とその影響は殆んどなくなる。

2) 加工物の撓みは加工距離に対してほぼ反比例し、回転数が小さいと撓み量はわずかに大きくなっているが大きな変化はない。

3) 加工物を回転させると撓みは静止の場合に比べて小さく荷重に対して直線的に変化しているがある限度以上になると急激に撓みが大きくなる。特に荷重の作用方向に垂直な方向の撓みが大きくなる。

4) 加工物が微小振動を起す場合、その振動方向は荷重方向に垂直でその振動数は回転数、荷重及び加工位置に無関係である。即ち加工物の固有振動数で振動するものと考えられる。

5) 微小振動の他に橈円振動も認められるが、この場合は回転数と一致し、その大きさは加工距離に比例し、荷重が大きくなると増大する。

6) 歳差運動は荷重の大きさにより加工距離との関係

は複雑であるが、いづれにしても橈円振動の場合と同じように 70rpm 附近が一番小さくなっている。

(1956, 10月29日受付)

参考文献

- 1) 井上友一：精密機械，22巻，1956，No.5．旋盤加工中の動的特性に関する研究．
- 2) 佐々木・井上：精密機械，22巻，1956，No.9．滑り軸受の動的剛性度に関する一考察（第3報）．

訂正

巻	号	頁	行	誤
22	11	487	左20	$EI = \frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{1}{2} m \omega^2 y$ <p style="text-align: center;">正</p> $EI \frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{1}{2} m \omega^2 y$

浮子面積式流量計の研究（第1報）*

正 会 員 森 康 夫**

On the Float-area-type Flow Meter (1st report)

Yasuo MORI

The float-area-type flow meter, frequently known as a rotor meter, is an important fluid flow measuring device when the flow rate is small. The present work was undertaken in an effort to develop the fundamental investigation of performance of float-type flow meters and to get datas for designing them.

In the 1st report, hydrodynamic analysis on laminar boundary layers around a float and an inner wall of tapered tube, is developed and relations about performance of various kinds of short or long floats are introduced. A drag coefficient of float is analytically expressed by a function of $l\nu/C^2U_m$, where l is the length of the part with maximum diameter, C the minimum clearance, ν the kinematic viscosity of the fluid, U_m the mean fluid velocity at the minimum sectional area. The analytical formula of sensitivity of this flow meter is introduced and the effect of various factors (the taper of the tube, the drag coefficient and weight of the float, the clearance-diameter-ratio) is explained.

1. 緒 言

浮子面積式流量計はロータメータともいわれ差圧式流量計とともに各種の流体の流量測定に広く用いられており、ことに差圧式流量計を用いることができないような流量の非常に少ない場合にその特徴を発揮する。また流量指示型空気マイクロメータの流量の指示に用いるとき

は高感度の空気マイクロメータ¹⁾がえられる。このような浮子面積式流量計は各種の用途をもつため、その特性についての解析²⁾³⁾⁴⁾、浮子の形状についての研究⁵⁾、性能の較正法⁶⁾など多くの研究がある。しかし浮子面積式流量計に用いる各種形式の浮子、テーパ管などについてあてはまる一般的な関係式は未だ知られていないし、よく用いられる浮子の流量係数も実験的に定める場合が多い。本研究は浮子面積式流量計の性能を根本的に研究し、その設計上の一般的基礎を明らかにするため、テー

* 昭和30年10月精機学会講演会にて発表

**東京工業大学

パ管に浮子の間の流れを流体力学的に検討し、浮子の抵抗係数についての一般式をみちびき、一方各種の浮子につき実験を行い、理論解析の結果と比較する。またテーパ管のテーパ、浮子の形、浮子の重量などが浮子面積式流量計の性能におよぼす影響を明らかにする。第1報においては一般的関係式をみちびくため、浮子とテーパ管の周りの境界層を考慮した流れの解析を行う。また浮子の抵抗係数についての理論式を示し、さらに浮子面積式流量計の感度におよぼす各種因子の影響を示す式をみちびき設計資料とする。

