面積式流量計の流量係数

相 川 長 彦*・金 住 順 二*

Flow Coefficient of Area-Type Flowmeter

Nagahiko AIKAWA* and Junji KANAZUMI*

Flow coefficient measured by an area-type flowmeter can be represented as a function of the Reynolds number through a series of experiments. From the experimental results obtained in this study, it was clarified that the characteristic curve can be divided into three ranges, that is, the viscous flow range, the intermediate flow range and the nonviscous flow range depending on the value of the Reynolds number.

At first, in the viscous flow range, laminar flow theory can be adopted suitably to the flow at the clearance between the taper-tube and float. Secondary, in the intermediate flow range, the values of the two sorts of coefficient, that is, one is that for geometry of the clearance between the taper-tube and the float and the other is that for the distribution of flow rate, were obtained as a function of the Reynolds number experimentally.

And then, it was observed that the float with sharp edge was useful for the measurement of viscous flow.

Furthermore, the nonviscous flow range seems to be a special case of the intermediate flow range because the nonviscous flow range corresponds to the case of an extremely large Reynolds number in the intermediate flow range.

From the discussions on the value of α done above, the following experimental equations were derived.

Those equations are well representing the experimental results with a high degree of approximation.

$$\alpha = \alpha_0 (R_e / R_{e0})^{1/2}$$

for the viscous flow range

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{K}{\sqrt{R_e}} \right) \left(-1 - \frac{N}{\sqrt{R_e}} \right)$$

for the intermediate flow range

where α ; flow coefficient
 α_0 ; flow coefficient of nonviscous flow range
 R_e, R_{e0} ; Reynolds number (R_{e0} is obtained through the experiment)
 K ; coefficient of rate distribution depending on Reynold number
 N ; coefficient geometrical condition depending on Reynolds number

1. 緒 言

面積式流量計はテーパ管とフロートを組み合わせた非常に簡単な構造であり、以下のような一般的な特色もっている。

1) 流量目盛が直線性であり、目盛の広範囲にわたり精度のよい流量測定が行え、流量の測定範囲が最小値から最大値の幅が1:10程度となり測定に幅をもっている。

2) 差圧式流量計などでは測定できないような微小流量においても十分適用できる。

3) 流量計の取付けに際し、管路に直接取付けて流量の検出ならびに指示を同時に行うので、他の流量計にみるような補助装置などの必要がない。

4) 他の計器にみるような直管長の必要性がない。

以上のような実用上便利な点が多いことから、今日では多方面に数多く使用されている。しかし、面積式流量計の使用に際してはまだ多くの問題を含んでいる。本報告は面積式流量計の使用状況の変化（流体の密度、粘度などの物理的諸性質の変化）に伴う目盛値の補正（流量の補正）について述べるものである。この問題についてはすでに数編の報告がみられるが、流量一般式を使用し、流体の物理的諸性質の影響を流量係数でとらえ、流量係数とレイノルズ数との関係について実験的に求め、この線図から流量係数の整理法、あるいはフロートの作動を検討した報告は、一例¹⁾を除いてほとんど見当らない。本報告は数種類のフロートおよびテーパ管に対し実験的に流量係数 $(\alpha) \sim \text{レイ}$

* 大阪産業大学工学部 大東市中垣内 3-1-1

* Faculty of Engineering, Osaka Industrial University, Daito

(Received February 16, 1978)

Fig. 1 Test equipment

Table 1 Kinematic viscosity and density of fluids

	Temperature (°C)	Kinematic Viscosity (St)	Density (g/cm ³)
water	10	0.0130	0.9997
	20	0.0100	0.9982
	30	0.0080	0.9957
	40	0.0065	0.9922
	50	0.0055	0.9881
spindle oil	10	0.380	0.8736
	20	0.240	0.8680
	30	0.168	0.8624
	40	0.120	0.8567
	50	0.094	0.8511
machine oil	10	3.40	0.8736
	20	2.59	0.8680
	30	0.85	0.8624
	40	0.49	0.8567
	50	0.39	0.8511

ノルズ数 (R_e) 線図を求め、この線図から R_e 数によって α が大きく三つの流域に区分されることから、各流域の α に対する実験式を求めるとともに、面積式流量計の作動に対する検討を加えたものである。

