分流二差圧式質量流量計[†]

芝 亀 吉*・土 井 孝一郎**

Two Differential Pressures Type Parallel Mass Flowmeter

Kamekichi SHIBA* and Koichiro DOI**

A two differential pressures type parallel mass flowmeter is composed of compound pipes in parallel with two branch pipe lines, a constant flow apparatus and two differential manometers. Both of the branch pipe lines have two straight portions.

The liquid to be measured flows in the pipe line and then is divided into two branches without control. A flow of constant volume flow rate is sent from a position between two straight portions of one branch pipe line to the corresponding position of the other. The differences of pressures at the straight portions of both branch pipe lines, are measured by the differential manometers.

Applying Bernoulli's theorem to the stream lines through both branch pipe lines, it is concluded that the difference of the two differential pressures is proportional to the mass flow rate. The error due to viscosity may be corrected by introduction of a discharge coefficient.

The results of experiments with two trial mass flowmeters show that the mass flow rate can be obtained by a parallel mass flowmeter of two differential pressures type with a constant discharge coefficient.

Keyword: flow measurement, liquid, mass flow rate, differential pressures type, constant flow apparatus

1. は し が き

等流量に分流する分流差圧式質量流量計はすでに報告されている¹⁾。それには等流量に分流するための流量調節装置、定体積流量を流す装置などが用いられている。

[†] 応用物理学会で発表 (昭 52・10)

* 東洋大学工学部 川越市鯨井中野台 2100

** 静岡大学工業短期大学部 浜松市城北 3-5-1

* Faculty of Engineering, Toyo University, Kawagoe

** Junior College of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu

(Received April 16, 1981)

分流二差圧式質量流量計では、分流し、二差圧なる2量を測定することによって質量流量が知られる。しかし、等流量に分流する必要はないので、流量調節装置は不要である。

2. 測定原理

Bernoulli の定理を適用するために、測定される液体は、近似的に非圧縮性の完全流体であるとする。

Bernoulli の定理は、エネルギー保存の法則を、完全流体の定常流の細い流管に適用して得られる。

細い流管というのは、その流管内の任意の2本の流線を区別して考える必要のないものであり、細い流管の位置は、その中の適宜の流線で示される。流線に Bernoulli の定理を適用するということがある。これは、その流線で代表される細い流管に適用することを簡略に表現したのである。定常流では、流れの中の任意の一点を通る流線は1本は必ず存在するが2本あるいはそれ以上は存在することはない。また、任意の1本の流線で代表される細い流管が必ず存在する。

細い流管ならば、任意の位置で直断面が考えられる。その直断面積は位置によって異なってもよい。

重力以外の力のする仕事および熱によるエネルギーの増減がないときに、1本の細い流管についての Bernoulli の定理は

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + p = \text{const.} \quad (1)$$

で表わされる。 h は適宜に選定した水平面からの高さ、 ρ は密度、 p は圧力、 v は流速である。

ポンプで流体を流すときには、ポンプのする仕事によるエネルギーの増減がある。それで、ポンプの前後を通しての流線については、(1)式の形で表わされる Bernoulli の定理をそのまま適用できない。分岐、合流はエネルギーの増減に関係がないので、分岐部、合流部を通る流線にも(1)式の形の Bernoulli の定理が適用される。ただし、1本の流線が2本に分岐したり、2本の流線が1本に合流することはない。

Fig. 1 Construction of two differential pressures type parallel mass flowmeter

測定される液体は、Fig. 1 に示されているように、流入管 A から断面積がそれぞれ S_1, S_2 の 2 本の分流管 B_1, B_2 に分流し、H で合流して流出する。

2 本の分流管 B_1, B_2 はその途中で定流量装置 G を介して互いに結ばれており、 B_2 から B_1 へ一定体積流量 q が流される。 q は正負のいずれでもよいが（負のときは、 B_1 から B_2 へ正の体積流量が流される）、以下では $q > 0$ とする。

