空気圧正重合案内弁・シリンダの周波数特性*

第1報 理論解析

荒 木 献 次**

Frequency Response of a Pneumatic Valve-Controlled Cylinder with an Overlap Four-Way Valve*, Part I Theoretical Analysis

Kenji Araki**

Abstract

This paper describes the frequency characteristics of a pneumatic valve-controlled cylinder system with an overlap four-way valve having different port width. Theoretical analysis is made of the frequency characteristics of a system wherein a valve which has the unevenness of the overlaps (i), the mean overlaps (Δ, Δ'), the geometrical asymmetry (η) and the port width ratio (ξ) is used, and an inertial load with both viscous friction and Coulomb friction is applied to the cylinder, and the flow rate versus pressure curves for the valve are approximated partially as polynomials of degree 3 of pressure.

The effects of the valve configuration parameters i, η, ξ and the amplitude of sinusoidal spool displacement (y_0) on the frequency characteristics of the system are theoretically analysed and the results obtained are summarized on the characteristics curves.

It is shown that proper selection of ξ and i may reduce the air consumption with a pneumatic servo.

1. はしがき

空気圧案内弁の漏れ空気を減らすために、案内弁を意図的に正重合にすることがある。正重合案内弁の流量特性は不感帯を持ち、負重合案内弁や零重合案内弁のそれらとは著しい相違がある。また、正重合弁を用いた案内弁・シリンダの動特性も、後者を用いた場合^{1)~4)}とかなりの相違があるので、新たに解析する必要がある。空気圧案内弁の場合には、弁重合量のわずかな非対称性や不均等さが案内弁・シリンダの動特性に大きな影響を及ぼし、案内弁が正弦波状に変化すると、弁出力に直流分を生じてシリンダがドリフトする。

シリンダがドリフトしないようにするためには、スプールの振幅と周波数に対応してスプールにバイアス（シフト量）を与える必要がある。このような系に関する研究はまだほとんど報告されていないようである⁵⁾。

ここでは、非対称・不均等でかつポート幅が上流側と下流側とで異なる正重合案内弁を用いた案内弁・シリンダ系について文献1)と同様な理論解析を行った。すなわち、案内弁の圧力・流量特性を圧力の三次式で部分的に近似し、負荷圧力がそれ程大きくない場合に適用できる案内弁・シリンダの周波数特性を理論的に求めた。シリンダの負荷としては、クーロン摩擦のある慣性負荷を考えている。案内弁の不均等さ、非対称さ、ポート幅比およびスプール変位振幅の系諸特性に及ぼす影響についても述べる。

* 昭和57年9月9日 原稿受付

** 埼玉大学工学部

ただし、 p_o と $p_{o'}$ は p_o で正規化した圧力振幅、 ϕ_{yw} と ϕ_{ys} は位相である。式(1)、(2)、(11)を式(4)、(5)に代入し、 $F|\Delta|$ で正規化した流量に*をつけると、

$$\left. \begin{aligned} w_1^* &= w_1/F|\Delta| = f(-1-i+\delta_o+y_o \sin \omega t)h_1 \\ w_2^* &= w_2/F|\Delta| = \xi f(-1+i-\delta_o-y_o \sin \omega t)h_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} w_1'^* &= w_1'/F|\Delta| = \eta f(-1-i'-\frac{\delta_o}{\eta}-\frac{y_o}{\eta} \sin \omega t)h_1' \\ w_2'^* &= w_2'/F|\Delta| = \xi \eta f(-1+i'+\frac{\delta_o}{\eta}+\frac{y_o}{\eta} \sin \omega t)h_2' \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

周波数特性 式(7)、(12)を式(13)、(14)に代入し、式(8)の w_m 、 w^* および w'^* の基本波成分を求めると、

$$\left. \begin{aligned} w_m^* &= w_m/F|\Delta| = w_o \sin(\omega t + \phi_{yw}) \\ w_o &= \sqrt{\bar{c}_s^2 + \bar{c}_c^2}, \quad \phi_{yw} = \tan^{-1}(\bar{c}_c/\bar{c}_s) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} w^* &= w/F|\Delta| = w_L \sin(\omega t + \phi_{ywL}) \\ w_L &= \sqrt{w_{Ls}^2 + w_{Lc}^2}, \quad \phi_{ywL} = \tan^{-1}(w_{Lc}/w_{Ls}) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} w'^* &= w'/F|\Delta| = w_R \sin(\omega t + \phi_{ywR}) \\ w_R &= \sqrt{w_{Rs}^2 + w_{Rc}^2}, \quad \phi_{ywR} = \tan^{-1}(w_{Rc}/w_{Rs}) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ただし、添字 s, c は sin 成分, cos 成分を表わし、

$$\bar{c}_s = (w_{Ls} + w_{Rs})/2, \quad \bar{c}_c = (w_{Lc} + w_{Rc})/2 \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} w_{Ls} &= (\lambda_s \bar{p}^3 + a_s \bar{p}^2 + b_s \bar{p} + c_s)/\pi \\ w_{Lc} &= (a_c \bar{p}^2 + b_c \bar{p} + c_c)/\pi \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} w_{Rs} &= \eta(\lambda_s \bar{p}'^3 + a_s' \bar{p}'^2 + b_s' \bar{p}' + c_s')/\pi \\ w_{Rc} &= \eta(a_c' \bar{p}'^2 + b_c' \bar{p}' + c_c')/\pi \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ここで、 λ_s , a_s , $\dots$, b_c , c_c は附録 2) に示してある。