2. 解析

1. 基礎解析：浮子とテーパ管の間の流れを解析するため、図1示すように垂直なテーパ管の中に浮いている一般的な形の浮子を考える。

浮子の上流で浮子とテーパ管の間隙が最小になるまで、すなわち浮子先端の円錐部の周りでは流体の速度はおそく圧力は降下するから境界層はうすいので浮子の周りおよびテーパ管内壁の境界層は最小間隙のところから発達すると考える。(この仮定については第2報でふれる)。図1に示すように浮子の直径 d 、その先端円錐部の長さ l 、円柱部の長さ l 、テーパ管内径と浮子の直径の差を $2c$ とする。流体は浮子の前方で圧力 p_0 、速度 U_0 、最小間隙のところで圧力 p_1 、一様な速度 U_m 、浮子の直後で圧力 p_2 をもつとする。最小間隙のところから下流に x 軸、これに垂直に流れの中に y 軸をとり、 x のところの境界層の厚さを δ とし、 x_0 のところでテーパ管内壁に発達した境界層と浮子の周りの境界層がかきなるとする。境界層の助走区間を含む流れでは流体の動粘性係数を ν とするときレイノルズ数 $Re = U_m l / \nu < 10^5$ では流れは層流である。普通用いられている浮子面積式流量計では流れは層流の範囲にあるから第1報においては流れは層流とし、かつ $(p_0 - p_2) / p_0 \ll 1$ であるから流体は非圧縮性とする。多くの場合間隙 c は浮子の直径 d に比べて小さく

$$c/d = O(\epsilon) \quad (1)$$

であり、またテーパ管のテーパは小さいから浮子の円柱部の長さ l が極端に長くないかぎり

$$(dc/dx)(l/d) = O(\epsilon^2) \quad (2)$$

と考えられる。従つて x のところのテーパ管内壁にそう境界層の厚さ δ_1 と浮子の周りの境界層の厚さ δ_2 について次の関係⁷⁾ がえられる。

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta$$

つぎに浮子にはたらく力を検討するためにまず浮子のまわりの流れの模様を解析する。浮子のまわりとテーパ管内壁にそう境界層がかきならない場合と境界層が重なる場合には流れの模様が異なるのでこれらを分けて検討する。

(i) 浮子のまわりとテーパ管内壁の境界層がかきならない範囲。図1を参照して、 x の断面の流体の主流の速度 U_1 、表面から y のところの境界層中の速度 U 、流体の密度 ρ 、粘性係数を μ とすれば連続の方程式は

$$\pi d \int_0^\delta \rho U dy_1 + \pi(d+2c) \int_0^\delta \rho U dy_2 + \{\pi(d+c)c - \pi(2d+2c)\delta\} \rho U_1 = \pi(d+c)c \rho U_m \quad (3)$$

となる。また運動量の方程式はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left[\pi d \int_0^\delta \rho U^2 dy_1 + \pi(d+2c) \int_0^\delta \rho U^2 dy_2 + \pi \cdot \right. \\ \left. \{(d+c)c - \pi(2d+2c)\delta\} \rho U_1^2 \right] \\ = -\pi(d+c)c \frac{dp}{dx} - \tau \{\pi d + \pi(d+2c)\} \quad (4) \end{aligned}$$

ここで τ は表面摩擦応力 $(= \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_{y=0} = \mu \frac{2U_1}{\delta})$ 。また主流は損失がないからつぎの式が成立する。

$$dp/dx = -(\rho/2) dU_1^2/dx \quad (5)$$

浮子とテーパ管の間隙内の流れは x の増加する方向に圧力が降下するから境界層内の速度分布は充分正確につぎのようにおける。

$$U/U_1 = 2(y/\delta) - (y/\delta)^2 \quad (6)$$

$$U_1/U_m = f + 1 \quad (7)$$

とおき (6), (7) 式を (3) 式に代入すればつぎの式がえられる。

$$\delta/c = (3/2)f/(f+1) \quad (8)$$

また (4) 式に (5), (6) 式を代入すれば

$$\frac{d}{dx} \left(-\frac{7}{15} \rho U_1^2 \delta + \frac{c}{4} \rho U_1^2 \right) = -\frac{2\mu}{\delta} U_1$$

