エジェクタ形ノズルを有する空気マイクロメータ回路の動特性†

鈴木 善 雄*

Dynamics of a Pneumatic Micrometer Circuit with on Ejector Type Nozzle

Yoshio SUZUKI*

This paper deals with the dynamic analysis of a pneumatic circuit which consisted of an air micrometer with a "Ejector type nozzle", which has the improved properties of the linearities and the frequency responses, and an output tube.

From the analytical results using a linearized lumped-parameter system model, it was yielded that the pneumatic micrometer circuit consisted of a frequency dependent output impedance Z'_{o0} ;

$$Z_{o0}' = (Z_{oi}, z_{i=0} + Z'_{no}) / \{1 + (Z_{oi}, z_{i=0} / Z_{o0})(Z_{no}' / Z_{o0})\}.$$

Where Z_{no}' ; the output impedance of the "Ejector type nozzle", $Z_{oi}, z_{i=0}$ and Z_{o0} ; the input impedance and the characteristic impedance of the output tube for connecting the nozzle to the loads, respectively.

The dynamical experiments were made from 0.02 Hz to 2 kHz, when the moving plate opposite to the nozzle had been driven by a electro-magnetic accelerator. The values of Z_{o0}' were calculated by means of a principle of the measurement based on Thevenin's theorem and its duality one. The experimental results agreed very well with the analytical ones of the pressure and the flow rate transfer characteristics, and the output impedance of the pneumatic micrometer circuit with the "Ejector type nozzle".

1. 緒 言

空気マイクロメータの動特性についての研究は多くなされている^{1)~4)}が、その変換特性のみが論じられている。この場合、負荷の特性が含まれるため、空気マ

イクロメータの動特性の評価が十分でなく、寸法、形状および負荷整合など設計を困難にしていると思われる。流体回路理論の発展⁵⁾により、空気マイクロメータなど流体変換器を理論的に流量あるいは圧力信号源と出力（内部）インピーダンスで表わすことが重要となってきた。しかしながら、これらの動特性を理論的・実験的に取り扱った研究は見当たらない。このような観点から本研究は、エジェクタ形ノズルを有する空気マイクロメータと出力管からなる空気回路の動特性を、それらのシステムパラメータのみで表現される流体信号源と出力インピーダンスの周波数依存性により明らかにすることを目的とする。

本研究において用いたエジェクタ形ノズルは、Fig. 1 に示すように、インパクトモジュレータのコレクタ部あるいは O. Brychta の Small Ejector System⁶⁾ と類似の形状をしたものであり、供給口がノズルに近づけて設置されている。エジェクタ形ノズルを

Fig. 1 Ejector type nozzle

Table 1 Dimensions of ejector type nozzle (mm)

D_s	2.5	L_s	2.2	D_{ss}	16.0
D_a	20.8	D_b	12.0	L_o	7.3
D_n	4.3	L_n	3.1	L_{sn}	8.3
D_{no}	6.7	D_g	7.4	L_g	104.5

† 第18回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭54・8)

* 福井大学工学部 福井市文京 3-9-1

* Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui (Received July 2, 1980)

(Revised November 28, 1980)

対向面と組合せて空気マイクロメータとして用いたときの静特性解析⁷⁾によれば、ノズルと対向面とのある間隙において出力流量と圧力が零となり、従来のノズルを用いた空気マイクロメータより線形性が優れている。したがって、対向面を電磁加振器などで駆動すると、定常流に付加された高周波数の空気信号を得ることができる。松本ら⁹⁾および O. Brychta⁶⁾らも同様なシステムを構成した流体信号発生器を発表しているが、その動特性の理論解析はなされていない。インパクトモジュレータについても動特性解析をしたものは見当たらない。

本報では、集中定数モデル⁹⁾による空気マイクロメータの動特性の理論解析を行い、エジェクタ形ノズルが仮想的な流量信号源と並列アドミタンスおよび直列インピーダンスで表わしうること、ならびに、エジェクタ形ノズルと出力管を含む空気マイクロメータ回路の出力インピーダンスを明らかにする。また、この出力インピーダンスを直接測定することができないため、テブナン-鳳の定理とその双対定理を用いて求める方法を提案する。対向面を電磁加振器により周波数応答試験を 0.02 Hz から 2 kHz まで行い、理論とよく一致することを示している。