式(19)、(20)中の平均圧 $\bar{p}$, $\bar{p}'$ は L 系, R 系の三方弁の一周期当りの流入量と流出量を等置した式

$$\left. \begin{aligned} \int_{\theta_1}^{\theta_2} w_1^* d(\omega t) &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} w_2^* d(\omega t) \\ \int_{\theta_1}^{\theta_2} w_1'^* d(\omega t) &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} w_2'^* d(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

に式(7)、(11)~(14)を代入し、基本波成分に着目すれば、次の三次式の実根として与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda \bar{p}^3 + a \bar{p}^2 + b \bar{p} + c &= 0 \\ \lambda' \bar{p}'^3 + a' \bar{p}'^2 + b' \bar{p}' + c' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ここで、 λ , a , b , c は附録 3) に示してある。

式(20)を積分して式(19)に代入すれば、近似的に

$$\begin{aligned} \dot{z} + 2\zeta_m \omega_m \dot{z} + \omega_m^2 z + \text{sgn}(\dot{z})(F_c/M_m) \\ = 2\omega_m^2 \int w_m dt / A_m(\bar{p}_L + \bar{p}_L') \end{aligned} \quad (23)$$

$$\omega_m = A_m \sqrt{\frac{x(\bar{p}_L + \bar{p}_L')}{V_m M_m}}, \quad 2\zeta_m \omega_m = \frac{D_m}{M_m} \quad (24)$$

式(8)、(13)~(17)を式(23)に代入し、ピストン変位の基本波成分を求めると、 z_1 を z の基準値として

$$z^* = z/z_1 = z_o \sin(\omega t + \phi_{zs}) \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} z_o &= \frac{(L_1/\omega) + L_2 \cos \phi_{ws}}{z_1 \sqrt{(\omega_m^2 - \omega^2)^2 \{1 - (\omega L_2/L_1)^2\} + (2\zeta_m \omega_m \omega)^2}} \\ \phi_{zs} &= \phi_{yw} + \phi_{ws} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_{ws} &= \phi_s - \cos^{-1}\{-(\omega L_2/L_1) \cos \phi_s\} \\ \phi_s &= \begin{cases} -\tan^{-1}\{2\zeta_m \omega_m \omega / (\omega_m^2 - \omega^2)\} & (\omega < \omega_m) \\ -\pi/2 & (\omega = \omega_m) \\ -\pi - \tan^{-1}\{2\zeta_m \omega_m \omega / (\omega_m^2 - \omega^2)\} & (\omega > \omega_m) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$L_1 = 2\omega_m^2 F|\Delta|w_o/A_m(\bar{p}_L + \bar{p}_L'), L_2 = 4F_c/\pi M_m \quad (28)$$

式(26)、(27)の位相 ϕ_{ywL} と ϕ_{ywR} はほとんど等しいので、

$$\phi_{ywL} \approx \phi_{ywR} \equiv \phi_{yw} \quad (29)$$

とおくと、圧力の振幅と位相は、L 系の場合、式(10)の第一式に式(22)の第一式、(16)、(25)を代入すれば、

$$p_o = \frac{\sqrt{K_1^2 + K_2^2}}{2p_s A_m \omega}, \quad \phi_{yp} = \phi_{yw} + \tan^{-1}\left(\frac{K_2}{K_1}\right) \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \{2\bar{p}_L/(\bar{p}_L + \bar{p}_L')\} M_m \omega_m^2 z_1 z_o \omega \cos \phi_{ws} \\ K_2 &= \{2\bar{p}_L/(\bar{p}_L + \bar{p}_L')\} \\ &\quad \times M_m (L_{1L} + \omega_m^2 z_1 z_o \omega \sin \phi_{ws}) \\ L_{1L} &= \omega_m^2 F|\Delta|w_L/A_m \bar{p}_L \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

