

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-124

吹出式超音速風洞の集合洞圧力制御について

外立政隆・近藤洋史・原 亘利

1967 年 12 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 資 料

TM-76	コーティングの断熱効果のアナログシミュレーション	1966年2月	小川 鉦一
TM-77	テレメータ電波の偏波面の回転を利用したロケットのスピン測定について	1966年3月	田畑 浄治, 桜井 善雄 三浦 雅男
TM-78	昇降舵の操舵力特性に関するシミュレータ解析	1966年3月	堀川 勇壮, 森 幹彦 中野 佳直
TM-79	テレメータ機上装置の小型化の研究	1966年3月	新田 慶治
TM-80	安定制御のための一計算法	1966年3月	植崎 哲二
TM-81	吹出式超音速風洞の起動時および停止時における過負荷防止装置	1966年3月	石原 久蔵, 斎藤 秀夫 外立 政隆, 榊原 盛三 宗美 均
TM-82	ピトー管による境界層速度分布測定について	1966年4月	長洲 秀夫, 柏原登喜子
TM-83	ジェットリフトエンジン空気取入口の実験(II)	1966年4月	近藤 博, 増田 惣平
TM-84	二段ロケットの低速風洞試験	1966年7月	毛利 浩, 田村 敦宏 佐野 四郎, 能村 実
TM-85	航空機の滑走路走行時の振動に関する実験的研究	1966年8月	小野 幸一
TM-87	極小型超音速機用姿勢制御装置の特性解析	1966年8月	池谷 光栄, 畑山 茂樹
TM-88	プロペラ後流偏向型 STOL 機の風洞試験(I)	1966年9月	犬丸 矩夫, 岡部祐二郎 北村 清美, 川幡 長勝 木村 友昭
TM-89	有孔板の振動について	1966年9月	川井 忠彦, 泉 日出夫
TM-90	地上付近の横風の影響による小型ロケットの方位角変化	1966年9月	戸川 隼人, 石黒登美子
TM-91	高速タービン翼列二次元試験	1966年10月	近藤 博, 蓑田 光弘 山崎 紀雄
TM-92	リフトジェットエンジン試験設備(I) 一台上運転設備一	1966年10月	大山 耕一, 吉田 晃昇 中山 晋, 菅原 昇 五味 光男
TM-94	J-3 ジェットエンジン用タービン動翼の固有振動特性	1966年11月	武内 澄夫, 宮地 敏雄 星谷 昌二
TM-95	超軽量軸流圧縮機動翼の固有振動特性	1966年11月	武内 澄夫, 宮地 敏雄 星谷 昌二
TM-96	2024-T4および7075-T6有孔平板の曲げ疲労試験と2024-T4平滑丸棒の軸荷重疲労試験	1966年11月	佐野 政明, 菰岡 一洋
TM-97	高マッハ数風洞について(II)	1967年1月	吉永 崇, 井上 建二 広田 正行, 楯 篤志
TM-98	40kWプラズマ発生装置の諸特性	1967年1月	野村 茂昭, 相原 康彦
TM-99	搭載機器用環境試験装置の特性	1967年2月	大月 正男, 鈴木 孝雄 田畑 浄治, 円居 繁治
TM-100	二連型リフトエンジンの吸込み抵抗	1967年3月	近藤 博, 大城章一郎
TM-101	低圧環境下における固体ロケットモータの性能	1967年3月	望月 昌, 斎藤 信 五代 富文, 伊藤 克弥 湯沢 克宜
TM-102	弾性支持片持板の振動	1967年3月	塙 武敏, 築地 恒夫 越出 慎一, 林 洋一
TM-103	結合梁の振動について	1967年3月	築地 恒夫, 林 洋一
TM-104	平板翼模型の固有振動モードの測定	1967年4月	中井 暎一, 森田 甫之
TM-105	非定常境界層方程式を含む放物型微積分方程式の数値解法	1967年4月	関口 清子

吹出式超音速風洞の集合胴圧力制御について*

外 立 政 隆**・近 藤 洋 史**・原 亘 利**

吹出式超音速風洞における集合胴圧力制御の制御特性の改善を計ることを目的として集合胴圧力制御系の伝達関数を風洞実験により求め、これをアナログ計算機でシミュレートして調節器に、(1) 比例+積分動作、(2) 比例+積分+弁開度制限動作、(3) 比例+積分+積分時間切換動作を与えた場合の制御特性をマッハ数および調節器パラメータを実験パラメータとして求め、各マッハ数の最適調節器条件を決定した。この結果を実際に風洞実験に応用して集合胴圧力制御系の制御特性をかなり改善することができた。また、非線形最適制御理論にもとづく調節器について、上記の (1)~(3) の制御方式と比較した結果、前記の制御方式の制御特性との差は比較的少なく、調節器パラメータを適当に選べば (1)~(3) の制御方式で実用上、十分な性能が得られることがわかった。

1. ま え が き

一般に吹出式風洞では圧縮空気を貯気槽に貯え、これを短時間に放出して測定部に所定の気流を得、各種の測定、計測を行なう。定常気流を得るためにはなんらかの集合胴圧力の制御が必要であり、通常は空気供給用の弁を制御弁として制御弁下流の集合胴圧力を検出して制御弁の開閉を行なって制御している。このような風洞では限られた空気量を有効に使って測定時間をできるだけ長くすることが要求されるから、圧力制御としては風洞起動の過渡時において早く目標値に近づけ、最大行き過ぎ量を少なくして整定させ、かつ整定後は定常特性の良い制御系を構成する必要がある。

航空宇宙技術研究所吹出式超音速風洞（測定部断面積 $1\text{m} \times 1\text{m}$ ）では Hagan 社製の圧力制御装置を設置したが、風洞本体、調節器、および調圧弁の特性に不明の点があるので Hagan 社製調節器で操作できる各制御方法が十分活用されていなかった。そこでこれらの制御要素の伝達特性を実験により求め、これをアナログ計算機でシミュレートしてつぎの解析を行なった。

- (1) Hagan社製調節器で操作できる比例+積分動作制御方式（以下 PI 動作制御という）、PI+弁開度制限制御方式および PI+積分時間切換制御方式のそれぞれの安定領域を求めた。またそれぞれの制御方式の最適と思われる応答の調節器条件を決

定した。

- (2) この制御系に非線形最適制御理論にもとづくデュアル・モード制御を行なう場合の調節器を構成し、そのシミュレーション実験を行なって (1) の各種制御方式の最適な応答と比較した。

その結果、Hagan社製調節器の各種調節器条件のときの応答波形を知ることができ、従来より速応性、減衰特性、定常特性のよい応答波形を見つけることができた。現在、これを実風洞に使用して好成績をおさめている。また非線形最適制御を使えば、これ等の特性をさらに改善されることを確認した。

2. 記 号

r : 設定値

e : 誤差=設定値-制御量

\dot{e} : $= \frac{de}{dt}$

e_a : 誤差圧力=設定圧力-集合胴測定圧力（制御量）(kg/cm^2)

e_b : 誤差電圧（誤差圧力を電圧に変換したもの）(V)

e_c : 調節器出力 (V)

e_f : 非線形制御において函数発生器の入力 (V)

e_d : 非線形制御における微分器の出力 (V)

m : 操作量 (cm/sec)

