531.717.082.36 : 532.525

半径流ノズルに関する研究*

(第4報, 空気マイクロメータの静特性)

萩 原 辰 弥**

Studies on the Characteristics of Radial-Flow Nozzles

(4th Report, Characteristics of Pneumatic Micrometers)

by Tatsuya HAGIWARA

Characteristic equations of the low pressure pneumatic micrometers are derived from the results of the theoretical analysis obtained in the 1st and the 2nd report. To prove these equations, experiments are carried out with respect to the characteristics of the outward and inward flows with a single nozzle and the push-pull and V shape characteristics with a combined nozzle. Experimental results show good consistence with theoretical values. The equation for outward flow in a single nozzle is compared with two typical equations of papers published previously, and it is found that the present one gives the values closer to the experimental results than others.

1. 緒 言

半径流ノズルの特性について第1報⁽¹⁾および第2報⁽²⁾で理論的解析を行ない, 第3報⁽³⁾で実験によってその結果が実用上十分に満足できることを証明した. この一連の研究の目的は空気マイクロメータの静特性の計算式を求めることにあるので, 第4報でさきに得られた結果から静特性式を誘き, 実験値と比較する.

いままでに, 空気マイクロメータの静特性に関する研究は数多く発表されている. その代表的なものの一つに川崎の研究⁽⁴⁾があるが, これは流体の粘性だけを考慮し, 流れは初めからポアズイユの流れであるとしている. さらに内部絞りの特性を線形とみなした簡単なものである. この結果はきわめて特殊な条件のときだけに適用できるもので一般的でない. ついで石原⁽⁵⁾は流体の速度ヘッドを考慮に入れて特性式を導いた. この場合, 内部絞りを流量測定用オリフィス板と同様に取扱ったので, かなり実際に近い値を与えた. この形の特性式を用いた論文の数はきわめて多い. しかしこの式も流れは初めからポアズイユの流れと考えて導かれている. その後, 塚原⁽⁶⁾は上記の特性式の二つの点を改めた. その一つはノズル周辺から吹きだす流体の速度ヘッドを平均速度から得られる値に $54/35$ をかけたことである. 速度分布が放物線状である場合には

当然この係数を用いるべきである. 他の一つは, この速度分布を得るために必要なエネルギーを加算したことである. そこで採用された係数の $2/35$ という値は, Schlichtig⁽⁷⁾ が平行板間の二次元流れについて求めた数値であるので半径流れにそのまま適用できるかどうか疑問である.

そのほかには半径流ノズルに着目して得られた特性式は見当らない. N. P. L. から発表された数々の論文⁽⁸⁾は測定ノズルの円筒形の流出面積に流量係数をかけているだけである. 流量係数がすきまおよびノズルの内外径比によって変化することは明らかであるので, これを一定として取扱う方法は一般的でない. 高圧式あるいは真空式空気マイクロメータの特性式はこの形式を用いたものが多い.

本報ではまず単独ノズル空気マイクロメータの外向き流れ特性式を導く. この形式は一般の空気マイクロメータで用いられているものであり, 従来の特性式と比較検討する. ついで内向き流れ特性式を導く. この特性は従来問題にされなかったが, 次に述べる二つの特性式を導くために必要である. これによって牧野⁽⁹⁾が発表した複合ノズルをもつプッシュ・プル式空気マイクロメータの特性式を導く. この原理はすでにヨハンソン社のデルタメータに用いられているが, 実験値と比較された特性式は発表されていない. さらにV形特性をもつ空気マイクロメータの特性式を導く, この特性は振幅測定⁽¹⁰⁾に応用されるたいせつな特性であ

* 昭和 34 年 4 月 4 日 第 36 期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 36 年 6 月 21 日.