2. 実験装置および実験方法

本実験に使用した装置を Fig. 1 に示す。使用流体はスピンドル油、マシン油、水でこれらの物理的諸性質を Table 1 に示す。面積式流量計に用いたフロートおよびテーパ管（ガラス製）を Table 2 に示す。テーパ管、フロートについては、JIS などにおいて規格がないため一般には種々の形状、寸法のもが使用されている。本報告はそのうちリブ形状のテーパ管（テーパ度 $4 \sim 6 \times 10^{-3}$ ）を使用した。フロートについても同様のことがいえるので、一般に使用されてい

Table 2 Dimension of floats and taper-tubes

Taper-tube

	Dimension mm						
	a	b	c	d	e	l ₂	l ₁
No. 8	8.02	10.0	15.0	10.02	15.0	18	165
No. 12	12.03	15.3	21.9	15.2	21.9	20.0	280
No. 20	20.02	26.1	34.5	26.2	34.5	27.0	273

Float

	Dimension mm						
	f	g	h	i	j	k	m
No. 8	3.5	3.1	8	2.7	6.8	2.7	—
No. 12	6.5	3.1	12	3	20.1	3	—
No. 20	10.5	4	20	5	20	5	—
No. 20	8.5	7.7	14	4	13.5	4	2
No. 12			12	(ball)			

る形状に近いものを製作した。製作に当っては、加工精度（表面あらさ）の問題を考慮し、表面を鏡面状に仕上げた。実験方法としては、各種流体の流出流量をメスシリンダとストップウォッチにより実測した。

3. 実験結果と検討

面積式流量計の一般式は次式²⁾⁻⁴⁾で表わされる。

$$Q = \alpha(A-a) \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}} \quad (1)$$

ここで、 Q ；流量、 $(A-a)$ ；テーパ管とフロートの間隙面積、 W_f ；流体中のフロートの重さ、 γ ；流体の密度、 a ；フロートの最大直径部の断面積。

(1)式は流体の粘度の影響が流量係数 α の中に含まれた形となっているから、これはレイノルズ数 R_e と (D_i/d_f) とに関係するものとする。ここに d_f はフロート直径、 D_i はテーパ管の内直径である。このことから(1)式で求めた流量係数 α を (D_i/d_f) をパラメータにとり、レイノルズ数との関係線図で表わすことができる。またレイノルズ数 (R_e) は $R_e = d_f \cdot v/\nu$ であり、 ν は流体の動粘度、 v は平均流速であ

Fig. 2 $\alpha \sim R_e$ characteristic curves for No. 8 taper tube

Fig. 3 $\alpha \sim R_e$ characteristic curve

る。平均流速のとりかたとしては α がフロートとテーパ管との最も狭い部分での係数であることから、この部分の平均流速に注目すべきであるが、整理などの考慮からテーパ管入口の平均流速を使用することとする。

Fig. 2 は α と R_e 数との関係線図の一例を示したものである。なおこの線図の一連性については本報告では述べていないが、気体（空気、He、 C_3H_8 、 CO_2 、 C_2H_4 など）において物理的性質（密度、粘度）の大きく異なるものに対しても、 $\alpha \sim R_e$ 線図において一連性があることを求めている。この図から明らかなように、 α が R_e 数に対して大きく三つの流域に区分されることがわかる（Fig. 3 参照）。そこでこれらの流域をそれぞれ、非粘性流域、中間流域、粘性流域とし、それぞれの各流域について検討する。

3.1 粘性流域

Fig. 3 の粘性流域の点 $A(\alpha, R_e)$ についてみると、 α の R_e 数に対する変化割合を示すと、つぎのような関係になる。

$$\frac{\log \alpha_0 - \log \alpha}{\log R_{e0} - \log R_e} = m \quad (2)$$

ここで m は傾斜係数を示すものとし、 $\tan \theta = m$ によって求められる値とする。（2）式より α は $\alpha = \alpha_0 (R_e/R_{e0})^m$ として表わされる。これを（1）式の α の項に代入すると、

$$Q = \alpha_0 \left(\frac{R_e}{R_{e0}} \right)^m \cdot (A-a) \cdot \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}} \quad (3)$$