この式に (7), (8) 式を代入し積分すればつぎの式をうる。

$$\frac{x}{mR_m} = 2.1 + 2.7f - 4.8 \ln(f+1) + 2.1 \frac{1}{f+1} \quad (9)$$

ここで $m = c/2$, $\nu = \mu/\rho$, $R_m = U_m \cdot m/\nu$ である。(9) 式の関係を図2に示してある。浮子とテーパ管の境界層が重なるのは $\delta = c/2$ のときであり、ここでは $f = 1/2$ となる。最小間隙の場所すなわち $x=0$ からこの点までの距離 x_0 は (9) 式より求めることができ、つぎの式で与

えられる。

$$x_0/mR_m = 0.104 \quad \dots\dots\dots (10)$$

最小間隙のところから x の距離までの圧力降下を ΔP_{2r} とすれば (5) 式よりつぎの式をうる。

$$\frac{\Delta P_{2r}}{(\rho/2)U_m^2} = -f^2 - 2f \quad \dots\dots\dots (11)$$

(9) 式より $\Delta P_{2r}/(\rho/2)U_m^2$ は x/mR_m の関数であり $x_0/mR_m = 0.104$ において $\Delta P_{2r}/(\rho/2)U_m^2 = 1.25$ となる。 $\Delta P_{2r}/(\rho/2)U_m^2$ と x/mR_m の関係を図 3 に曲線

図 2

図 3

(1) で示してある。

浮子はその表面にそい摩擦応力をうけ $x=0$ から x までの浮子に加わる摩擦力を T_r とすれば

$$\begin{aligned} T_r / [(\rho/2)U_m^2 \cdot (\pi/4)d^2] \\ = \int_0^x \tau \cdot \pi d \cdot dx / [(\rho/2)U_m^2 (\pi/4)d^2] \\ = \frac{16m}{d} \left\{ \frac{27f^2 - 33f - 15}{60} + 2.3 \ln(f+1) \right. \\ \left. + \frac{0.7}{f+1} - 0.45 \right\} = t_r \cdot (16m/d) \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$x=x_0$ のときは $T_r / [(\rho/2)U_m^2 \cdot (\pi/4)d^2] = 0.536 \times (16m/d)$ である。 t_r はまた x/mR_m の関数であるがこの関係を図 3 に曲線 (2) で示してある。

(ii) 浮子のまわりとテーパ管内壁の境界層が重なっている範囲。浮子のまわりの境界層とテーパ管内壁の境界層が重なった後は流れに垂直な断面で速度分布は不変であり速度の最大値を U_2 とすれば $U_2 = (3/2)U_m$ である。また浮子の表面にはたらく摩擦応力を τ_p とすれば

$$\tau_p = 2\mu U_2/m = (\rho U_m^2/2)(6/R_m) \quad \dots\dots (13)$$

この範囲では流れの方向の単位距離についての圧力降下の割合は一定であり、境界層が重なった点から浮子後端までの圧力降下を ΔP_{2p} とすれば図 1 を参照して

$$\Delta P_{2p} = (l - x_0)\tau_p/m \quad \dots\dots\dots (14)$$

2. 抵抗係数：流体中で浮子が静止しているときは、浮子の前後の圧力差にもとづく力（流体の位置水頭にもとづくものを除く）、浮子表面の摩擦力、浮力、浮子にはたらく重力などの諸力が釣合にある。ゆえに浮子の密

度 ρ_r 、体積 V 、重量を W とすれば図 1, (12), (13) 式を参照してつぎの式がえられる。

$$\begin{aligned} W = \rho_r g V &= (p_0 - p_2)(\pi/4)d^2 + \int_0^l \pi d \tau \cdot dx \\ &+ egV = \{(p_0 - p_1) + (p_1 - p_2)\}(\pi/4)d^2 \\ &+ T_r + \tau_p \pi d(l - x_0) + \rho_g(l + l'/3)(\pi/4)d^2 \quad \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

