの流れに関し 15 回のサンプリングを行って得た測定誤差 ϵ のヒストグラムである。いずれも $Q_{L2}/Q_{L1}=0.1$ における値である。データは $\epsilon=0$ の周囲に集中しており、その分布は正規分布に類似していて、標準偏差は $\sigma=2.3\%$ である。

図 4 の分布が正規分布にしたがうものと仮定すると、3 回の抽出を行えばその平均値は信頼度 95% で相対誤差 ϵ は 3% 以内に収まる⁽¹⁰⁾。ただし、この図 4 の実験は、主流の設定流量をあらかじめ知ったうえでその流量を提案の方法で測定し、測定値と設定値の比較を行ったものである。実は、4・4 節で後述するように、まったく未知の流量を推定する場合には推定流量が誤差の範囲で真の値に近づくまでに 2~3 回の試行を必要とする。したがって、試料の抽出回数としては、この 2~3 回の試行(予備抽出)ののち、精度の高い推定値を得るために改めて 2~3 回のサンプリングを行うことになる。

4・3 種々の二相流に対する測定誤差 図 5 は $j_L=0.3 \sim 2.0$ m/s, $j_G=0.2 \sim 30$ m/s の範囲で得られた気泡流から環状流までの 23 とおりの二相流に関する測

定誤差である。横軸は見掛けの空気流速 j_G で、記号は見掛けの水流速 j_L と流動様式によって区別されている。二次液流量比はすべて流れに対して $Q_{L2}/Q_{L1}=0.1$ である。誤差 ε は流動様式に関係なく、 $-5.2 < \varepsilon < 6.2$ % の範囲にある。これは直接的な比較は困難であるが、Baker ら⁽¹¹⁾ が報告しているタービン流量計、ボルテックス流量計、電磁流量計の測定誤差よりはるかに小さい。

本測定法の最大誤差を誤差の伝ばにより推定すると、 $Q_{L2}/Q_{L1}=0.1$ のとき 12~15 % である。その中では濃度差の誤差、式(1)の分母の誤差、が全体の約 80 % を占める。

4.4 本測定法の適用方法 液相流量が未知である二相流に本測定法を適用する場合の手続は次のようになるう。

- (1) 第1抽出点の染料濃度が分光光度計の好適な吸光度出力範囲に入るように染料液の流量を調節する。
- (2) 適当な流量の二次液を注入して二つの抽出点の液相濃度を測り、式(1)より主流の液相流量を算出する。
- (3) 二次液の流量をこの算出流量の 10 % となるように調整し、上記の(2)と同じ方法で流量を求める。これを第1回めの推定流量とする。
- (4) 以後、1 回前の推定流量に基づいて二次液流量を適当に調整し(たとえば $Q_{L2}/Q_{L1}=0.1$)、これに対

表 2、未知流量の流れに対する本測定法の適用結果

Flow pattern	Reference flow rate Q_{L1} l/s	Measured flow rate Q_{L1} l/s			Error ε %
		1st	2nd	3rd	
Bubble	0.783	0.807	0.801	-	2.4
Slug or churn	0.416	0.388	0.418	0.423	1.6
Annular	0.083	0.088	0.086	-	2.8

図 5 種々の二相流における推定流量の測定誤差

(a)

(b)

(c)

図 6 管壁に沿う染料濃度分布の流動方向への変化

応する主流の流量を求める。その値が前回の推定値とたとえば $\pm 5\%$ で一致するまで二次液の流量を変えて試行を繰返す。

上記の手続にしたがって得られた気泡流、スラグチェーン流、環状流の各一つの流れに対する試行結果を表2に示す。各流れは第三者によって任意に設定されたものである。表2から明らかなように、2~3回の試行によって設定流量に近い推定値が得られている。4・2節に述べたように、この試行後さらに2~3回のサンプリングを行い、その結果から測定値を決定することを推奨する。

5. 結 言

染料の濃度変化を利用する定常な気液二相流の液相流量の簡便な測定法について調査した。内径25 mmの水平円管内を流動する $j_c=0.2\sim 30$ m/s, $j_L=0.3\sim 2.0$ m/sの範囲の空気-水系二相流の実験から、次の知見を得た。

