

流体ブリッジの作動特性に関する研究

(第1報：定常特性)

濱 邦 彦*

(昭和47年5月30日受理)

1. ま え が き

流体ブリッジとは、図1に示すように流体の流れによって圧力降下の生ずる流体抵抗体 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 を四辺にもつ流体回路である。この流体回路への入力信号をブリッジ回路を構成している流体抵抗の変化に変換することにより、抵抗接続点間の圧力差として検出することができる。すなわちこの4個の抵抗値 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 のうちの1個、2個あるいは4個の抵抗値が変化する場合、その対角線の位置にある2点間B、Cには抵抗値の変化に応じた圧力差が生ずる。この圧力差を利用して抵抗値の変化量を計測したり、また流体モータ等の駆動装置を操作したりすることができるので、工業計測や自動制御の分野でしばしば用いられる計測要素である。この抵抗値の変化およびその原理を図2(a), (b), (c)に示す。

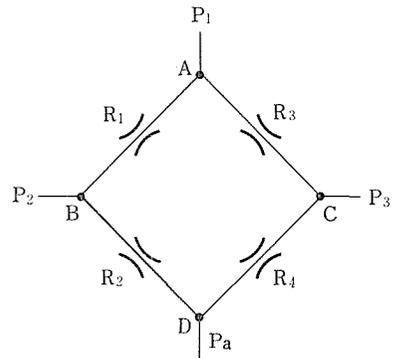


図1 流体ブリッジ

たとえば負重合の油圧案内弁¹⁾は四辺の流体抵抗値が連動して差動的に変化する流体ブリッジであり、ノズルフラップ弁²⁾は二辺の抵抗値だけが差動的に変化する流体ブリッジ

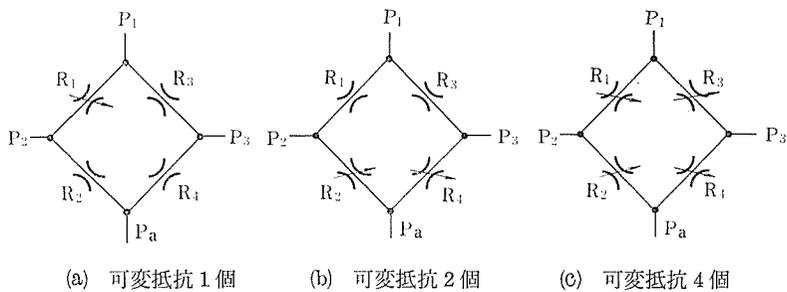


図2 流体ブリッジの原理図

* 機械工学教室 助手

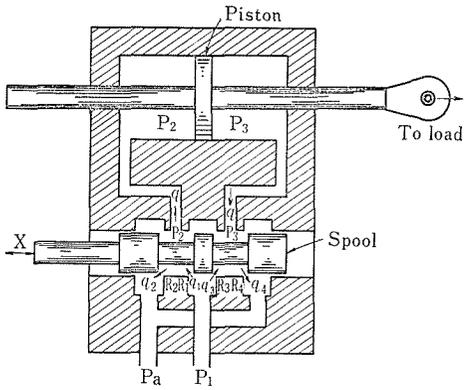


図3 負重合の4ポート3ランド油圧案内弁

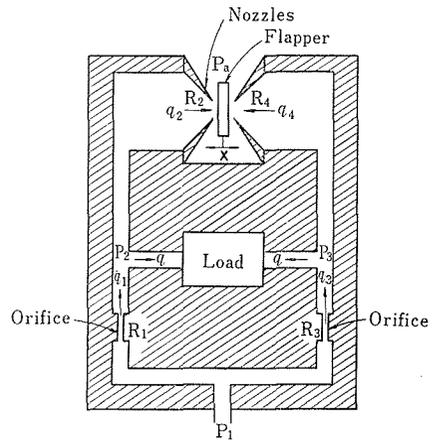


図4 4ポートノズルフラップ弁

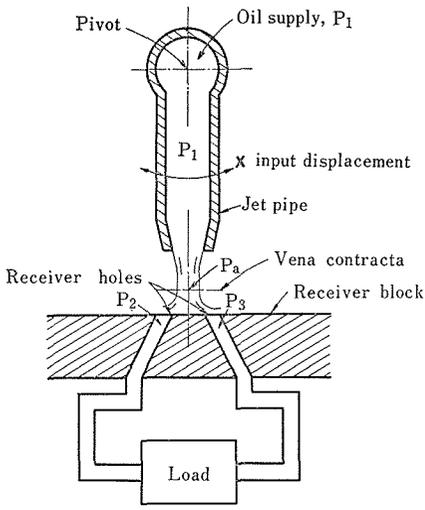


図5 噴射管弁

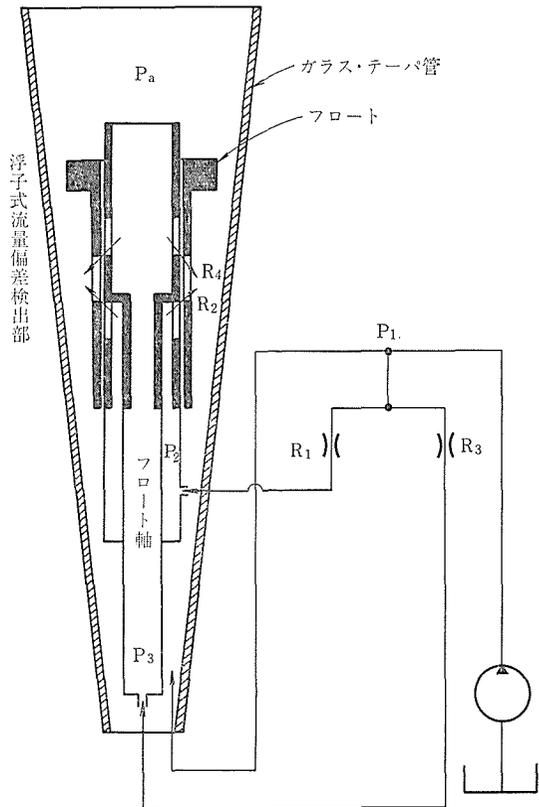


図6 フロート式(浮子式)流体ブリッジ

である。また噴射管弁³⁾も流体ブリッジの一種と見做すことができる。図3, 4および図5にはこれらの概要を示す。

これらのブリッジにおいては絞り抵抗体の両端の圧力差が流量の自乗にほぼ比例するので、電気系ブリッジのように簡単に解析を行なうことはできない。したがっていままでは通常圧力と流量の間の関係を線形的に近似して解析し、伝達関数を求めその系の特性を考察するのが普通であった。

しかしこの手法により求められる伝達関数は、絞りの流体抵抗値の変化が非常に小さい場合にはある程度あてはまるが、たとえば実際に使われている自力式流量調節装置に使用されるフロート式流体ブリッジのような場合には、絞りの流体抵抗値の変化範囲が極めて大きいので、同じように線形化して伝達関数を求めるにしても、自乗特性の式から出発して最後に線形化する方が従来の方法によるものよりも妥当性があるように思われる。図6にはこの形の流体ブリッジを示す。

以上述べた事柄によって筆者は流体ブリッジに関する伝達関数を一層実情に則したものとするために、流体ブリッジの管路の中の非定常流の式から対角線の位置にある2点間の圧力差を誘導し、さらにこの圧力差を用いて質量負荷をもつシリンダを駆動する場合の状況を圧力-流量間の自乗特性をもとにして解析する。

本論文においては究極的にはこれらの流体ブリッジサーボを使用した自動調節系の動特性を探究するのが目的であるが、本報文はその第1報として種々の絞りの流体抵抗値の変化に対する各抵抗を流れる流量の定常状態における値を求め、流体ブリッジの定常特性を知ることが目的としたものである。