R 系の場合も同様にして

$$p_o' = \frac{\sqrt{K_1'^2 + K_2'^2}}{2p_s' A_m \omega}, \quad \phi_{yp}' = \phi_{yw} + \tan^{-1}\left(\frac{K_2'}{K_1'}\right) \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} K_1' &= \{2\bar{p}_L'/(\bar{p}_L + \bar{p}_L')\} M_m \omega_m^2 z_1 z_o \omega \cos \phi_{ws} \\ K_2' &= \{2\bar{p}_L'/(\bar{p}_L + \bar{p}_L')\} \\ &\quad \times M_m (L_{1R} + \omega_m^2 z_1 z_o \omega \sin \phi_{ws}) \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

$$L_{1R} = \omega_m^2 F|\Delta|w_R/A_m \bar{p}_L'$$

ピストン速度は式(25)より

$$v = \dot{z} = z_1 z_o \omega \sin(\omega t + \phi_{ys} + \pi/2) \quad (34)$$

2.3 等価不均等指数 i_e

正重合三方弁内弁が正弦波状に変位したときの等価な $i (= i_e)$ は、文献 4) の附録 4 と同様にして求められる。ただし、両ポート閉じ切りの場合は、 $\bar{p}$ が定まらないので i_e も定まらない。Fig. 2 は ξ が 1 の場合の y_o と i_e の関係を示す。負重合の場合⁴⁾に比べ、 $y_o = 1$ 近傍の図形が大きく異なる。また、 $i = 0$ の直線より上が $i < 0$ の場合、下が $i > 0$ の場合となり、負重合の場合と逆になっている。1 $\leq \xi \leq 10$ の範囲で i_e は、

$$\left. \begin{aligned} i_e &\approx \begin{cases} [-\text{sgn}(i) - i_o] \exp(Ak/|i|) + i_o & (|i| > 0.02) \\ i_o & (|i| \leq 0.02) \end{cases} \\ i_o &= (1 - \xi)/(1 + \xi), \quad y_e = y_o - 1 - |i| \\ k(i, y_o) &= \begin{cases} y_e/(1 + By_e) & (y_e > 0) \\ 0 & (y_e \leq 0) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

で近似できる。

Fig. 2 i_e versus y_0 characteristics of a three-way-valve with a parameter i ($\xi = 1$)

ただし、 A, B は Table 1 より求められる。また i_e は、
 $i_e = i_e(i, y_0/\eta)$ ただし、 $i_e = i_e(i, y_0)$ (36)

シフト量 ピストンがドリフトしないためには、

$$\bar{p} = \bar{p}' \quad \text{..... (37)}$$

そのためスプールを $\delta_0/4$ だけシフトさせ (式(11))、その
 ときの i, i' を各々 i_1, i_1' とすると、式(33), (34) より

$$i_1 = i - \delta_0, \quad i_1' = i' + \delta_0/\eta \quad \text{..... (38)}$$

よって δ_0 の第一近似値は、式(36), (37) より

$$i_e(i - \delta_0, y_0) = i_e'(i' + \delta_0/\eta, y_0/\eta) \quad \text{..... (39)}$$

を満足する δ_0 として求まる。式(35)は $p_0 = 0$ の場合の i_e
 を与え、 $p_0 \neq 0$ の場合には、式(39)の解 δ_0 は修正を要す
 る。その修正量 $d\delta_0$ は、式(35), (39) を用いて

$$d\delta_0 \approx \left\{ \begin{array}{ll} (-i_e + i_e')/x & (\bar{p} > \bar{p}') \\ (i_e - i_e')/x & (\bar{p} < \bar{p}') \end{array} \right\} \quad \text{..... (40)}$$

$$x = -(i_e - i_0)Ak_1/i_1^2 + (i_e' - i_0)Ak_1'/i_1'^2$$

$$k_1 = k(i_1, y_0), \quad k_1' = k(i_1', y_0/\eta)$$

2.4 案内弁形状が周波数特性に及ぼす影響

入力をスプール変位 y_i 、出力をピストン速度 v として案内弁・シリンダの周波数特性を計算する。 p_s を 1.08 MPa とし、式(7)の係数は文献(4)の Table 1, 2 の数値を用いる。計算手順を Fig. 3 に示す。

(計算例) $\Delta = -2.8 \times 10^{-3}$ (cm), $\eta = 1.05$, $\xi = 1$, $i = -0.6$, $c_d b_{p2} = 0.644$ (cm), $A_m = 12.1$ (cm²), $V_m = 41.9$ (cm³), $M_m = 0.53$ (kg), $D_m = 11$ (kg·s⁻¹), $F_c = 9.8$ (N), $\rho_a = 1.2 \times 10^{-6}$ (kg·cm⁻³), $x = 1.4$ の場合の計算値を Fig. 4 に示す。この図より、 y_0 の値によって、系の低周波ゲイン、共振の有無、共振点ゲインと共振点周波数、ピストン停止周波数が大幅に変わることがわかる。

Table 1 A and B in eq. 35

$$A = \frac{A_1}{i + A_2} + A_3, \quad B = \frac{B_1}{i + B_2} + B_3$$

$$A_j = \frac{\ell_{A_j}}{\xi + m_{A_j}} + n_{A_j}, \quad B_j = \frac{\ell_{B_j}}{\xi + m_{B_j}} + n_{B_j}$$

