くさび形絞り流量計の研究*

小 栗 幸 正^{*1}

Wedge Flowmeter

Yukimasa OGURI

This paper describes experimental results of a wedge flowmeter. This flowmeter may be used to measure the flow rate in a pipeline by reading the differential pressure between the front and the rear edges of a wedge-shaped constrictor in the meter as in usual constriction meters. Two shapes of constriction wedge were employed; one is an equilateral triangle and the other a right-angled isosceles triangle, and their heights are approximately 0.5, 0.4 and 0.3 times the inner diameter of the flowmeter, respectively. It is found that the wedge flowmeter is of an accuracy sufficient for practical use. As the Reynolds number in the pipe is increased, the discharge coefficient of the flowmeter approaches more rapidly to a constant value than that of a pipe orifice which has a same rate of throttled area.

Key Words: Flow Measurement, Wedge Flowmeter, Discharge Coefficient, Pressure Distribution, Flow Resistance

1. ま え が き

管路の流量測定は重要な課題で、使用条件に応じて種々の流量計の研究開発が行われている。きょう雑物を含む流体用として、秋葉⁽¹⁾はくさび形状の絞りを設けた流量計を紹介している。しかし、簡単な説明のみで実用面に対する詳細については触れていない。これと類似の流量計に偏心オリフィス、欠円オリフィス⁽²⁾⁽³⁾があるが、実用面で流量係数とレイノルズ数の関係のデータが不十分である。著者は、くさび形流量計の特長、すなわち、絞り部が壁面に沿って局部的に開口しているので、流体中のきょう雑物がたい積する心配がなく、流れ方向に関係なく用いられ、さらに固液や気液の混相流にも使用できる点に注目し、正方形断面管内にプリズム状のくさびを設けた流量計に対し、その特性と実用性を実験的に確かめてきた⁽⁴⁾。しかし、工業上の有用性を考慮すれば、流路断面が円形の管に、くさび状の絞りを設置したものがより実用的であるといえる。

本研究は、円形断面の直管内にくさびを欠円状(弓

形)に設けた、くさび形絞り流量計に対し、流量係数とくさび形状およびレイノルズ数との関係、絞りによる損失ヘッドについて実験的に確かめ、その実用性の検討を行い、さらに管オリフィス・管ノズルとの比較も行った。実験は実際面を考慮して、レイノルズ数が約 $(1.5 \sim 15) \times 10^4$ の乱流域で行った。

2. 記 号

- C_c : 収縮係数, [式(10)]
- C_d : 流量係数, [式(2)]
- C_p : 圧力係数, [式(1)]
- d : 流量計の内径
- d_s : 流量計前後の取付け直管の内径
- g : 重力の加速度
- H : 壁圧ヘッド
- h : 絞り前後の差圧ヘッド
- L, l : 管中心軸距離
- Q : 流量
- Re : レイノルズ数 $(= V_m d / \nu)$
- Re_d : 流量係数が一定値になる限界レイノルズ数
- S : 絞り部の開口面積, [式(3)]
- V_m : 管内平均流速
- z : 絞り最大高さ

* 昭和62年8月20日 第65期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和62年2月4日。

*¹ 正員、中部大学工学部 (〒487 春日井市松本町1200)。

- β^2 : 絞り面積比, [式(5)]
 $\Delta h/h$: 絞りによる損失ヘッド (無次元数)
 λ : 直管の管摩擦係数
 ν : 動粘度
 ϕ : 絞り部欠円の中心角, [式(4)]

3. 実験装置と方法

3.1 実験装置 実験装置の概要を図1に示す。ポンプ①で貯水槽よりあふれタンク②にくみ上げられた水は、水位を一定に保たれたのち、流量調整弁③・整流タンク④・上流側直管⑤を経て供試流量計⑥に流入する。ここを出た水は下流側直管⑦を通り、計量用タンク⑧を流過し、再び貯水槽にもどされる。流量計前後の直管⑤, ⑦は引抜き黄銅管を用い、その内面は水力学的に滑らかである。流量計の内径 d と直管内径 d_s および管の主要部長さを図中に示す。流量計入口より約 $30d$ 上流の断面 E において壁圧ヘッド H_E を測定し、これを基準値にして絞り前後の圧力分布を求めた。

