組合せ形カスケード増幅空気マイクロ メータ回路の静特性*

—組合せ形カスケード増幅空気マイクロメータ (第3報)—

山 本 巖**

Static Transfer Characteristics of Pneumatic Micrometer with both Hybrid
Pressure Cascade Connection and Linear Feedback

—Pneumatic Micrometer with both Hybrid Pressure Cascade
Connection and Linear Feedback (3rd Report)—

Iwao YAMAMOTO

This paper is concerned in static transfer characteristics of the pneumatic micrometer system with both hybrid pressure cascade connection and linear feedback. The static transfer characteristic expression is shown as the sum of the transfer characteristic of the linear feedback path and that of the forward circuit which consists of a series of two pneumatic micrometer single circuits. Using the same pneumatic circuit element informed in the previous report No. 2, the static characteristic curve is concretely introduced, and the effect of the input stage initial operating point, the coupling transducer gain, the feedback transducer gain and the compliance between the gauging nozzle and its counter-face on the transfer characteristic curve are discussed. It is also described on a three stage pneumatic amplifier having additional intermediate amplifier circuit which is good for getting very high amplification.

1. 序 言

はじめの報告において、低-高圧の順に供給源圧力の異なる空気マイクロメータをカスケード接続したものに、線形特性のフィードバック回路を付加した測定系を提案し、その特徴を実験により定性的に示した¹⁾。また第2報において、この系の前向き回路に相当する低-高圧の順に供給源圧力の異なる空気マイクロメータ単回路をカスケード接続した回路の静特性式を導き、その静特性曲線および静特性曲線の近似線形領域の性質について調べた結果について述べた²⁾。この報告では、第2報で述べた回路に線形フィードバックを付加した系、すなわち本研究の目的とする測定系の静特性曲線ならびにその線形域が、系を構成する回路要素の定数および作動点の選び方によってどのように変化するかについて、第2報で述べたこの系の前向き回路の静特性との関連を考慮し、また特に低い測定力と高倍率を必要とするときに有

効な中間段増幅回路を付加した場合も含めて調べた結果を述べる。

本報告で用いられる主な記号はつぎのとおりである。

- k_{rf}, k_{rg} : 入力段, 出力段各空気回路の測定ノズルとその対向面間のコンプライアンス
- K_g : 段間結合変換器のゲイン
- p_1, p_2 : 入力段, 出力段各空気回路の指示圧力
- F_1, p_{01} : 入力段空気回路の測定力ならびに作動開始圧力
- p_{s2} : 出力段空気回路の供給源圧力
- β : フィードバック変換器のゲイン
- p_{mc}, m_c : カスケード接続回路の静特性曲線の変曲点の圧力ならびにその点での変換倍率
- K_m : この系の最大倍率
- η : 静特性曲線上の点が直線からどれだけずれているかをあらわす関数
- η_c : カスケード接続回路の静特性曲線についての η
- Δp_l : 線形域の長さ
- p_3, p_{03} : 3段増幅の場合における中間段増幅空気回路の指示圧力ならびに作動開始圧力

*原稿受付 昭和45年5月26日。昭和40,43年度精機学会春季大会学術講演会(昭和40年4月8日, 43年4月3日)にて発表。

**正会員 金属材料技術研究所(東京都目黒区中目黒2-3-12)。

図1 組合せ形カスケード増幅空気マイクロメータの回路構成と静特性曲線

2. 組合せ形カスケード増幅空気マイクロメータの静特性式

カスケード接続空気マイクロメータ回路の作動図(第2報図1(b))における $k_{rf} f_1(p_{01})$ の代りに $k_{rf} f_1(p_{01}) + \beta \cdot p_{s2}$, $k_{rf} f_1(p_1)$ の代りに $k_{rf} f_1(p_1) - \beta \cdot p_2$ を考えた図1(a)を用いれば, 第2報と同じ過程により線形フィードバック回路の付加されたカスケード接続空気マイクロメータの一般式として次式が得られる.