	A_j	ℓ_{A_j}	m_{A_j}	n_{A_j}
$i \leq -1$	A_1	-160	-16.3	-9.21
	A_2	120	-16.6	2.6
	A_3	34.2	18	-2.03
$-1 \leq i \leq 0$	A_1	0.53	-16.6	0.032
	A_2	1.22	-19.7	0.05
	A_3	386	44.4	-8.94
$i \geq 0$	A_1	-1.04	0.005	-0.338
	A_2	3.6	0.32	2.44
	A_3	-0.15	0.15	-0.097

	B_j	ℓ_{B_j}	m_{B_j}	n_{B_j}
$i \leq 0$	B_1	20.4	17.8	-1.25
	B_2	0.807	10.3	-0.123
	B_3	0.01	-0.046	-0.042
$i \geq 0$	B_1	0.16	0.66	0.06
	B_2	0.18	1.44	-0.029
	B_3	0.146	4.47	-0.053

そこで、以下に、 ξ, i, y_0 および η が周波数特性に及ぼす影響について述べる。計算に使用する諸量は ξ, i, y_0 および η を除いて、上述の値を用いる。

1) 低周波ゲイン $K_m = V(j\omega)/Y(j\omega)|_{\omega=0} \equiv |G_{yo}(j0)|$

Fig. 5 は ξ, i および y_0 が K_m (dB) に及ぼす影響を示す。 y_0 が小さくなると、 K_m は急激に小さくなり、負重合弁の場合 (文献(3)の Fig. 4) と著しく相違し、制御性がよくない。

2) 共振点のゲイン $G_p \equiv G_{yo}(j\omega_p)$ と周波数 ω_p

Fig. 6 は ξ, i および y_0 が G_p に及ぼす影響を示す。 G_p は y_0 に対して急増した後飽和する。過小の y_0 に対しては共振点が消失する。これはクーロン摩擦に起因するものである。 ξ が増大すると G_p は減少する。

Fig. 7 は ξ, i および y_0 が $f_p = 2\pi\omega_p$ に及ぼす影響を示す。 f_p は y_0 とともに急増した後はほぼ一定値と

η のシフト量 δ_0 に及ぼす影響 Fig. 8 は $y_0 = 5$, $\xi = 1$, $f = 10$ Hz のとき, η と i が δ_0 に及ぼす影響を示す。 δ_0 は i に対して直線的に変化し, $\eta < 1$ では正の勾配, $\eta > 1$ では負の勾配をもつ。 η が過大で, 附録 (A・2) 式を満足しなくなると, 閉じきりのポートがでてきて, δ_0 は求まらなくなる。

Fig. 9 は η が 0.5 と 2 の場合の i と y_0 が δ_0 に及ぼす影響を示す ($\xi = 1$, $f = 10$ Hz)。 y_0 が増大すると, $|\delta_0|$ は単調に減少し, 負重合弁の場合 (文献2) の Fig. 6) と逆の傾向を示している。点線は $F_c = 0$ の場合で, $\times$ 印はクーロン摩擦のためピストンが停止する値を示す。

η が変動圧の振幅 p_0 と位相 ϕ_{yp} に及ぼす影響 Fig. 10 は y_0 に対する圧力振幅の周波数特性である ($y_0 = 7$; $\eta = 1, 1.05, 1.5$), $\eta = 1$ (対称弁, 破線) と $\eta \neq 1$ (非

Fig. 8 Null shift δ_0 versus valve unevenness i characteristics with a parameter η .

Fig. 9 Null shift δ_0 versus valve displacement y_0 with parameters i and η .

対称弁, 破線以外の線) の場合では, 低周波の圧力特性に大きな差がみられる。案内弁がわずかに非対称 ($\eta = 1.05$) であっても, $\omega \rightarrow 0$ のとき p_0 は積分性を示し, $\phi_{yp} \rightarrow -90^\circ$, $\phi'_{yp} \rightarrow 90^\circ$ となる。これは以下のように証明される。

対称弁の場合, $\lim_{\omega \rightarrow 0} p_0$ は式(30)に,

$$\left. \begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} \cos \phi_{\omega s} &\approx \lim_{\omega \rightarrow 0} \{-(2\xi_m/\omega_m) + (L_2/L_1)\}\omega \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} \sin \phi_{\omega s} &\approx \lim_{\omega \rightarrow 0} [-1 + \{(2\xi_m/\omega_m) \\ &\quad + (L_2/L_1)\}\omega^2/2] \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

を代入し, $\bar{p}_L = \bar{p}'_L$, $\bar{p}_L = \bar{p}'_L$ が成立しているとすれば,

$$\left. \begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} p_0 &= M_m L_1 (2\xi_m + L_2 \omega_m / L_1) / 2 A_m p_s \omega_m \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} \phi_{yp} &= \lim_{\omega \rightarrow 0} [\phi_{yw} + \tan^{-1}(K_2/K_1)] = \phi_{yw} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