C_1, C_2 は定体積流量 q の出入する位置より上流側にあり、 D_1, D_2 は下流側にあるとする。なお、両分流管 B_1, B_2 は同一水平面上にあるとする。

この管路系に、密度 ρ の被測定液体が体積流量 Q となって流入し、分流されて C_1, C_2 を通る体積流量はそれぞれ Q_1, Q_2 であるとする。 A, C_1, C_2, D_1, D_2 における圧力をそれぞれ $p_A, p_{C1}, p_{C2}, p_{D1}, p_{D2}$ とし、流速をそれぞれ一様に $v_A, v_{C1}, v_{C2}, v_{D1}, v_{D2}$ とすると

$$v_{C1} = \frac{Q_1}{S_1}, v_{C2} = \frac{Q_2}{S_2}, v_{D1} = \frac{Q_1 + q}{S_1}, v_{D2} = \frac{Q_2 - q}{S_2} \quad (2)$$

である。

流入管 A、分流管 B_1, B_2 を通る流線に Bernoulli の定理を適用すると、 $h_A = h_B$ としているので

$$\left. \begin{aligned} p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 &= p_{C1} + \frac{1}{2} \rho v_{C1}^2 = p_{D1} + \frac{1}{2} \rho v_{D1}^2 \\ p_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 &= p_{C2} + \frac{1}{2} \rho v_{C2}^2 = p_{D2} + \frac{1}{2} \rho v_{D2}^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

が得られ、これに (2) 式を代入して整理すると

$$\left. \begin{aligned} p_{C1} - p_{D1} &= \frac{\rho}{S_1^2} \left(p Q_1 + \frac{1}{2} q^2 \right) \\ p_{C2} - p_{D2} &= \frac{\rho}{S_2^2} \left(\frac{1}{2} q^2 - q Q_2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となる。この両式から

$$S_1^2(p_{C1} - p_{D1}) - S_2^2(p_{C2} - p_{D2}) = \rho q(Q_1 + Q_2) = \rho q Q$$

すなわち

$$\rho Q = \frac{1}{q} \{ S_1^2(p_{C1} - p_{D1}) - S_2^2(p_{C2} - p_{D2}) \} \quad (5)$$

が得られる。 ρQ は質量流量であるから、2 差圧 (p_{C1}

$-p_{D1}$), ($p_{C2} - p_{D2}$) の測定によって、質量流量が知られる。

2 本の分流管 B_1, B_2 の断面積が等しいとする。すなわち

$$S_1 = S_2 = S$$

とすると、(5) 式は

$$\rho Q = \frac{S^2}{q} \{ (p_{C1} - p_{D1}) - (p_{C2} - p_{D2}) \} \quad (6)$$

となる。この式は

$$\rho Q = \frac{S^2}{q} \{ (p_{C1} - p_{C2}) - (p_{D1} - p_{D2}) \} \quad (7)$$

と書くこともできる。二差圧 ($p_{C1} - p_{C2}$), ($p_{D1} - p_{D2}$) の測定でも質量流量が知られる。

$S_1 \neq S_2$ のときには、(7) 式に相当する式は

$$\rho Q = \frac{1}{q} \{ (S_1^2 p_{C1} - S_2^2 p_{C2}) - (S_1^2 p_{D1} - S_2^2 p_{D2}) \}$$

である。 $S_2^2 = n S_1^2$ と置くと、この式は

$$\rho Q = \frac{S_1^2}{q} \{ (p_{C1} - n p_{C2}) - (p_{D1} - n p_{D2}) \} \quad (8)$$