本報文は、これら流体ブリッジの定常特性について実験結果と理論演算結果とが良く合致し目的を全うすることができたのでここに報告する次第である。

なお本報文において重要な因子の一つである絞りの流体抵抗値とは、絞り抵抗の両端の圧力差を絞り抵抗を流れる流量の自乗で除したものである。ここで使用される圧力の単位は kg/cm^2 、流量の単位は cm^3/s であるので絞りの流体抵抗値の単位は $\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^8$ となる。

2. 前 提

本報文においてはつぎのことを前提としている。

(1) 絞りの流体抵抗の両端における圧力差は、これを通して流れる流量の自乗に比例する。このときの比例定数を絞りの流体抵抗値とする。

(2) 実験において使用する流体は水とする。

(3) 水は非圧縮性流体である。

(4) 水の粘性による圧力降下は絞りの部分に集中していると考ええる。

(5) 絞りの部分の長さは管路部分の長さに比較して非常に短いので、絞り部分の水の慣性による圧力降下の影響は無視することができる。

(6) 圧力供給口A、放水口Dおよび分岐口B, Cにおいては断面積が大きく、そこでの速度はほとんど0と見做すことができ、流れの動圧は無視することができる。

- (7) 流体ブリッジの四辺の管路の長さおよび管路の内径は等しいものとする。
 (8) 中正時における流体ブリッジの四辺の抵抗値は等しい。
 (9) 重力の影響は無視する。

3. 記号および単位

本報文においてはつぎの記号および単位を使用する。またその符号はつぎのように規定する。

P	: 圧力	}	$\text{kg/cm}^2 \cdot \text{gauge}$
P_1	: 流体ブリッジのA点の圧力		
P_2	: 流体ブリッジのB点の圧力		
P_3	: 流体ブリッジのC点の圧力		
P_a	: 流体ブリッジのD点の圧力であり、この圧力 P_a は大気圧と考えるので $P_a = 0 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{gauge}$ (圧力 P_1, P_2, P_3 は正または0である)		
R_1	: 管路AB間にある絞りの流体抵抗値	}	$\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{cm}^8$
R_2	: 管路BD間にある絞りの流体抵抗値		
R_3	: 管路AC間にある絞りの流体抵抗値		
R_4	: 管路CD間にある絞りの流体抵抗値		
R	: 中立時における流体ブリッジの四辺の抵抗値		
r	: 絞りの流体抵抗値 R_2 および R_4 の抵抗値の変化分		
r'	: 対角線管路BC間にある絞りの流体抵抗値 (絞りの流体抵抗値は全て常に正符号である)	}	cm^3 / s
q	: 対角線管路BCを流れる対角線流量 (BからCへ流れる方向を正符号とする)		
q_1	: 管路ABを流れる流量 (AからBへ流れる方向を正符号とする)		
q_2	: 管路BDを流れる流量 (BからDへ流れる方向を正符号とする)		
q_3	: 管路ACを流れる流量 (AからCへ流れる方向を正符号とする)		
q_4	: 管路CDを流れる流量 (CからDへ流れる方向を正符号とする)	}	cm^3 / s
q_0, q_{\max}	: 対角線管路BCを流れる対角線最大流量		
φ_1, φ_2	: 圧力 P_1 , 流体抵抗値 r および対角線流量 q により表わされる関数	}	cm^3 / s
l	: q/q_0 ($0 \leq l < 1$)		
m	: r'/R ($0 \leq m$)		
n	: r/R ($0 \leq n \leq 1$)		

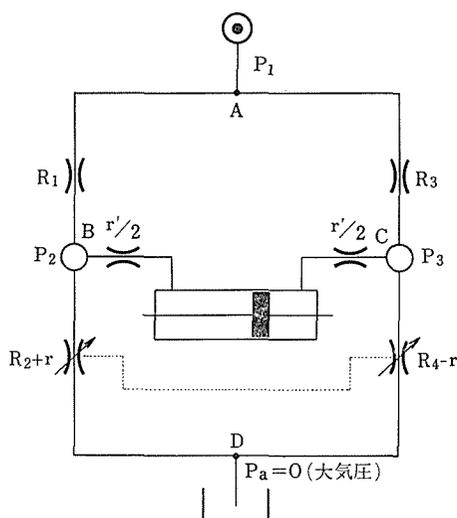


図7 流体アクチュエータに接続した流体ブリッジ

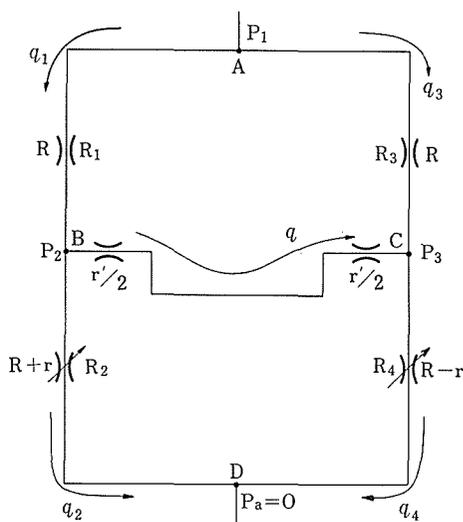


図8 対角点B, Cが短絡された流体ブリッジ

4. 定常状態における基礎流量方程式

水溶液の流量調節に用いられる流体ブリッジの場合には、図7に示すように一端Aから供給圧力 P_1 を加え他端Dを大気中に開放し、残りの2個所の対角点BおよびCの圧力 P_2 および P_3 を流体アクチュエータに接続する。このような状態における流量の現在値が設定値と丁度等しい場合における定常状態の基礎流量方程式を求めるために負荷のない場合について考える。そこで図8に示されるように流体アクチュエータの両端B, Cを短絡し、まず流体ブリッジが中正の状態よりB-D間の流体抵抗値 R_2 が r だけ増大し、C-D間の流体抵抗値 R_4 が同量 r だけ減少する場合において対角線管路BCを流れる対角線流量 q に関する流量方程式を求める。このような状態においては q は正である。

前提(8)により中立時においては四辺の抵抗値は等しいことより

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \tag{1}$$

また流体抵抗値 R_2 および R_4 が r だけステップ状に変化した場合において、流体ブリッジの四辺の流体抵抗値はつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R \\ R_2 &= R + r \\ R_3 &= R \\ R_4 &= R - r \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

つぎに前提(1)によりつぎの関係式を得ることができる。
管路ABに関して

$$P_1 - P_2 = R \cdot q_1^2 \quad (3)$$

管路ACに関して

$$P_1 - P_3 = R \cdot q_3^2 \quad (4)$$

管路BDに関して

$$P_2 - P_a = (R + r) \cdot q_2^2$$

すなわち

$$P_2 = (R + r) \cdot q_2^2 \quad (5)$$

管路CDに関して

$$P_3 - P_a = (R - r) \cdot q_4^2$$

すなわち

$$P_3 = (R - r) \cdot q_4^2 \quad (6)$$

連続の法則によりB点およびC点に関して次式を得る.

$$q_2 = q_1 - q \quad (7)$$

$$q_4 = q_3 + q \quad (8)$$

対角線管路BCについて前提(1)を適用すれば

$$P_2 - P_3 = r' \cdot q^2 \quad (9)$$

式(5), (6)を式(3), (4)に代入して P_2 および P_3 を消去すれば

$$P_1 = R \cdot q_1^2 + R \cdot q_2^2 + r \cdot q_2^2 \quad (10)$$

$$P_1 = R \cdot q_3^2 + R \cdot q_4^2 - r \cdot q_4^2 \quad (11)$$

式(5), (6)を式(9)に代入して

$$(R + r) \cdot q_2^2 - (R - r) \cdot q_4^2 = r' \cdot q^2 \quad (12)$$

式(7), (8)によって表わされる q_2, q_4 を上式に代入して整理すると

$$R \cdot (q_1^2 - q_3^2) - 2R \cdot q(q_1 + q_3) + r \cdot (q_1^2 + q_3^2 + 2q^2 + 2qq_3 - 2qq_1) = r' \cdot q^2 \quad (13)$$