となる。（2）式の傾斜係数 m を実験結果より求めると Table 3 のような結果となる。この結果から $m \approx 1/2$

Table 3 Values of m

	values of m	float direction
No. 20	$1/2 - 0.014$ $1/2 + 0.006$	reverse
No. 12	$1/2 + 0.004$ $1/2 + 0.0115$	reverse
No. 8	$1/2 + 0.016$ $1/2 + 0.0110$	reverse

に近似するものとする。（3）式の m に $1/2$ を代入すると、粘性流域の実験式は

$$Q = \alpha_0 \left(\frac{R_e}{R_{e0}} \right)^{1/2} \cdot (A-a) \cdot \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}} \quad (4)$$

となる。（4）式が粘性流域の作動式として適応しているかどうかの判断をすると、（4）式において R_e は $R_e = d_f \cdot v/\nu = d_f \cdot Q/\{\nu(A-a)\}$ で表わせることからこれを代入すると、

$$Q = \alpha_0 \left(\frac{d_f \cdot Q}{R_{e0} \cdot \nu \cdot (A-a)} \right)^{1/2} \cdot (A-a) \cdot \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}} \quad (5)$$

となる。 $c_1 = \alpha_0 \cdot R_{e0}^{-1/2} \cdot \left(\frac{2gW_f}{a} \right) \cdot (A-a) \cdot \{d/(A-a)\}^{1/2}$ を常数項として整理すると

$$Q = \frac{c_1^2}{\mu} \quad (6)$$

となり、流量 Q は粘性係数（ μ ）により影響されることが明らかとなり、一般的な粘性作動の様子がうかがえる。Fig. 4 は実測流量 Q と μ の関係線図を示す。

3.2 中間流域

この流域については、つぎのように考える。中間流域におけるフロートとテーパ管の間の流速分布を実験データをもとにして考察する。流量 Q と間隙面積 $A-a$ との関係を実験の結果から示すと、Fig. 5 のように表わされる。この図は同一テーパ管、フロートについ

Fig. 4 $\mu \sim Q$ characteristic curves for No. 12 taper tube

Fig. 5 (A-a)~Q characteristic curves

Fig. 6 Distribution of flow rate

て Q と $A-a$ との関係を示したものであり、流体 a , b , c (粘度 $a < b < c$)の粘度による特性曲線において、フロート位置が高くなると直線関係にある。この直線部分を延長して $A-a$ 軸との交点を S とすると、それぞれ S_a , S_b , S_c は粘度の大小に応じ一定の関係²⁾にある。また特性曲線 a , b , c の直線部分の傾斜の角度は、流体の物理的性質によって変化していることがわかる。このような事柄から、中間流域は間隙面積に関係する項目とフロート形状が関係する要因が含まれると考えられるので、(1)式の流量一般式を

$$Q = C_f \cdot (A - a - s) \cdot \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}} \quad (7)$$

の形²⁾で表わすこととする。 C_f はフロート形状に関係する係数。(7)式の流量の式を検討するにあたり、Fig. 5の関係よりFig. 6のような流速分布のモデルを考える。このモデルにおいて v_c は $Q/(A-a-s)$ の値を示すものであり、 S_a , S_b , S_c がFig. 5で示されたように測定流体の物理的性質によって大きく変化するものと思われる。これらのことから、(7)式の粘性に関係するところの S は境界層論に基づく境界層の厚みに関係するものと考えられる。そこでフロート

およびテーパ管における境界層の厚みを δ_1 , δ_2 とする。ここに δ はフロートエッジ部の厚みに影響されるものと考えられるが、実験に使用したフロートについてはエッジ部の厚みが小さいことから、テーパ管内壁ならびにフロート面における境界層の厚みは等しいものと考え、 $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, ならびに $\delta = kl/R_e^{1/2}$ の関係から、 S はつぎのように表わされる。ただし l はフロート最大直径部の長さ、 k は常数

$$\begin{aligned} s &= \pi(r_0^2 - r_i^2) - \pi\{(r_0 - \delta)^2 - (r_i + \delta)^2\} \\ &= 2\pi\delta(r_0 + r_i) = \frac{2\pi kl}{\sqrt{R_e}} \cdot (r_0 + r_i) \end{aligned} \quad (8)$$