** 正員, 明治大学工学部 (東京都千代田区神田駿河台).

る。以上の諸特性式を実験結果と比較しその適用性を検討する。

本報で用いられるおもな記号は次のとおりである。

- A : ノズル部の粘性抵抗を表わす無次元量
 B : ノズル部の慣性抵抗を表わす無次元量
 C : 内部絞り部の抵抗を表わす無次元量
 G : 流体の性質, 空気源圧力 p_0 (ゲージ) および装置の代表寸法 r_1 を含む無次元量
 α : ノズルの内外径比 ($=r_2/r_1$)
 ξ : 圧力損失係数
 R : 流れの状態を表わす無次元量 $\frac{Qh}{2\pi r_1^2 \nu}$
 (レイノルズ数に相当する値)
 r_1 : ノズル入口の半径で装置の代表寸法
 d_e : 内部絞りの相当径
 p : 測圧室内のゲージ圧力
 p_∞ : h を無限大としたときの p の値
 p_1 : アタッチメントボックス内のゲージ圧力
 H : 複合ノズルのすきま全幅の 1/2

2. 空気マイクロメータの静特性式

2.1 単独ノズルの外向き流れ特性式 測定ノズルを流れる空気の容積流量を Q , すきまを h , ノズルの内径を $2r_1$ とすると第3報(1), (2)式によって

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{2\pi r_1 h} \right)^2 (\xi - 4\xi) + p_\infty \\ 4\xi &= 4 \left(\frac{h}{r_1} \right)^2 \left\{ \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^4 - 1 \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで r_0 は垂直管の内半径であり, したがってノズル内角の丸みは $r_1 - r_0$ となる。普通使用される測定ノズルの内外径比は大略2前後であり, $R = \frac{Qh}{2\pi r_1^2 \nu}$ は150より小さいからノズルの出口で流れはポアズイユの流れになっている。内外径比が小さくても内径が大きくなった場合は, R が小さくなるのでやはりポアズイユの流れが存在する。内径と同時に内外径比が小さく, 内部絞りの穴径が大きくなるとノズル出口では境界層がすきまを満たさない状態になることもあるが, 実際にこのような状態はきわめてまれにしかおきない。それで(1)式の ξ は[II]領域に対して与えた理論値を用いる。すなわち第1報(30)式によって

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{54}{35\alpha^2} + \frac{24}{R} \log_e \alpha + f(R) \\ R &= \frac{Qh}{2\pi r_1^2 \nu} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$f(R)$ は R だけで定まる値であり, α はノズルの内外径比である。すきま h を無限大にしたときの測圧室

の圧力 p_∞ は一般に

$$p_\infty = \zeta_1 \frac{8\mu l}{\pi r_0^4} Q + \zeta_2 \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{\pi r_0^2} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。ここで l はノズル垂直管の有効長さである。 ζ_1 および ζ_2 はノズルの形状および取付方法によって定まる係数である。(1), (2)および(3)式から p を求めると

$$p = \frac{6\mu}{\pi r_1^3} \times 10^3 A Q + \frac{\rho}{8\pi^2 r_1^4} \times 10^2 B Q^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} A &= \left(\frac{r_1}{10h} \right)^3 \log_e \alpha + \frac{4}{3} \zeta_1 \left(\frac{l}{r_0} \right) \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^3 \times 10^{-3} \\ B &= \left(\frac{r_1}{10h} \right)^2 \left\{ \frac{54}{35\alpha^2} + f(R) \right\} \\ &\quad + 4 \left\{ (\zeta_2 - 1) \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^4 + 1 \right\} \times 10^{-2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

一方恒圧さうのゲージ圧力を p_0 , 内部絞りの直径を d およびその流量係数を C_f とすると

$$\left. \begin{aligned} p_0 - p &= \frac{\rho}{8\pi^2 r_1^4} \times 10^2 C Q^2 \\ C &= (r_1/d_e)^4, \quad d_e = \sqrt{C_f/0.8} \cdot d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで d_e は内部絞りの相当径であって絞りの流量係数を 0.8 に相当させたときの d の換算値である。実験に用いられた0.5~2.0mm程度の小孔径のオリフィス板で差圧が水柱 500mm 以下のときの流量係数はだいたい 0.7~0.9 という値になる。したがって相当径 d_e は実際の穴径 d とたいしてちがわない。(4)式と(6)式とから Q を消去すると