一方式(3), (4), (9)から

$$R \cdot (q_3^2 - q_1^2) = r' \cdot q^2 \quad (14)$$

式(13)と(14)からつぎの関係を得る.

$$-2R \cdot q(q_1 + q_3) + r \cdot \{q_1^2 + q_3^2 + 2q(q + q_3 - q_1)\} = 2r' \cdot q^2 \quad (15)$$

式(7)の q_2 を式(10)に代入することにより

$$P_1 = R \cdot q_1^2 + (R+r) \cdot (q_1 - q)^2 \quad (16)$$

上式(16)の q_1 に関する二次方程式を解くと

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{(R+r) \cdot q \pm \sqrt{(R+r)^2 \cdot q^2 - (R+r)(2R+r) \cdot q^2 + P_1(2R+r)}}{2R+r} \\ &= \frac{(R+r) \cdot q \pm \sqrt{P_1(2R+r) - R(R+r) \cdot q^2}}{2R+r} \end{aligned} \quad (17)$$

全く同じ手順により式(8)および(11)よりつぎの関係式を得る.

$$\begin{aligned} q_3 &= \frac{-(R-r) \cdot q \pm \sqrt{(R-r)^2 \cdot q^2 - (R-r)(2R-r) \cdot q^2 + P_1(2R-r)}}{2R-r} \\ &= \frac{-(R-r) \cdot q \pm \sqrt{P_1(2R-r) - R(R-r) \cdot q^2}}{2R-r} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで $r=0$ すなわち流体ブリッジが完全に平衡が保持されている中立時において管路A B Dおよび管路A C Dについてつぎの関係式を得る.

$$\begin{aligned} P_1 - P_a &= 2R \cdot q_1^2 \\ &= 2R \cdot q_3^2 \end{aligned} \quad (19)$$

すなわち $P_a=0$ であり, また流量 q_1 はAからBに流れるとき, 流量 q_3 はAからCに流れるとき正符号をもつことより

$$q_1 = q_3 = \sqrt{\frac{P_1}{2R}} \quad (19')$$

一方中立時において $r=0$, $q=0$ であることより式(19')を考慮すれば, 式(17)および式(18)の正符号のみが必要となる. したがって

$$q_1 = \frac{(R+r) \cdot q + \sqrt{P_1(2R+r) - R(R+r) \cdot q^2}}{2R+r} \quad (20)$$

$$q_3 = \frac{-(R-r) \cdot q + \sqrt{P_1(2R-r) - R(R-r) \cdot q^2}}{2R-r} \quad (21)$$

式(20), (21)の q_1 および q_3 を式(15)に代入することによりつぎの流量に関する定常状態流量方程式を得ることができる.

$$-2 \cdot \frac{R(R+r)}{2R+r} \cdot q\varphi_1 - 2 \cdot \frac{R(R-r)}{2R-r} \cdot q\varphi_2 + \frac{2Rr}{4R^2 - r^2} P_1 - \frac{2R^2r(4R^2 - 3r^2)}{(4R^2 - r^2)^2} \cdot q^2 = r' \cdot q^2 \quad (22)$$

上式における φ_1 , φ_2 は式の簡略化のために使用された P_1 , r および q に関する方程式でありそれぞれつぎのように表わされる.

$$\varphi_1(P_1, r, q) = \frac{\sqrt{P_1(2R+r) - R(R+r) \cdot q^2}}{2R+r} \quad (23)$$

$$\varphi_2(P_1, r, q) = \frac{\sqrt{P_1(2R-r) - R(R-r) \cdot q^2}}{2R-r} \quad (24)$$

ここで $\frac{r'}{R} = m$, $\frac{r}{R} = n$ とおき式(22)を変形すると

$$\left\{ m + 2n \frac{4-3n^2}{(4-n^2)^2} \right\} \cdot q^2 + 2 \left\{ \frac{1+n}{2+n} \cdot \varphi_1 + \frac{1-n}{2-n} \cdot \varphi_2 \right\} \cdot q - \frac{2n}{4-n^2} \cdot \frac{P_1}{R} = 0 \quad (25)$$

同様に式(23)および(24)を変形すると

$$\varphi_1 = \varphi_1\left(\frac{P_1}{R}, n, q\right) = \sqrt{\frac{1}{2+n} \cdot \frac{P_1}{R} - \frac{1+n}{(2+n)^2} \cdot q^2} \quad (26)$$

$$\varphi_2 = \varphi_2\left(\frac{P_1}{R}, n, q\right) = \sqrt{\frac{1}{2-n} \cdot \frac{P_1}{R} - \frac{1-n}{(2-n)^2} \cdot q^2} \quad (27)$$

式(25)が本報文の目的とする対角線流量 q に関する定常状態における流量方程式である。この式(25)から求められる対角線流量 q は流体ブリッジの対角点間に流体アクチュエータを接続した流体ブリッジサーボのインディシャル応答における最終値を示すものであり、線形化近似を行なう際の基礎になるものである。

5. 対角線流量に対する考察

式(25)により明らかなようにこの q に関する流量方程式を直接解法することは不可能である。したがって出来る限り正確に方程式を解くためにつぎのような考え方に基礎をおき考察する。

流体ブリッジの各点の圧力の分布は絞りの流体抵抗値の分布によって定まる。また各部分を通れる流量はその部分の流体抵抗値と絞り抵抗両端の圧力差とによって導かれるので $m\left(=\frac{r'}{R}\right)$ および $n\left(=\frac{r}{R}\right)$ が一定であるならば、その部分の管路を通れる流量は $\sqrt{P_1/R}$ に比例する。

ここにある P_1/R および $n\left(=\frac{r}{R}\right)$ に対して $m\left(=\frac{r'}{R}\right) \rightarrow 0$ とした場合における対角線流量を最大対角線流量と呼び、これを q_{\max} としてこの q_{\max} を求める。しかし式(25)の流量方程式において $m=0$ としても、これを直接解き q を求めることは困難である。したがってつぎのように定義される流量 q_0 を考え、これを最大対角線流量 q_{\max} に置き換える。

図9に示されるように $r'=0$ (したがって $m=0$) の管路を考えると、B点とC点との間の管路においては絞りによる圧力降下はないから、B点における圧力 P_2 とC点における圧力 P_3 とは等しい。

$$\therefore P_2 = P_3 (= P \text{ とおく}) \quad (28)$$

一方管路ABを通れる流量 q_1 と管路ACを通れる流量 q_3 とは等しいはずであるから

$$q_1 = q_3 \quad (29)$$

また管路BDとCDとにおいて、管路を流れる流量、絞りの流体抵抗値および絞りの両端の圧力差との間には 前述した式 (5) および式 (6) により示される関係がある。すなわち、

$$P_2 = (R + r) \cdot q_2^2 \quad (5)$$

$$P_3 = (R - r) \cdot q_4^2 \quad (6)$$

式 (28), (5), (6) を関連させると

$$\begin{aligned} P &= (R + r) \cdot q_2^2 \\ &= (R - r) \cdot q_4^2 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\therefore \frac{q_2}{q_4} = \sqrt{\frac{R - r}{R + r}} \quad (31)$$

一方式 (7), (8) を加え合わせるにより

$$2q = (q_4 - q_2) + (q_1 - q_3) \quad (32)$$

式 (29) より $q_1 = q_3$ のとき対角線流量 q は最大となり、このときの流量を q_0 と定義すれば式 (32) における q は q_0 におきかえることができる。

$$\therefore q = q_0 = \frac{1}{2}(q_4 - q_2) \quad (33)$$

式 (30) および式 (31) を使って式 (33) を書き換えると

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{R + r} - \sqrt{R - r}}{\sqrt{R^2 - r^2}} \cdot \sqrt{P} \quad (34)$$