本論文において用いた記号の主なもの、 A ; 断面積, C ; キャパシタンス, D ; 直径, I ; イナータンス, L ; 長さ, N_R ; レイノルズ数, P ; 圧力, Q ; 流量, R ; 粘性抵抗, V ; 容積, X ; ノズルと対向面間隙, Y ; アドミタンス, Z ; インピーダンスなどに, b ; 低圧部, g ; 出力管, n ; ノズル, l ; 負荷, 0 ; 出力部などを表わす添字をつけて用いる。状態量 P, Q および X については, $\bar{P}, \bar{Q}, \bar{X}$; 定常状態の値, p, q, x ; 変動分, $\hat{p}, \hat{q}, \hat{x}$; p, q, x をラプラス変換したものとする。 f ; 周波数, $j = \sqrt{-1}$; 虚数記号, z ; 出力管軸に沿う座標, γ ; 伝搬定数, δ ; 位置角, κ ; 断熱指数, λ ; 管摩擦係数, ν ; 動粘性係数, π ; 円周率, ρ ; 流体の密度, ω ; 角周波数。他に静特性解析において用いた $A_{22}', A_{den}, C_e, C_m, \zeta$ および φ を再定義なしで用いる。

2. 基 礎 式

静特性解析⁷⁾では、非圧縮性流を仮定し、エジェクタ形ノズル内部の流れ模様を Fig. 2 に示すように、供給口からの噴流、ノズルへの衝突部、ノズルと対向面間隙部、低圧部、出力部および負荷部に分けて行った。動特性解析においては、出力管以外はエジェクタ形ノズルの寸法が Table 1 に示すように 2 cm 以下であり、約 10 KHz までは集中定数モデル⁹⁾による記

Fig. 2 Flow pattern

述が可能である。定常状態からの微小変動を仮定し、また、擬定常過程であるとして静特性解析における基礎式を線形化して用いる。

まず、静特性解析における基礎式をつぎに列挙する。供給口における流れに対して

$$P_s - P_b = (\rho/2)(Q_s/\alpha_s A_s)^2, \quad 2\alpha_s \approx 1 \quad (a)$$

ノズルと対向面間隙における流れに対して塚原¹⁶⁾の理論より

$$P_n - P_a = \frac{6\rho\nu}{\pi X^3} \left\{ \ln \left(\frac{D_{n0}}{D_n} \right) \right\} Q_n + \frac{27}{35} \frac{\rho Q_n^2}{(\pi D_{n0} X)^2},$$

$$P_a; \text{ 大気圧} \quad (b)$$

衝突部の圧力は運動量理論を用いて

$$(P_n - P_b)[A_{22}' - \{(1 + C_e)/2C_m\} \\ \times \{1 + C_e - Q_n/Q_s\} \sin(\pi - \varphi)] \\ = \rho C_m \{1 - \sin(\pi - \varphi)\} Q_s^2/A_s \\ + \{\rho C_m/(1 + C_e)\} Q_s Q_n \sin(\pi - \varphi)/A_s \\ - \rho Q_n^2/A_n \quad (c)$$

出力部の圧力回復は、逆流する流れの運動エネルギーに比例していると仮定して、次式を得る。

$$P_0 - P_b = \zeta \frac{\rho}{2} \{C_m/(1 + C_e)\}^2 (Q_s/A_s)^2 \quad (d)$$

以上の諸式と連続の式ならびに負荷に対する式を用いて静特性解析がなされる。

以下に動特性解析について述べる。供給口からの噴流の断面は簡単のため供給口の断面に等しく一様であるとし、噴流流速は大きく時間遅れを無視でき、またこの噴流部の容積は小さく無視しうるとすると運動方程式をラプラス変換して

$$(I_s S + R_s) \hat{q}_s = \hat{p}_s - \hat{q}_s \quad (1)$$

ここに、 $I_s = \rho L_s n/A_s$, 式(a)より $R_s = \rho \bar{Q}_s/(\alpha_s A_s)^2$ 。噴流衝突部に対しては、イナータンス、キャパシタンスおよびレジスタンスを無視しうるとし、(c)式より

$$\hat{p}_n - \hat{p}_b = R_{snb} \hat{q}_s + R_{nnb} \hat{q}_n \quad (2)$$

ここに、 $R_{snb} = \{\partial(p_n - p_b)/\partial q_s\}$, $R_{nnb} = \{\partial(p_n - p_b)/\partial q_n\}$ 。ノズルと対向面間隙流れに対しては、音響的キャパシタンスは無視しうるが、対向面の掃気による効果を考慮すると間隙を流れる流量は

$$Q_{nz} = Q_n - A_{n0}(dX/dt), \quad A_{n0} = \pi D_{n0}^2/4 \quad (e)$$

となり、(b)式の Q_n の代りに Q_{nx} を用いて運動方程式を求めると

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{nx} &= \dot{q}_n - A_{n0}s\dot{x} \\ (I_n s + R_n)\dot{q}_n &= (D_n/D_{n0})\dot{p}_n - \{I_n A_n s^2 \\ &\quad + (R_n A_{n0} + I_n \bar{Q}_n)s + K_{nx}\}\dot{x} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $I_n = \rho(D_{n0} - D_n)/(\pi D_{n0}\bar{X})$ 、 $R_n = 6\rho\nu \times \ln(D_{n0}/D_n)/(\pi \bar{X}^3) + (54/35)\rho\bar{Q}_n/(\pi D_{n0}\bar{X})^2$ 、 $K_{nx} = \{18\rho\nu \ln(D_{n0}/D_n)/(\pi \bar{X}^3) + (54/35)\rho\bar{Q}_n/(\pi D_{n0}\bar{X})^2\}(\bar{Q}_n/\bar{X})$ 。