A : 操作量の最大値 (cm/sec)

z : 調圧弁ストローク (cm)

弁開度: 調圧弁の全ストロークに対する開度の割合 (%)

* 昭和42年9月20日受付

** 空気力学第二部

- p_0 : 集合胴圧力 (kg/cm²G)
 P_T : 貯気槽圧力 (kg/cm²G)
 G : 調節器ゲイン
 T_I : 調節器積分時間 (sec)
 VL : 調節器弁開度制限の設定値 (%)
 T : 制御対象の時定数 (sec)
 L : 制御対象のむだ時間 (sec)
 K : 制御対象の比例定数
 M : マッハ数
 T_S : 整定時間, 誤差が最終的に $\pm 1\%$ 以内におさまるまでの時間 (sec)
 e_v : 定速度定常偏差 [kg/cm²·sec]
 ϵ : 自然対数の底
 $f_{L0}(e \cdot \dot{e})$: むだ時間のないときの切換曲線の式
 $f_{L1}(e \cdot \dot{e})$: むだ時間のあるときの第一切換曲線の式
 $f_{L2}(e \cdot \dot{e})$: むだ時間のあるときの第二切換曲線の式
 v : 調圧弁特性の諸量を示す
 p : 風胴特性の諸量を示す
 t : 時間
 s : ラプラス演算子
 i : 諸量の初期値を示す

3. 制御系のブロック線図

3.1 調圧弁の特性

圧力制御系統を図 3.1 に示す。この図で調節器の後 a 点より調圧弁のストローク (z) までの伝達特性を調圧弁の特性と定義し、これを求めた。まず a 点にステップ入力を加えると弁は一般に図 3.2 に示すような応答をする。すなわちステップ入力印加後、(a) あるむだ時間をおいた後、(b) ほぼ直線的に開度をまし、(c) ステップ入力に対応する開度を示した後一定となる。ここで、(a)、(b)、(c) の過程を図 3.2 に点線で示すようにそれぞれ直線で近似することにした。(b) の直線部分の傾斜は弁の飽和速度を表わすが、これは貯気槽圧力にほぼ比例して変化し、貯気槽初期圧力 (P_{Ti}) 19 kg/cm²G のとき 15.3 cm/sec の値に達する。またこの飽和速度に達する入力の値は図 3.1 の b 点でフィードバックを切り、 a 点に種々の大きさのステップ入力を加えて弁の速度を測定することによって得られ、貯気槽初期圧力 (P_{Ti}) 19 kg/cm²G の場合、0.48 V である。この飽和特性を図 3.3 に示す。通常、風胴起動時における貯気槽初期圧力 (P_{Ti}) は 19~20 kg/cm²G であるから風胴起動時における調圧弁の伝

達特性はむだ時間と飽和要素を持った一次遅れで近似すると図 3.4 の (i)、(ii)、(iii) から成るブロック線図となる。ただし (iii) はストローク検出器の既設のもの値である。なお測定に用いたペン書きオシログラフの周波数特性は測定周波数よりも十分高いものを使用した。

3.2 風胴特性

ここで風胴特性とは調圧弁ストローク (z) から集合胴圧力 (p_0) までの関係をいう。一般に超音速風胴において測定部の流れが定常状態に達しているときの伝達関数は貯気槽圧力、流出する空気温度、調圧弁開口面積、ノズル部開口面積等の関数とされている¹⁾。起動時においてはさらに急激な温度変化、非定常衝撃波等が加わり複雑な関数となる。しかし巨視的な見方をすれば集合胴圧力は調圧弁を経て流入する流量の圧力上昇分とノズル部より流出する流量の圧力降下分の差となり、水位プラントに見られるように一次遅れである程度近似できることが予想される。ここでは風胴実験より得たデータをもとに風胴伝達関数をむだ時間と一次遅れで近似し、その時定数、比例定数を求めた。

ここで風胴伝達関数を G_p とすると、 G_p はむだ時間と一次遅れで近似するのであるから次式となる。

$$G_p(s) = \frac{p_0(s)}{z(s)} = \frac{Kp}{Tp s + 1} \epsilon^{-Lp s} \quad (3.1)$$

また、風胴実験を使って、おもなマッハ数について調圧弁ストローク (z) と集合胴圧力 (p_0) の応答を得ると図 3.5~3.7 の実線となる。この応答より各マッハ数における Kp , Tp , Lp を推定する。まず Kp は

$$Kp = \frac{p_0 \text{ の最終値}}{z \text{ の最終値}} \quad (3.2)$$

となり容易に求まる。つぎに Tp , Lp を推定するのであるが、計算を簡単にするため調圧弁ストローク (z) の動きを図 3.5~3.7 に点線で示すように 0.1 秒のむだ時間をおいた後、直線的に変化し、設定開度に達した後一定値を保持するとして式 (3.1) を与え、 Tp , Lp に適当な数値を入れると p_0 を計算することができる。最初に与えた値が適当でない場合は p_0 の計算曲線と実験曲線が大きく異なるが、数回試行錯誤を繰り返すことにより図に点線で示すように実験曲線に近い曲線を得ることができた。この計算曲線の Lp , Tp の値をそのマッハ数における風胴伝達関数を表わす定数とした。マッハ数 4.0 で若干近似度が悪いが全体的に見て風胴起動時における伝達関数はむだ時間と一次遅れで表わされることがわかった。マッハ数と Kp , Lp , Tp の関係を図 3.8 に示す。なお上記で求めた風胴伝

達関数は圧力変換器の遅れも含まれている。厳密にいうと圧力変換器にも一次遅れ要素があるが、測定の結果、その時定数は0.1秒以下で Tp に比べて十分小さいので風洞伝達関数と分けて考えることはしなかった。以上調圧弁と風洞を結合した制御系のブロック線図を図 3.9 に示す。なお、むだ時間をアナログ計算機でシミュレートするとき、 $padé$ の展開式を二次で近似した。

4. 各種制御方式

4.1 PI 動作制御方式

図 3.9 のブロック線図をアナログ計算機でシミュレートし、調節器に比例+積分動作を行なわせる制御方式 (PI 動作制御) をまず検討した。

この方式はいままで吹出式超音速風洞において最も多く使用されており、各マッハ数において速応性、減衰特性、定常特性のよい応答の調節器条件 (ゲインおよび積分時間) をみつけることが要求されていた。そこで先に求めた Lp , Kp , Tp の値を使い、各マッハ数の通常の設定電圧を与え、調節器のゲイン (G) と積分時間 (T_I) を種々かえてそれぞれのステップ入力に対する応答波形を得た。それを図 4.1~4.6 に示す。