3.2 供試流量計 使用したくさび形絞り流量計と絞り前後の壁圧測定孔 (孔径 0.8 mm) の位置を図2に示す。管長 500 mm の流量計は、透明なアクリル製円管を用い、その中央断面に黄銅製のくさび形絞りを図のように欠円状に設置した。くさびの断面形状は、図2(b)に示す正三角形 (形式 A) と直角二等辺三角形 (形式 B) の2種類を用い、その表面は十分に滑らかに磨き、頂点は鋭く仕上げてある。絞りの最大高さ z と管内径 d との比 z/d の値は、それぞれ約 $0.5, 0.4, 0.3$ にした。この場合、絞り部開口面積と流路断面積との比を表す絞り面積比 β^2 は、約 $0.50, 0.63, 0.75$ になる。くさび形絞りの主要寸法を表1に示す。

絞り前後の流路に沿った壁圧変化を調べるため、図2(a)と図2(c)のように、絞り前方で $a_1, a_2, \dots, a_5$ の5箇所、絞り後方で $b_1, b_2, \dots, b_{11}$ の11箇所に測圧点を設けた。これらの位置は、絞り前端の a_1 と後端の

図1 実験装置の概要

b_1 とをそれぞれ基点として、上流側と下流側に示してある。そしてこれらの測圧点は、絞り中央の管壁上の点を結ぶ f-f 線 (図2(b)参照) に沿って配列されている。なお、測圧点 b_8 より流量計出口までの距離 e は、表1に示すようにくさびの大小と形式によって若干異なってくる。

4. 実験結果と考察

4.1 圧力分布 管路に沿った壁圧は、絞りの存在によって変化する。その状況を調べるため、任意の断面における壁圧の無次元値として、圧力係数 C_p を次式で定義する。

$$C_p = \lambda \frac{L_i}{d} - \frac{H_E - H_i}{V_m^2 / (2g)} \quad (1)$$

ここで、 L_i は図1の基準断面 E から、図2の絞り前後に設けた各測圧点 $a_5, a_4, \dots, a_1, b_1, b_2, \dots, b_{11}$ までの管軸に沿って測った距離、 H_E は断面 E における壁圧ヘッド、 H_i は各測圧点における壁圧ヘッド、 V_m は管内平均流速、 λ は直管の管摩擦係数である。

図3は、レイノルズ数 $Re (= V_m d / \nu) \approx 1.06 \times 10^5$ に

表1 絞り部の主要寸法

Dimensions						
No.	z, mm	z/d	β^2	B_0, mm	θ°	e
A-1	25.15	0.503	0.496	29.02	59.96	0.71 d
A-2	20.00	0.400	0.626	22.94	59.67	0.77 d
A-3	14.94	0.299	0.749	17.21	59.88	0.83 d
B-1	25.00	0.500	0.500	49.80	89.77	0.50 d
B-2	20.00	0.400	0.626	39.80	89.71	0.60 d
B-3	15.11	0.302	0.745	29.82	89.24	0.70 d

(a) 流量計と測圧点

(b) くさび形絞り

(c) 下流側直管の測圧点

図2 供試流量計と壁圧測定位置

おける C_d の分布を示す。なお、 $Re=5.1 \times 10^4$ における C_d もほぼ同様の分布であった。図3の横軸は、絞り前端の測圧点 a_1 と後端の測圧点 b_1 を基点として、上流と下流の方向へそれぞれ距離 $-l_i$, l_i をとり、これを d で無次元化してある。また、図3の上端には、絞り前後の各測圧点 $a_5, a_4, \dots, b_{11}$ の位置を示している。なお、測圧点の a_1 と b_1 の間には、形式Aと形式Bのくさび断面形状を示してある。