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_0 - p}{p_0} &= \frac{C}{B+C} \frac{\sqrt{A^2 + G(B+C)} - A}{\sqrt{A^2 + G(B+C)} + A} \\ &= \frac{C \{ \sqrt{A^2 + G(B+C)} - A \}^2}{G(B+C)^2} \\ G &= \frac{p_0 r_1^2}{72\nu^2 \rho} \times 10^{-4} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

A と B とはノズル部でそれぞれ Q と Q^2 とに比例する圧力損失を表わす無次元量とともに h を含んでいる。 C は内部絞りにおける抵抗の係数であって, その値は装置によってきまり h に無関係である。 G は初圧 p_0 , 装置の代表寸法 r_1 および流体の性質を含む無次元量で, 水柱 500mm の空気を用いるならばその値は r_1 だけで定まる。(5)式の ζ_1 および ζ_2 は第3報で用いたようなノズルで普通の取付け方をすれば近似的に

$$\zeta_1 = 1.00, \quad \zeta_2 = 1.30$$

としてよいことが予備実験の結果からわかった。また(4)式の $f(R)$ の値は第1報で述べたように $10 \leq R \leq 150$ の範囲では 0.130 ± 0.008 となるが, 空気マイク

ロメータの R はだいたいこの範囲にあるので計算に
 当って

$$f_{(R)} = 0.130$$

が用いられる。 R が小さいときは ξ が大きいので
 0.008 はきわめてわずかな部分になる。また R が大
 きくなるとこの省略部分は ξ の 2% 程度にまでなる
 が、このときは h が大きく、したがって $(\rho/2)V^2$ が
 小さいので圧力としてはきわめて小さい値となる。

2.2 単独ノズルの内向き流れ特性式 この場合の
 圧力損失係数 ξ は第 2 報で述べたようにノズルの内
 外径比 α と R との組合せによって三つの異なった式
 で表わされる。外向き流れの場合はノズルの出口がほ
 とんど [II] の領域にあって、これが [I] の領域にな
 ることはきわめてまれであった。しかし内向き流れの
 場合は領域が変わることが、それほどまれでないが、ノ
 ズルの構造上 R が一般に小さく、出口が [II] の領域
 にあることが比較的多い。

混乱をさけるため ξ と R をノズル内径 r_1 基準に
 統一して、 ξ に対して [II] の領域の式を適用する。

第 2 報 (13) 式より

$$\xi = \frac{54}{35} + \frac{24}{R} \log_e \alpha + \frac{f_{II}(R)}{\alpha^2} \dots\dots\dots (8)$$

右辺の最終項は R と α との関数であるが、第 1 お
 よび第 2 項に比べて小さいので、一般に用いられる
 $\alpha = 1.5 \sim 3.0$ の範囲に対して近似的に

$$f_{II}(R)/\alpha^2 \doteq \frac{0.07}{\alpha} - 0.013 \dots\dots\dots (9)$$

とする。(9) 式は R が小さければ* きわめてよい近
 似値を与える。

またエネルギー回復 $\Delta\xi'$ の式 [第 3 報 (4) 式] は複
 雑なので、取扱いやすい式で近似させる。すなわち

$$\Delta\xi' \doteq 0.540 \left(\frac{r_1}{r_0} \right) - 0.780 \\ + \left(1.750 + 0.900 \frac{r_1}{r_0} \right) \frac{h}{r_0} \dots\dots\dots (10)$$

p_∞ については (3) 式と同じ式が用いられるが、第
 1 図 (a) に示すようにノズルの中央に半径 r_d のロッ
 ドがあるので ζ_2 のかわりに

$$\zeta_2' = \zeta_2 \left(\frac{r_0^2}{r_0^2 - r_d^2} \right)^2 \dots\dots\dots (11)$$