低圧部の流れを近似的に円環状流れとし、空間的平均流量を Q_b として連続の式および運動方程式は (d) 式を用いて次式で与えられる。

$$C_b s \dot{p}_b = \dot{q}_s - \dot{q}_n - \dot{q}_b \quad (5)$$

$$(I_b s + R_b)\dot{q}_b = \dot{p}_b - \dot{p}_0 + R_z \dot{q}_s \quad (6)$$

ここに、 $C_b = V_b/\kappa \bar{P}_b$ 、 $V_b = A_b L_b$ 、 $A_b = \pi(D_a^2 - D_b^2)/4$ 、 $I_b = \rho L_b/A_b$ 、 $R_b = 128\rho\nu L_b/[\pi(D_a^2 - D_b^2)\{D_a^2 + D_b^2 - (D_a^2 - D_b^2)/\ln(D_a/D_b)\}]$ 、 $R_z = \zeta\{C_m/(1+C_z)\}^2 \bar{Q}_s/A_s^2$ 。

ノズル出力部の流れに対しても同様に

$$C_0 s \dot{p}_0 = \dot{q}_b - \dot{q}_0 \quad (7)$$

$$(I_0 s + R_0)\dot{q}_0 = \dot{p}_0 - \dot{p}_{0i} \quad (8)$$

ここに、 $C_0 = V_0/\kappa \bar{P}_0$ 、 $V_0 = A_0 L_0$ 、 $A_0 = \pi(D_a^2 - D_0^2)/4$ 、 $I_0 = \rho L_0/A_0$ 、 $R_0 = 128\rho\nu L_0/[\pi(D_a^2 - D_0^2)\{D_a^2 + D_0^2 - (D_a^2 - D_0^2)/\ln(D_a/D_0)\}]$ 。

インピーダンス Z_l の負荷を含む出力管入口における入力（駆動点）インピーダンスを Z_{0i} とすると

$$\dot{p}_{0i} = Z_{0i}\dot{q}_{0i}, \quad \dot{q}_{0i} = \dot{q}_0 \quad (9)$$

以上の (1)~(9) 式を用いて整理すると Fig. 3(a) に示すブロック線図を得る。ここに図中の伝達関数はつぎのとおりである。

$$\begin{aligned} G_{xn}(s) &= K_{nx}(T_{n1}s^2 + T_{n2}s + 1), \quad T_{n1} = A_{n0}I_0/K_{nx}, \\ T_{n2} &= (R_n A_{n0} + I_n \bar{Q}_0)/K_{nx} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Z_{nn}(s) &= R_n \left(1 + \frac{D_n}{D_{n0}} \frac{R_{nnb}}{R_n} \right) (T_{ns} + 1), \\ T_n &= I_n / \left\{ R_n \frac{I_n}{1 + \frac{D_n}{D_{n0}} \frac{R_{nnb}}{R_n}} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$Z_{ss}(s) = I_s s + R_s + Z_{ss}'(s), \quad (12)$$

$Z_{ss}'(s)$ ；空気供給系の出力インピーダンス

$$Y_{bn}(s) = C_b s + (D_n/D_{n0})/Z_{nn}(s) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Z_{sb}(s) &= Z_{ss}(s) \\ &\quad + \{1 + (D_n/D_{n0})R_{snb}/Z_{nn}(s)\}/Y_{bn}(s) \end{aligned} \quad (14)$$

$$Z_{bb}(s) = I_b s + R_b + (Z_{ss}(s) - R_z)/(Z_{sb}(s)Y_{bn}(s)) \quad (15)$$

Fig. 3 Block diagram and equivalent electric circuits of pneumatic signal generator system

$$Y_{ob}(s) \equiv 1/Z_{ob}(s) = C_0 s + 1/Z_{bb}(s) \quad (16)$$

$$Z_{on}(s) = I_0 s + R_0 \quad (17)$$

Fig. 3 の (b) および (c) は等価電気回路を示し、(b) はエジェクタ形ノズルが $\dot{x}$ によって変動する流量信号源 $\dot{q}_x$ と並列アドミタンス Y_{ob} および直列インピーダンス Z_{on} で表わされることを示し、(c) はその等価変換したものを示す。