$$e_i = g_1 \left(p_{01} - \frac{1}{K_g} \left[g_2(p_2) + k_{rg} \{ f_2(p_{s2}) - f_2(p_2) \} \right] \right) + k_{rf} \left\{ f_1(p_{01}) - f_1 \left(p_{01} - \frac{1}{K_g} \left[g_2(p_2) + k_{rg} \{ f_2(p_{s2}) - f_2(p_2) \} \right] \right) - g_1(p_{01}) + \beta(p_{s2} - p_2) \right\} \quad (1)$$

ここで, 関数形 g_1 , g_2 および f_1 , f_2 としてそれぞれ低圧作動, 高圧作動の各空気マイクロメータ単一回路の静特性関数および測定力関数を代入することによって組合せ形カスケード増幅空気マイクロメータの静特性が求められるが, 第2報の結果を参照することによって, 式(1)はつぎのように表現されう.

$$e_i = g_{12}(p_2) + \beta(p_{s2} - p_2) \quad (2)$$

ここで,

$$g_{12}(p_2) = g_1 \left(p_{01} - \frac{1}{K_g} \left[g_2(p_2) + k_{rg} \{ f_2(p_{s2}) - f_2(p_2) \} \right] \right) - g_1(p_{01}) \quad (3)$$

で, 入力段の測定力の効果を省略した場合の低-高圧カスケード接続空気マイクロメータ回路の静特性式である. 図1(c), (d)はこれらの関係を示すブロック線図ならびに静特性曲線の略図である.

この系の静特性曲線の線形域をそれに対するずれ率³⁾

$$\eta = \frac{\varepsilon(p_2)}{\left(\beta + \frac{1}{m_c} \right) (p_{mc} - p_2)} \quad (4)$$

が所要値をとる範囲とすれば, これは η と系の前向き回路であるカスケード接続回路の静特性曲線に対するずれ率

$$\eta_c = \frac{\varepsilon(p_2)}{\frac{1}{m_c} (p_{mc} - p_2)} \quad (5)$$

との間の次式

$$\eta = \eta_c / (n + 1) \quad (6)$$

の関係をを用いて求めることができる. ここで,

$$n = m_c \beta \quad (7)$$

である. 特性曲線の線形領域に対する変換倍率 K_m は

$$K_m = -m_c / (n + 1) \quad (8)$$

$p_{01}=450\sim 100\text{mmAq}, K_g=2\mu/\text{mmAq}, \beta=50\mu/\text{kg/cm}^2, k_{rg}=0$
(a)

$p_{01}=350\text{mmAq}, K_g=4\sim 0.25\mu/\text{mmAq}, \beta=50\mu/\text{kg/cm}^2, k_{rg}=0$
(b)

$p_{01}=350\text{mmAq}, K_g=2\mu/\text{mmAq}, \beta=12.5\sim 800\mu/\text{mm}$
(c)

$p_{01}=350\text{mmAq}, K_g=2\mu/\text{mmAq}, \beta=50\mu/\text{kg/cm}^2$
(d)

図 2 静特性曲線の計算例

であり, また測定力は

$$F_1 = f_1 \left(p_{01} - \frac{1}{K_g} \left[g_2(p_2) + k_{rg} \{ f_2(p_{s2}) - f_2(p_2) \} \right] \right) \quad (9) \quad \text{であたえられる.}$$

表 1 ノズルおよびオリフィスの寸法

ノズル	d_{0j}	d_{1j}	d_{2j}	δ_j
N ₁₁	2.03	2.34	3.28	2
N ₂₁	1.53	1.53	3	2
オリフィス	d'_{0j}	d'_{1j}	d'_{2j}	δ'_j
N ₁₂	0.71	2.5	18	2
N ₂₂	0.50	0.53	18	2