式 (34) の P の値は実際にどのような値か不明瞭であるので、つぎのような手順にしたがつてこれを供給圧力 P_1 で表示する。

式 (7), (8) より

$$q_1 = q_3 = \frac{q_2 + q_4}{2} \quad (35)$$

式 (33) の場合と同様に式 (35) を書き換えると

$$q_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{R + r} + \sqrt{R - r}}{\sqrt{R^2 - r^2}} \cdot \sqrt{P} \quad (36)$$

管路 ABD について次式が成立する。

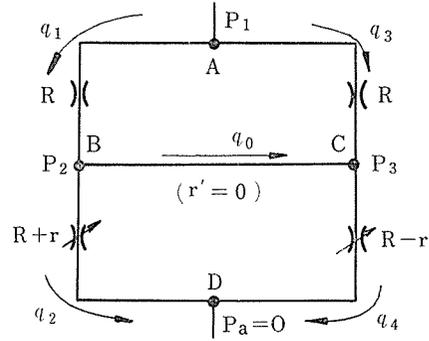


図9 $r' = 0$ の場合における流体ブリッジ

$$P_1 = P + R \cdot q_1^2 \quad (37)$$

式(37)に式(36)の q_1 の値を代入して P の値を P_1 で表わすと

$$P = \frac{2(R^2 - r^2)}{3R^2 - 2r^2 + R\sqrt{R^2 - r^2}} \cdot P_1 \quad (38)$$

式(38)に示される P の値を式(34)に代入することにより流量 q_0 をつぎのように表わすことができる.

$$q_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{R+r} - \sqrt{R-r}}{\sqrt{3R^2 - 2r^2 + R\sqrt{R^2 - r^2}}} \cdot \sqrt{P_1} \quad (39)$$

これを $n\left(=\frac{r}{R}\right)$ におきかえると

$$q_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{1+n} - \sqrt{1-n}}{\sqrt{3 - 2n^2 + \sqrt{1-n^2}}} \cdot \sqrt{\frac{P_1}{R}} \quad (40)$$

式(40)において示される流量 q_0 は真の最大対角線流量 q_{\max} ではないが最大流量の一つの目安となる値である.

この流量 q_0 は $\sqrt{P_1/R}$ に比例し, n が大きくなるとともに増大する量である. また対角線流量 q はこの q_0 の値を越えることはできないが同程度の値と考えられる. そこで $l = \frac{q}{q_0} (0 \leq l < 1)$ とにおいて式(25)で示される流量方程式を無次元化するとつぎのようになる.

$$\left\{ m + 2n \frac{4 - 3n^2}{(4 - n^2)^2} \right\} l^2 + 2 \left\{ \frac{1+n}{2+n} \cdot \frac{\varphi_1}{q} + \frac{1-n}{2-n} \cdot \frac{\varphi_2}{q} \right\} l^2 - \frac{2}{n(4-n^2)} \left\{ 2(2-n^2)(1+\sqrt{1-n^2}) - n^2 \right\} = 0 \quad (n \neq 0) \quad (41)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし } l &= \frac{q}{q_0} \quad (0 \leq l < 1) \\ m &= \frac{r'}{R} \quad (0 \leq m) \\ n &= \frac{r}{R} \quad (0 < n \leq 1) \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

一方式(26)および式(27)より

$$\frac{\varphi_1}{q} = \sqrt{\frac{1}{2+n} \cdot \frac{P_1}{R \cdot q^2} - \frac{1+n}{(2+n)^2}} \quad (43)$$

$$\frac{\varphi_2}{q} = \sqrt{\frac{1}{2-n} \cdot \frac{P_1}{R \cdot q^2} - \frac{1-n}{(2-n)^2}} \quad (44)$$

以上により無次元表示された対角線流量 q に関する定常状態における流量方程式は、式 (41), (42), (43) および式 (44) によって表わされる。したがって対角線流量 q の定常値は $\frac{P_1}{R}$, m および n の関数として表示され、一般につぎのように書くことができる。

$$q = q\left(\frac{P_1}{R}, m, n\right) \quad (45)$$

6. 流体ブリッジを線形と考えた場合における 定常状態の基礎流量方程式

まず前提 (1) をつぎのように書き改める。

“絞りの流体抵抗の両端における圧力差はこれを通して流れる流量に比例する。このときの比例定数を絞りの流体抵抗値とする”

図 8 によって表わされる対角点 B, C が短絡された場合における流体ブリッジにおいて、上述の前提よりつぎの諸関係を得ることができる。

管路 AB に関して

$$P_1 - P_2 = R \cdot q_1 \quad (46)$$

管路 AC に関して

$$P_1 - P_3 = R \cdot q_3 \quad (47)$$

管路 BD に関して

$$P_2 = (R + r) \cdot q_2 \quad (48)$$

同様にして管路 CD について

$$P_3 = (R - r) \cdot q_4 \quad (49)$$

対角線管路 BC においては B 点の圧力が P_2 , C 点の圧力が P_3 であることより

$$P_2 - P_3 = r' \cdot q \quad (50)$$

つぎに対角点 B, C に連続の法則を適用すると

$$q_1 = q + q_2 \quad (51)$$

$$q_4 = q + q_3 \quad (52)$$

以上の式 (46) ~ (52) が流体ブリッジに関する関係式である。これらよりつぎのようにして対角線管路を流れる流量 q を導出する。

式 (46), (48) および式 (47), (49) より

$$\begin{aligned} P_1 &= R \cdot q_1 + (R + r) \cdot q_2 \\ &= R \cdot q_3 + (R - r) \cdot q_4 \end{aligned} \quad (53)$$

式(51)の q_1 を式(53)に代入することにより

$$\begin{aligned} P_1 &= R \cdot (q + q_2) + (R + r) \cdot q_2 \\ &= (2R + r) \cdot q_2 + R \cdot q \end{aligned} \quad (54)$$

$$\therefore q_2 = \frac{P_1 - R \cdot q}{2R + r} \quad (55)$$

全く同様にして式(52)の q_3 を式(53)に代入して整理すると

$$q_4 = \frac{P_1 + R \cdot q}{2R - r} \quad (56)$$

つぎに式(48), (49)を式(50)に代入して

$$(R + r) \cdot q_2 - (R - r) \cdot q_4 = r' \cdot q \quad (57)$$

式(55)～(57)を整理しまとめると対角線流量 q はつぎのようになる。

$$q = \frac{2P_1 R r}{4R^2 r' - r^2 r' + 4R^3 - 2r^2 R} \quad (58)$$

$\frac{r'}{R} = m, \frac{r}{R} = n$ とおき式(58)を書き換えると

$$q = \frac{2n}{4m - mn^2 - 2n^2 + 4} \cdot \frac{P_1}{R} \quad (59)$$

したがって上式(59)は簡単につぎの関数におくことができる。

$$q = q\left(\frac{P_1}{R}, m, n\right) \quad (60)$$

この式は非線形として取り扱った定常状態における流量方程式(45)と全く同じ関数関係の式として表わされる。

7. 実験方法および実験結果

本論文に関する実験装置を図10に示し、自力式流量調節装置回路図を図11に、流体ブリッジのみの回路図を図12に示した。

水圧源としては20 mAqヘッド用の渦巻ポンプと7 mAqヘッド用渦巻ポンプとを並列に接続し、できるだけ流量を多くすることができるようにした。これは浮子式流量偏差検