一般に制御特性の評価方法は種々あるが、最も一般的な方法としてつぎの三つが考えられる³⁾。

- (1) 定常特性
- (2) 安定度あるいは減衰特性
- (3) 速応性

(1) 定常特性、ここで対象としている制御系は図 3.9 に示すように I 型であるから定常特性は定速度定常偏差 (e_v) によって左右される。図中各応答下の括弧内の数字はそれぞれの応答の定速度定常偏差を示すもので、 $e_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s^2} \cdot \frac{1}{1+G(s)}$ から算出したものである。ただし $G(s)$ は図 3.9 の制御系の一巡伝達関数である。図 4.1~4.6 に見られるように定速度定常偏差は調節器の積分時間 (T_I) が小さいほど、またゲイン (G) が大きいほど小さくなる、すなわち定常性は良くなる。

(2) 安定度あるいは減衰特性は過渡応答において行き過ぎ量または減衰比であらわされ、この系では調節器の積分時間 (T_I) が小さいほど、またゲイン (G) が大きいほど悪くなることがわかった。図からそのマッハ数における各調節器条件のときの応答がわかり、安定の度合を直ちに知ることができる。

表 1

マッハ数	設定圧力 (kg/cm ² G)	調 節 器 条 件			T_s (sec)	最大行き過ぎ量 (%)	e_v	備 考
		ゲ イ ン	積分時間	VL (%)				
1.5	0.6	2.4	0.54	50	1.3	1.3	0.91	2720 Run
2.0	1.2	1.6	0.9	50	1.6	0	1.20	2651 Run
2.5	2.0	1.4	1.5	50	1.8	2.3	1.24	2869 Run
3.0	3.9	0.7	1.5	50	3.0	3.0	1.49	
3.5	6.9	0.7	2.5	50	3.7	3.0	1.63	
4.0	11.0	0.5	3.5	50	4.5	5.5	2.10	

備考：風洞実験番号

表 2

マッハ数	設定圧力 (kg/cm ² G)	調 節 器 条 件			T_s (sec)	最大行き過ぎ量 (%)	e_v	備 考
		ゲ イ ン	積分時間	VL (%)				
1.5	0.6	1.2	0.32	40	2.5	0	1.08	1011 Run
2.0	1.2	0.8	0.32	30	4.0	7.5	0.86	965 Run
2.5	2.0	0.57	0.54	30	5.0	7.3	1.09	967 Run
3.0	3.9	0.55	0.9	35	6.0	9.2	1.13	1988 Run
3.5	6.9	0.62	1.5	35	7.5	25.5	1.08	{ VL 作動 1987 Run
4.0	11.0	0.8	1.5	35	7.0	11.5	0.56	{ VL 作動 1985 Run

(3) 速応性は一般に基本モードの非減衰固有振動数があるいは過渡応答波形の応答時間であらわされ、図に見られるように調節器の積分時間 (T_I) とゲイン (G) を適当に選ぶことによって最適とすることができる。

さてここで最大行き過ぎ量が小さく、しかも応答時間の短い応答波形の調節器条件を図より決定し、その諸定数を表 1 にまとめた。表 2 はこの研究以前に使用していた応答波形の諸定数であり表 1 と比較すると研究後は整定時間、最大行き過ぎ量が共に改善されている。図 4.1~4.6 中△印は表 2 の調節器条件の近くの応答であり、○印は表 1 の調節器条件による応答である。しかし定速度定常偏差については表 2 より表 1 の方が悪くなっている。これを改善するために本調節器の持つ他の制御機能である PI+弁開度制限制御方式および PI+積分時間切換制御方式について解析を試みた。以下それについて述べる。

4.2 PI+弁開度制限制御方式

PI+弁開度制限制御方式の特長は、(1) 起動時における速応性を犠牲にして整定後の定速度定常偏差(e_0)を十分小さくできる。その結果圧力スィープにおける追従精度が良くなり、また通風の持続時間を延長するため貯気槽圧力の低いところまで使用するとき、十分な整定精度が得られる、(2) 高いマッハ数における実験で集合胴圧力を急激に増加させると風胴壁や模型に大きな衝撃が加わり好ましくないことがある。そのようなとき、この制御方式を使用して集合胴圧力の立ちあがりをゆるやかにして風胴壁や模型を保護する、等である。

この制御方式を使用するにあたって、(i) 弁が開度制限するときの条件、(ii) 各マッハ数の開度制限値、調節器ゲインおよび積分時間の適当な値を見つけることが要求されていた。図 4.7 に調節器ブロック線図と動作原理図を示し、以下図によって動作原理を説明する。まず、調節器条件は PI 動作制御であれば当然大きな行き過ぎ量を生じるようなゲイン、積分時間を与

え、風胴起動初期の誤差電圧の大きいときに調圧弁の開度を制限して応答の立ちあがり部分をゆるやかにし、誤差電圧が小さくなったとき、開度制限を解除して PI 動作制御とする。したがって PI 動作制御と比較して起動時における速応性は悪くなるが、最大行き過ぎ量と定速度定常偏差を十分小さくすることができる。つぎに弁の開度制限は図 4.7 に示すように調節器にリミッタ回路を設け調節器出力を制限することによって調圧弁の開度を制限している。リミッタ回路はリレーによって作動し、リレーが ON で出力制限、OFF で制限解除となる。またリレーは誤差電圧とゲインの積 ($e_0 \times G$) の大きさに制御し、 $e_0 \times G$ が 10V を越ええると ON となる、この 10V はマッハ数によって変化しない。一度リレーが ON となると $e_0 \times G$ が 0.1V 以下となるまでそのままの状態を保持する。いわば、ヒステリシスを持った動作を行なう。 $e_0 \times G$ の一番大きいときは風胴起動初期の集合胴圧力が上昇し始める直前であり、このとき設定電圧はそのまま誤差電圧となって現われる。したがって設定電圧とゲインの組み合わせによってリレーが作動するか、否か、が決まり、リレーの作動する値が 10V の場合、その作動領域は図 4.8 に示すようになる。図に示すように設定圧力の低いところでリレーを作動させるには大きなゲインを与えなければならないが、ゲインを無制限に大きくすると系が振動的となり好ましくない (図 4.9 で $T_I = 0.54$, $G = 3.2$ の応答参照)、また弁を制限するつもりで大きなゲインを与えてもリレーの作動領域に入らず境界線すれすれのところで制限されない場合、大きな行き過ぎ量を生じて非常に危険である (図 4.9 で $T_I = 0.9$, $G = 3.0$ の応答参照)。ここで通常の集合胴設定圧力をステップ入力として与えた場合の応答波形をシミュレートして、これを図 4.9~4.12 に示す。図を見てもわかるように最大行き過ぎ量が小さく減衰特性のよい応答の範囲は低いマッハ数で狭く、マッハ数が高くなると広がってゆくことがわかった。ここで各マッハ数の最適と思われる応答波形を決定し、その諸

表 3

マッハ数	設定圧力 (kg/cm ² G)	調 節 器 条 件			T_s (sec)	最大行き 過ぎ量 (%)	e_0	備 考
		ゲ イ ン	積分時間	VL (%)				
2.5	2.0	3.2	1.5	20	3.5	12.5	0.542	
3.0	3.9	1.6	0.9	20	3.8	6.5	0.309	3040 Run
3.5	6.9	1.2	0.9	23	5.0	4.2	0.292	3037 Run
4.0	11.0	1.6	1.5	23	5.5	5.0	0.281	3036 Run