よって(7), (8)式の関係から流量式は

$$Q = C_f \cdot (A - a) \left[1 - \frac{2kl}{\sqrt{R_e}(r_0 - r_i)} \right] \cdot \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}} \quad (9)$$

となる。つぎに一般式(1)においてフロート指示値(D_i/d_f)一定の条件のもとで、非粘性流体の理想条件における流量係数を α_0 とし次式で表わす。ただし流量係数 α_0 における形状係数を C_{f0} とすると、

$$Q_0 = C_{f0} \cdot \pi(r_0^2 - r_i^2) \sqrt{\frac{2gW_{f0}}{\gamma \cdot a}} \quad (10)$$

そこで(9)式, (10)式の両辺の比をとると

$$\frac{Q \sqrt{\frac{2gW_{f0}}{\gamma \cdot a}}}{Q_0 \cdot \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}}} = \left\{ 1 - \frac{kl}{\sqrt{R_e}(r_0 - r_i)} \right\} \cdot \frac{C_f}{C_{f0}} \quad (11)$$

の関係がえられる。(11)式がいかなる意味をもつかについては(1)式に基づく流量係数を中間流域において α とした場合 $Q = \alpha(A-a) \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}}$ より、 $\alpha(A-a) = \frac{Q}{\sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}}}$, また非粘性の場合 $Q_0 = \alpha_0(A-a) \sqrt{\frac{2gW_{f0}}{\gamma \cdot a}}$

より $\alpha_0(A-a) = \frac{Q_0}{\sqrt{\frac{2gW_{f0}}{\gamma \cdot a}}}$, よって $\frac{Q \sqrt{\frac{2gW_{f0}}{\gamma \cdot a}}}{Q_0 \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}}} = \frac{\alpha}{\alpha_0}$ と

なり、(11)式の左辺は α/α_0 を表わしており、 α/α_0 が右辺のような関数で表わされることとなる。また C_f についてはFig. 6において表わされるように v_c は $Q/(A-a-s)$ の値を示すものであり、 R_e 数によって S が変化することから v_c も R_e 数によって変わる。またそれと同時にフロート形状によっても変化することから形状係数 C_f を $C_{f0}(1 - nl/\sqrt{R_e}(r_0 - r_i))$ の形で仮定すると(11)式は

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \left(1 - \frac{K}{\sqrt{R_e}} \right) \left(1 - \frac{N}{\sqrt{R_e}} \right) \quad (12)$$

Fig. 7 Relation between N and K

交点が1点で交わる値が存在すれば、(12)式は粘性の影響、形状の影響を考慮した実験式であるといえる。

Fig. 7 は K, N 線図の一例を示したものである。この図から明らかなように、 K, N の曲線群は1点で交わっていることがわかる。これにより、(12)式の形が実験結果から正しいことが判断された。(12)式において、導入過程から K は正、 N は負の値をもつこととなる。ここで、 K, N の付号を考慮すると(12)式は

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 + \frac{N}{\sqrt{R_e}} \right) \left(1 - \frac{K}{\sqrt{R_e}} \right) \quad (13)$$

となる。Fig. 8 はフロート指示値 (D_f/d_f) ごとの K, N の関係を実験結果より表わしたものである。さて、フロート形状と N, K の値について検討すると、Fig. 8 と同じ方法によって、それぞれの N, K の値を求めると、球状フロートでは $N=1.0$ 、 $K=6.0$ となり、傘形フロートでは $N=3.6$ 、 $K=4.0$ となる。傘形フロートで N, K の値が接近し、球状フロートではその絶対値が大きく差異を生じている。 N, K の付号が正

Fig. 8 Relation between D_f/d_f and K or N

で表わされる。ただし、 n は v_e の R_e 数に対する変化係数、 l' はフロートの形状が v_e に与える R_e 数に対する変化係数 $K = kl/r_0 - r_i$ 、 $N = nl'/r_0 - r_i$ である。(12)式の左辺の値が実験から求めることができる。右辺の K, N の値を任意に与えて、レイノルズ数をパラメータにとり K, N の

関係曲線を描き、それらの曲線群の

Fig. 9 $\alpha \sim R_e$ characteristic curves of experimental equation

負になっているので粘度の影響の少ないフロート形状は傘形（エッジ部が鋭い）のものであることがわかる。上述の流量係数の式によって、フロート形状の優劣を決める手がかりが見出されたこととなる。