を用いねばならない。 ζ_2 は 1.30 とする。

そこで外向き流れの場合と同様の計算を行なうと p
 の式は (7) 式と同一になる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_0 - p}{p_0} &= \frac{C}{B+C} \frac{\sqrt{A^2 + G(B+C)} - A}{\sqrt{A^2 + G(B+C)} + A} \\ B &= \left(\frac{r_1}{10h} \right)^2 \left(2.310 + 0.070/\alpha - 0.540 \frac{r_1}{r_0} \right) \\ &\quad - \left(\frac{r_1}{10h} \right) \left(\frac{r_1}{r_0} \right) \left(0.175 + 0.090 \frac{r_1}{r_0} \right) \\ &\quad \times 10^{-1} + 4\zeta_2' \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^4 \times 10^{-2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

A, C および G は外向き流れの場合と同じである
 [(5), (6) および (7) 式]。

2.3 複合ノズルのプッシュ・プル特性式 第 1 図
 (b) あるいは (c) に示すようなノズルを用いたときす
 きまの変化と圧力 p_1 の関係がプッシュ・プル特性とな
 る。上下のすきまの和 $2H$ は装置によって一定とな
 り、 $2H$ の行程によって p_1 は p_0 から完全に 0 にま
 で変化する。

外向き流れの部分に対しては、測圧室内の圧力を p
 とすると

$$p - p_1 = \frac{6\mu}{\pi r_1^3} \times 10^3 A_1 Q + \frac{\rho}{8\pi^2 r_1^4} \times 10^2 B_1 Q^2 \dots\dots\dots (13)$$

ここで $A_1 B_1$ は (5) 式と同じである。内向き流れの
 部分に対しては

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \frac{6\mu}{\pi r_1^3} \times 10^3 A_2 Q + \frac{\rho}{8\pi^2 r_1^4} \times 10^2 B_2 Q^2 \\ A_2 &= \left(\frac{r_1}{10h'} \right)^3 \log_e \alpha' + \frac{4}{3} \zeta_1 \left(\frac{l'}{r_0'} \right) \left(\frac{r_1}{r_0'} \right)^3 \times 10^{-3} \\ B_2 &= \left(\frac{r_1}{r_1'} \right)^2 \left(\frac{r_1}{10h'} \right)^2 \left(2.310 + \frac{0.070}{\alpha'} - 0.540 \frac{r_1}{r_0'} \right) \\ &\quad - \left(\frac{r_1}{r_1'} \right)^2 \left(\frac{r_1}{10h'} \right) \left(\frac{r_1}{r_0'} \right) \left(0.175 + 0.090 \frac{r_1}{r_0'} \right) \\ &\quad \times 10^{-1} + 4\zeta_2' \left(\frac{r_1}{r_0'} \right)^4 \times 10^{-2} \\ h + h' &= 2H \text{ (一定)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

第 1 図

* 内向き流れの場合、性能に影響があるのはだいたい外径基準で $R < 5$ の範囲である。

ここでは代表寸法に r_1 を選び内向き流れ部のノズル寸法には (') をつけた, 内部絞りでは (6) 式が成立するので, (6), (13) および (14) 式から,

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{B_2}{B_1 + B_2 + C} \left[1 + \frac{2 \{A_2(B_1 + C) / B_2 - A_1\}}{\sqrt{(A_1 + A_2)^2 + G(B_1 + B_2 + C) + (A_1 + A_2)}} \right] \quad (15)$$

をうる. G は (7) 式に示されているとおりである.

この特性は p_1 測定部の上流の抵抗と下流の抵抗とが差動して変化することから生ずるので, 内部絞りを設けなくてもよいことになる. このときは d_e が無限大となるので (15) 式で $C=0$ とおけばよい.