となり, p_0 は一定値に, $\phi_{yp} = \phi_{yw} \approx 0$ となる。次に, 非対称弁の L 系の $\lim_{\omega \rightarrow 0} p_0$ は, $\bar{p}_L = \bar{p}'_L$, $\bar{p}_L = \bar{p}'_L$ として,

$$\left. \begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} K_1/\omega &= -M_m L_{1L} (2\xi_m + L_2 \omega_m / L_{1L}) / \omega_m \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} K_2/\omega &= \lim_{\omega \rightarrow 0} M_m (L_{1L} - L_1) / \omega \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

よって, p_0 と ϕ_{yp} は, $\eta > 1$ の場合 $L_{1L} > L_1$ を考慮して,

$$\left. \begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} p_0 &= \lim_{\omega \rightarrow 0} M_m (L_{1L} - L_1) / 2 p_s A_m \omega \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} \phi_{yp} &= \phi_{yw} - \pi/2 \approx -\pi/2 \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

同様に, R 系の場合も, $L_{1R} < L_1$ を考慮して,

$$\left. \begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} p_0 &= \lim_{\omega \rightarrow 0} M_m (L_1 - L_{1R}) / 2 p_s A_m \omega \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} \phi_{yp} &= \phi_{yw} + \pi/2 \approx \pi/2 \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

式(44), (45)より, 案内弁が少しでも非対称 ($\eta \neq 1$) であれば, $\omega \rightarrow 0$ において $|P_0 p_s / Y|$ と $|P'_0 p_s / Y|$ は p_L と p'_L が p_a と p_s の間の値であれば積分特性を持ち, $\phi_{yp} \rightarrow -90^\circ$, $\phi'_{yp} \rightarrow 90^\circ$ となることが証明された (文献2) のむすびの2)の位相に関する結論に誤りがあるので上述のように訂正する。

Fig. 10 Frequency responses of the pressure changes of p_L and p'_L versus y_0 ($\Delta = -28 \mu\text{m}$, $\xi = 1$, $i = -0.6$, $y_0 = 7$).

2.5 案内弁形状が空気消費量に及ぼす影響

正重合を用いると、系の静止状態における空気消費量が負重合の場合より少なくなる。また、系の運動中は、今、単位時間当りの案内弁平均流入空気量 $\bar{w}$ と単位時間当りのピストン平均移動量の比を I_p とおくと

$$I_p = 2y_0|\Delta|G_{y_0}(j\omega)/\pi\bar{w} = (v \text{の振幅})/w_0 \quad \dots (46)$$

となり、省空気の度合いを表わす。 $\xi = 1$, $i = 0$ (理想案内弁)の低周波における I_p を I_{p1} とおくと、 $y_0|\Delta| =$ (一定)のもとに $|\Delta| \rightarrow 0$ とすれば

$$I_{p1} = \lim_{\omega \rightarrow 0, y_0 \rightarrow \infty} I_p|_{\xi=1, i=0} \quad \dots (47)$$

$$I_p^* \equiv I_p/I_{p1} \quad \dots (48)$$

Fig. 11は(計算例)と同じ数値を用いて計算した I_p^* を示す。共振点近傍で I_p^* は最大となる。この最大値は y_0 の増大とともに増大し、ついには飽和する。

Fig. 12は $y_0 = 5, 10$ の場合の低周波における I_p^* と i, ξ の関係を示す。 I_p^* は ξ および i とともに増大している。正重合の場合は負重合の場合(文献3, Fig. 8)より幾分小さく、 I_p^* 軸に対して互いに対称の形となっている。

Fig. 13は、共振点における I_p^* と ξ, i, y_0 の関係を、示す。ほぼ $y_0 > 6$ においては、 $\xi = 4$ の場合の方が $\xi =$

Fig. 11 I_p^* versus frequency characteristics of a valve-controlled cylinder.

Fig. 12 Effects of ξ, i and y_0 on I_p^* at low frequencies.

Fig. 13 Effects of ξ, i and y_0 on I_p^* at resonance frequencies.

1の場合より I_p^* が大きくなり、かなり省空気となっている。

3. むすび

非対称・不均等正重合をもち、ポート幅が上、下流側で異なる案内弁に、クーロン摩擦と粘性摩擦のある慣性負荷のついたシリンダを接続した系の周波数特性を計算する理論式を求めた。その式を用いて計算し、案内弁の形状等がその系の周波数特性に及ぼす影響を調べ、次のようなことが明らかとなった。

- 1) 低周波ゲインは、負重合の場合のそれに比べ、全体的に低く、スプール振幅 y_0 に対する変化が大きい。
- 2) 共振点ゲインと共振周波数はポート幅比 ξ の増大とともに低下する。計算例では、 y_0 が4より小さくなると共振点ゲインが急減し、ついに共振なくなる。
- 3) ピストン停止周波数はほぼ y_0/ξ に比例する。
- 4) 非対称さ η の弁の場合のシフト量 δ_0 は、不均等指数 i に対して直線的に変化し、 $\eta > 1$ の場合 η が増大すると直線の傾斜が急になる。また、 $|\delta_0|$ は y_0 が増大すると減少するが、すぐ一定値となる。
- 5) 案内弁が少しでも非対称($\eta \neq 1$)であると、スプール変位 y_0 に対する変動圧の周波数特性は低周波域で積分特性を示し、 $\omega \rightarrow 0$ において圧力振幅が増大し、L系、R系の位相はそれぞれ -90° , 90° に収束する。
- 6) 省空気の度合 I_p^* は、共振点で鋭いピークをもち、適当な ξ を選べば空気消費を少なくできるが、 y_0 の小さい範囲では、 i の影響も大きい。

