機を設計試作した。重型は充分目的を達するものであつたが軽型は更に改良の必要があることが判つた。これ等の試験機を大越式結合度試験機 (Okoshi Grade Tester) と名づけた。

終りに本研究に際し御支援を頂いた機械工業技術委員会研削砥石専門委員会委員長熊谷直次郎博士、副島委員外各委員に対し、又試験機の試作に御協力下された東京衝器製造所田中技師外一同に対し厚くお礼申上げる。

尙本研究の一部は文部省科学試験研究補助金を以つてなされたものであることを附記する。

(1952, 1 月 12 日受付)

参照*

- (1) 大越諄, 渡辺清, 渡辺半十; (I 報) 精密機械 18 巻 4 号, 昭 27-4
- (2) 渡辺半十; 機械試験所々報, 5 巻 6 号, 昭 26-10
- (3) 大越諄; 精密機械, 16 巻 3 号, 昭 25
- (4) 大越諄, 渡辺半十; (III 報) 精密機械 18 巻, 9 号, (昭 27-9) に発表の予定

空気マイクロメータの静特性 (第 4 報)*

531.714.082.36

——低圧式厚み計型 (続)——

正会員 塚 原 鶴 夫**

The Statical Characteristics of Pneumatic Micrometers (Part 4)
——Thickness Comparator Types of Low Pressure (continued)——

Tsuruo Tsukahara

In the first report we treated the statical characteristics of low pressure- and vacuum-type pneumatic gages of length comparator type in that case $d_1 > 3d_B$ where d_1 is the diameter of the jetting opening and d_B is the diameter of the orifice bore for supplying air to the back pressure measuring chamber. In this report the characteristics in case of $d_1 < d_B$ were obtained. The results were given from general relations between non-dimensional quantities and can be used to design air gages and various automatic governing valves of fluid type.

1. 序

空気マイクロの倍率と比較測定精度は、初圧 P_A とともに流入孔径 d_B の大きさと噴出口形状 (内径 d_1 , 鏑外径 d_2) の選たういかにかかっている。筆者はさきに⁽¹⁾⁽²⁾低圧式 (初圧水柱, 数 m 以下) に対して $d_1 > 3d_B$ なる場合についてはそれらの関係する静特性を報告し、図 20 a) b) にあたる型については解析し終つたが、一般的にはその特性に流体的寸法効果すなわち

R_c 数も関係し設計公式は複雑になるきらいがあつた。実際には噴口内径 d_1 は指圧室流入孔径 d_B に近い値をとらねばならぬ場合もあり、またその方が目的に合う場合もあるので、本報においてはとくに現象の複雑な噴口の小さい $d_1 < 3d_B$ なる場合を主にとりあげて噴出口大きさと形状とによつて静特性がいかに変るか、その得失を一般的に検討して空気マイクロメータおよび同原理の流体式調節器の設計の資としたい。求めた結果は一般的に無次元として表わされ、実験は低圧式と低真空式の空気および圧力式の水マイクロメータについてなされた。

* 昭和 26 年 6 月 29 日精機学会長岡講演会で講演

** 金沢大学工学部

図 20 両口の大きさのプロポーシオンと噴流の有様
a) b) $d_1 > 3d_B$, c) d) $d_1 < 3d_B$
(A, C 室は実際は大きい)

2. 噴出口内径の大小の効果

図 20 b) d) 両図の特性を模型的に比較してみる事にする。いま d) は噴口径 d_1 が流入孔径 d_B と等しくかつ長さも等しいとする: $d_1 = d_B$, b) は $d_1 = 3d_B$ とする。まず対壁がない時つまり被測間隔 $h \rightarrow \infty$ の時には丁度空気マイクロによる「孔径検査」⁽³⁾と同じ原理となり、d) の型では両口の流量がつり合つて指圧 P_c は初圧 P_A の半分: $P_c = (1/2)P_A$ となるが、b) の型ではほぼ $P_c = 0$ (大気圧) となる。すなわち噴口の内径の長さの管 (噴口管とよぶことにする) が特性に影響ある無しの違いがある。