絞り部上流の C_d 分布は、絞り面積比 β^2 に関係なくほぼ同様に变化する。一方、絞り部下流では C_d の値が大きく変化し、 β^2 の大小とくさび形状の差異による影響が顕著である。すなわち、 C_d は β^2 の値が流量計 A-3, B-3 より流量計 A-1, B-1 へと減少する(くさび高さの増大)に伴って小さくなり、壁圧も低下する。 β^2 が同じ場合には、形式A(正三角形断面)のほうが、形式B(直角二等辺三角形断面)より C_d は小さくなる。また、測圧点の位置による C_d の変化をみると、絞り後端の測圧点 $b_1(l_i=0)$ で C_d は急減し、測圧点 $b_2 \sim b_3[l_i=(1/4 \sim 1/2)d]$ でさらに減少して最小になる。その後 C_d は急増し、ついでのゆるやかな増加をたどり一定値に近づく。図中の矢印の位置、すなわち流量計 A-3, B-3 では $l_i \approx 4.0d$ 、流量計 A-2, B-2 では $l_i \approx 5.5d$ 、流量計 A-1, B-1 では $l_i \approx 6.1d$ の位置で C_d はほぼ一定になる。

絞り流量計としては、絞り前後の差圧ヘッド h ができるだけ大きいことが望ましい。この条件に従えば、絞り部前方における測圧点は、 $a_1 \sim a_2[(0 \sim 1/4)d]$ の範囲に、絞り部後方における測圧点は、 $b_2 \sim b_3[(1/4 \sim 1/2)d]$ の範囲に設けることが望ましい。また、くさび形状としては、形式Aのほうが適している。

4.2 流量係数 くさび形絞り流量計の流量係数 C_d は、管オリフィス・管ノズルの絞り流量計の式と同様に、絞り部で得られる差圧ヘッドを h とすれば、次式で定義される。

図3 絞り前後の圧力分布

$$C_d = Q / (\sqrt{2gh} \cdot S) \quad (2)$$

ここで、 Q は流量、 S は絞り部開口面積で、次式より求められる。

$$S = d^2(2\pi - \phi + \sin \phi) / 8 \quad (3)$$

式中の ϕ は、絞り部欠円の中心角(図2参照)で、次式で与えられる。

$$\phi = 2 \cos^{-1}(1 - 2z/d) \quad (4)$$

この場合、絞り面積比 β^2 は次式で表される。

$$\beta^2 = 1 - (\phi - \sin \phi) / (2\pi) \quad (5)$$

式(2)の h を求める最適の測圧点は、図3の結果よ

(a)

(b)

図4 流量係数 C_d

り、絞りの前方では測圧点 a_1 と a_2 、後方では測圧点 b_2 と b_3 である。管オリフィスと比較するため、さらに測圧点 b_1 を追加すれば、絞り前後の差圧測圧点は $a_1 \sim b_1$, $a_1 \sim b_2$, $a_1 \sim b_3$, $a_2 \sim b_1$, $a_2 \sim b_2$ および $a_2 \sim b_3$ の6組になる。これらの測圧箇所得られた h よりの流量係数 C_d を、レイノルズ数 Re で整理して図4に示す。 C_d はそれぞれ Re の増加とともに漸増傾向を示し、各 C_d 曲線の×印付近で C_d はほぼ水平になり、それ以上の Re 範囲で C_d はそれぞれ一定値をとる。この×印点の Re を、流量係数に関する限界レイノルズ数 Re_d という。各 C_d 曲線の右端に、この Re_d 以上のレイノルズ数における C_d の平均値、すなわち平均流量係数 $\bar{C}_d$ を示す。 Re_d の値は、流量計 A-1, A-2 および流量計 B-1, B-2 の場合、約 $(2.0 \sim 2.2) \times 10^4$ である。しかし、流量計 A-3, B-3 では約 $(2.0 \sim 2.8) \times 10^4$ となり、一定値への収束が若干遅くなる。流量計としては、 Re_d が小さいほど C_d の一定領域が拡大され、実用性が卓越されてくる。この観点よりみれば、流量計 A-1, A-2 と流量計 B-1, B-2 が優れているといえる。