参考文献

- 1) 荒木：不均等負重合案内弁を用いた案内弁・シリンダの周波数特性，第1報，油圧と空気圧，10-1，57/63（昭和54年）。
- 2) 荒木：同上，第2報，油圧と空気圧，10-6，361/367（昭和54年）。
- 3) 荒木：同上，第3報，油圧と空気圧，12-4，262/268（昭和56年）。
- 4) 荒木：同上，第4報，油圧と空気圧，12-4，269/276（昭和56年）。
- 5) K. Araki: Effects of Valve Configuration on a Pneumatic Servo, 6th International Fluid Power Symposium, BHRA, Paper F2, 271/291, April 1981.

（附録1）四つの制御オリフィスが開く期間のあるのは，式(13)，(14)の $f(x)$ の x が正になるときで， $i = i'$ （中立状態）とおけば，

$$\left. \begin{aligned} -1-i+\delta_o+y_o > 0, \quad -1+i-\delta_o+y_o > 0 \\ -1-i-\frac{\delta_o}{\eta}+\frac{y_o}{\eta} > 0, \quad -1+i+\frac{\delta_o}{\eta}+\frac{y_o}{\eta} > 0 \end{aligned} \right\} \quad \text{..... (A・1)}$$

上式より δ_o を消去し整理すると， y_o は次式より求まる。

$$y_o > 1, \quad y_o > \eta, \quad y_o > (1+\eta)(1+|i|)/2 \cdots \quad \text{(A・2)}$$