定数を表3に示す。表1のPI制御と比較するとゲインは約2~3倍となり、積分時間は約1/2となる、そして定速度定常偏差は約1/2~1/7と十分改善される。図4.11, 4.12に見られるようにマッハ数3.5, 4.0の場合には同じような応答波形が多くあり、どれを最適な波形とするか判断がむずかしい。そこで、ここでは図の中で最大行き過ぎ量が少なく減衰特性が良くてなおかつ定速度定常偏差の小さいものを最適な応答波形とした。高いマッハ数(3.5, 4.0)ではゲイン、積分時間を大幅に変えても起動時の応答波形にさほど変化のないことを確認した。この制御方式は高いマッハ数において有効である。つぎに弁開度制限値は試行錯誤的に調べた結果20~23%付近が適当であることがわかった。この値が不適当な場合、たとえば、最適値より大きいとき、最大行き過ぎ量が多くなり、最適値より小さいとき、誤差電圧が0.1V以下とならないので、弁制限は解除されずにそのままの値を保持するから集合胴圧力は一度設定値に近づくが、その後しだいに離れてゆき最終的に整定しない。この関係を図4.13に示す、したがって開度制限値は最適値より2~3%高めに設定した方が安全である。図中弁開度制限が働かない場合の応答は $G=0.9$ で起動初期の $e_0 \times G$ が9.68Vとなり10Vを越えないのでリレーが働かず弁が制限されないため、最大行き過ぎ量が大きく危険な状態となることを示す。この制御方式を使用するときは十分注意する必要がある。

4.3 PI+積分時間切換制御方式

この制御方式の特長は起動時における速応性をPI制御と同じに保ちつつ誤差電圧が小さくなってから積分時間を切り換えて定速度定常偏差をPI制御より小さくすることを目的とする。その結果、起動時における速応性はPI+弁開度制限制御より改善され、定常特性はPI制御より良くすることができる。しかし最大行き過ぎ量はPI制御よりわずかに増加する。そこで各マッハ数において積分時間をどの程度まで小さく切り換えることができるかまたその時最大行き過ぎ量および減衰特性はどうなるかを調べた。

この制御方式のブロック線図を図4.14に示す。動作原理はPI+弁開度制限制御とほぼ同じで風洞起動初期の誤差電圧の大きいとき、PI制御で最適な応答波形の得られる調節器条件を使い、誤差電圧が十分小さくなったところで積分時間を数分の一に切り換える。積分時間を切り換えるリレーが作動する条件は $e_0 \times G$ が2Vを越えたときであり、このときリレーがONとなり積分時間を大きくする。そして $e_0 \times G$ が0.1V

以下となったとき、リレーがOFFとなり積分時間が小さくなる。ここで各マッハ数の通常の設定圧力をステップ入力とした応答波形をシミュレートして図4.15~4.19に示す。左端の切り換えなしの応答波形はPI動作制御で最適と思われる調節器条件のときであり、右に積分時間を逐次小さな値に切り換えたときの応答波形を示す。各応答下のかっこ内の数字はそれぞれの応答波形の定速度定常偏差(e_v)である。下段の波形は誤差電圧の小さな部分を拡大して見ている。たとえば図4.18のマッハ数3.5について見れば、切り換えなしの応答では $e_v=1.63$ で最大行き過ぎ量が3.0%であり、積分時間を0.23に切り換えたときの応答では $e_v=0.149$ となり最大行き過ぎ量が6.1%となる。また図の誤差電圧の拡大部分を見ればわかる通り積分時間の大きいときはゆっくり設定値に近づくが積分時間の小さいとき急速に近づくので整定時間も僅かではあるが短縮される。しかし積分時間を十分小さな値とすると振動的となり減衰特性はかえって悪くなる。切り換え後の最小積分時間は各マッハ数ごとに異なる。図4.15~4.19に示す値が限度であると思われる。なおこの制御方式も風洞起動初期に $e_0 \times G$ がリレーの作動する値(2V)を越えないとき、リレーはOFFであり積分時間は最初から小さな値となっているから集合胴圧力(p_0)は大きな行き過ぎ量を生じ、非常に危険であるから注意を要する。この制御方式はマッハ数2.0~3.0において有効である。

4.4 非線形最適制御

つぎに非線形最適制御理論にもとづく最適切換曲線を使用したデュアル・モード制御を試みた。

図3.9において調圧弁のフィードバック・ループをb点で開き飽和要素が常に飽和領域で動作するように調節器出力を与えるとすれば圧力制御系は図4.20のように書き表わされる。

すべての制御系には制御対象に与える操作量にある制限があり、常に最大操作量を使って最大加速度で目標値に近づけ、ある時刻で最大減速度をかけて目標値に到達させれば最少時間で過渡応答を終らせることができる。この考えが非線形最適制御といわれ多くの論文がある^{3), 4), 5)}。一般に n 次系については $(n-1)$ 次までの微分値を情報とする n 次元の位相空間で操作切換曲面を考え $(n-1)$ 回の切換えを行えば最適応答が得られることが示されている⁶⁾。

図4.20で示される制御系ではむだ時間のない場合二次であるから1回の切換えでよいが、むだ時間を考えた場合位相面上で2本の切換曲線を考え、第一切換

曲線で操作量を正あるいは負の最大に切り換え、第二切換曲線で正あるいは負の最大から零に切り換えてやる必要がある。ここで図 4.20 の制御対象について $m/A \rightarrow m$, $L/T \rightarrow l$, $e_a/AKT \rightarrow e_a$, $\dot{e}_a/AK \rightarrow \dot{e}_a$ と標準化するとむだ時間のないとき、およびあるときの第一、第二切換曲線は次式で示される⁷⁾。

$$f_{L0}(e_a, \dot{e}_a) = e_a + \dot{e}_a + \ln(1 - \dot{e}_a) = 0 \quad (4.1)$$

$$f_{L1}(e_a, \dot{e}_a) = e_a + \dot{e}_a - l + \ln\{2 - (1 + \dot{e}_a)e^{-l}\} = 0 \quad (4.2)$$

$$f_{L2}(e_a, \dot{e}_a) = \frac{e_a}{2} + \frac{\dot{e}_a}{2} - \frac{l}{2} + \ln\left\{\frac{2}{1 + (1 + \dot{e}_a)e^{-l}}\right\} = 0 \quad (4.3)$$

ここでマッハ数 3.5 の場合について、それぞれの曲線を計算すると図 4.21 となる。むだ時間を持つ制御系の非線形最適応答は誤差圧力と誤差圧力の微分値とを情報として位相面で図 4.21 の曲線を作り操作量を切り換えることによって得られる。しかし実際には原点付近でこのような第二切換曲線を作ることは困難であるし、また実現しても誤差の小さい領域でオンオフ制御によるリミットサイクルが生じるので、ここでは図に示すような原点付近の斜線で囲む範囲を PI 動作制御で行なうデュアル・モード制御とした。上記にもとづく制御系を構成すると図 4.22 となる。基本動作は誤差電圧の大きいとき関数発生器と微分器の出力を情報として比較器を働かせ制御対象に最大操作量を与え、一方誤差とその微分の絶対値を情報として線形、非線形領域を判断しリレーを作動させる。