ここで $p_0 - p_1 = (\rho/2)U_m^2 - (\rho/2)U_0^2$

$$= \frac{\rho}{2} U_m^2 \left\{ 1 - \frac{\left(1 + \frac{2m}{d}\right)^2 \left(\frac{8m}{d}\right)^2}{\left(1 + \frac{4m}{d}\right)^4} \right\}$$

で与えられる。

(15) 式に対してつぎの式で定義する抵抗係数 C_D を導入する。

$$W = C_D (\rho/2)U_m^2 (\pi/4)d^2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

抵抗係数 C_D は浮子の長さにより 2 種の式で表わせる。浮子の円柱部の長さが短くて浮子の周りとテーパ管内壁の境界層が重ならないときは (11), (12), (14), (16) 式などから

$$\begin{aligned} C_D &= (1 - \xi_0) - (f^2 + 2f) + t_r(16m/d) \\ &+ \left(l + \frac{l'}{3}\right) / (U_m^2/2g) \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

となる。ここで $\xi_0 = \left(1 + \frac{2m}{d}\right)^2 \left(\frac{8m}{d}\right)^2 / \left(1 + \frac{4m}{d}\right)^4$ であり、 f はすでにのべたように図に示したような $l/R_m \cdot m$ の関数である（図の中の x を浮子円柱部長さ l で表わす）。浮子が長くて境界層が重なっているときは (13), (14), (17) 式を用いて

$$\begin{aligned} C_D &= (1 - \xi_0) + 1.25 + 8.58 \frac{m}{d} + \frac{6(l - x_0)}{mR_m} \cdot \\ &\left(1 + \frac{4m}{d}\right) + \left(l + \frac{l'}{3}\right) / (U_m^2/2g) \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

となる。(17), (18) 式の右辺最後の項は浮力の影響を表わす項であり、流体が空気の場合にはこの項は省略でき、抵抗係数 C_D は l/mR_m および m/d のみの関数となる。 m/d は普通 0.1 前後あるいはそれ以下の値であるから m/d により C_D は余り変化しない。ゆえに C_D を l/mR_m の関数として表わしておく、これは m/d をパラメータとしてわづかに変化することになる。また流量を Q とすれば

$$U_m = Q/\pi(d+c)c \quad \dots\dots\dots (19)$$

であるから

$$C_D = 8\pi W(d+c)^2 c^2 / \rho Q^2 d^2 \quad \dots\dots\dots (20)$$

となり、これは

$$l/mR_m = 4\pi \mu l(d+c)/\rho Q c \quad \dots\dots\dots (21)$$

の関数として表わすことができる。

3. 感度：浮子面積式流量計の主要な目的は流量を浮子の位置で表わすことである。ゆえに流量の変化 ΔQ に対する浮子の位置の変化を Δi とすれば感度としては $\Delta i/\Delta Q$ をとるのが適当である。浮子の位置の変化 Δi に対するテーパ管と浮子の間隙の変化を Δc とすれば

$$\text{感度} = \frac{\Delta i}{\Delta Q} = \frac{\Delta i}{\Delta c} \cdot \frac{\Delta c}{\Delta Q} \dots\dots\dots (22)$$

となる。ゆえに感度をますにはテーパを小にするか $\Delta c/\Delta Q$ を大にすればよい。テーパ管の製法、内径の精度などの点でテーパを小さくするには 限度がある考えられる。感度は使用全域にわたって一定であることが多くの場合のぞましいが、後にのべるように $\Delta c/\Delta Q$ を全域にわたって一定にすることはむづかしく、またテーパを変化させることも製作上困難が多い。さて (22) 式からわかるように浮子面積式流量計の精度、感度に直接の影響をもつものはテーパ管のテーパであり、この精度、精度は全く製法にかかっているので本報告ではこれ以上ふれず、感度に影響をもつ他の重要な因子である $\Delta c/\Delta Q$ につき以下検討する。