2.4 複合ノズルの V 形特性式 第1図 (b) あるいは (c) に示すノズルで圧力 p に着目すると V 形特性曲線が得られる. 上あるいは下のすきまが 0 のとき圧力 p は p_0 になり, その中間に最低圧力が存在する.

(13), (14) 式から p_1 を消去し, さらに (6) 式によって Q を消去する. 上下のすきまの和を $2H$ とし, 上のすきまを $h=H(1+x)$, 下のすきまを $h'=H(1-x)$ とおくと

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_0 - p}{p_0} &= \frac{C}{B+C} \left\{ \frac{\sqrt{A^2 + G(B+C)} - A}{\sqrt{A^2 + G(B+C)} + A} \right\} \\ A &= \left(\frac{r_1}{10H} \right)^3 \left\{ \frac{a_1}{(1+x)^3} + \frac{a_2}{(1-x)^3} + a_3 \right\} \\ B &= \left(\frac{r_1}{10H} \right)^2 \left\{ \frac{b_1}{(1+x)^2} + \frac{b_2}{(1-x)^2} - \frac{b_3}{(1-x)} + b_4 \right\} \\ C &= \left(\frac{r_1}{d_e} \right)^4, \quad G = \frac{72p_0 r_1^2}{\nu^2 \rho} \times 10^{-4} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \log_e \alpha, \quad a_2 = \log_e \alpha' \\ a_3 &= \frac{4}{3} \zeta_1 \left(\frac{10H}{r_1} \right)^3 \left\{ \left(\frac{l}{r_0} \right) \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^3 + \left(\frac{l'}{r_0'} \right) \left(\frac{r_1}{r_0'} \right)^3 \right\} \times 10^{-3} \\ b_1 &= \frac{1.543}{\alpha^2} + 0.130, \quad b_2 = \left(\frac{r_1}{r_1'} \right)^2 \left\{ 2.310 + \frac{0.070}{\alpha'} - 0.540 \left(\frac{r_1}{r_0'} \right) \right\} \\ b_3 &= \left(\frac{10H}{r_1} \right) \left(\frac{r_1}{r_0'} \right) \left(\frac{r_1}{r_1'} \right)^2 \left(0.175 + 0.090 \frac{r_1'}{r_0'} \right) \times 10^{-1} \\ b_4 &= 4 \left(\frac{10H}{r_1} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^4 + \zeta_2 \left\{ \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^4 + \left(\frac{r_1^2}{r_0^2 - r_d^2} \right)^2 \right\} \right] \times 10^{-2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中 $\zeta_1=1.00$, $\zeta_2=1.30$ が用いられる.

以上の計算式で外向き流れの場合には $f(R)=0.130$ とし, 内向き流れの場合には ξ を (9) および (10) 式で近似的に与えている. それゆえ ξ の真の値と近似値との差異によって生ずる p の補正を考えなければならないが, 外向き流れではこの値はきわめてわずかである. 内向き流れでも流量のとくに多い場合を除けば補正は小さい. また空気マイクロメータに用いられるような小孔径の絞りでは低流量のときに流量係数 C_f が一定の値に保たれにくいため補正が必要となることがあるが, 一般には特性に無関係な範囲のことなので無視してよいだろう. (3) 式中の ζ_1 および ζ_2 の値の変動による補正は, p_∞ が元来小さな値なので無視できる.

3. 実験方法および実験結果

3.1 実験方法 低圧式空気マイクロメータを対象としたため恒圧さうのゲージ圧力を水柱 500 mm とした. すきまは 1μ よみのマイクロヘッドによって変

化させた. 圧力は水柱マノメータで測定した. 内向き流れ特性を求めるために第1図(a)のノズルを, プッシュ・プルおよびV形特性に対しては(b)のノズルを用い(c)のノズルは用いなかった. (b)のノズルはすきまの平行をだすことと0ぎめとにかなり苦心したが電気接点と微圧計とを用いて満足できる設置ができた. 内部絞りの d_e は 0.52 mm から 2.04 mm のものまで5種類を用いた. もちろん流量係数はおのの別個の値であるが, それぞれの値はきわめて流量の少ない範囲を除けばほぼ一定であった. ノズルは第3報で用いたものを全部つけたが内向き流れノズルは PL1 だけである.