ここでマッハ数 3.5 の場合について実験例を示す。マッハ数 3.5 における通常の集合胴設定圧力は 6.9 kg/cm²G であり、設定電圧であらわすと 10.78 V、この値は関数発生器の入口のところでは $e_f = 46.8$ (V) となる。また誤差圧力の初期値を $e_{a(0)}$ であらわせば $e_{a(0)}/AKT = 0.241$ となり、位相面では図 4.21 の A 点となる。ここは原点から遠く離れているので非線形領域であり、非線形調節器が働く。最初正の最大操作量が与えられるが 0.3 秒はむだ時間であるから軌跡は A 点に留まる。その後矢印の方向に移動し、B 点で操作量は負の最大に切換わる。

この点の e_a , \dot{e}_a は図より読みとれ、 e_f に換算すると $e_f = 30.7$ (V), $\dot{e}_f = 42.3$ V/sec となる。ここで微分器は図 4.23 に示す回路を使ったので、その伝達関数は

$$G_D = \frac{0.05s}{0.018s + 1}$$

となり、上記の例で $\dot{e}_f = 42.3$ V/sec の場合、微分器の出力は $\dot{e}_a = 2.12$ V/sec となる。これは実験と一致する(図 4.25 参照)。つぎに関数発生器の入力対出力特性は図 4.21 の第一切換曲線を微分器の出力特性に合せて電圧に変換して表わすと図 4.24 となる。

B 点で操作量が切り換わるとその動作は 0.3 秒後に現われ(位相面では C 点となる)。軌跡はこれより曲線 $f_{L0}(e_a, \dot{e}_a)$ にそって原点に向かい、D 点でリレー (L_1) が働き操作量を零とする。そしてむだ時間 0.3 秒をおいてリレー (L_2) を作動させ線形制御 (PI 制御) に切り換える。これらの切換点ですべて理想的に切り換えられれば軌跡は一度で原点に静止する。つまり最適応答が得られる。しかし実際には制御系に種々の外乱が加わり、切換点でも理想的に切り換わらない場合が多いので軌跡は原点付近でわずかに渦を描きながら原点に収斂する。

つぎに非線形制御から線形制御に切り換える方法であるが、非線形制御では図 4.22 に示すように調圧弁の開ループを開き制御対象を無定位としている。しかし線形制御の PI 動作制御では図 3.9 に示すようにこれを定位としている、したがって非線形から線形に切り換えるとき、系に振動を生じないようにするために調圧弁の開信号を情報として線形調節器の積分要素に調圧弁ストローク (z) の変位分の初期値を与えておく方法を採用した。この回路図を図 4.22 に示す。以上のような非線形調節器を構成してマッハ数 3.5 の場合のステップ入力に対する応答波形を得ると図 4.25 となる。上段の PI+積分時間切換制御の応答と比較すると操作量の動作状態の違いがよくわかる。操作量の切換点 B, D で e_f , \dot{e}_a の理論値を計算して図中括弧内に示す。実験とわずかに異なるがこの原因として考えられることは制御対象のむだ時間および微分器を近似回路で置き換えたためと思われる。

4.5 各種制御方式による応答の比較

マッハ数 3.5 の場合について PI 動作制御, PI+弁開度制限制御, PI+積分時間切換制御および非線形最適制御のそれぞれの最適な応答波形を比較すると図 4.26 となる。A, B, C, D はそれぞれの最適応答, A', C' は定速度定常偏差を 4 方式のうち最も小さな PI+弁開度制限制御の値に合わせるために調節器ゲイン (G) を変えたもの、つまり定速度定常偏差 (e_0) を 0.29 にするためには PI 制御では 115%, PI+積分時間切換制御では 60% も最大行き過ぎ量を生じるが非線形最適制御ではほとんど生じない。図でもわかるように整定時間は小さい順に D→C→A→B, 最大行き過ぎ量

表 4

制御方式	特長	過渡特性	定常特性	調節器装置
PI 動作制御		良い	悪い	簡単
PI+弁開度制限制御		悪い 特に速応性が悪い	非常に良い	やや複雑 ゲイン時定数の選択により危険あり
PI+積分時間切換制御		良い, 最大行き過ぎ量がPI動作制御よりやや多い	良い	やや複雑
非線形最適制御		非常に良い	非常に良い	非常に複雑

はD→B→A→C, また定速度定常偏差はD→B→C→Aとなり, 非線形最適制御は過渡特性と定常特性が共にすぐれていることが確認された。また線形制御において, 最大行き過ぎ量が3方式ほぼ同じ応答波形を比較すると過渡特性の良い応答を望むときはPI+積分時間切換制御が, また定常特性の良い応答を望むときはPI+弁開度制限制御が有効である。各種制御方式の特長を表4に示す。図4.22および図4.26に示すように非線形制御系(D)は回路が複雑であり, その反面, 線形制御(A, C)に比べてその性能改善の度合すなわち効果が小さい。したがって, このような目的では線形制御でも十分と考えられる。今回はマッハ数3.5の場合について資料を付したがその他のマッハ数についても表4の特長を適用することができる。

つぎに今回のシミュレーション実験の信頼性であるが調節器条件を同じにしたPI+弁開度制限制御の場合について, 実風洞とシミュレーションの応答を図4.27で比較すると非常によく一致する。またこの研究によって得た資料を使って改善した風洞実験の一例として線形制御の場合を図4.28に示す。

む す び

(1) 風洞の過渡時における伝達特性を実験により求め, これをアナログ計算機でシミュレートして現在使用中のHagan社製調節器で操作できる各種制御方式(PI動作制御, PI+積分時間切換制御, PI+弁開度制限制御)のそれぞれの調節器条件による応答波形を求め風洞制御に使い易い図にまとめた。

(2) 各マッハ数ごとに調節器の最適なゲイン, 積分時間を決定し, これを風洞実験に適用して起動時において従来の応答波形と比較して最大行き過ぎ量を約1/2に減少させ, 整定時間を平均3.0秒短縮することができた。これは通常風洞実験による平均測定時間が

20秒であるから, およそ15%測定時間を延ばすことができた。また定常特性については定速度定常偏差を従来の1/2~1/3にしてフラッター試験における圧力スweep制御の整定精度を高めることができた。

(3) 非線形最適制御理論にもとづく調節器を構成し, ステップ入力に対する応答波形を得て(1)の各種制御方式による最適な応答波形と比較した。その結果整定時間については各種制御方式のうち最も整定時間の短いPI+積分時間切換制御と比較して約1.0秒位しか短縮できず, 複雑な調節器を使う割に効果が少なかった。しかし定速度定常偏差と最大行き過ぎ量はかなり小さくすることができ, 線形制御と比較して非線形最適制御は整定時間, 減衰特性, 定常特性等共にすぐれていることを確認した。しかし非線形最適制御を実用化するには多くの解決しなければならない問題点がある⁶⁾。今後さらに研究を進めたい。なお, この研究は正規の風洞実験の合間に行なったもので, 資料の不備の部分があるが, 今後さらに充実したものとしたい。