測圧点の組合せとしては、流量係数 C_d が小さくなる箇所、いいかえれば差圧ヘッド h が大きく現れる箇所が望ましい。この見地より検討すると、最適な箇所は測圧点 $a_1 \sim b_2$ および $a_1 \sim b_3$ であり、ついで測圧点 $a_2 \sim b_2$ と $a_2 \sim b_3$ が適当であるといえる。

図5は、測圧点の各組合せに対する、平均流量係数 $\bar{C}_d$ と絞り面積比 β^2 との関係を示し、比較のため管オリフィスのコーナタッピングによる流量係数 C_{d0} を併記してある。くさび形絞り流量計の $\bar{C}_d$ 曲線は、 β^2 の増加に伴って両形式ともほぼ同じ傾きでゆるやかに上昇し、 $\beta^2 \geq 0.63$ で傾きが多少大きくなる。しかし、管オリフィスの C_{d0} 曲線よりも、 $\bar{C}_d$ 曲線の傾斜は若干ゆるやかである。そして、 β^2 が $0.62 \sim 0.70$ の範囲で、流量計 A の $\bar{C}_d$ 曲線と、管オリフィスの C_{d0} 曲線との交差が現れる。ただし、測圧点 $a_2 \sim b_1$ の場合には交差が現れない。ここで注目されることは、測圧点 $a_1 \sim b_2$ と $a_1 \sim b_3$ の場合、流量計 A の $\bar{C}_d$ 曲線と C_{d0} 曲線との交点が、 $\beta^2 = 0.63$ 付近に現れ、流量計 A-2 はここで管オリフィスとほぼ等しい流量係数をとることである。そこで、この両流量計 ($\beta^2 = 0.626$) に対し、流量係数が一定値になる限界レイノルズ数 Re_d を比較すると、管オリフィスの場合 $Re_d = 2.4 \times 10^5$ であるが、流量計 A-2 では $Re_d = 2.1 \times 10^4$ (図4参照) で、管オリフィスの Re_d のほぼ $1/11$ と極めて小さい。したがって、この面に関しては、くさび形絞り流量計は管オリフィスより適用範囲が広く、実用性に優れているとい

える。

4.3 絞りによる損失ヘッド 流体が絞り部を通過する際の損失ヘッド Δh を検討した。図3の圧力分布より、絞りの影響が及ばない絞り前方の測圧点 a_5 ($l_i = -2d$) の圧力ヘッド h_u と、絞り後方で絞りの影響による圧力変化が減衰し、流体摩擦のみの損失になる断面の圧力ヘッド、すなわち、式(1)の圧力係数 C_p が一定になる測圧点の圧力ヘッド h_d との差 $\Delta h (= h_u - h_d)$ が、絞り流量計の損失ヘッドになる。絞り後方の圧力ヘッド h_d として流量計 A-3, B-3 では測圧点 b_6 ($l_i = 4d$)、流量計 A-2, B-2 および流量計 A-1, B-1 では、測圧点 b_7 ($l_i = 6.3d$) における圧力ヘッドをとった。そして、絞りのコーナタッピングに相当する測圧点 a_1 と b_1 の間の差圧ヘッド h との比 $\Delta h/h$ 、すなわち、無次元損失ヘッドを求めた。図6は、この $\Delta h/h$ と絞り面積比 β^2 との関係を示したもので、比較のため次式⁽⁵⁾⁽⁶⁾より求めた管オリフィスと管ノズルの $\Delta h/h$ も示してある。

$$\text{管オリフィス: } \Delta h/h = 0.985 - 1.02\beta^2 \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\text{管ノズル: } \Delta h/h = (1 - \beta^2)/(1 + 0.9\beta^2 + \beta^4) \quad \cdots \cdots (7)$$