となる。(8) 式の右辺 { } 内の量はつぎのようにして得られるが、簡単でないので、実際には (8) 式による測定はあまりよくない。

天秤の腕に、Fig. 2 のように、有効面積が等しい 4 個のペローズの各一端面をつけ、各他端面は固定し、その中の圧力がそれぞれ $p_{C1}, p_{C2}, p_{D1}, p_{D2}$ であるようにする。天秤の支点 K から各ペローズの軸までの距離は、図のように、 l_1 あるいは l_2 であり、 $l_2 = n l_1$ である。したがって、圧力 $p_{C1}, p_{C2}, p_{D1}, p_{D2}$ による力の支点の周りのトルクは (8) 式の右辺 { } 内の量に比例している。なお、この方法では、各ペローズの有効面積が異なっても支点からの距離 l によって調節することができる。

上述の測定原理は Bernoulli の定理に基づいて誘導されているので、一般的には粘性のための誤差がある。それを補正するために流量係数を導入して、(5) ~ (7) 式の代りに、それぞれ

$$\rho Q = \frac{\alpha}{q} \{ S_1^2(p_{C1} - p_{D1}) - S_2^2(p_{C2} - p_{D2}) \} \quad (9)$$

Fig. 2 Apparatus to obtain a torque proportional to the quantity in the brackets { } of eq. (8)

$$\rho Q = \frac{\alpha S^2}{q} \{(p_{C1} - p_{D1}) - (p_{C2} - p_{D2})\} \quad (10)$$

$$\rho Q = \frac{\alpha S^2}{q} \{(p_{C1} - p_{C2}) - (p_{D1} - p_{D2})\} \quad (11)$$

とすべきである。

流量係数 α は、実験によって定められるものである。 α が一定であれば都合がよいが、一般には一定とはみられず、Reynolds 数 R_D の関数とみられるであろう。

なお、定体積流量 q と流入する体積流量 Q とは

$$Q \cong q \quad (12)$$

のいずれでもよい。

3. 実験装置

3.1 流量計本体

ここでは、Fig. 3 に示されている 2 種類の流量計本体を試作した。(a)は試作流量計 I で、2 本の分流通管がいずれも一樣な断面を有するものである。(b)は試作流量計 II で、圧力取出部を細くしてその下流に拡大部を設け、差圧は大きく、しかも、圧力損失は少なくなるように作られたものである。

Fig. 3 は試作された装置とほぼ相似に描かれており、全長は I では約 65 cm, II では約 85 cm である。圧力測定部の管径は、I, II のそれぞれについていずれも 1.40 cm である。なお、II ではそのほかの部分の管径は約 2.4 cm である。

3.2 定流量装置

ここでは、Fig. 4 に示されているように、吐出流量がほぼ一定のポンプと弁とを組合せ、弁を手動で調節して一定体積流量 q を得た。

実用的には、流れの状態が変わってもつねに一定の

Fig. 3 Trial mass flowmeters

Fig. 4 Constant flow apparatus

F: Oval flowmeter, P: Pump, V1, V2: Valves

Fig. 5 Complex differential manometer

体積流量が自動的に得られる定流量装置が必要である。そのような装置は適宜の形式のものでよいのであるが、たとえば、歯車ポンプによる定流量装置²⁾などが都合よく利用されるものと考えられる。

3.3 複合差圧計

測定原理から知られるように、この質量流量計では、二差圧の差から質量流量が知られる。二差圧の差は二つの差圧計を用いて二差圧を別々に測定したのち計算によってその差を求めてもよいし、また、Fig. 5 に示されているような複合差圧計を用いて、二差圧の差を直接に測定してもよい。Fig. 5 の複合差圧計では互いに有効面積 S^* の等しい 4 個のベローズが用いられている。ベローズ DC_1, DC_2, DD_1, DD_2 にそれぞれ圧力 $p_{C1}, p_{C2}, p_{D1}, p_{D2}$ を加えると、可動壁に及ぼされている圧力による力は $S^* \{(p_{C1} - p_{C2}) - (p_{D1} - p_{D2})\}$ である。それで、4 個のベローズの複合バネ定数を k 、可動端の変位を δ とすると