3.2 単独ノズル外向き流れの実験結果 第2図は内角丸みの効果の一例である. $8/3$ ノズルは内角に丸みをつけない場合であるが, h が大きくなり R が大きくなると実験値は計算値(実線)から離れていく. これは第3報で述べた縮流が原因であって, この効果の現われはじめる R の値は 30~35 で前報の結果と一致している. ところが内角に丸みをつけると計算値と

よく一致する。図に 0.84mm の丸みをもった $8/3_{m-2}$ ノズルの実験結果を示す。丸みをつけると感度が改善されるほか、特性をあらかじめ正確に計算できるという利点がある。内角に丸みのあるノズルを用い d_e をいろいろかえて実験を行なったが、 d_e が小さい間はきわめてよく計算と実験とが一致した。しかし d_e が 2mm 以上となり、かつ h の大きい範囲では多少の差が生じた。実際には感度が低下するので d_e が 2mm もある内部絞りをを用いることはきわめてまれである。この場合、 $d_e=0.52$ で最大感度* が 11550 倍であるのに対して $d_e=2.04$ mm では、これが 2770 倍とな

第 2 図

第 3 図

* すきまの変化に対する水柱マノメータ水面の変化の比。

る。しかし、このような極端な例に対しても測定範囲**については(7)式が適用できることがわかった(第3図参照)。

3.3 従来の特性式との比較 従来発表された静特性理論式の代表として次の二つを選んで本報の結果と比較する。内部絞り部に関しては、それらはいずれも(6)式と同じ式を用いているが、測定ノズル部についてはそれぞれ異なった式となっている。

$$p = \frac{6\mu Q}{\pi h^3} \log_e \alpha + \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{2\pi r_1 h} \right)^2 \frac{1}{\alpha^2} \dots\dots\dots (I)$$

$$p = \frac{6\mu Q}{\pi h^3} \log_e \alpha + \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{2\pi r_1 h} \right)^2 \left(\frac{54}{35\alpha^2} + \frac{2}{35} \right) \dots\dots\dots (II)$$

(I)式は石原⁽⁵⁾、(II)式は塚原⁽⁶⁾の発表したものである。この3者の相違は主として測定ノズル部で Q^2 に比例する圧力損失、いいかえれば(5)式の B の値の差にある。 $A^2 \ll G(B+C)$ として近似的にその効果を求めると

$$\frac{dp_B}{p_0} = \frac{C/B}{(1+C/B)^2} \frac{dB}{B} \dots\dots\dots (18)$$

となる。一般に $C/B > 1$ であるから dB が一定ならば、 C が大きいほど、いいかえれば d_e が小さいほど dp_B は小さくなる。

$\alpha=2.72$, $r_1=1.84$ mmおよび丸み 0.30 mmの PU2 ノズルを用いたときの計算値と実験値を第3図に示す。 d_e が 1.01 mm のときは3者の結果に大きな違いはないが h が大きくなると多少の差が認められる。実験値は h の広い範囲にわたって常に本報の特性式と一致している。 $d_e < 1.0$ mm ならば測定範囲を問題にするかぎり(I)あるいは(II)式を用いてもさしつかえない。

d_e が大きくなると(18)式が示すように3者の理論値の差はかなり大きくなるが、本報の特性式が実験結果に最も近い値を与えることがわかる。それでも h の大きいところでは若干の差が生ずる。このような場合(I),(II)式は用いられず(7)式の適用も測定範囲を検討するだけにかぎるべきであろう。