d) の型の噴口の面積は $(1/4)\pi d_1^2$ であるから、放射環状断面積 $\pi d_1 h$ がそれに等しい時近似的に流量が飽和になる。つまり等値して得られる間隔 $h^* = (1/4)d_1$ の時から指圧 P_c^* は $(1/2)P_A$ になつて飽和すると近似的に考えられる。もつとも h^* くらいの間隔の広さになると噴口管内の速度は非常に大きくなるから、むしろ対壁に噴流が衝突する事になり流れは噴口内縁から離れ (剝離 Separation) てのち縮流が (Contraction) 起るから流量係数は小さくなり、流量は h^* にともなわなくて幾分小さ目になる。従つて図 21 の様に h^* のところで指圧 P_c は $P_c^* = (1/2)P_A$ より幾分大きくて、それより間隔が広くなるにつれて P_c^* に漸近する事になる。一方 b) 図の場合は特性全範囲にわたつて殆んど平行放射状に噴出すると考えられ

図 21 縁なし型噴口の大小による特性の比較模型図
る⁽⁴⁾。

もし噴口内径が小さく長い場合にはさらにその噴口管の粘性摩擦も加つてきて飽和指圧 P_c^* はもつと大きくなるし、一般にその摩擦の影響は流量をおさえる方に働くから P_c の下がりがたが少なくなり倍率は悪くなる。これらの効果は噴口 d_1 が $3d_B$ より小さくなる程いちじるしくなるので、既報⁽¹⁾においてそのとり扱いから除外されているのである。

3. $d_1 < 3d_B$ なる時の静特性

(i) 噴口に縁のない場合——d) 図の場合
既報⁽¹⁾において、図 20a) の場合には

$$Z = 0.0115 \left\{ \frac{R_e}{\log(d_2/d_1)} \right\}^{2/3} \cdot \left(\frac{d_B}{r_2} \right)^2 \cdots (1)$$

ただし

$$R_e = (d_B/\nu) \sqrt{P_A/(2\rho)}, \quad r_2 = (1/2)d_2$$

なる数値 Z が特性の相似因数になり、 Z が大きな値 ($> 2 \sim 3$) の場合には噴流の平行放射状流の摩擦圧損が慣性速度圧損にくらべて省略できる事を述べた。さて図 20d) の様な場合には d_B/r_2 は比較的大きく $d_2/d_1 \rightarrow 1$ だから (1) 式の Z の値は大きな値になり一般に特性は慣性拡大の原理にあたる。故に計算には粘性摩擦を省略して、間隔 h が $(1/4)d_1 = h^*$ より幾分狭い間隔までの場合に対して流量は両口において

$$Q = c_B (\pi d_B^2/4) \sqrt{2(P_A - P_c)/\rho}$$

$$Q = c_D \cdot \pi d_1 h \sqrt{2P_c/\rho}$$

ρ は単位体積質量、 $c_B \cdot c_D$ は両口の流量係数でほとんど摩擦の影響がなくて縮流の効果のみとみてよい。この両式を等値し、 $c_B = c_D$ という実用的近似をいれて整理すれば

図 22 $d_1/d_B < 3$ にして噴口縁なし型の静特性 ($M = |dP_C/dh|$)

$(P_A - P_C)/P_C = \{4(h/d_B)(d_1/d_B)\}^2 \cdots (2)$
この式をさらに整理して P_C/P_A と (h/d_B) (d_1/d_B) の関係とし、 d_1/d_B を副変数にとつて $h \rightarrow \infty$ の時両口流量係数の等しい (流入孔管と噴口管とが形状相似に近い) 場合を想定してその飽和指圧 P_C^* を既報(3)より与えて、前節の考えをもとり入れ静特性曲線を求めると 図 22 の太線の如くなり、その倍率の無次元値 $(dP_C/dh)(d_B/P_A)(d_B/d_1)$ は細線の様になる。ただし倍率曲線は個々の場合ではない。ここで最大倍率は