（附録2） $\lambda_s, a_s, \cdots, b_c, c_c$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \lambda_s &= (\lambda_1 G_{s1} - \xi \lambda_2 H_{s1}) \\ a_s &= (a_1 G_{s1} - \xi a_2 H_{s1}) + 3p_o(\lambda_1 G_{s2} - \xi \lambda_2 H_{s2}) \\ b_s &= (b_1 G_{s1} - \xi b_2 H_{s1}) + 2p_o(a_1 G_{s2} - \xi a_2 H_{s2}) \\ &\quad + 3p_o^2(\lambda_1 G_{s3} - \xi \lambda_2 H_{s3}) \\ c_s &= (c_1 G_{s1} - \xi c_2 H_{s1}) + p_o(b_1 G_{s2} - \xi b_2 H_{s2}) \\ &\quad + p_o^2(a_1 G_{s3} - \xi a_2 H_{s3}) + p_o^3(\lambda_1 G_{s4} - \xi \lambda_2 H_{s4}) \\ &\quad \text{..... (A・3)} \\ a_c &= 3p_o(\lambda_1 G_{c2} - \xi \lambda_2 H_{c2}) \\ b_c &= 2p_o(a_1 G_{c2} - \xi a_2 H_{c2}) + 3p_o^2(\lambda_1 G_{c3} - \xi \lambda_2 H_{c3}) \\ c_c &= p_o(b_1 G_{c2} - \xi b_2 H_{c2}) + p_o^2(a_1 G_{c3} - \xi a_2 H_{c3}) \\ &\quad + p_o^3(\lambda_1 G_{c4} - \xi \lambda_2 H_{c4}) \\ &\quad \text{..... (A・4)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{s1} &= 2I_1 \cos \phi_1 + y_o R_1 \\ G_{s2} &= (I_1 R_1 + y_o R_2) \cos \phi_{yp} \\ G_{s3} &= I_1 \{ R_2 \cos^2 \phi_{yp} + (2/3) \cos^3 \phi_1 \sin^2 \phi_{yp} \} \\ &\quad + y_o \{ R_3 \cos 2\phi_{yp} + R_1 \sin^2 \phi_{yp} \} \\ G_{s4} &= (I_1/16) \{ 12R_1 \cos \phi_{yp} - (\sin 4\phi_1 - 2 \sin 2\phi_1) \\ &\quad \times \cos 3\phi_{yp} + (y_o/8) \{ (9 \cos \phi_1 - \cos 3\phi_1) \cos \phi_{yp} \\ &\quad + \{ \cos \phi_1 - (2/3) \cos 3\phi_1 + (1/5) \cos 5\phi_1 \} \cos 3\phi_{yp} \} \} \\ &\quad \text{..... (A・5)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{s1} &= -2I_2 \cos \phi_2 - y_o S_1 \\ H_{s2} &= (I_2 S_1 - y_o S_2) \cos \phi_{yp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{s3} &= I_2 \{ S_2 \cos^2 \phi_{yp} - (2/3) \cos^3 \phi_2 \sin^2 \phi_{yp} \} \\ &\quad - y_o \{ S_3 \cos 2\phi_{yp} + S_1 \sin^2 \phi_{yp} \} \\ H_{s4} &= (I_2/16) \{ 12S_1 \cos \phi_{yp} + (\sin 4\phi_2 - 2 \sin 2\phi_2) \\ &\quad \times \cos 3\phi_{yp} - (y_o/8) \{ -(9 \cos \phi_2 - \cos 3\phi_2) \times \cos \phi_{yp} \\ &\quad - \{ \cos \phi_2 - (2/3) \cos 3\phi_2 + (1/5) \cos 5\phi_2 \} \times \cos 3\phi_{yp} \} \} \\ &\quad \text{..... (A・6)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{c2} &= \{ I_1 R_4 + (2/3) y_o \cos^3 \phi_1 \} \sin \phi_{yp} \\ G_{c3} &= \{ (2/3) I_1 \cos^3 \phi_1 + y_o (R_1 - R_2) \} \sin 2\phi_{yp} \\ G_{c4} &= (I_1/16) \{ 12R_4 \sin \phi_{yp} + (\sin 4\phi_1 + 2 \sin 2\phi_1) \\ &\quad \times \sin 3\phi_{yp} \} + (y_o/8) \{ (3 \cos \phi_1 + \cos 3\phi_1) \sin \phi_{yp} \\ &\quad + \{ \cos \phi_1 - (1/5) \cos 5\phi_1 \} \sin 3\phi_{yp} \} \\ &\quad \text{..... (A・7)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{c2} &= \{ I_2 S_4 + (2/3) y_o \cos^3 \phi_2 \} \sin \phi_{yp} \\ H_{c3} &= \{ -(2/3) I_2 \cos^3 \phi_2 - y_o (S_1 - S_2) \} \sin 2\phi_{yp} \\ H_{c4} &= (I_2/16) \{ 12S_4 \sin \phi_{yp} - (\sin 4\phi_2 + 2 \sin 2\phi_2) \\ &\quad \times \sin 3\phi_{yp} \} - (y_o/8) \{ -(3 \cos \phi_2 + \cos 3\phi_2) \\ &\quad \times \sin \phi_{yp} - \{ \cos \phi_2 - (1/5) \cos 5\phi_2 \} \\ &\quad \times \sin 3\phi_{yp} \} \\ &\quad \text{..... (A・8)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_1 &= (\pi - 2\phi_1 + \sin 2\phi_1)/2 \\ R_2 &= (9 \cos \phi_1 - \cos 3\phi_1)/6 \\ R_3 &= \{ 6(\pi - 2\phi_1) + 8 \sin 2\phi_1 - \sin 4\phi_1 \}/16 \\ R_4 &= (\pi - 2\phi_1 - \sin 2\phi_1)/2 \\ &\quad \text{..... (A・9)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_1 &= (\pi + 2\phi_2 - \sin 2\phi_2)/2 \\ S_2 &= (-9 \cos \phi_2 + \cos 3\phi_2)/6 \\ S_3 &= \{ 6(\pi + 2\phi_2) - 8 \sin 2\phi_2 + \sin 4\phi_2 \}/16 \\ S_4 &= (\pi + 2\phi_2 + \sin 2\phi_2)/2 \\ &\quad \text{..... (A・10)} \end{aligned}$$

$$I_1 = -1 - i + \delta_o, \quad I_2 = -1 + i - \delta_o \quad \text{..... (A・11)}$$

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \begin{cases} -\pi/2 & (\alpha > 1) \\ -\sin^{-1} \alpha & (|\alpha| \leq 1) \\ \pi/2 & (\alpha < -1), \end{cases} \quad \alpha = \frac{I_1}{y_o} \\ \phi_2 &= \begin{cases} \pi/2 & (\beta > 1) \\ \sin^{-1} \beta & (|\beta| \leq 1) \\ -\pi/2 & (\beta < -1), \end{cases} \quad \beta = \frac{I_2}{y_o} \\ &\quad \text{..... (A・12)} \end{aligned}$$

また，式(20)の $\lambda'_s, a'_s, b'_s, c'_s, a'_c, b'_c$ および c'_c は，式(A・3)，(A・4)において，次の置換により求められる。

$$\begin{aligned} \lambda_s &\rightarrow \lambda'_s, \quad a_s \rightarrow a'_s, \quad b_s \rightarrow b'_s, \quad c_s \rightarrow c'_s, \quad a_c \rightarrow a'_c \\ b_c &\rightarrow b'_c, \quad c_c \rightarrow c'_c, \quad p_o \rightarrow p'_o, \quad G_{sj} \rightarrow (-1)^j H'_{sj}, \\ H_{sj} &\rightarrow (-1)^j G'_{sj}, \quad G_{cj} \rightarrow (-1)^j H'_{cj}, \quad H_{cj} \rightarrow \\ &\quad (-1)^j G'_{cj} \\ &\quad \text{..... (A・13)} \end{aligned}$$