最後にこの研究途上防衛庁に出向された新井技官のご指導に感謝する。

文 献

- 1) 橋爪 宏, 中井暎一; 吹出式風洞の圧力制御(フラッター試験設備の場合)航技研資料TM-26.
- 2) 市川邦彦; 自動制御の理論と演習, p. 125~132.
- 3) 三巻達夫; 非線形を導入した最適化制御, 制御工学, 第5巻, 第1号, 1961, pp. 10~16.
- 4) Rufus. Oldenburger, Rockford. Ill; Optimum Nonlinear Control, Trans, ASME, 1957, pp. 527~546.
- 5) 示村悦二郎, 吉田幸雄, 河村和彦, 小松雄一郎; むだ時間を含む線形系の最適制御(最短時間問題)計測と制御, 第3巻, 第6号, 昭和39年6月, pp. 7~11.
- 6) I. Bogner, L.F. Kazda; An Investigation of the Switching Criteria for Higher Order Contactor Servomechanisms, Trans. AIEE. 2, 1954, pp. 118~127.
- 7) 三巻達夫; むだ時間を含む系の非線形最適制御, 日本機械学会論文集, 24巻, 147号, 昭和33~11, pp. 915~921.
- 8) 北森俊行; 最適化制御の現状と将来, オートメーション, 第9巻, 第1号, pp. 18~27.

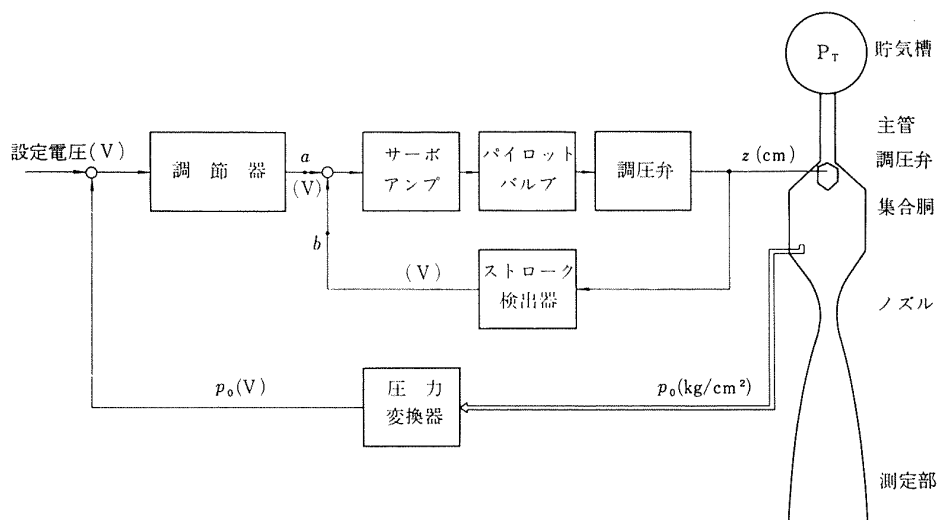


図 3.1 圧力制御系

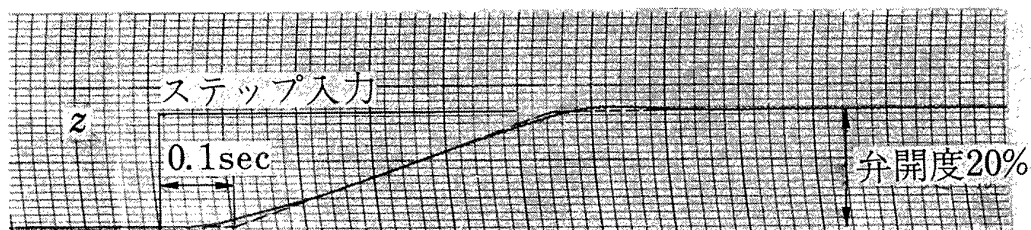
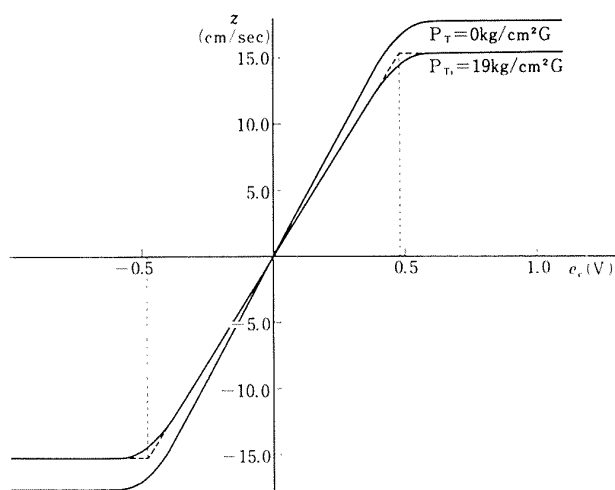
図 3.2 調圧弁のステップ入力に対する応答 (弁開度 20% の場合)
(横軸時間 10 cm/sec)