空気マイクロメータの変換特性 $\dot{q}_0/\dot{x}$ および $\dot{p}_0/\dot{x}$ は Fig. 3 より容易に求められるが、これらは負荷のインピーダンス Z_{0i} を含み空気マイクロメータのみの特性を示すものではない。Fig. 3 の (b) あるいは (c) よりエジェクタ形ノズルの出力インピーダンスは

$$Z_{n0}' = Z_{ob} + Z_{on} \quad (18)$$

となり、 $\dot{q}_x$ 、 $\dot{p}_x$ および Z_{n0}' の周波数依存性を明らかにすることにより、エジェクタ形ノズルを有する空気マイクロメータの動特性を評価することができる。

3. 出力管を含む空気マイクロメータ回路の出力インピーダンスおよび測定原理

Z_{n0}' を直接測定することは現実には不可能であり、また、信号発生器として用いるときは接続管により負荷に接続されるので出力管（および接続管）を含む空気マイクロメータ回路の出力インピーダンスを明らかにすると設計上も好都合である。

3.1 出力管を含む空気マイクロメータ回路の出力インピーダンス

Fig. 3 における Z_{0i} は Fig. 4 に示す出力管路系

Fig. 4 Output tube system

の点 i より負荷側をみた入力インピーダンスである。出力管（特性インピーダンス Z_{0g} および伝搬定数 γ_g ）の点 $i, z, 0$ より負荷側をみたインピーダンス Z_{gi}, Z_{gz}, Z_{g0} は伝送線路理論より位置角 δ を用いて求められる。一方、各点でエジェクタ形ノズル側をみた場合、 Z_{n0}' を負荷インピーダンスとみなして同様に各点でのインピーダンス Z_{gi}', Z_{g0}' を求める。

$$\left. \begin{aligned} Z_{gi}' &= Z_{0g} \tanh(\delta_{gi}'), \quad \delta_{gi}' = \operatorname{arctanh}(Z_{n0}'/Z_{0g}) \\ Z_{g0}' &= Z_{0g} \tanh(\delta_{g0}'), \quad \delta_{g0}' = \delta_{gi}' + \gamma_g L_g \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$Z_{gi}, z=0 = Z_{0g} \tanh(\gamma_g L_g)$ を用いて上式を整理すると、出力管を含む空気マイクロメータ回路の出力インピーダンスは、

$$Z_{g0}' = \frac{Z_{gi}, z=0 + Z_{n0}'}{1 + (Z_{gi}, z=0/Z_{0g})(Z_{n0}'/Z_{0g})} \quad (20)$$

さて、出力管の特性 Z_{0g}, γ_g および Z_{gi} などの計算においては定常流の存在と助走区間の存在を考慮しなければならない。定常流がある場合の管路の動特性については P. A. Orner¹¹⁾, F. T. Brown ら^{12), 13)} および松本¹⁴⁾ などの研究があり、中野ら¹⁵⁾ は円管内助走区間における“平均的非定常粘性抵抗係数”の周波数依存性を明らかにしている。本報では簡単のため N. B. Nichols¹⁶⁾ の理論により Z_{0g}, γ_g を求めて計算した。ただし、 $\omega < \omega_v$ ($\omega_v = 16\nu/D^2$; 粘性特性周波数¹⁶⁾) である低周波数域では Nichols の理論における直列インピーダンスの R_v に加えて、近似的に定常流の N_{Rs} を用いた管摩擦抵抗 R_{vgs} と助走区間に対する補正抵抗 R_{entg} を考慮した。

$$R_v = \begin{cases} R_v = 128\rho\nu/\pi D_g^4; & \text{高周波数モデル} \\ R_v + R_{vgs} + R_{entg}; & \text{低周波数モデル} \end{cases} \quad (21)$$

ここに、 $R_{vgs} = \lambda \rho \bar{Q}_g / (D_g A_g^2)$, $\lambda = \{64/N_{Rs}; N_{Rs} < 2300, \quad 0.3164 N_{Rs}^{-1/4}; N_{Rs} > 2300\}$, $R_{entg} = \{R_v(\sqrt{0.07/\bar{L}_g + 1} - 1) - R_{vgs}\}$, $\bar{L}_g = L_g/(N_{Rs} D_g/4)$.

3.2 測定原理

Fig. 4 の各点における圧力および流量は次式で関係づけられる。なお、本節では p, q, x は複素数表示とする。

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_{gi}}{\sinh(\delta_{gi})} &= \frac{p_{gz}}{\sinh(\delta_{gz})} = \frac{p_{g0}}{\sinh(\delta_{g0})} \\ \frac{q_{gi}}{\cosh(\delta_{gi})} &= \frac{q_{gz}}{\cosh(\delta_{gz})} = \frac{q_{g0}}{\cosh(\delta_{g0})} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