$$S^* \{(p_{C1} - p_{C2}) - (p_{D1} - p_{D2})\} = k\delta \quad (13)$$

であり、したがって

$$(p_{C1} - p_{C2}) - (p_{D1} - p_{D2}) = \frac{k}{S^*} \delta \quad (14)$$

である。 k/S^* は定数であるから、変位 δ を測定すれば、二差圧の差が知られる。変位の測定には差動変圧器式変位計を用いた。

4. 実験ならびに結果

実験は試作流量計 I, II にそれぞれ水の定常流を流し、二差圧の測定値からそれらの差を求める方法と複合差圧計を用いて二差圧の差を直読する方法とによって行われた。いずれの場合にも、一定体積流量 q は $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ および $100 \text{ cm}^3/\text{s}$ とした。

4.1 二差圧を別々に測定する場合

ここでは、二差圧 $(p_{C1} - p_{C2})$, $(p_{D1} - p_{D2})$ を二つの U 字管圧力計で測定し、それらの差と質量流量 ρQ との関係調べた。

試作流量計 I および II による実験の結果を Fig. 6, 7 に示す。これらの結果は (7) 式の関係を満足していないが、測定点はいずれも原点を通る直線上にのっているものとみられる。それで、(11) 式の流量係数 α は

Fig. 6 Relation between mass flow rate and difference of differential pressures for the trial mass flowmeter (I)

Fig. 7 Relation between mass flow rate and difference of differential pressures for the trial mass flowmeter (II)

定数であり、その値をあらかじめ調べておけば、二差圧の差から質量流量が得られる。上記の実験結果から α の値を求めると、 q がそれぞれ $50 \text{ cm}^3/\text{s}$, $100 \text{ cm}^3/\text{s}$ のとき、試作流量計 I では 1.22, 1.25 であり、試作流量計 II では 1.50, 1.53 である。

なお、流量計内での圧力損失（流入管 A の端面と流出管 H の端面との間の差圧）は ρQ が $1,000 \text{ g/s}$ のときに、試作流量計 I では約 $400 \text{ cmH}_2\text{O}$ 、II では約 $130 \text{ cmH}_2\text{O}$ であり、後者の圧力損失が $1/3$ 以下である。

4.2 2 差圧の差を測定する場合

前述の複合差圧計を用いて、二差圧 ($p_{C1} - p_{C2}$),

Fig. 8 Relation between mass flow rate and reading of a displacement meter for the trial mass flowmeter (I)

Fig. 9 Relation between mass flow rate and reading of a displacement meter for the trial mass flowmeter (II)

($p_{D1} - p_{D2}$) の差を変位計の指示 δ に比例する量として直読し、質量流量 ρQ の関係を調べた。(11), (14) 式から両者の関係を求めると

$$\rho Q = \frac{\alpha S^2 k}{q S^*} \delta = K \delta \quad (15)$$

となる。

試作流量計 I, II による結果を Fig. 8, 9 に示す。測定点はいずれも原点を通る直線上にのっているものとみられる。それで、比例定数 K の値をあらかじめ実験的に調べておけば、変位 δ のみの測定によって質量流量 ρQ が知られる。このときには、比例定数 K の中には流量係数も含まれている。

5. 結 論

この研究の結果、分流二差圧式質量流量計によって質量流量の測定ができることが明らかとなった。ただし、Bernoulli の定理を理論の基礎としているので、流量係数をあらかじめ実験的に定めておく必要がある。実験された流量範囲では、流量係数が流量によらないとみられる。

前の分流差圧式質量流量計¹⁾と異なり、等流量に分

流する必要がないため、分流調節装置などが不要である点が有利である。差圧の測定については、二差圧の差を測定しなければならないが、複合差圧計を用いることによって差圧の差を直読することができる。

参 考 文 献

- 1) 芝 亀吉, 劉 鼎嶽: 応用物理, **45**, 214 (1976)
- 2) 大石 清: 精密機械, **26**, 352 (1960)