単位: mm

N₁₁, N₁₂: 入力段用, ($j=1$) N₂₁, N₂₂: 出力段用, ($j=2$)表 2 図 2 (a)~(d) における, 各種パラメータと静特性曲線の線形域の長さ Δp_1 , 線形域の中心 p_{1m} , 変換ゲイン K_m , 測定力の初期値 F_{01} ($p_1=p_{01}$ における装置の測定力の値) および $p_2=0.2 \text{ kg/cm}^2$ としたときの測定力の F_{01} からのずれ $\Delta F_{(0.2)}$ との関係

p_{01} (mmAq)	Δp_1 (kg/cm ²)	p_{1m} (kg/cm ²)	K_m (kg/cm ² /mm)	F_{01} (g)	$\Delta F_{(0.2)}$ (g)
450	0.575	0.660	18.43	4.13	0.71
350	0.582	0.672	18.54	2.60	0.48
250	0.510	0.688	18.04	1.61	0.31
150	0.388	0.712	16.38	0.93	0.25
100	0.298	0.735	14.03	0.63	0.25

 $K_g=2 \mu/\text{mmAq}$, $\beta=50 \mu/\text{kg/cm}^2$, $k_{rg}=0$, $\eta=0.02$

(a)

K_g (μ/mmAq)	Δp_1 (kg/cm ²)	p_{1m} (kg/cm ²)	K_m (kg/cm ² /mm)	F_{01} (g)	$\Delta F_{(0.2)}$ (g)
4	0.726	0.635	19.25	2.60	0.24
2	0.584	0.671	18.54	2.60	0.48
1	0.442	0.700	17.22	2.60	0.97
0.5	0.328	0.724	14.85	2.60	1.46
0.25	0.223	0.730	10.87	2.60	2.46

 $p_{01}=350 \text{ mmAq}$, $\beta=50 \mu/\text{kg/cm}^2$, $k_{rg}=0$, $\eta=0.02$

(b)

β ($\mu/\text{kg/cm}^2$)	Δp_1 (kg/cm ²)	p_{1m} (kg/cm ²)	K_m (kg/cm ² /mm)	F_{01} (g)	$\Delta F_{(0.2)}$ (g)
800	0.954	0.520	1.244	2.60	0.48
400	0.905	0.548	2.47	2.60	0.48
200	0.824	0.588	3.29	2.60	0.48
100	0.712	0.638	9.62	2.60	0.48
50	0.584	0.672	18.55	2.60	0.48
25	0.454	0.692	34.6	2.60	0.48
12.5	0.356	0.704	61.0	2.60	0.48

 $K_g=2 \mu/\text{mmAq}$, $p_{01}=350 \text{ mmAq}$, $k_{rg}=0$, $\eta=0.02$

(c)

k_{rg} (μ/g)	Δp_1 (kg/cm ²)	p_{1m} (kg/cm ²)	K_m (kg/cm ² /mm)	F_{01} (g)	$\Delta F_{(0.2)}$ (g)
0	0.582	0.672	18.55	2.60	0.48
0.25	0.594	0.650	18.22	2.60	0.53
1.0	0.544	0.590	15.52	2.60	0.65
4.0	0.336	0.442	15.56	2.60	1.14

 $K_g=2 \mu/\text{mmAq}$, $p_{01}=350 \text{ mmAq}$, $\beta=50 \mu/\text{kg/cm}^2$, $\eta=0.02$

1970年8月

3. 計算例にもとづく静特性曲線の性質の検討

図 2 (a)~(d) は第 2 報で用いたものと 同様の表 1 の寸法のノズル, オリフィスの組合わせを使用するとして静特性曲線を求めた結果である. ここで, g_1, g_2, f_2 の関数形は第 2 報と同一のものを使用している. また表 2 (a)~(d) は, 図 2 (a)~(d) の各特性曲線について, これに対応する前向き回路の $p_2-\eta_c$ 曲線(第 2 報の図 2~6) を使用して求めた $\eta=0.02$ に対する線形域の長さ, その中心点, 変換倍率, 測定力の初期値およびその一定出力圧に対する変動分を求めた結果である.