浮子の重量を W とし、流量 Q_0 のときの間隙 C_0 、抵抗係数 C_{D0} とすれば (20) 式より

$$W = \frac{\pi \rho Q_0^2 d^2}{8(d+C_0)^2 \cdot C_{D0}} \cdot C_{D0} \dots\dots\dots (23)$$

となる。 C_{D0} における $C_D \sim l/mR_m$ 曲線の勾配を ζ とし、浮力の項を省略して (23) 式を微分すればつぎの式をうる。

$$\frac{dc}{dQ} = \frac{1}{C_0} + \frac{1}{d} - \frac{2\pi l \zeta (d+C_0)}{Q_0 \sqrt{C_{D0}} Q_0^2 C_0} \left(-\frac{1}{d} + \frac{1}{C_0} \right) \dots\dots\dots (24)$$

$C_0/d \ll 1$ であるから (23) 式を用いて (24) 式を簡単化して

$$\frac{dc}{dQ} = \sqrt{\frac{\pi \rho C_{D0}}{8W}} \left[1 - \frac{2C_0}{d} - \sqrt{\frac{4\zeta}{C_{D0}}} \cdot \left(\frac{l\nu}{U_m \cdot C_{D0}^2} \right) \left(\frac{C_0}{d} \right) \right] \dots\dots\dots (25)$$

となる。ゆえに感度をます一つの方法は浮子の重量をかるくすることである。また (25) 式によると C_{D0} を大にすればよいわけであるが、 C_{D0} を大きくするには l を長くする必要があり、このときは (25) 式かつこ内第3項がきいて必ずしも感度はまさない。実用の浮子は l を小さくするが、 c に比べて l を著しく小さくできず l/mR_m は有限な値になり使用範囲内で C_{D0} は変化する。 C_0/d は使用範囲で相当に変わるので一般に感度は一定でなく、テーパが一定のときはテーパ管下部の方が感度がよい。

また感度をますためには (25) 式の C_0/d を小さくすればよい。しかしこれを余り小さくするとテーパ管内径の仕上精度が著しく感度に影響をもつに至る。上述の理由でテーパ一定では全範囲にわたり感度を一定にすることはできないから感度を一定にするには (25) 式にしたがつて dc/dQ を求め、これに対してテーパを管の長さ方向に変化させねばならぬ。

(19) 式以後の解析においては (15) 式の右辺最後の浮力を表わす項を省略して考えたが W の代りに $W' = (\rho_r - \rho)gV$ を用いれば浮力を考えるときも本節の解析をそのまま用いることができる。

3. 討 論

本報告においては浮子の周りの流れが層流の範囲にある場合につき考えてきた。第2報においてのべるように各種形状の浮子について求めた性能は第2章の解析より求めた性能と非常によく一致している。しかし或る種の浮子はある範囲で非常に不安定な性能を示すことを実験により確認した。第2報において詳しくのべるように、この不安定な性能が乱れにもとづくものか、あるいはテーパ管内における浮子の偏心にもとづくものかあるいは二重管の流れ特有のもの⁸⁾かは今後の研究にまたねばならない。

浮子面積式流量計はロータメータともいわれる。その原因は浮子になるべく安定な性能を与えるため浮子にむづかに回転を与えることにともづいている。この浮子の回転が浮子のまわりの流れによおよす影響を考えてみる。第2章の解析においてのべた U_m は普通、数 m/s から数 10 m/s におよび浮子の回転にもとづく円周速度はせいぜい数 10 cm/s であり回転の影響は流体力学的性能には全く影響がなく本報告の結果をそのままロータメータに应用することができる。