図 3.3 調圧弁の飽和特性

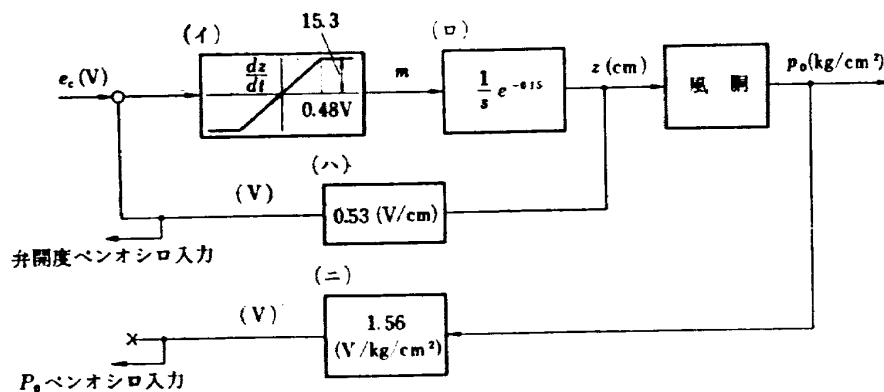
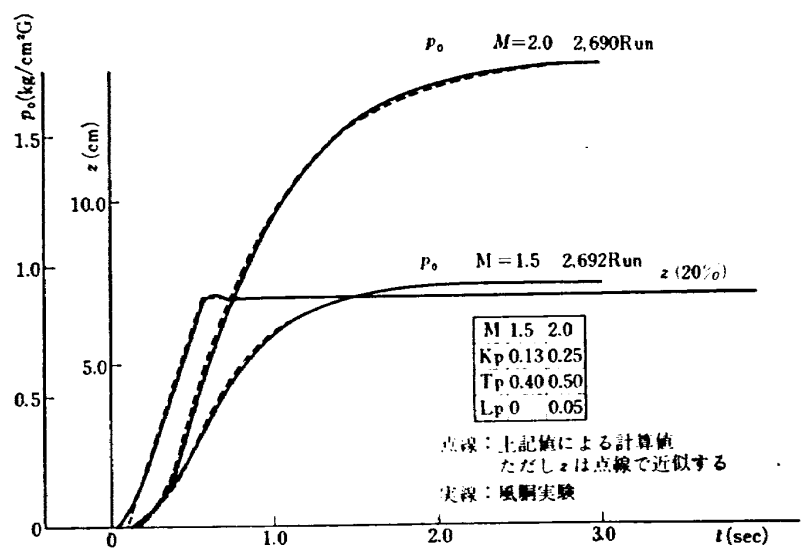
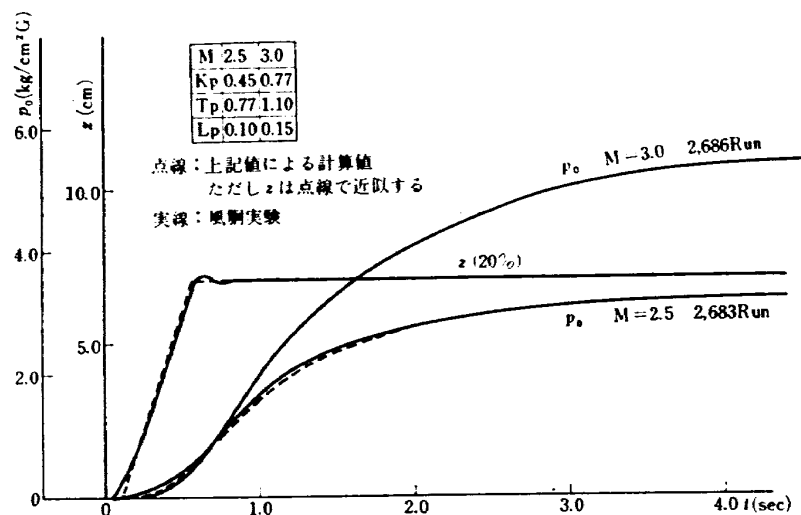


図 3.4 調圧弁系ブロック線図

図 3.5 $M=1.5$, $M=2.0$ における z , p_0 の応答図 3.6 $M=2.5$, $M=3.0$ における z , p_0 の応答

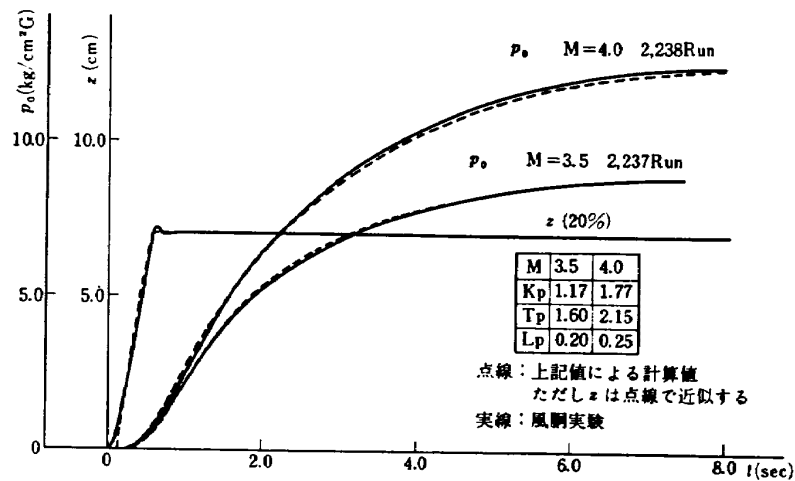
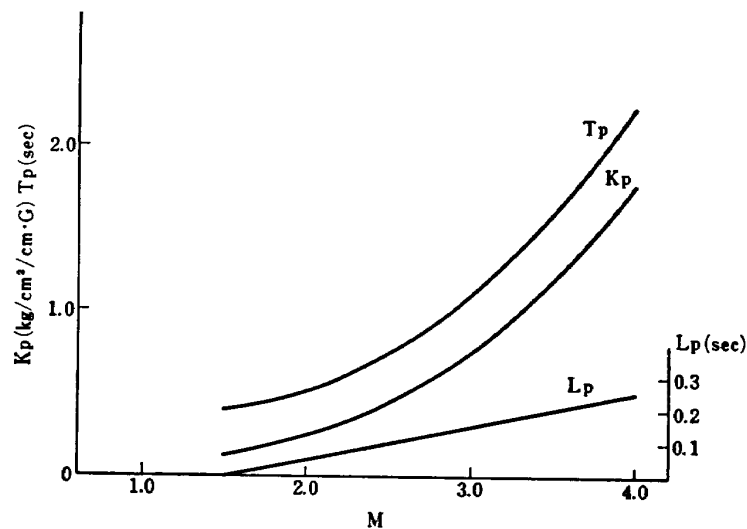
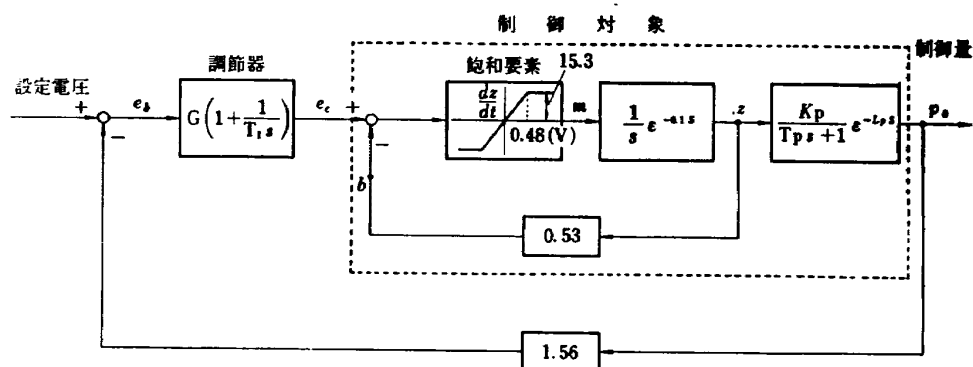
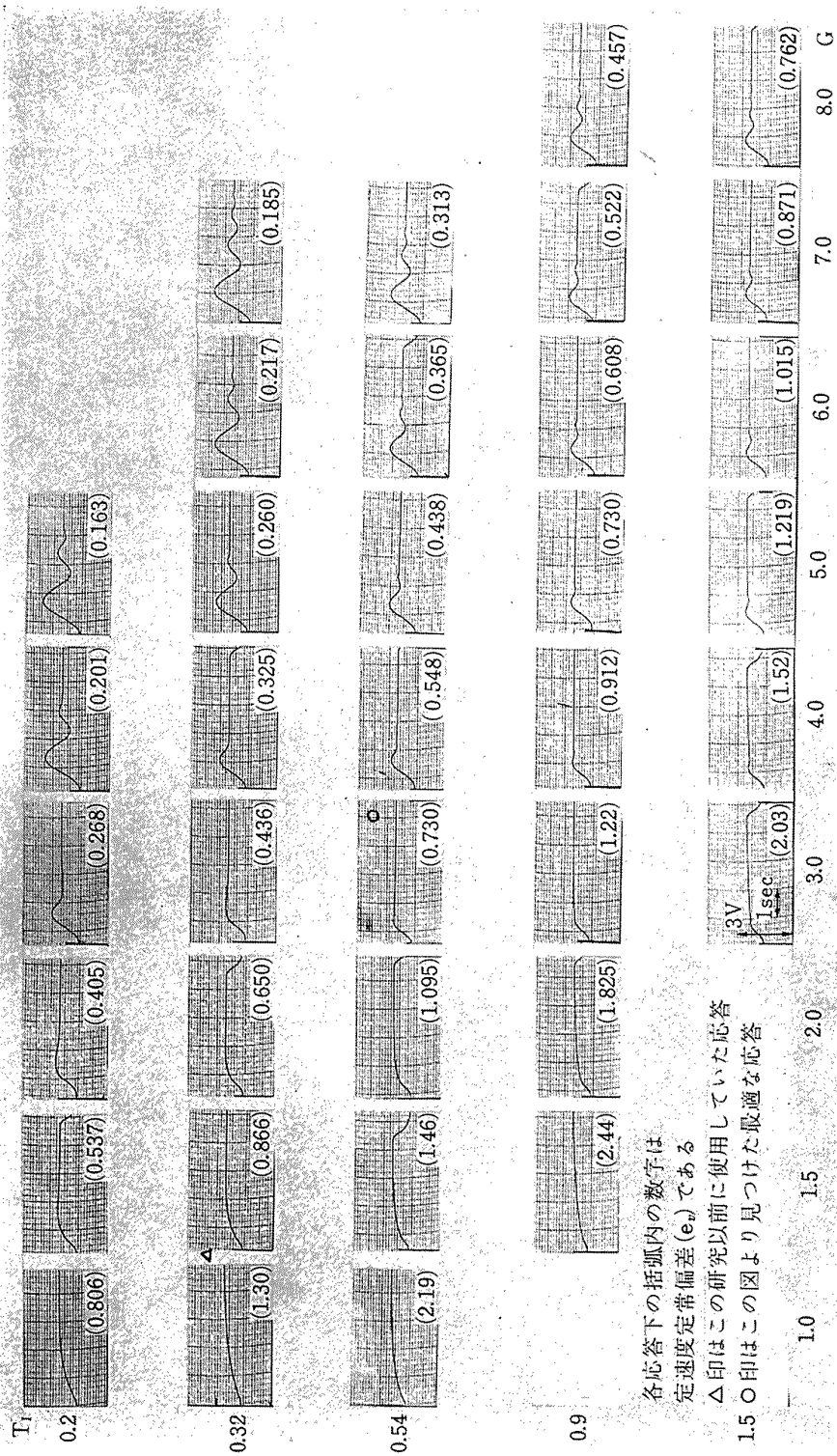
図 3.7 $M=3.5$, $M=4.0$ における z , p_0 の応答図 3.8 各マッハ数における T_p , K_p , L_p の値