まず図 2 (a), (b) は p_{01}, K_g をそれぞれパラメータとした場合であるが, これらから p_{01} が入力段空気回路の静特性曲線の変曲点の圧力 p_{m1} ($=381 \text{ mmAq}$) に近いものほど, また K_g が大なるものほど静特性曲線が線形化されることがわかる. これは, この場合第 2 報で述べたごとく, 前向き回路の静特性曲線が, p_{01} が p_{m1} から離れ, K_g が小なるほど非線形化されることが, それが低倍率化されることの両方に起因している. すなわち, 上下の $p_2-\eta_c$ 曲線における η_c の同一値に対しての間隔が減少することと, m_c が減少するため β の一定値に対する式(5)の n が減少することによる. なお測定力は p_1 に依存するので, その大きさは p_{01} が大なるほど大となる. これらの関係は表 2 (a), (b) に具体的に示されている.

つぎに図 2 (c) は β をパラメータとして表現したものであるが, これより β が大なるほど静特性曲線が線形化される様子がわかる. この静特性曲線の β に対する関係は図 2 (a) のその K_g に対する関係とよく似ているが, この場合には前向き回路の静特性曲線はすべてのものに共通であるため, 系の静特性曲線が β の増大によって線形化するのとはもっぱら式(6)における n の増大によっている. なお, p_1 と p_2 との関係は次式

$$p_1 = p_{01} - \frac{1}{K_g} \left\{ g_2(p_2) + k_{rg} \{ f_2(p_{s2}) - f_2(p_2) \} \right\}. \quad (10)$$

であたえられ, β に無関係であるため, 横軸を βp_s について規格化して表わした図 2 (c) では, p_1 曲線は β が小なるものほど横にのびて上側に位置するようになっている. したがって,

器のゲイン K_g を十分に選んで、系の前向き回路の変換倍率を所要の十分大きなものにする必要がある。

このような場合に、 K_g を等価的に増大させる方法として最も有効なものは、もう一つの段間結合変換器と高圧作動空気マイクロメータ単一回路を入・出力空気回路の中間に挿入して前向き回路を3段増幅とすることである。図3(a)にこのブロック線図が示されている。ここで中間段の空気マイクロメータ G_3 は、その作動開始圧力 p_{03} を G_3 単独の静特性曲線の変曲点の圧力 p_{m3} 以下の適当な点に選ぶことによって、その増分変換倍率を所要の値に選ぶことができる。 G_3 は高圧作動であるため、その変換倍率は大であるので、結合変換器 T_{g1} ならびに T_{g2} は比較的ゲインの低い小型のものが使用でき、さらに G_3 の作動開始圧力 p_{03} を可変とすることによって、3(a)で $T_{g\cdot T}$ として示された部分の等価変換ゲイン K_g の調整が可能である。この場合の正確な特性式は、入・出力回路についての作動図(図1(a)ならびに $p_{01} \rightarrow p_{03}$ とおきかえた図1(b))とあわせて、図3(b)の中間段増幅回路についての作動図を画くことによって得られる次式

$$e_i = g_1(p_1) - g_1(p_{01}) + \beta(p_{s2} - p_2) \quad (11)$$

$$p_1 = p_{01} - \frac{1}{K_{g1}} \left[g_3(p_3) - g_3(p_{03}) + k'_{rg} \{ f_3(p_{03}) - f_3(p_3) \} \right] \quad (12)$$

$$p_3 = p_{03} - \frac{1}{K_{g2}} \left[g_2(p_2) + k_{rg} \{ f(p_{s2}) - f_2(p_2) \} \right] \quad (13)$$