周波数応答試験における測定値 p_{gz}, q_{gz} および x より変換特性 $p_{gz}/x, q_{gz}/x$ および点 z より負荷側を見た $Z_{gz} = p_{gz}/q_{gz}$ の測定値は求められる。出力管を含む空気マイクロメータ回路の出力インピーダンス Z_{g0}' は、テブナン-鳳の定理とその双対定理を用いると形

式的に次式で定義される。全閉負荷のときの圧力 $p_{g0}, z=0$ と全開負荷のときの流量 $q_{g0}, z=0$ より

$$Z_{g0}' = p_{g0}, z=0 / q_{g0}, z=0 \quad (24)$$

(23)式を用いると

$$Z_{g0}', z=0 = \frac{[p_{gz} \sinh(\delta_{g0}) / \sinh(\delta_{gz})]_{z=0}}{[q_{gz} \cosh(\delta_{g0}) / \cosh(\delta_{gz})]_{z=0}} \quad (25)$$

となる。 $[\sinh(\delta_{g0})]_{z=0} = j$, $[\cosh(\delta_{g0})]_{z=0} = 1$ であり、負荷により Z_{0g}, γ_g が変化しないとすると

$$\begin{aligned} [\sinh(\delta_{gz})]_{z=0} &= \left[\cosh\left(\frac{\pi}{2} j + \gamma_g L_g\right) \right]_{z=0} \\ &= j [\cosh(\gamma_g L_g)]_{z=0} \\ &\approx j [\cosh(\gamma_g L_g)]_{z=0} \end{aligned}$$

となるゆえ (25) 式は簡単になって

$$Z_{g0}' = p_{gz}, z=0 / q_{gz}, z=0 \quad (26)$$

となる。すなわち、出力管の点 0 における出力管を含む空気マイクロメータ回路の出力インピーダンスは、負荷によって系のシステムパラメータが変化しないと仮定したとき、近似的に全閉負荷のときの圧力 $p_{gz}, z=0$ と全開負荷のときの流量 $q_{gz}, z=0$ の比で与えられる。

4. 結 果

実験は周波数応答法により 0.02 Hz~2 KHz まで行った。対向面は、minishaker (Brüer Kjør 製 4810 形, DC~18 KHz) に固定され、超低周波関数発生器 (NF ブロック製 E-1101 形, 0.02 Hz~200 KHz), 直流増幅器 (NF ブロック製 TA-120 改造, DC~10 KHz) による正弦波信号にて駆動される。対向面の変位測定は、発光ダイオードによる光量を対向面に固定したナイフエッジにて遮断しその光量変化をフォトトランジスタにより検出して行った。圧力および流量測定は、Fig. 5 に示すように、 $\phi 0.5$ mm の圧力測定孔より小形半導体圧力変換器 (トヨタ工機製 CT-08 形)

Fig. 5 Apparatus for measurements of pressure and flow rate

により、および熱線プローブ ($\phi 5 \mu\text{m}$ タングステン線) により検出した。変位および空気信号はそれぞれ適当に増幅され記録装置に導いた。低周波数域 ($0.02 \sim 10 \text{ Hz}$) ではペン書き記録計 (渡辺測器製, WTR 281, DC $\sim 80 \text{ Hz}$)、高周波数域ではシンクロスコープによる写真撮影および周波数分析器を併用した。

4.1 変換特性

ノズルと対向面間隙に対する出力圧力および流量変換特性 $\bar{p}_{oz}/\bar{x}$, $\bar{q}_{oz}/\bar{x}$ の測定値および理論値を Fig. 6 に示す。供給圧力を $p_s = 9.8 \text{ kPa}$ とし、a) は全開負荷 $Z_t = 0$, b) は全閉負荷 $Z_t = \infty$ とした場合であり、動作点はそれぞれ $\bar{X} = 0.0238$, 0.0242 cm であり、対向面の振幅は $\Delta X = 0.003 \text{ cm}$ である。

全開負荷のとき、 $|\bar{q}_{oz}/\bar{x}|$ は 200 Hz まで $|\bar{p}_{oz}/\bar{x}|$

Fig. 6 Transfer frequency characteristics of a pneumatic signal generator with ejector type nozzle

は出力管の粘性特性周波数 ($f_v = \omega_v/2\pi \cong 1.3 \text{ Hz}$) 以下で一定であり、それぞれの周波数以上で周波数依存性が現れる。 $\angle \bar{q}_{oz}/\bar{x}$ および $\angle \bar{p}_{oz}/\bar{x}$ もそれぞれの周波数以下では $-\pi \text{ rad}$ であり、高周波数において周波数依存性が現れ 200 Hz 以上ではともに急激に遅れる。理論値は、(21)式による高周波数モデルと(22)式による低周波数モデルを用いた結果が示されている。