$G'_{aj}, H'_{aj}, G'_{cj}$ および $H'_{cj} (j=1,2,3,4)$ は式 (A・5) ~ (A・8) にて,

$$G_{aj} \rightarrow G'_{aj}, H_{aj} \rightarrow H'_{aj}, G_{cj} \rightarrow G'_{cj}, H_{cj} \rightarrow H'_{cj} \quad (\text{A} \cdot 14)$$

$$I_1 \rightarrow I'_1, I_2 \rightarrow I'_1, y_o \rightarrow y_o/\eta, R_n \rightarrow R'_n, S_n \rightarrow S'_n, \phi_1 \rightarrow \phi'_1, \phi_2 \rightarrow \phi'_1, \phi_{yp} \rightarrow \phi'_{yp} \quad (\text{A} \cdot 15)$$

$$R'_n, S'_n (n=1,2,3,4) \text{ は式 (A} \cdot 9), (\text{A} \cdot 10) \text{ において, } R_n \rightarrow R'_n, S_n \rightarrow S'_n, \phi_1 \rightarrow \phi'_1, \phi_2 \rightarrow \phi'_1 \quad (\text{A} \cdot 16)$$

$$I'_1, I'_2, \phi'_1 \text{ および } \phi'_2 \text{ は, 式 (A} \cdot 11), (\text{A} \cdot 12) \text{ において, } I_1 \rightarrow I'_1, I_2 \rightarrow I'_1, \phi_1 \rightarrow \phi'_1, \phi_2 \rightarrow \phi'_1, i \rightarrow -i', \delta_o \rightarrow \delta_o/\eta, y_o \rightarrow y_o/\eta \quad (\text{A} \cdot 17)$$

なる置換を施してえられる。

(附録3) $\lambda, a, \dots, b', c'$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \lambda &= (\lambda_1 D_1 - \xi \lambda_2 E_1) \\ a &= (a_1 D_1 - \xi a_2 E_1) + 3p_o(\lambda_1 D_2 - \xi \lambda_2 E_2) \\ b &= (b_1 D_1 - \xi b_2 E_1) + 2p_o(a_1 D_2 - \xi a_2 E_2) \\ &\quad + 3p_o^2(\lambda_1 D_3 - \xi \lambda_2 E_3) \\ c &= (c_1 D_1 - \xi c_2 E_1) + p_o(b_1 D_2 - \xi b_2 E_2) \\ &\quad + p_o^2(a_1 D_3 - \xi a_2 E_3) + p_o^3(\lambda_1 D_4 - \xi \lambda_2 E_4) \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 18)$$

$$D_1 = I_1(\pi - 2\phi_1) + 2y_o \cos \phi_1$$

$$D_2 = G_{s1} \cos \phi_{yp}$$

$$D_3 = (I_1/2)(\pi - 2\phi_1 + \sin 2\phi_1 \cos \phi_{yp}) + y_o\{R_2 \cos^2 \phi_{yp} + (2/3)\cos^2 \phi_1 \sin^2 \phi_{yp}\}$$

$$D_4 = (I_1/6)(9 \cos \phi_1 \cos \phi_{yp} - \cos 3\phi_1 \cos 3\phi_{yp}) + (y_o/16)\{12R_1 \cos \phi_{yp} - (\sin 4\phi_1 - 2 \sin 2\phi_1) \cos 3\phi_{yp}\} \quad (\text{A} \cdot 19)$$

$$E_1 = I_2(\pi + 2\phi_2) + 2y_o \cos \phi_2$$

$$E_2 = H_{s1} \cos \phi_{yp}$$

$$E_3 = (I_2/2)(\pi + 2\phi_2 - \sin 2\phi_2 \cos 2\phi_{yp})$$

$$E_4 = (I_2/6)(-9 \cos \phi_2 \cos \phi_{yp} + \cos \phi_2 \cos 3\phi_{yp}) - (y_o/16)\{12S_1 \cos \phi_{yp} + (\sin 4\phi_2 - 2 \sin 2\phi_2) \cos 3\phi_{yp}\} \quad (\text{A} \cdot 20)$$

また, λ', a', b' および c' は式 (A・18) に次の置換

$$\left. \begin{aligned} \lambda &\rightarrow \lambda', a \rightarrow a', b \rightarrow b', c \rightarrow c', p_o \rightarrow p'_o \\ D_j &\rightarrow (-1)^j E'_j, E_j \rightarrow (-1)^j D'_j \quad (j=1,2,3,4) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A} \cdot 21)$$

を施してえられる。 D'_j, E'_j は式 (A・19), (A・20) において, $D_j \rightarrow D'_j, E_j \rightarrow E'_j$ および式 (A・14), (A・15) の置換により求められる。