Fig. 9 は、 N, K を考慮した中間流域の実験式が実測値を十分に満足していることを示すものである。以上のことから中間流域における流量の実験式は

$$Q = \alpha_0 \left(1 - \frac{K}{\sqrt{R_e}} \right) \left(1 + \frac{N}{\sqrt{R_e}} \right) (A - a) \sqrt{\frac{2gW_f}{\gamma \cdot a}} \quad (14)$$

で表わされる。

3.3 非粘性流域

非粘性流域については実際としては存在せず、一般的には中間流域に属する流域と考えられる。しかし、 R_e 数がある値以上の大きになると、 α の R_e 数に対する変化は非常に小さいものとなり、実用面では粘度の影響を無視しても大きな誤差は生じないものと考えられる。なお、JIS 規格においては誤差を最大指示値に対し $\pm 2\%$ を規定している。

3.4 実験式の適用範囲

以上のように、粘性、中間の各流域の実験式を検討してきた。ここでこれらの各流域の実験式が、フロートおよびテーパ管の組合せにおいて D_f/d_f のどの程度の値まで適用できるか、また実際に使用する流体が

Fig. 10 $\alpha \sim R_e$ characteristic curves for No. 20 taper-tube

Fig. 11 Relation between D_i/d_f and R_{em}

わかった場合、その作動が粘性流域、中間流域のどちらの実験式に適用すべきか、などの問題がある。そこでまず D_i/d_f の限界について検討する。同一形状のフロートに対し、 D_i/d_f の広範囲にわたり α と R_e 数との関係を求めたものを Fig. 10 に示す。この線図から明らかなように D_i/d_f がある値以上になると、Fig. 3 で説明したような粘性、中間の一連の実験式の関係がなくなってくる。この結果をみると D_i/d_f の限界値は $D_i/d_f \approx 1.464$ となっている。この値はフロート、テーパ管形状により多少異なった値となることは十分考えられるが、本実験のフロート形状においては、ほとんど差異がないことからこの値がほぼ限界値であると判断される。つぎに仕様流体がわかった場合、この流体におけるフロート作動が粘性、中間の実験式のどちらに適合するかを検討については、Fig. 3 において粘性流域と中間流域の境界の R_e 数 (R_{em}) を前もって知る必要がある。もしテーパ管とフロートの組合せにおいて、限界値 R_{em} がわかれば使用流体の R_e 数を求めて適用式を選択する。Fig. 11 は限界値 R_{em} と D_i/d_f の関係の一例を示したも

のである。 R_{em} の D_i/d_f に対する値は、フロートおよびテーパ管形状によって大きく異なってくるが、主にフロート形状による。

4. 結 論

以上のように実験により、レイノルズ数の広範囲の流量係数を求め、 $\alpha \sim R_e$ 線図を検討した結果つぎのような事柄が結論される。

- 1) 粘度の高い流体 (粘性流域; R_{em} 以下の R_e 数) に対しては、 R_e 数または粘性係数 μ がわかれば流量が求まる実験式が導びかれた。
- 2) 中間流域において間隙部形状に関する係数 (形状係数) と、流速分布に関する係数 (間隙面積の縮小と等価) を考えることによって実測値を十分満足する実験式が求められた。
- 3) 粘性流域と中間流域の二つの実験式は、その適用されるレイノルズ数の限界値 (R_{em}) を求めることによって、あらゆる流体および流量の広範囲の変化に対して正確に適用される。
- 4) 従来、数多くの流体によって求めなければならない $\alpha \sim R_e$ 線図が、中間流域の数種類の流体の流量係数とし、レイノルズ数を求めることにより、粘性流域から中間流域の一連のレイノルズ数に対する流量係数の値を求めることができる。

参 考 文 献

- 1) 田中, 坂田, 井伊谷: フロート形面積流量計流出係数の一整理法, 計測と制御, 7-4, 269/272 (1968)
- 2) 相川: 面積式流量計について, 計測, 6-9, 430/434 (1956)
- 3) 相川: 面積式流量計について, 島津評論 (1949)
- 4) 相川: 面積式流量計について, 科学測器第8号 (1942)