$\bar{q}_{oz}/\bar{x}$ は両モデルによる影響がほとんどなく測定値とよい一致をしている。 $\bar{p}_{oz}/\bar{x}$ は f_v 以下においてのみ両モデルの影響が現れ、測定値は(22)式を用いた理論値に一致し、高周波数域では両モデルの影響はほとんどなく測定値との一致もよい。 f_v 以下において $\bar{p}_{oz}/\bar{x}$ の測定値が理論値より大きいのは、出力管の出入口における断面形状の変化による損失を理論解析において無視しているためと考えられる。

全閉負荷のときは、 $\bar{p}_{oz}/\bar{x}$ は 100 Hz まではほぼ一定であり、高周波数において周波数依存性が現れ、理論値と測定値との一致はかなりよい。一方、 $\bar{q}_{oz}/\bar{x}$ は熱線風速計による測定のため超微風速 (数 cm/s 以下) では自己放熱、支持棒の影響などにより十分な精度で測定しえなかったが、理論値によると f_v 近傍以外ではほぼ 20 dB/dC でゲインは大きくなり位相は $-\pi/2 \text{ rad}$ で一定であるが、 200 Hz 以上にて周波数依存性が強くなる。

4.2 出力管を含む空気マイクロメータ回路の出力インピーダンス

Fig. 6 の測定値より(26)式を用いて計算した Z_{o0}' および(9)式に相当する $Z_{oz} = \bar{p}_{oz}/\bar{q}_{oz}$ を用いて計算

Fig. 7 Output impedance of a pneumatic signal generator with ejector type nozzle and driving point impedances at measuring point

した測定点における負荷インピーダンスの測定値ならびに(20)式などによる理論値を Fig. 7 に示す。

$|Z_{g0}'|$ は約 100 Hz まではほぼ一定であり $\angle Z_{g0}' \approx 0$ rad であり、高周波域で周波数依存性が強くなる。注意すべきことはゲインが極小となる周波数近傍において位相が零となることである。測定値と理論値との一致はきわめてよい。

全開負荷時の $Z_{gz, z1=0}$ は測定値と理論値との一致はよいが、全閉負荷時の $Z_{gz, z1=\infty}$ は既述のように流量の測定上の問題からほとんど一致していない。しかし、これら $Z_{gz, z1=0}$ および $Z_{gz, z1=\infty}$ の結果と Fig. 6 とを比較すると、 $(\dot{q}_{gz}/\bar{x})_{z1=0}$ あるいは $(\dot{p}_{gz}/\bar{x})_{z1=\infty}$ がほぼ一定である低周波数域においては $(\dot{p}_{gz}/\bar{x})_{z1=0}$ あるいは $(\dot{q}_{gz}/\bar{x})_{z1=\infty}$ は負荷の特性を表わしており、圧力あるいは流量の測定のみで負荷の周波数依存性を評価できることがわかる。

5. 考 察

前章の結果は、測定範囲内で測定値と理論値とのよい一致を示し、理論解析が満足すべきものであることを示している。(20)式は、負荷のインピーダンスを陽には含まず、負荷によるシステムパラメータの変化を考慮しなければ、エジェクタ形ノズルおよび出力管のシステムパラメータのみで表わされている。以下に空気マイクロメータ回路の動特性を評価するために、

$$R_{n0} = \frac{1 - R_s/R_s}{\frac{1}{R_s} \left\{ 1 + \frac{(D_n/D_{n0})(R_{n0}/R_n)}{1 + (D_n/D_{n0})(R_{n0}/R_n)} \right\} + \frac{1}{R_n} \frac{D_n/D_{n0}}{1 + (D_n/D_{n0})(R_{n0}/R_n)}} \quad (27)$$

本報の場合 $R_s/R_s \approx 0.07$ ($\zeta = 0.347$), $R_{n0}/R_n \approx 0.05$, $R_{n0}/R_n \approx -0.008$, $D_n/D_{n0} = 0.64$ なるゆえこれらを含む項を無視すると、(27)式のキャパシタンス $C_0 + C_b$ は背圧室の全容積で与えられ、抵抗 R_{n0} は供給口の絞り抵抗 R_s とノズル対向面間隙の抵抗 R_n との並列結合されたもので与えられる。よって

$$Z_{n0}' \approx Z_{00} \approx R_{n0}/(T_{n0}s + 1), \quad T_{n0} = CR_{n0} \quad (28)$$

となり、全開負荷のとき $R_{n0} \approx 22.3 \text{ Pa}/(\text{cm}^3/\text{s})$, 折点周波数 $f_{n0} = 1/2\pi T_{n0} \approx 540 \text{ Hz}$ である。負荷による効果は 1 kHz 以上ではほとんど無視しうる。1 kHz 以下では全閉負荷のとき $R_{n0} \approx 20.5 \text{ Pa}/(\text{cm}^3/\text{s})$ となり、全開負荷のときの R_{n0} との差異は動作点における状態量により決定される R_s, R_n などの変化によるものである。