をまとめることによってつぎようになる。

$$\begin{aligned} e_i = & g_1 \left(p_{01} - \frac{1}{K_{g1}} \left\{ g_3 \left(p_{03} - \frac{1}{K_{g2}} \left[g_2(p_2) + k_{rg} \{ f_2(p_{s2}) - f_2(p_2) \} \right] \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + k_{rg} \{ f_2(p_{s2}) - f_2(p_2) \} \right\} \right) - g_3(p_{03}) + k'_{rg} \\ & \times \left\{ f_3(p_{03}) - f_3 \left(p_{03} - \frac{1}{K_{g2}} \left[g_2(p_2) + k_{rg} \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \times \{ f_2(p_{s2}) - f_2(p_2) \} \right] \right\} \right\} - g_1(p_{01}) + \beta(p_{s2} - p_2) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 K_{g1}, K_{g2} : T_{g1}, T_{g2} の変換ゲイン、 k'_{rg} : G_3 の測定ノズル部のコンプライアンス、 g_3, f_3 : G_3 の静特性関数と測定力関数である。 G_3 の特性を線形とみなせば、式(14)は簡略化された表現として、さらに

$$\begin{aligned} e_i = & g_1 \left(p_{01} - \frac{1}{K_{g1} K_{g2}} \left\{ \left(\frac{dg_3(p_3)}{dp_3} \right)_{p_{03}} - k_{rg} \left(\frac{df_3(p_3)}{dp_3} \right)_{p_{03}} \right\} \right. \\ & \left. \times [g_2(p_2) + k_{rg} \{ f_3(p_{s2}) - f_2(p_2) \}] \right) - g_1(p_{01}) \\ & + \beta(p_{s2} - p_2) \end{aligned} \quad (15)$$

のようになる。

5. 実験

5.1 実験装置と方法

5.1.1 2段増幅の場合

I_0 : 水銀柱圧力計

I_1 : 水柱圧力計

Sw : N_{21} の垂直位置調整ねじ

B_g : ベロー (油入り)

H : レバー支持台

L : レバー

C_m : 垂直移動台

N_{11}, N_{21} : ノズル

N_{12}, N_{22} : オリフィス

J : ベロー支持台

P_f : ノズル支持板

M : 被測定面

S_g : 引張ばね

S_f : 圧縮ばね

B_d, B_d' : 減衰用油入りベロー

V_1 : 定圧室 (低圧用)

V_h : 定圧室 (高圧用)

V_1 : 入力段指示室

V_2 : 出力段指示室

図4 実験装置 (2段増幅の場合)

図4に示されるような装置を製作し実験を行なうこととした。これは第2報で用いた実験装置に、測定ヘッドである入力段空気回路の測定ノズルを出力空気圧に比例して変位させようとした、圧縮コイルばねとペローからなる圧力変位変換器（図中破線で囲まれた部分）を付加したものである。

図において、平板 P_f は圧縮ばね S_f によって上下のばね固定棒の間に弾性的に支持されている。ノズル N_{11} は、 P_f の中央部からその固定部分に向う、内部が細長くくりぬかれた配管によってペロー J をへて室 V_1 に連結されている。 B_d および B'_d はフィードバック変換器の減衰用として付加された中間に可変絞りをもつペローで、内部には油が充てんされている。フィードバック変換器のゲインの変更はばね S_f の交換によって行なわれる。図のような構造では、 β および k_{rf} は次式であたえられる。

$$\beta = S_\beta / (K_{s\beta} + K_{b\beta}) \quad (16)$$

$$k_{rf} = k_t \beta / (K_{s\beta} + K_{b\beta}) \quad (17)$$

ここで、 S_β : ペロー B_f の受圧面積、 $K_{s\beta}$: ばね S_f の合計のばね定数、 $K_{b\beta}$: B_f のばね定数、 k_t : 比例係数である。段間結合変換器については第2報に述べたものと同様で、レバー比 l/l_0 、ばね S_g の組合せにより、各種の K_g 、 k_{rg} が得られるようになっている。表4(a)(b)は使