4. 結 論

浮子面積式流量計の浮子とテーパ管の流れを層流として、浮子とテーパ管の境界層につき助走区間を含めた流体力学的解析を行い、浮子の抵抗係数につき理論式をみちびいた。流体の最小間隙の平均速度 U_m 、動粘性係数 ν 、最小直径間隙 $4m$ 、浮子の直径 d 、円柱部の長さを l とすれば抵抗係数は $l\nu/U_m \cdot m^2$ の関数でありむづかに m/d により変化することを示した。更に浮子面積式流量計の感度につき解析し、その感度をますにはテーパ管のテーパを小にするか、浮子の重量、最小間隙を小にすることなどが必要であることをのべた。またこの種流量計の感度を使用全範囲にわたって一定にすることはむづか

しいことをのべた。さらに本形式の流量計の精度、感度とテーパ管の内径との関係を理論式を示して論じ、テーパ管の精度が如何に基本的問題を含んでいるかを明らかにした。

終りにのぞみ 本研究を終始御指導下さった東京工業大学谷口修教授に感謝致します。(1956, 11月8日受付)

文 献

- 1) 塚原；空気マイクロメータ（科学技術社）。
- 2) E.M.Schoenlorn and A.P.Colburn：A.I.C.

- E., Trans, Vol. 35 (1939).
- 3) M.R. Shafer, E.F.Flock, H.L.Bovey and R.B.Van Lone：Res.Nat.Bur.Stand., Jour., Vol. 47, No.4 (1951).
- 4) 相川：計測，第6巻，9号（昭31年）。
- 5) K. Fisher, S. Blechman and E. Lipstein：Instruments, Vol. 14 (1941).
- 6) J.J.Martin；Chem.Eng.Prog., Vol.45, No. 5 (1949).
- 7) 本間仁訳，ミューラ；粘性流体の力学。
- 8) 富田：日本機械学会論文集，第1巻（昭10年）。

構成刃先の研究（第2報）*

正 会 員 中 山 一 雄**

Studies on the Built-up Edge (Part 2)

Kazuo NAKAYAMA

In the previous report, the fact that the built-up edge disappears when the cutting temperature rises above the annealing temperature of workpiece material was shown in the case of SAE 1040 Steel. In this report, this fact was confirmed by varying the workpiece material and tool material and by using cutting fluids. Considerations were made on the formation and the fracture of the built-up edge.

1. 緒 言

切削加工面の粗さを支配する要因としては

i) 工具刃先の形状及び工具の加工物に対する運動軌跡によつて幾何学的にきまるもの。

ii) 工具が加工物に対して理想通りに運動しないことによるもの。

iii) 加工物からの切屑の分離が工具の刃先で行われないことによるもの。

の三つをあげることができる。i) は刃先丸味半径を増したり送りを小さくすることによつて簡単に解決できる。

ii) は工作機械や工具の剛性を増すことによつて撓みや振動を防止し，又流れ型切屑を得ることによつて切削抵抗の変動を避ければ解決できる。流れ型切屑を得る為には切削速度の増加，送りの減少，すくい角の増加等の他に，被削材の展延性増加の為の熱処理，高温切削等を行

えばよいことが知られている。iii) はラックが加工面以下に入るような亀裂型や捲れ型の切屑の生成を避けて流れ型の切屑を得るようにし，且つ構成刃先の発生を防げばよい。この構成刃先の発生条件について筆者は前報¹⁾において，構成刃先ができるのは切屑が流れ型であつてしかも刃先温度がある一定値（略々被削材の再結晶温度附近）以下である場合に限ることを，0.4%炭素鋼について示した。本報告はこの結論を普遍化する為に，被削材及び工具材を変えた場合並びに切削液を用いた場合について実験を行い，更に之等の実験結果に基づいて構成刃先の生成消失の機構について考察を行ったものである。

2. 被削材質の影響

炭素鋼と並んで構成刃先の最も出来易いものとして18—8 不銹鋼及びアルミニウムを撰び，之等について前報と同様の方法で構成刃先の生成消失の条件を調べた。

(a) 18—8 不銹鋼

外径 49mm, 肉厚 1.5mm の 18—8 不銹鋼パイプを 0.1mm/rev. の送りで S1 超硬バイトで二次元旋削した

* 昭和31年春季精機学会講演会にて発表

**横浜国立大学工学部