3.4 単独ノズル内向き流れの実験結果 $\alpha=1.63$, $r_1=3.38$ mm および丸み 0.33 mm の PL1 ノズルの実験結果を第4図に示す。外向き流れの場合と同様、 d_e が小さい間は実験値と計算値とはよく一致するが、 d_e が大きくかつ h が大きくなると両者の間に差が生ずる。このことは(12)式の B の項に含められたものの以外の抵抗の要素がわずかながら存在していることを示している。この場合も d_e が 2 mm までならば測定範囲内の特性の検討には十分適用できることが明らかである。

** 特性曲線がほぼ直線とみなされる最大感度点付近の範囲をいう。

$d_e=2.04\text{ mm}$ の場合, h が 0.143 mm 以上になるとノズル出口は〔II〕の領域から〔I〕の領域に移る。それで ξ に関する補正も大きくなり, その最大値は 23.8 mmAq に達するので, この補正は無視できない。最大感度は $14\,200$ 倍ないし $2\,220$ 倍であった。この特性に対して比較すべき理論式は見当らない。

3.5 プッシュ・プル特性の実験結果 ノズル PU1-PL1 の組合せで d_e の 5 種, $H=0.096\sim 0.221\text{ mm}$ の 4 種について実験を行なった。第 5 図は $H=0.116\text{ mm}$

第 1 表 プッシュ・プル特性 (PU1-PL1, $p_0=500\text{ mmAq}$)

$d_e\text{ mm}$	0.52	1.01	1.75	2.04	∞
最大感度	14 850	7 300	5 160	4 780	5 550

第 4 図

第 5 図

の場合であるが, 実験値と計算値はきわめてよく一致している。 H がこの程度であると, d_e が小さい間は d_e によって性能が著しく変わるが d_e が大きくなるとその影響はなくなる。 d_e が 1 mm 以下だと単独ノズルの特性 (図中破線は PL1 ノズルの特性を示す) とたいしてちがいはない。 d_e が 2 mm 近くなると両者の特性に著しい差が認められる。最大感度は d_e が小さいほど大きくなることは単独ノズルの場合と同様であるが, d_e が大きくなると感度は小さくなるが, ある値以上になると再び大きくなる (第 1 表参照)。それで内部絞りをはずした場合の特性が問題となる。この場合は感度がかかなり大きいにもかかわらず測定範囲

第 6 図

が大きいかつ最大感度点のすきまが大きい。とくに後者の特性は実用上きわめて重要な利点である。

d_e を一定にして H をしだいに大きくすると感度は小さくなるが, 測定範囲は単独ノズルの場合より大きくなる。

3.6 V 形特性の実験結果 前節と同様の装置を用いて測圧室の圧力 p を測定した。横座標は, 上下のすきまが等しい点を基準とし, この点からの変位 $\Delta h (=Hx)$ をと

第 7 図

った。

第 6 図は $H=0.096\text{ mm}$ の場合、第 7 図は $H=0.160\text{ mm}$ の場合である。 p の極小値は一般に $\Delta h=0$ の点にはない。これは上下のノズルの特性が異なるためである。(5)式と(14)式の B を h の同じ関数にすることができないので曲線を理論的に対称形にすることはできない。しかし H と d_0 との組合せによって p の極小を $\Delta h=0$ の点にもたらしことは可能である。本実験に用いたノズルの組合せは比較的対称形に近い特性を与えていて、 p を極小にする Δh の値は d_0 の広い範囲に対して H の $\pm 5\%$ 以内にある。

d_0 の値によって特性曲線の形は著しく変化する。 H が小さいときは d_0 が小さいほど V 形の先端が鋭くなるが、 d_0 が小さくて H が大きくなると先端が平らになり U 形となる。それで振幅測定に用いる場合は d_0 は H の値によって適当にきめねばならないことがわかる。

実験の結果は計算値とよく一致している。 $H=0.221\text{ mm}$, $d_0=2.04\text{ mm}$ の場合は流量がきわめて大きくなるがそれでも両者の差は 5 mm Aq 以内である。