表4 段間結合およびフィードバック変換器の種類とその構成要素の寸法（図4の場合）

(a) ばね

記号	線径 (mm)	コイル径 (mm)	長さ (mm)	巻数	ばね定数 (kg/mm)
S_{g-1}	1.0	7	40	20	0.296
S_{g-2}	1.5	7	50	20	1.02
S_{g-1}	3	20	35	6	3.11
S_{g+2}	5	25	35	6	17.8

(b) ペロー

記号	外径 (mm)	長さ (mm)	材質	有効受圧 面積 (cm^2)	ばね定数 (kg/mm)
B_{g-1}	105	52	焼青銅	69.3	0.45
B_{f-1}	44	50	焼青銅	10.8	0.37

(c) 段間結合変換器 (T_g) の構成と特性

記号	使用ペロー	使用ばね	l/l_0 (mm/mm)	K_g (μ/mmAq)	k_{rg} (μ/g)
A	B_{g-1}	$S_{g-1} \times 3$	163/214	4.0	0.7
B	B_{g-1}	$S_{g-2} \times 3$	106/213	1.0	0.25

(d) フィードバック変換器 (T_f) の構成と特性

記号	使用ペロー	使用ばね	β ($\mu/\text{kg}/\text{cm}^2$)	k_{rf} (μ/g)
β_1	B_{f-1}	$S_{f-1} \times 13$	250	0.17
β_2	B_{f-1}	$S_{f-2} \times 12$	48	0.05

用したペロー、ばねの寸法、定数、表4(c),(d)はこれらを組合せて構成させたフィードバック変換器および段間結合変換器の種類とそのゲインおよびコンプライアンスの測定値である。ノズル、オリフィスは表1の寸法のものを使用している。

実験にあたっては、あらかじめ平面 M をノズル N_{11} に近づけてゆき、ノズル N_{21} がレバー上のその対向面と接触したとき、室 V_1 の圧力が所要の作動開始圧力に等しくなるように、 N_{21} の垂直位置を S_w により調整した。この状態から M を N_{11} と逆の方向に変位させてゆき、その変位を別に付加された基準測微計（最小目盛 0.5μ ）でよみとり、これに対応する室 V_1 および V_2 の空気圧をそれぞれ水柱圧力計および水銀柱圧力計により読みとり静特性曲線を求めた。

5.1.2 3段増幅の場合

3段増幅の場合の実験装置として図5に示されるようなものを試作した。これは図4の B_g 、 S_g 、 L からなる段間結合変換器を、 B_{g1} と S_{g1} 、 B_{g2} と S_{g2} の2組のペローばねからなる圧力-変位変換器と、ノズル N_{31} 、オリフィス N_{32} からなる高圧作動空気マイクロメータの組合せで置き換えたものである。すなわち、被測定面の変位によって生ずる入力段空気回路の圧力変化は、一度 N_{31} 、 N_{32} からなる中間段の空気回路で増幅された後、出力段空気回路の入力変位となる。ねじ S_{w1} はノズル N_{31} 、ねじ S_{w2} はノズル N_{21} の垂直位置の調整用で、これによって入力段空気回路の作動開始圧力 p_{01} ならびに中間段空気回路の作動開始圧力 p_{03} が選択される。 p_{01} 、 p_{03} はそれぞれノズル N_{31} 、 N_{21} の位置とつぎの関係をもっている。

$$p_{01} = \frac{1}{K_{g1}} \{ e_{03} + k'_{rg} f_3(p_{03}) - g_3(p_{03}) \} \quad (18)$$

$$p_{01} = \frac{1}{K_{g2}} \{ e_{02} + k_{rg} f_2(p_2) \} \quad (19)$$

ここで、 e_{02} : 装置の作動前における N_{21} とその対向面との間隔、 e_{03} : 同じく N_{31} とその対向面との間隔である。なお、フィードバック変換機構としては図示のように自由端付近にノズル N_{11} が固定された片持はり状に支持された弾性板 S_f の中間点を、ロッドを介してペロー B_f で押すようにした構造のものを使用している。