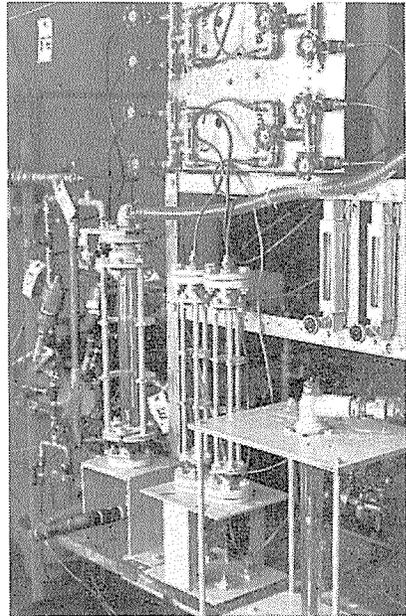


図10 実験装置

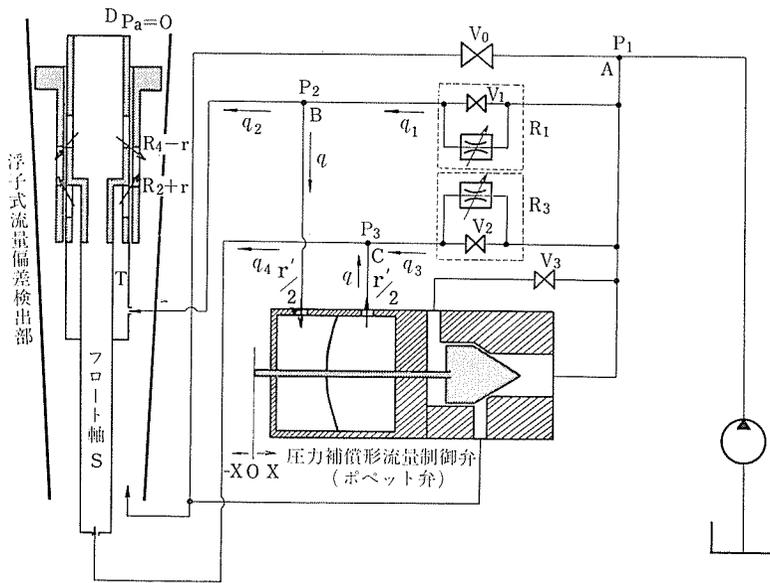


図11 自力式流量調節装置回路図

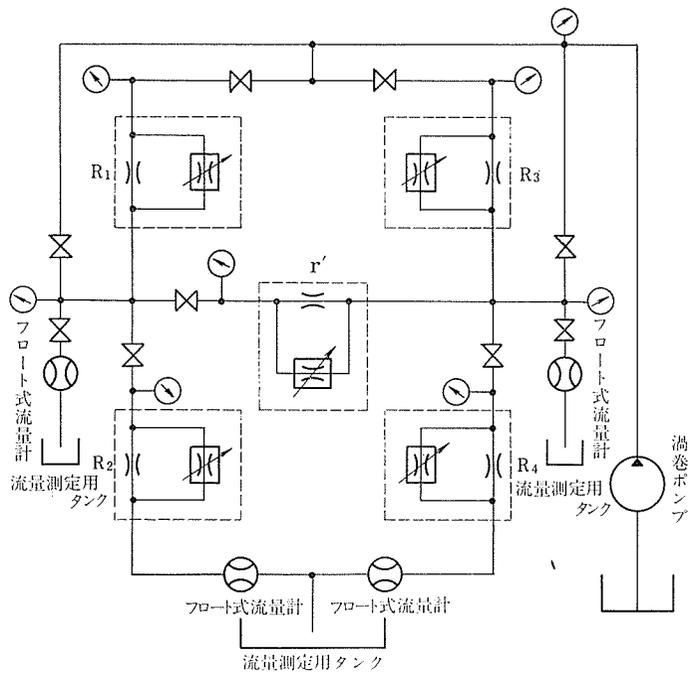


図12 実験装置回路図

出部に多くの流量を必要とするためである。また配管は圧力降下を少なくするためにできる限り径の大きい管で内面の滑らかな管を使用するようにし、本実験においては 30 m/m 径のビニール・パイプを用い、流体ブリッジ部分の配管は 1/2" 用ガス管を使用した。各管路の絞り抵抗は 1/2" ストップ・バルブと 2/8" メートル・コックとを並列接続にし、絞りの流体抵抗値の調節範囲を可能な限り大きくとるように心がけた。

各管路を流れる流量は管路に接続したフロート式の面積形流量計によって知るとともに、

流量測定用タンクを用いて同時に流量を測定し測定誤差を少なくするようにした。また流体ブリッジの各点における圧力はブルドン管圧力計を使用して測定し、これと並列に水銀柱マノメータをも同時に使って精密な圧力を求めた。

以下は各試験の実験方法およびその実験結果である。

(1) 2/8" メートル・コック 圧力流量特性試験

図13に 2/8" メートル・コックの流体抵抗値実験装置を示す。図において水圧源としては前述した渦巻ポンプを使用した。また絞り抵抗を流れる流量はフロート式面積形流量計を用いて求めた。絞り抵抗の一端は大気中に開放し、他端の圧力供給端の圧力はブルドン管圧力計および水銀柱マノメータにより測定した。実験方法はパラメータとして開度をとりメートル・コックの全開時のハンドル位置を 0° とし、ハンドル位置が 40° までを 10° ずつ変化させて開度を 5 段階において実験した。その実験結果を図14に示す。図における縦軸は絞り抵抗を流れる流量 q を cm^3/s および l/h の単位で示し、横軸には供給圧力 P をとりその単位は $\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ である。

実験結果より明らかなようにハ

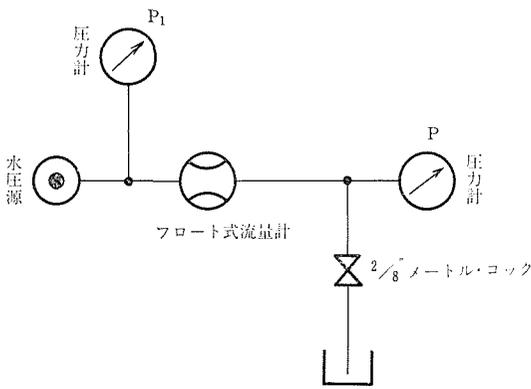


図13 2/8" メートル・コックの流体抵抗値実験装置

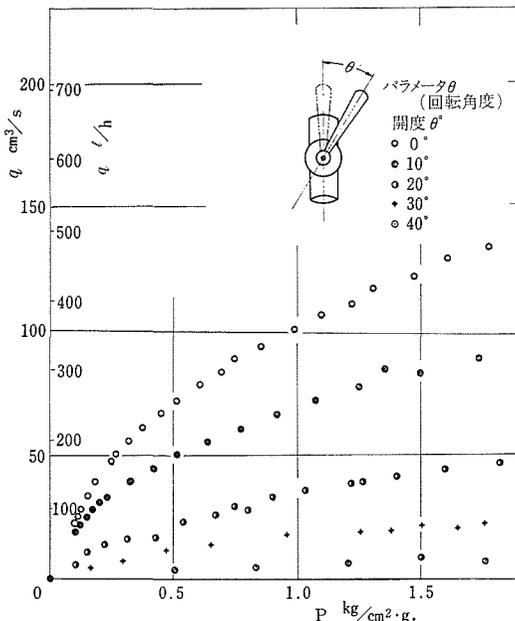


図14 2/8" メートル・コック流量-圧力特性 (開度をパラメータとする) (水温: 22.0 °C)

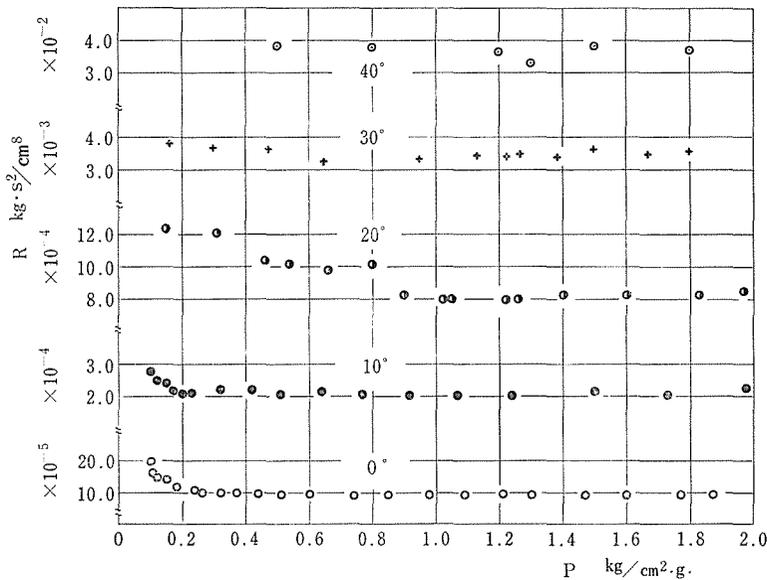


図15 2/8"メートル・コックの流体抵抗値(開度をパラメータとする)