4. 結 言

第 1, 2 報で求めた半径流ノズルの理論式から低圧空気マイクロメータの静特性式を誘導し実験結果と比較したところ、次の諸点が明らかにされた。

1. 単独ノズル外向き流れの場合の特性式は実験結果ときわめてよく一致する。ただ普通用いられないようなとくに穴径の大きい内部絞りをういたときは若干の差が生じたが、それでも測定範囲の特性の検討を行なうためにはさしつかえない。圧力の補正はほとんど問題にならない。

2. 従来発表された特性式よりさらによい近似を与

える。とくに h の大きい場合、絞りの穴径の大きい場合にも適用できることが著しい違いである。

3. 単独ノズル内向き流れの場合も外向き流れの場合と同様きわめてよい結果が得られた。ただこの場合は圧力補正を無視してはならない。

4. 複合ノズルのプッシュ・プル特性は内部絞りを除いた場合にその特長があらわれる。この点に関して今後十分な検討が望ましいが、そのためには本報の特性式が役に立つ。

5. 複合ノズルの V 形特性は空気式振動計の基礎となるものであるが、ここで導かれた特性式を用いれば十分な検討が可能であることがわかった。

このように本報で導かれたすべての特性式は、実験結果によって、広い範囲にわたって適用できることが明らかになった。したがって第 3 報の結果と相まって第 1, 2 報で求められた理論式が実用上成立することが実証された。

終りに本研究に際して数々の御教示を賜った東京工業大学 岡本哲史、谷口 修両教授ならびに実験および結果の整理に始終協力下さった上村正治氏に心から感謝の意を表する。

文 献

- (1) 萩原, 本論文集 138 ページ.
- (2) 萩原, 本論文集 145 ページ.
- (3) 萩原, 本論文集 150 ページ.
- (4) 川崎, 精密機械, 13-2 (昭 22-2), 1.
- (5) 石原, 精密機械, 13-10 (昭 22-10), 6.
- (6) 塚原, 機械学会論文集, 17-56 (昭 26), 10.
- (7) Goldstein, *Modern Developments in Fluid Dynamics*, 1 (1952), 309, Oxford Press.
- (8) たとえば J.C. Evans & I.G. Morgan, *Machinery* (London), 87 (1955), 867.
- (9) 牧野, 機械試験所報, 8-4 (昭 29-7), 145.
- (10) 萩原, 計測, 3-5 (昭 28-9), 222.

地熱発電調査 5 箇年計画

通産省所管の地質調査所では地熱発電実用化のための基礎データをうるために昭和 29 年以来、地熱開発調査を実施しているが、このほどさらに 5 箇年計画で松川地区 (岩手県)、鬼頭地区 (宮城県) における深部の地熱の調査研究のほか、新しい形式として北海道の昭和新山および阿蘇山周辺の地質学的調査研究に着手することになった。なお、地質調査所のこれまでの調査によると松川地区では 120m 以下に第三紀石英山岩質凝灰岩の存在が確かめられ、天然蒸気の状態と地質構造との関係を知る上で重要な手掛りをえている。さらに掘さく時における孔底温度の測定結果によると 120~160 m 以下で温度が急激に上昇する。そし

て、電気探査と地震探査を行なって昭和 35 年度に 325m, 450m のボーリングを行なった結果、予想どおりの噴気をみた。つまり、これらの調査から地熱探査技術の確立がいよいよ固められてきたので、今後新形式の地熱賦存地帯である昭和新山や阿蘇山周辺の地熱開発に大きな期待がかけられているわけである。なお、さいきん松川地区の地下構造調査の結果、深度 900~2 000 m 付近に山津田層と呼ばれる砂岩、頁岩、凝灰岩の混在する地層があることも確かめられているので、今後松川地区が地熱開発を進めるに向かうかどうか近く決定されることになっている。

(服部 敏夫)