出力管の特性 Z_{00}, γ_g および $Z_{gi, z1=0}$ の周波数依存性は Fig. 8 に見るようによく知られたものである。 Z_{g0}' の測定値を計算する(26)式は、負荷によって管路

Fig. 8 Z_{n0}' and $Z_{00} = 1/Y_{0b}$ of ejector type nozzle, and Z_{00}, γ_g and $Z_{gi, z1=0}$ of output tube

$Z_{g0}', Z_{n0}', \dot{q}_x/\bar{x}$ などについて考察する。

5.1 $Z_{n0}', Z_{00}, Z_{00}, \gamma_g, Z_{gi, z1=0}$ および Z_{g0}'

Fig. 8 に理論解析による $Z_{n0}', Z_{00}, Z_{00}, \gamma_g$ および $Z_{gi, z1=0}$ の周波数ゲイン特性を示す。実線は全開負荷のとき、破線は全閉負荷のときである。 Z_{n0}' と G_{0b} とは 2 kHz まではほぼ同じであり、(18)式から明らかなように Z_{0n} は Z_{0b} に比して小さく無視しうる。同様の理由から(15)式の $R_b + I_b s$ を無視しうるとし、(11)式と(12)式はそれぞれ $Z_{nn} \approx R_n \{1 + (D_n/D_{n0})(R_{n0}/R_n)\}$, $Z_{ss} \approx R_s$ とおけるとすると並列アドミタンスは次式で近似的に与えられる。

$$Y_{0b} = 1/Z_{0b} \approx \{C_0 + C_b/(1 - R_s/R_s)\}s + 1/R_{n0},$$

特性が変化しないと仮定しているが、低周波数域における Z_{00}, γ_g の負荷による影響は本報のように管路長が短い場合 $Z_{gi, z1=0} \ll Z_{n0}'$ および $(Z_{gi, z1=0}/Z_{n0}') \ll 1$ なるゆえ(20)式より $Z_{g0}' \approx Z_{n0}'$ となり無視しうる。

Fig. 8 の Z_{n0}' と $Z_{gi, z1=0}$ を参考にして Fig. 7 の Z_{g0}' を見ると、100 Hz 以下では上述のように $Z_{g0}' \approx Z_{n0}'$ となり、 $|Z_{gi, z1=0}/Z_{n0}'| \approx 1/10$ となる 100 Hz から Z_{g0}' は減少しはじめるが、 Z_{g0}' は $Z_{gi, z1=0}$ と Z_{n0}' の結合されたものとなり、とくに $Z_{gi, z1=0}$ の特性が強く現れている。 $|Z_{g0}'|$ が極小となるのは $Z_{gi, z1=0}$ の固有振動数より少し低いところに現れている。これはエジェクタ形ノズルと出力管からなる系の共鳴現象であり、 $Z_{gi, z1=0}$ を 1 次近似すれば $I_g's + R_g'$ のように表わせ(20)式より Z_{g0}' がキャパシタンス、インダクタンスおよびレジスタンスの直列結合になることから明らかである。

5.2 $\dot{q}_x/\bar{x}$ および $\dot{p}_x/\bar{x}$

Fig. 3 から流量信号源 $\dot{q}_x$ の $\bar{x}$ に対する変換特性は

$$\dot{q}_x/\bar{x} = G_{xn}(s)(Z_{ss}(s) - R_x)/\{Z_{nn}(s)Y_{bn}(s)Z_{sb}(s)Z_{bb}(s)\} \quad (29)$$

となり、(15)式の $I_{bs} + R_b$ を無視しうるとすると

$$\dot{q}_x/\bar{x} \approx G_{xn}(s)/Z_{nn}(s) \quad (29)'$$

を得る。 G_{xn} および Z_{nn} は、噴流衝突部とノズル対向面間隙の流れによって評価され、それぞれ固有振動数 $f_{xn} \approx 6000$ Hz, 減衰係数 $\zeta = 0.422$ をもつ2次進み要素と折点周波数 $f_{nc} \approx 500$ Hz の1次進み要素である。したがって、(29)'式は近似的に1次進み要素となるが、計算結果によれば約8 kHzにおいてピークを生じ、これは Y_{0b} が極値をとる周波数である。(29)式のゲイン定数は、近似的に $-K_{nx}/R_n$ となり、負符号は $\dot{q}_x$ と $\bar{x}$ の位相差が π radであることを示す。 $K_{nx} = -(\partial P_n / \partial X)$ および $R_n = (\partial P_n / \partial Q_n)$ は(c)式を線形化して得られる。 $\dot{q}_x/\bar{x}$ の負荷による影響は、5 kHz以下の低周波数域においてのみすなわちゲイン定数において現れる。低負荷になると R_n, K_{nx} ともに小さくなるが、 K_{nx} の変化が大きいため全閉負荷のときに対して約6%低くなる。