ンドルの位置が 0° から 20° までは2次曲線に近い形をしており前提(1)が正しいことが認められる。しかしハンドルの位置が 30° および 40° になると絞り抵抗を流れる流量は急激に減少し、実験結果のバラツキも激しくなる。図14をもとにして2/8"メートル・コックの流体抵抗値を求めた結果を図15に示す。図において縦軸には絞りの流体抵抗値を $\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^8$ の単位で示し、横軸は供給圧力 P を $\text{kg}/\text{cm}^2\cdot\text{g}$ の単位で示した。作動液体は水を使用し実験時の水温は 22.0°C である。図はまたハンドルの位置すなわち開度をパラメータにとり5段階の実験結果を示した。図において開度 0° および 10° の場合には供給圧力 P が $0\sim 0.3\text{ kg}/\text{cm}^2\cdot\text{g}$ までは絞りの流体抵抗値 R が供給圧力の増加とともに徐々に減少しており、 P がそれ以上になるとほとんど一定な R の値が得られている。これは圧力が低い領域においては絞りを流れる流体の流れが不安定になり測定誤差も大きくなるためと思われる。したがって本報文において使用する絞りの流体抵抗値としては、供給圧力 P に無関係に一定となる値を使用する。

つぎに開度が 20° になると圧力 P が $0\sim 0.8\text{ kg}/\text{cm}^2\cdot\text{g}$ の領域において開度 0° 、 10° の場合と同様に流体抵抗値は供給圧力の増加とともに徐々に減少している傾向があらわれており、それより P が高くなると供給圧力 P に関係なく流体抵抗値はほとんど一定である。

また開度 30° になるといままでの開度 0° 、 10° および 20° の場合と傾向が若干異なり、圧力 P の低い範囲における流体抵抗値の減少の様子は顕著ではない。しかも実験値に若干のバラツキが見られる。このバラツキの現象は開度 40° になるともっと明確になり、一定なる流体抵抗値は得られない。したがって2/8"メートル・コックの使用範囲は開度 0° から 30° までに限定する。

なお実験結果をまとめた図14および図15は付録表1を基礎としたものである。

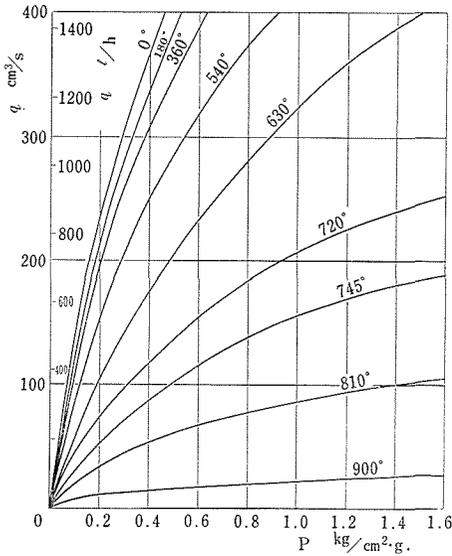


図16 1/2" ストップ・バルブ流量—圧力特性
(開度をパラメータとし全開時を0°とする)
(水温: 20.0°C)

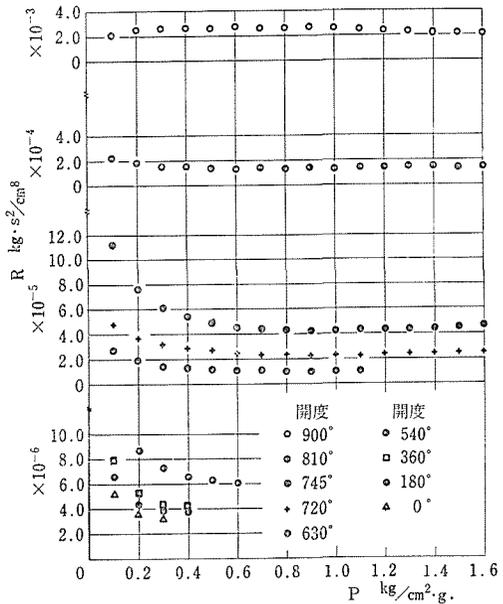


図17 1/2" ストップ・バルブの流体抵抗値

表1 1/2" ストップ・バルブの流体抵抗値の測定結果

		供給圧力 P kg/cm².g.															
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
ストップ・バルブ開度	0°	5.2 × 10 ⁻⁶	3.6	3.2													
	180°	6.6 × 10 ⁻⁶	4.4	3.9	3.8												
	360°	7.9 × 10 ⁻⁶	5.3	4.4	4.3												
	540°	13.5 × 10 ⁻⁶	8.7	7.3	6.6	6.3	6.1										
	630°	2.7 × 10 ⁻⁵	1.9	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0					
	720°	4.8 × 10 ⁻⁵	3.7	3.3	2.9	2.7	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5
	745°	11.2 × 10 ⁻⁵	7.6	6.1	5.4	4.9	4.5	4.4	4.3	4.2	4.2	4.3	4.3	4.3	4.4	4.5	4.6
	810°	2.2 × 10 ⁻⁴	1.8	1.5	1.5	1.4	1.3	1.4	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5
	900°	2.1 × 10 ⁻³	2.5	2.6	2.6	2.6	2.7	2.6	2.6	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1

つぎに図16に1/2" ストップ・バルブの流量—圧力特性を示す。バルブの開度をパラメータにとりストップ・バルブの全開時を0°とした場合のものである。全開時0°とバルブ開度900°との間を8段階に開度を変えてそれぞれの場合について流量と圧力の関係を示したものである。図において縦軸には流量qをとり、単位もcm³/sとl/hの2通りを示した。横軸には供給圧力Pをkg/cm².g.の単位で表わした。この実験は図14に示した2/8"メー

トル・コックの場合と同様な実験であるが、図16においては実験点を個々にプロットすることなく、それぞれの平均と見做せる部分を実線により結んだものである。

表1は図16に示した流量—圧力特性より求めた $\frac{1}{8}$ "ストップ・バルブの流体抵抗値の測定結果であり、これを図示したものが図17である。図よりわかるようにバルブ開度が 90° および 81° のように比較的絞りが大きい場合には絞りの流体抵抗値 R は圧力 P に関係なくほとんど一定値をもつことがわかる。

また開度が 745° 、 720° および 630° の場合にはメートル・コックのときと同じように供給圧力の低い領域においては、圧力が増加するにつれて流体抵抗値は減少する傾向にあり、ある圧力以上になると流体抵抗値は圧力に無関係に一定となる。

開度がそれ以上大きくなると傾向は同一であるが、開度が大きいために供給圧力を高くすることは困難になり実験は不可能であった。したがって流体抵抗値が圧力に無関係となる領域は得ることができなかった。

8. 実験結果と理論演算結果の比較

図18は式(40)で示される対角線流量 q の最大流量 q_0 と流体抵抗値の変化分 r/R との関係を図示したものである。この図は式(40)をもとにして抵抗値の変化の無次元表示された n を0から1.0までを100個に分割して電算機により理論演算し、その結果を図示し実線により結び付けたものである。この図より明らかなように最大流量 q_0 は n が小さい領域 ($0 \leq n \leq 0.3$) においては n の増加とともに曲線状に増大するが、 n の値が0.3より大きな領域においては、最大流量 q_0 は n の増加とともに直線状に増大する現象を読みとることができる。