実験方法は、あらかじめ S_{w2} 、 S_{w1} により N_{21} 、 N_{31} の位置を、 N_{21} が対向面と密接したときに入力段および中間段の指示圧がそれぞれ所定の作動開始圧力になるように調整しておくこと以外は、5.1.1の場合とほぼ同様である。ただし、被測定面 M としては全長 60 cm、縮少比 4:1 のてこの短腕の端に取り付けた平滑面を使用した。

N_{11}, N_{21}, N_{31} : ノズル
 S_{g1}, S_{g2} : 引張ばね
 N_{12}, N_{22}, N_{32} : オリフィス
 B_{g1}, B_{g2}, B_f : ペロー
 S_{w2} : N_{21} の垂直位置調整ねじ
 S_{w1} : N_{31} の垂直位置調整ねじ
 I_o : 水銀柱圧力計
 J : 可とう配管
 S_f : 板ばね
 M : 被測定平面

図 5 実験装置 (3 段増幅の場合)

表 5 段間結合およびフィードバック変換器の種類とその構成要素の寸法 (図 5 の場合)

(a) ばね

記号	線径 (mm)	コイル径 (mm)	長さ (mm)	巻数	ばね定数 (kg/mm)
S_{g-1}	1.0	7	40	20	0.296

(b) 板ばね

記号	厚み (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	材質	ヤング率 (kg/mm ²)
S_{f-1}	3.0	40	220	チタン銅合金	12×10^4
S_{f-2}	10	40	220	鋼	21×10^4

(c) ペロー

記号	外径	長さ	材質	有効受圧面積 (cm ²)	ばね定数 (kg/mm)
B_{g-1}	44	40	燐青銅	10.8	0.40
B_{g-2}	44	40	燐青銅	10.8	0.33
B_{f-1}	41	40	燐青銅	9.6	0.30
B_{f-2}	19	24	燐青銅	2.0	0.34

(d) 段間結合変換器 (T_{g1}) の構成と特性

記号	使用ペロー	使用ばね	K_{g1} (mm/kg/cm ²)	k'_{rg} (μ /g)
A_1	B_{g-1}	$S_{g-1} \times 3$	13	1.2

(e) 段間結合変換器 (T_{g2}) の構成と特性

記号	使用ペロー	使用ばね	K_{g2} (mm/kg/cm ²)	k_{rg} (μ /g)
A_2	B_{g-2}	$S_{g-1} \times 3$	15	1.38

(f) フィードバック変換器 (T_f) の構成と特性

記号	使用ペロー	使用ばね	l_1/l_0 (mm/mm)	β (μ /kg/cm ²)	k_{rf} (μ /g)
β'_1	B_{f-1}	$S_{f-1} + S_{f-2}$	157/106	25	0.005
β'_2	B_{f-2}	$S_{f-1} + S_{f-2}$	143/106	5	0.005

このでこの長腕の端を 1μ の微動目盛を有するマイクロメータのスピンデルで移動させることにより、約 0.2μ の精度で M を微小変位させ、これによって変化する出力段の指示圧 p_2 ならびに入力段、中間段の指示圧 p_1, p_3 をよみとることによって静特性曲線を求めた。

5.2 実験結果とその検討

図 6 (a)~(d) は表 4 (c) (d) の 2 種数ずつの段間結合およびフィードバック変換器の組合せのおおのについて、 $p_{01}=350, 150 \text{ mmAq}$ として、フィードバック回路の付加された低-高圧 2 段カスケード接続空気マイクロメータの静特性を測定した結果である。