流量信号源を等価変換したときの圧力信号源の変換特性は、 $\dot{p}_x/\bar{x} = (\dot{q}_x/\bar{x})/Y_{0b}$ となる。その周波数依存性は、5 kHz以下での $\dot{q}_x/\bar{x}$ は上述のようにゲイン定数のみであるから、 $1/Y_{0b} = Z_{0b}$ の周波数依存性により明らかである。

6. 結 言

以上の結果を要約すると

- 1) エジェクタ形ノズルを有する空気マイクロメータ回路の動特性は、ノズルと対向面間隙に対応する流量信号源と出力インピーダンス Z_{00}' の周波数依存性により明らかとなる。
- 2) 流量信号源は、ノズルと対向面間隙流れに対する2次進み要素と1次遅れ要素のカスケード結合で近似され、ノズル内部の特性により8 kHzでピークを有するが、5 kHz以下では周波数依存性を無視しうる。
- 3) Z_{00}' は、エジェクタ形ノズルの出力インピーダンス Z_{nn}' と無負荷時の出力管の入力インピーダンス $Z_{01, Z_{10}=0}$ の結合されたもので与えられ、テブナン-鳳の定理とその双対定理を用いた測定原理による測定値は理論値と測定範囲においてよく一致した。
- 4) Z_{00}' は、流量信号源に並列なアドミタンスなどエジェクタ形ノズルのシステムパラメータのみで与え

られ、2 kHz以下では折点周波数 $f_{nc} \approx 540$ Hzの1次遅れ要素である。

5) 空気マイクロメータ部はノズル背圧室と出力管とからなる一種の共鳴器とみなせるが、 $Z_{01, Z_{10}=0}/Z_{00} \ll 1$ である低周波数域(100 Hz以下)では $Z_{00}' \approx Z_{nn} \approx R_{n0}$ (供給口とノズル対向面間隙流れの抵抗の並列抵抗)となり、高負荷時では定圧力信号、低負荷時には定流量信号を発生できる。

最後に、本研究にあたり、終始御指導を賜った京都大学 花房秀郎教授、御鞭達を賜った福井大学 段野勝教授ならびに実験などに御協力いただいた元卒業研究学生諸君に感謝の意を表します。また、本研究に対して文部省科学研究補助金(奨励研究)の一部を使用させていただいたことを付記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高橋安人編：自動制御論, 257/262, 岩波書店(1961)
- 2) 米持政忠：高圧式空気マイクロメータの動特性, 精密機械, **19**-10, 357/362 (1953)
- 3) 鈴木, 岡林：空気信号発生器の動特性, 機械学会・精機学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, **713**-3, 113/116 (1971)
- 4) 山本巖：空気マイクロメータの動特性とその供給圧および作動点との関係, 精密機械, **43**-7, 861/867 (1977)
- 5) 高森, 米持：フルイディスク回路系における空気管路のパワー伝送特性, 計測自動制御学会論文集, **10**-2, 245/252 (1974)
- 6) O. Brycta: The "Small Ejector" System, Proc. Fourth Cranfield Fluidics Conference, **E7** (1972)
- 7) 鈴木善雄：エジェクタ形ノズルを有する空気マイクロメータの研究(静特性), 計測自動制御学会論文集, **10**-2, 179/186 (1974)
- 8) 松本, 畑中：ノズル・フラップを用いた可変バイアス型空気圧正弦波信号発生器, 第8回フルイディスクシンポジウム講演論文集, 55/60 (1973)
- 9) W. A. Boothe: A Lumped-Parameter Technique for Predicting Analog Fluid Amplifier Dynamics, ISA, Trans. **4**-1, 84/92 (1965)
- 10) 塚原鶴夫：空気マイクロメータ, 139/162, 近代科学社(1962)
- 11) P. A. Orner: Linear Dynamic Modeling of Flowing Fluid Lines, ASME, Trans. ser. **D-91**-4, 740/749 (1969)
- 12) F. T. Brown: A Quasi Method of Characteristics with Application to Fluid Lines with Frequency Dependent Wall Shear and Heat Transfer, ASME, Trans. ser. **D-91**-2, 217/227 (1969)
- 13) F. T. Brown et al.: Small-Amplitude Frequency Behaviour of Fluid Lines with Turbulent Flow, ASME Trans., ser. **D-91**-4, 678/693 (1969)
- 14) 松本幸生：定常流のある空気圧伝送管路系の動特性, 計測自動制御学会論文集, **13**-5, 502/508 (1977)
- 15) 横田, 中野：円管内動走区間における振動流(第2報近似解析と非定常粘性抵抗係数), 油圧と空気圧, **11**-2, 107/114 (1980)
- 16) N. B. Nichols: The Linear Properties of Pneumatic Transmission Lines, ISA, Trans. **1**-1, 5/14 (1962)