つぎに図19、20および図21は対角線流量 q と対角線流体抵抗値 r' の無次元表示された m との関係を図示したものである。全ての図において流体抵抗値の変化分 r の無次元表示された n の値をパラメータとした。また図19、20および図21は P_1/R の値がそれぞれ1.0、10.0および20.0の場合である。

図は縦軸・横軸とも対数目盛でとり、縦軸には対角線流量 q を cm^3/sec の単位で示し、横軸には対角線流体抵抗値 m を示した。これらの図より P_1/R の値が大きくなると対角線を通る流量も大きくなることが明確である。しかもおのおのの図においてパラメータ

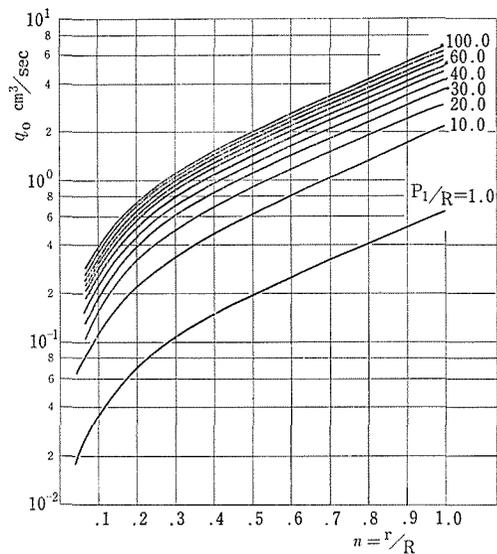


図18 定常状態における $q_0 - \frac{r}{R}$ 特性

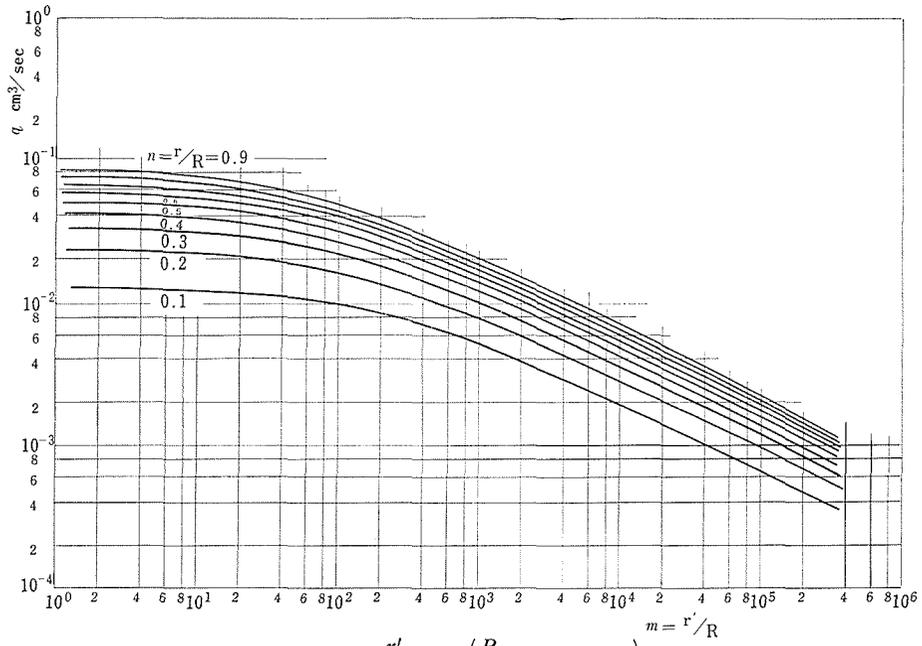


図19 $q - \frac{r'}{R}$ 特性 ($\frac{P_1}{R} = 1.0$ の場合)

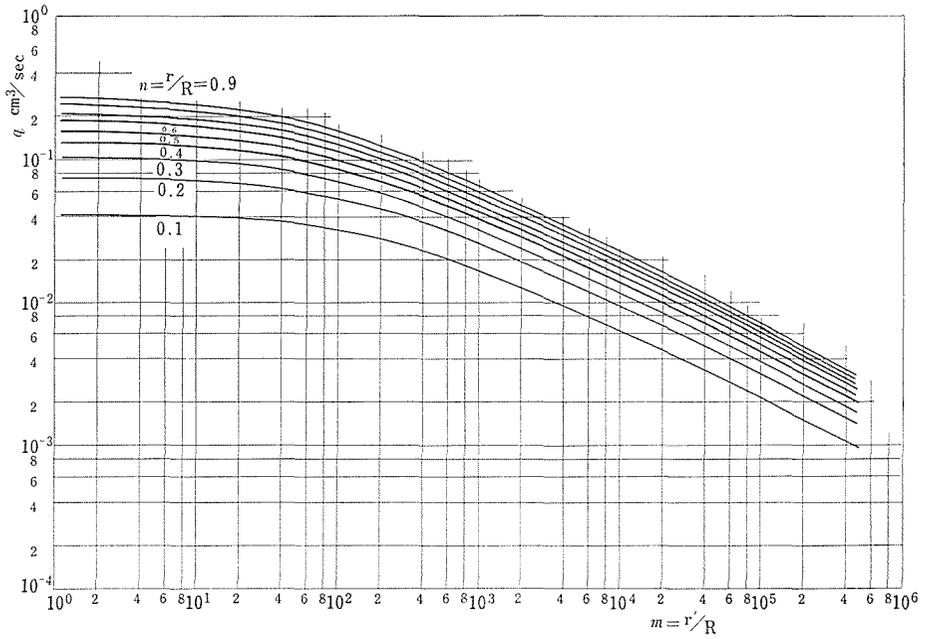


図20 $q - \frac{r'}{R}$ 特性 ($\frac{P_1}{R} = 10.0$ の場合)

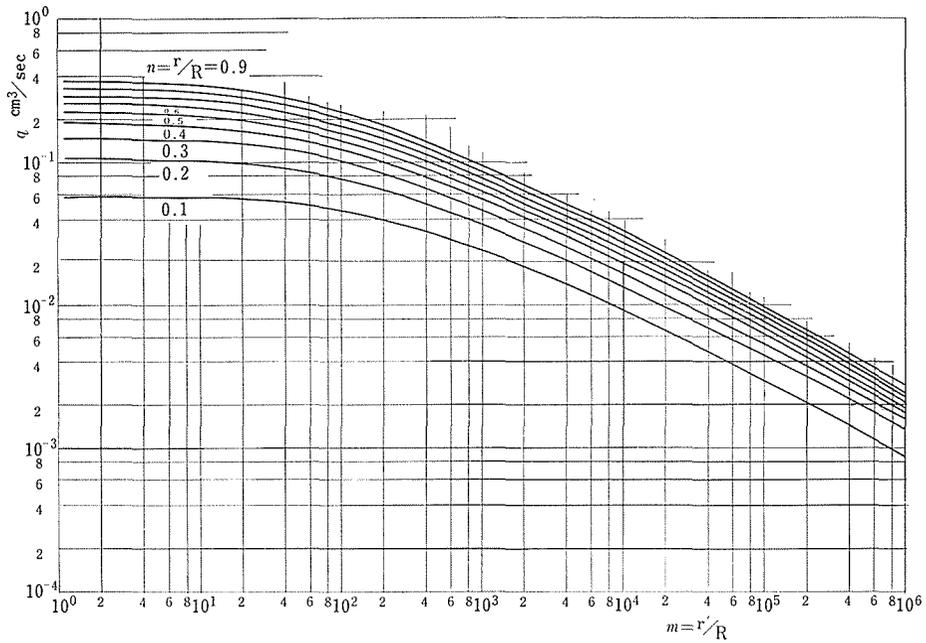


図21 $q - \frac{r'}{R}$ 特性 ($\frac{P_1}{R} = 20.0$ の場合)