また、図 7 (a) (b) は 3 段増幅の場合の測定結果で、 $p_{01}=150 \text{ mmAq}$, $p_{03}=0.7 \text{ kg/cm}^2$ で表 5 の変換器についてのものである。これらの図中、併記された曲線は式 (2), (3) ならびに式 (4) にもとづいて計算した理論曲線で、入出力段空気回路の静特性関数ならびに測定力関数は第 2 報で使用したものと同じものを使用し、中間段空気回路については出力段空気回路と同じものを使用して求めたものである。これらにおいて、いずれも実験値は理論曲線によく一致していて、これらの特性式によってこの系の静特性曲線が正確に求めることがわかる。なお、これらの結果をうるにあたっては、第 2 報の低-高圧カスケード接続回路のみの場合にみられたような出力空気圧のドリフト、脈動等の不安定現象はみられなかった。

この系では、入力段の作動開始圧力 p_{01} を選ぶことは、測定力の最大値を定めると同時に測定ヘッドと被測定面との最小間隙 ($e_{01}=g_1(p_{01})$) を決定する。したがって p_{01} を低く選ぶことは測定力をきわめて小になしうるとともに、測定ヘッドが被測定面と比較的離れた位置を

(a) $T_g: A, T_f: \beta_1$ (b) $T_g: B, T_f: \beta_1$ (c) $T_g: A, T_f: f_2$ (d) $T_g: B, T_f: f_2$

図 6 図 4 の装置を用いた実験結果

図7 図5の装置を用いた実験結果

基準として測定が行なわれることを意味し、被測定面のセッティングが容易になるという実用上の利点がある。2段増幅の図4の構造でも、ペロー B_g の受圧面積を大に選ぶか、レバー比 l/l_0 を大にすれば、結合変換器のゲイン K_g をかなり大きくすることも可能であるが、前者は入力段空気回路の負荷容積を大ならしめて装置の応答時間を増大させることになり、後者はコンプライアンス k_{rg} を大ならしめて出力段空気回路を低倍率化して K_g を大きくすることにより得られる系の前向き回路に対する高倍率化の効果を相殺することになる。したがって、 B_g の受圧面積ならびにレバー比 l/l_0 を極端に大にすることはさけるべきであり、高倍率の装置を実現するために十分大なる所要の K_g をうる方法としては、図5のような中間段増幅回路を用いた装置が有効である。

6. 結 言

組合せ形カスケード増幅空気マイクロメータの静特性曲線の性質を具体的回路例によって調べ、検討を加えた。その結果を要約するとつぎのようになる。

- 1) この系の静特性は、その前向き回路である低-高圧カスケード接続空気マイクロメータ回路の静特性とフィードバック回路のそれとの合成されたものとして表現される。
- 2) 入力段空気回路の作動開始点はその静特性曲線の

変曲点に近いほど、また結合変換器のゲイン K_g およびフィードバック変換器のゲイン β が大なるほど系の静特性曲線の線形域は広くなる。3) 出力段空気回路の測定力は、その測定ノズル部のコンプライアンス k_{rg} が比較的小であれば、静特性曲線の線形域の長さをわずかに増加させるが、 k_{rg} が大になるにつれてしだいに線形域の長さを減少させる効果をもつ。4) p_{01} , K_g , β の選択により所要の測定力、変換倍率および線形域の長さをもつような空気マイクロメータを得ることができる。中間段増幅回路を付加し実効的に K_g を増大させることによって、高倍率できわめて低い測定力と広い線形域の特性曲線をあわせもつような装置を実現できる。

おわりにあたって、この研究に関して貴重なご教示を賜った東京工業大学谷口修教授、ならびに実験およびデータ整理等終始熱心にご協力くださった元本研究所物理分析室、本間良之氏に深謝を捧げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 山本 巖：組合せ形カスケード増幅空気マイクロメータ，精密機械，**30**，11 (1964) 864.
- 2) 山本 巖：低-高圧カスケード接続空気マイクロメータ回路の静特性，精密機械，**35**，11 (1969) 738.
- 3) 山本 巖：フィードバックを使用した空気マイクロメータ計測自動制御学会論文集，**2**，3 (1966) 195.