(1) 染料濃度が一樣であれば、この測定法の精度は、たとえば二次液流量比 $Q_{L2}/Q_{L1}=0.1$ の場合 $\pm 6\%$ であり、他の方式の測定誤差より小さい。 Q_{L2}/Q_{L1} の増大にしたがって精度は向上する。

(2) 試料の抽出回数は、2~3回の予備抽出によって概略の主流流量を知ったのち、改めて2~3回必要である。

濃度測定断面において染料濃度が一樣であることが、この測定法の条件である。これを満たす断面までの染料導入点からの最大距離は、付録に述べてあるように、気泡流とスラグチェーン流では管径の約100倍、環状流では約200倍である。測定に必要な管長を短縮するには、混合羽根あるいは本法との併用が考えられる絞り機構や動圧法のセンサを設置することによって染料の混合を向上させることが考えられるが、これについては今後の課題としたい。

なお、トレーサは液相の種類によって選択すべきであり、染料以外の物質が適する場合もある。さらに、この方法は気-液系以外のたとえば固-液系の液相流量の測定にも適用できると思われる。

最後に本実験の遂行に協力いただいた塚島浩明、田代久晴の両氏に謝意を表す。

付録 水平管の断面内濃度分布の 流動方向変化

図6(a)~(c)は断面内の濃度分布の推移を見ら

めに管壁に沿う濃度分布の流動方向への変化を水平管内の発達した気泡流、スラグチェーン流、環状流の3例について調べたものである。縦軸は吸光度 E 、横軸は管壁上の角度 θ (管頂を角度零とする)、パラメータは染料導入点を起点として測った管軸方向の位置 Z/D である。測定断面の位置は $Z/D=30, 50, 70, 90, 110, 130, 170, 210$ であり、図6は一部の断面の結果を省略して描いてある。

染料溶液は管底部から点源として流れに導入した。すなわち、図6(a)に示してあるように、内径1 mmのL字形ノズルの開口部を下流に向けて管底部に置き、これから染料溶液を低速で、連続的に注入した。この状態のもとで全点のサンプリングを同時に実行した。

図6から液相の混合現象は流動様式に依存することがわかる。図6(a)の気泡流の場合には $Z/D\approx 110$ で断面内の染料濃度は一樣になる。図6(b)のスラグチェーン流では混合が盛んで、 $Z/D=90$ で濃度は一樣になる。図6(c)の環状流の場合、濃度分布が一樣になるには $Z/D\approx 200$ の長さを要している。

文 献

- (1) Hewitt, G. F., *Measurement of Two Phase Flow Parameters*, (1978), 92, Academic Press.
- (2) Hsu, Y. Y. (Hetsroni, G., ed), *Mass Flow and/or Quality Measurement, Handbook of Multiphase Systems* (1982), 10-50, Hemisphere.
- (3) Reimann, J., John, H. and Müller, U., *Measurements of Two-Phase Mass Flow Rate: A Comparison of Different Techniques*, *Int. J. Multiphase Flow*, 8-1 (1982), 33.
- (4) 赤川, 気液二相流の特性と流量計測, 第4回混合流シンポジウム講演論文集, (昭60), 89.
- (5) 世古口・深野・逢坂・石田, オリフィス対による水平管内気液二相流の流量測定(第1報, オリフィス対の構成および開口比の影響について), 機論, 44-380 (昭53), 1347.
- (6) 川田, 工業計測技術大系3, 流量(下), (昭39), 103, 日刊工業新聞社.
- (7) Stothard, P. H., *The Measurement of Two-Phase Flow Parameters by Salt Tracer Injection*, *CEGB Rep. No. CERL/RD/L/N 21*, (1972).
- (8) Brown, M., *Measurement of Mass Flow-Rates of Water and Steam in Evaporator Tubes on Operating Boilers Using Radiotracers*, *Int. J. Appl. Radiat. Isotopes*, 25-7 (1974), 289.
- (9) 例えば, 武藤, 共立全書97, 比色分析法, (昭36), 203, 共立出版.
- (10) イ・エス・ソロニン, 数理統計学, (昭37), 35, 東京図書.
- (11) Baker, R. and Deacon, J., *The Behavior of Turbine, Vortex and Electromagnetic Flowmeters*, *Chem. Eng.*, No. 401 (1984), 13.