$$P_C = 0.75P_A, h = 0.144d_B(d_B/d_1) \text{ なる時に}$$

$$M = |dP_C/dh|_{\max} = 2.6(P_A/d_B)(d_1/d_B) \cdots \cdots (3)$$

(ii) 噴口に鰐のある場合—c) 図の様な場合 噴流の現象は複雑であつて、一応つぎの様な過程を考える事ができる。間隔 h が 0 から段々広くなる場合順に 1) 鰐の外縁直径 d_2 のところまで流れが平行にふき出る：図 20a) と同様。2) 対壁への噴流の衝突速度が大きくなつてきて縮流が増してくる。3) 噴口の内縁から剝離して行く：図 20c) の下側。

この第2第3の過程はいわば間隔の割には抵抗が割合に大きくなるので、流量が割合に増さない結果指圧の下がり方が少くなり倍率が小になる傾向を生ずる。第1の過程がそのまま続くといふ仮定すれば前項 (i) の d_1 のかわりに d_2 とかえればよいから、その場合の最大倍率は

$$P_C = 0.75P_A, h = 0.144d_B(d_B/d_2) \text{ なる時に}$$

$$M = |dP_C/dh|_{\max} = 2.6(d_A/d_B)(d_2/d_B)$$

$$\cdots \cdots \cdots (4)$$

また第3の過程のみでとり扱うとすれば式(2)(3)となるわけである。

従つて一般に式(3)(4)の計算値は両極端の場合であり、実際はどの様な特性となつてゐるかを静特性の代表たる最大倍率値について実験値の整理をしてのち吟味する事とする。

鰐が非常に広い場合には式(1)の Z の値は小さくなり Z の値を標準にして第1報⁽¹⁾で処理さるべきである。

4. 倍率実験値とその整理および吟味

実験方法は既報⁽¹⁾に全く同じで、噴口の同じものは実験番号も同じである。 d_1/d_B が3に近いものを第1報から若干抜いてあるがほとんど新しい条件の組合せて、その倍率値とともに表5に示した。噴口の鰐の大きさの範囲は外径対

倍率式・初圧500mm水柱						倍率空式					
No.	d_1	d_2	d_3	倍率		No.	d_1	d_2	d_3	倍率	
13	4	4.6	123	3.150	▲	29	500	391	524	1.59	●
14	23	43	103	5.150	△	30	1000	391	524	1.59	●
15	1.05	4.2	123	1.240	▽	32	1750	391	524	1.59	●
16	1.02	4.3	77	3.700	▼	33	500	4	6	1.59	□
17	39	84	123	11.480	◇	34	1000	4	6	1.59	□
18	6	8	123	5.200	□	35	1500	4	6	1.59	□
21	6	12	123	3.140	◎	36	1750	4	6	1.59	□
22	2.6	12	123	3.310	◎						
37	1	4		1.100	◆	水マイクロメータ					
				3.700		28	3000	4	5.37	1.6	●
38	1	2		1.530	◆	27	2000	4	5.37	1.5	●
39	2	4		3.900	◆						
40	3	4	123	3.220	◆						

表5 実験条件と倍率実験値

単位は mm, 倍率は mm 水柱/mm
初圧は mm 水柱

内径の比が 1.15~4 の程度である。

これらの実験値 (倍率値) を整理したのが 図 23 で、左側の図は噴口径対流入孔径の比 d_1/d_B を横軸にしてあり実線は式(3)：

$$M = |dP_C/dh|_{\max} = 2.6(P_A/d_B)(d_1/d_B)$$

をあらわし右側の図は噴口鰐外径対流入孔径の比 d_2/d_B を横軸にして同じ資料をプロットしてあり実線は式(4)を表わしている。

この図から得られる事、および総合的事を列挙すると

(i) 倍率—— $d_1/d_B < 3$ では一般に噴口内縁

附近から流れが剥離するとみなす式(3)の値に近いところに大体まとまり式(3)を下限として

$$|dP_C/dh|_{\max} \cdot (d_B/P_A) \cdot (d_B/d_1) = 2.6 \sim 4.2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