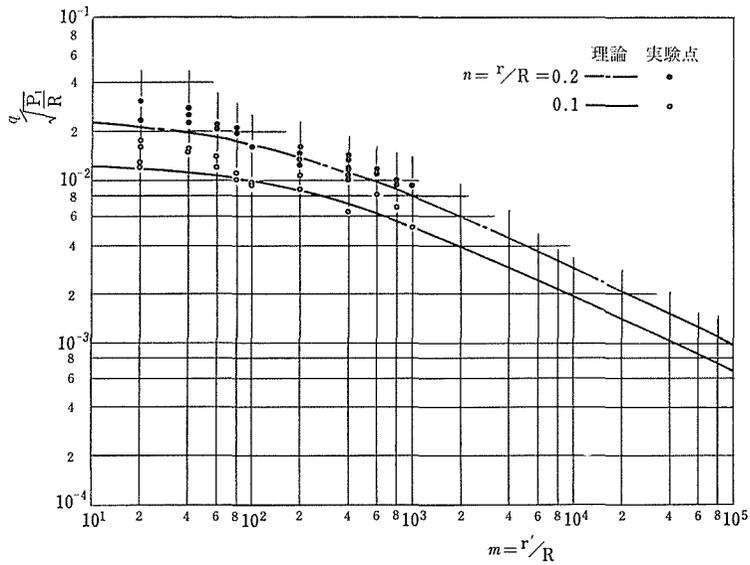


図22 流体ブリッジの対角線抵抗—対角線流量特性

にとつた n の値の増加とともに流量 q も大きくなる。

3つの図において重要なことは P_1/R の値に応じて m の値が 0 からある値 (すなわちこれは P_1/R の値によって変化する値である) までは、 m の値に無関係に流量 q はほとんど一定値となる点である。

図22には流体ブリッジの対角線抵抗—対角線流量の特性についての実験結果と理論演算結果との比較を示した。縦軸には対角線流量 q を無次元化した $q/\sqrt{P_1/R}$ をとり、横軸には対角線抵抗 m を示した。両軸ともに対数目盛にし、抵抗値の変化分 n をパラメータとした。図中の○、●印は実験値を示し、実線および一点鎖線はそれぞれに対応する理論値である。図にはパラメータ n の値のうち 0.1 と 0.2 の2つの特性を示したが、残りの流体抵抗値についても同一なる傾向が得られる。図よりはっきりするように実験値にはバラツキが見られるが、実験結果と理論演算結果の特性には共通点を見出すことができる。実験は m の値が 2 から 1000 までの間の範囲について行なったが、 m が 1000 より大きい領域の値については実験に困難を感じた。

9. 結 論

- (1) 流体ブリッジの対角線を通る流量 q の定常値は、 $\frac{P_1}{R}$ 、 $\frac{r'}{R}$ および $\frac{r}{R}$ の関数としてあらわすことができる。
- (2) 流体ブリッジの対角線を通る流量の最大流量 q_0 は $\sqrt{\frac{P_1}{R}}$ に比例する $n\left(=\frac{r}{R}\right)$ の関数である。
- (3) 流量 q の定常値は、可変抵抗部の変化量 r と各辺抵抗 R との比 n が増大するほど大になり、また一般的には対角線抵抗 r' と各辺抵抗 R との比 m が減少するほど大となる。
- (4) $0 \leq m \leq 1$ の領域においては、対角線流量 q の定常値は m に無関係にほとんど一定である。
- (5) $m \geq 3$ の領域においては、対角線流量 q の定常値をつぎのようにおくことができる。

$$q = \sqrt{\frac{P_1}{R}} \cdot m^{f(n)}$$

(ただし $f(n)$ は n の関数であり n によって規定される定数である)

- (6) したがって以上の結論より流体ブリッジを慣性負荷をもつ流体アクチュエータに接続した場合のインディシャル応答の最終値は、 $\frac{P_1}{R}$ 、 m および n をパラメータとする図集を作っておけば、直ちに図集の上から求めることが可能である。

10. 参 考 文 献

- 1), 2), 3) Allen C. Morse : electrohydraulic servomechanisms (1963) P. 4-41.

11. 付 録

付録表 1 は $\frac{3}{8}$ "メートル・コックの流体抵抗値の実験結果である。

付録表1 2/8"メートル・コックの流体抵抗値の実験結果

開度 実験項目 実験回数	0°			10°			20°			30°			40°		
	P kg/cm ² ・g.	q cm ³ /sec	R kg・s ² /cm ³	P kg/cm ² ・g.	q cm ³ /sec	R kg・s ² /cm ³	P kg/cm ² ・g.	q cm ³ /sec	R kg・s ² /cm ³	P kg/cm ² ・g.	q cm ³ /sec	R kg・s ² /cm ³	P kg/cm ² ・g.	q cm ³ /sec	R kg・s ² /cm ³
1	0.10	22.5	$\times 10^{-5}$ 19.7	0.10	19.0	$\times 10^{-4}$ 2.77	0.15	11.0	$\times 10^{-4}$ 12.4	0.16	6.5	$\times 10^{-3}$ 3.80	0.50	3.0	$\times 10^{-2}$ 3.80
2	0.11	26.0	16.2	0.12	22.0	2.48	0.22	14.0	11.2	0.30	9.1	3.65	0.80	4.6	3.80
3	0.12	28.0	15.3	0.15	25.0	2.40	0.31	16.0	12.1	0.47	11.4	3.60	1.20	6.0	3.65
4	0.15	33.0	13.8	0.17	28.0	2.17	0.46	21.0	10.4	0.65	14.0	3.34	1.30	6.3	3.32
5	0.18	39.0	11.8	0.20	31.0	2.08	0.54	23.0	10.2	0.95	16.8	3.35	1.50	6.4	3.70
6	0.24	47.0	10.9	0.23	33.0	2.11	0.66	26.0	9.76	1.14	18.2	3.45	1.80	6.9	3.70
7	0.26	50.0	10.4	0.32	38.0	2.22	0.80	28.0	10.2	1.23	18.8	3.45			
8	0.32	56.0	10.2	0.42	44.0	2.17	0.90	33.0	8.26	1.27	19.0	3.50			
9	0.37	61.0	9.92	0.51	50.0	2.04	1.03	36.0	7.95	1.39	19.8	3.52			
10	0.44	67.0	9.82	0.64	55.0	2.12	1.22	39.0	8.02	1.50	20.0	3.65			
11	0.51	72.0	9.84	0.77	61.0	2.07	1.26	40.0	7.88	1.67	21.8	3.50			
12	0.60	79.0	9.61	0.92	67.0	2.05	1.40	41.0	8.33	1.80	22.3	3.62			
13	0.69	83.0	10.0	1.07	72.0	2.06	1.60	44.0	8.26						
14	0.74	89.0	9.34	1.24	78.0	2.04	1.83	47.0	8.28						
15	0.85	94.0	9.62	1.50	83.0	2.18	1.97	48.0	8.55						
16	0.98	101.0	9.61	1.73	89.0	2.18	2.29	50.0	9.16						
17	1.09	107.0	9.52	1.98	93.0	2.29									
18	1.21	111.0	9.82												
19	1.30	117.0	9.50												
20	1.47	123.0	9.72												
21	1.60	129.0	9.61												
22	1.77	134.0	9.86												
23	1.87	139.0	9.69												

Summary

The Study on Peculiarities of the Fluid Bridge when it works (The 1st report : Regular peculiarities)

Kunihiko HAMA

(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

This report is on the experiment and the study of the regular peculiarities of the fluid bridge which is formed of four fluid resistances in the stream of such fluid as oil and water.

The aim and essential points of this report are as follows.

The nozzle flapper valve, the pilot valve of the under lap, and the jet pipe valve frequently used in the field of the control can be replaced by the fluid bridge which is formed of four fluid resistances.

In the case of the fluid resistance which forms no line, we can survey the change of the flux easily and especially it is very important to calculate the ordinary valve in order to know the transitional response namely the moving peculiarities of the flux, and we aim at knowing the regular velocity under the ordinary condition at the time of commanding the fluid actuator with the fluid bridge.