本流量計の $\Delta h/h$ は、両形式とも管オリフィス・管ノズルの場合と同様に、 β^2 の増加につれて直線状に減少し、その線の傾きは、管オリフィスの線より若干ゆるやかになり、管ノズルの線の傾きとほぼ同じになる。本流量計に対し、 $0.5 \leq \beta^2 \leq 0.75$ の範囲で、 $\Delta h/h$ を求める次の実験式を得た。

$$\text{流量計 A: } \Delta h/h = 0.887 - 0.82\beta^2 \quad \cdots \cdots (8)$$

図5 平均流量係数 $\bar{C}_d$ と β^2 の関係

図6 損失ヘッド $\Delta h/h$ と β^2 の関係

流量計 B: $\Delta h/h = 0.855 - 0.80\beta^2$ ..... (9)
 $\beta^2 = 0.5$ の場合, 流量計 A-1 の $\Delta h/h$ は, 管オリフィスの値とほぼ等しいが, 流量計 B-1 では管オリフィスの値より約 4.4% 小さくなり, 絞りによる損失ヘッドが少なくなる。

次に, 損失は絞り部における流れの収縮と, その後のひろがりに起因し, 流れの収縮と損失ヘッド Δh の関係は, 収縮係数 C_c を用い次式で表される。

$$\Delta h = \left(\frac{1}{C_c \beta^2} - 1 \right)^2 \cdot \frac{V_m^2}{2g} \text{ ..... (10)}$$

実験結果を用いて収縮係数 C_c を求め, 絞り面積比 β^2 との関係を図7に示す。比較のため管オリフィスの C_c を併記してある。本流量計の C_c は, 両形式とも β^2 が $0.5 \sim 0.63$ の範囲でほぼ一定になり, それ以上の β^2 ではゆるやかな増加傾向を示す。しかし, C_c 線の傾きは, 管オリフィスの C_c 線より小さい。また, 流量計 A-2 は, 同一 β^2 の管オリフィスと C_c が一致する。

5. 結 論

くさび形絞り流量計のくさび形状と, 絞り面積比 β^2 を変えた6種類の流量計に対し, レイノルズ数 Re が $1.5 \times 10^4 \leq Re \leq 1.5 \times 10^5$ の乱流域で実験を行い, 次の結論を得た。

図7 収縮係数 C_c と β^2 の関係

(1) 流量測定に際し, 絞りの前後に設ける壁圧測定孔は, 絞り前方では $(0 \sim 1/4)d$, 絞り後方では $(1/4 \sim 1/2)d$ の位置に設けるのがよい。

(2) 流量係数 C_d が一定値になる限界レイノルズ数 Re_d は, 同じ絞り面積比 β^2 をもつ管オリフィスの Re_d の約 $1/11$ と小さい。この面からみれば, 本流量計はレイノルズ数 Re の広い範囲で実用に適している。

(3) 本流量計の絞りによる無次元損失ヘッド $\Delta h/h$ は, $0.5 \leq \beta^2 \leq 0.75$ において式(8), (9)で表される。また, 絞り部の流れの収縮係数 C_c は, β^2 が $0.5 \sim 0.63$ の範囲でほぼ一定になる。

文 献

- (1) 秋葉, 夾雑物を含む流体の流量測定, 機習教 (関西支部), (昭37-11), 49.
- (2) Beitler, S. R. and Masson D. J., Calibration of Eccentric and Segmental Orifices in 4 and 6-In. Pipe Lines, *Trans. ASME*, 71 (1949), 751.
- (3) ASME Research Committee on Fluid Meters ed., *Fluid Meters Their Theory and Application*, Sixth Edition, (1971), 73. ASME Research Committee on Fluid Meters.
- (4) 小栗, くさび形絞り流量計, 中部大学工学部紀要, 20 (昭59-10), 7.
- (5) Troskolański, A. T., *Hydrometry* (1960), 361, Pergamon Press.
- (6) 日本機械学会編, 機械工学便覧, 第6版, (昭52), 8-18, 日本機械学会.