なる式の範囲にはいる。総体的に実験値は散っているが理論式と対応させていうならば、図23

図 23 倍率実験値と、二種の特性限界計算値 ($d_1/d_B < 3$ の実験値に対して)

の理論線のうち左側の線たる式(3)を下限とし右側の線式(4)を上限としている。前節(ii)の所論でいうならばその第1仮定の結果を上限とし第3仮定の結果を下限としている事になる。

$d_1/d_B < 1$ では実験値が式(3)を表わす実験線より下に出ているが、これは縮流大きくかつ噴口管摩擦損失も加わっているからで、もともとこの場合は飽和指圧 P_C^* も大きくて直線的拡大に近い特性もなく実用性にとぼしい様である。

なお低真空式と水の場合の実験値 ($d_1/d_B > 1.9$, $d_2/d_1 = 1.3 \sim 1.5$) はむしろ噴流の剥離なくかつ縮流小とする(4)式の線(図 23 右側)に一致する。

(ii) 噴流間隔の適当値 h_M の値 第1報⁽¹⁾にも述べた様に間隔を測定する事には種々な誤差の危険をふくむ故にここには実験値はとらなかつたが、第2報⁽⁵⁾が針金計型における対応現象の計算線と実験値でありそれらの一致を参考として、これとほぼ相似な本場合に対しても計算値を基本として倍率の結果と同様に適被測隙の無次元値 h_M/d_B は $0.144(d_B/d_1)$ を上限(図 23 左側の破線)とし $0.144(d_B/d_2)$ を下限(同図右側の破線)とみてよい。

一般に初圧の影響をうけない特徴がある。

(iii) 緑なし型 この型では $d_1 \doteq d_2$ であるから式(3)(4)は同じになり、上述の上限下

限が一致してほぼ式(2)(3)および図 22 をそのまま使う事が出来て簡便になる。実際問題としてはこれを作る事困難であり、またきずがつき易くて長もちはしない欠点がある。本実験条件中最もこれに近いものでも縁幅 0.5mm ($d_2/d_1 = 1.15$) であり、すでに被測適隙の数倍あつて緑なしとはいえないが、その実験値は本項所論とよく合っている。さてこの型は式(1)Z の値が大きくなり流体特性変化その他による誤差もなくなる長所をもつから、図 20e) の様な噴口を代用して球面に穿孔しきずのつかない様な設計と使い方をするのが得策と思う。

5. 結 言

噴口 d_1 と流入孔 d_B の大きさが $1 < (d_1/d_B) < 3$ の範囲内でかつ緑なしに近い噴口の場合には図 22 を静特性とする事ができ、また特性上は流体特性変化の影響もうけず、極めて単純な設計公式でありもし初圧も変えられる装置を有すればこの型式の口の組合せのみで目的を達する事ができて設計が簡便に統一される。一般に d_1/d_B が小になる程倍率は d_1/d_B に比例して下がるが適被測隙は逆比例して大きくなるという特徴をもっている。 $d_1/d_B < 1$ では実用性にとぼしい。

本結果は流体のいかんをとわず非圧縮性とみなされる圧力式と真空式の空気マイクロメータと同原理のものに適用でき、空気では低圧式と低真空式の厚み計型ならびに内径ゲージ用プラグ型などの空気ゲージに、また液体では諸種流体式調節器⁽⁶⁾の設計の資とする事が出来る。

終りに東大運沼教授の御指導に深謝すると共に文部省科学研究費によるものなる事を附記して感謝したい。(1952, 1 月 26 日受付)

註(1) 塚原, 精密機械, 17 巻 9 号 (1951)302 頁

(2) 塚原, 機械学会論文集, 17 巻 56 号 (1951) 10 頁

(3) 塚原, 機械の研究, 3 巻 2 号 (1951)161 頁

(4) この仮定が第1報文献(1)でとりいれられ、結果としての特性はよく実験と合っていた。

(5) 塚原, 精密機械, 17 巻 11-12 号 (1951)387 頁

(6) 例えばパイロットバルブ, 板谷外, 機械学会 531 回講演会前刷 56 頁 (1951-12)