図 3.9 圧力制御系 (比例+積分動作制御)



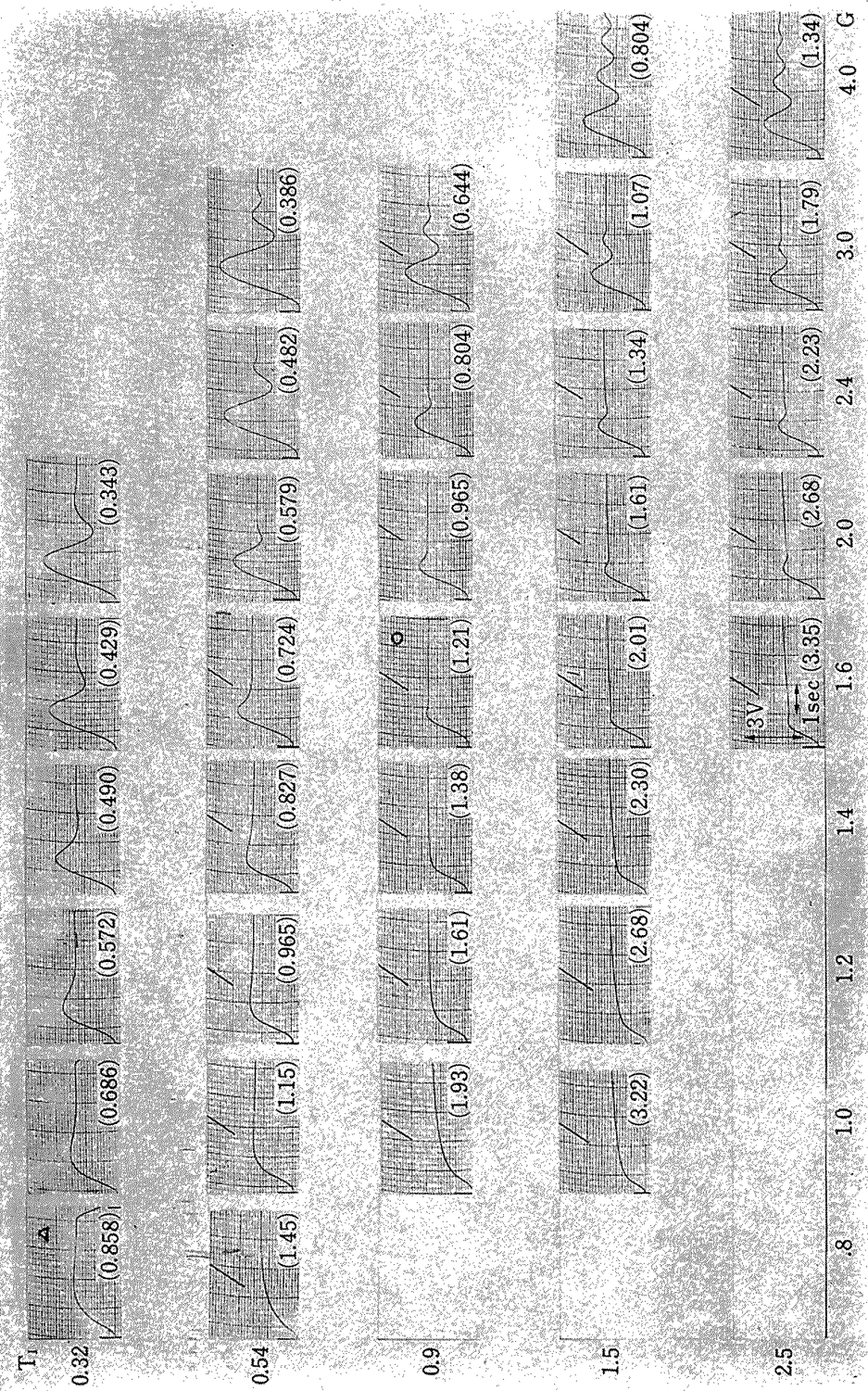


図 4.2 PI 動作制御方式による集合胴圧力の応答波形 M 2.0
設定圧 1.2 kg/cm²G P_{Ti} 19 kg/cm²G

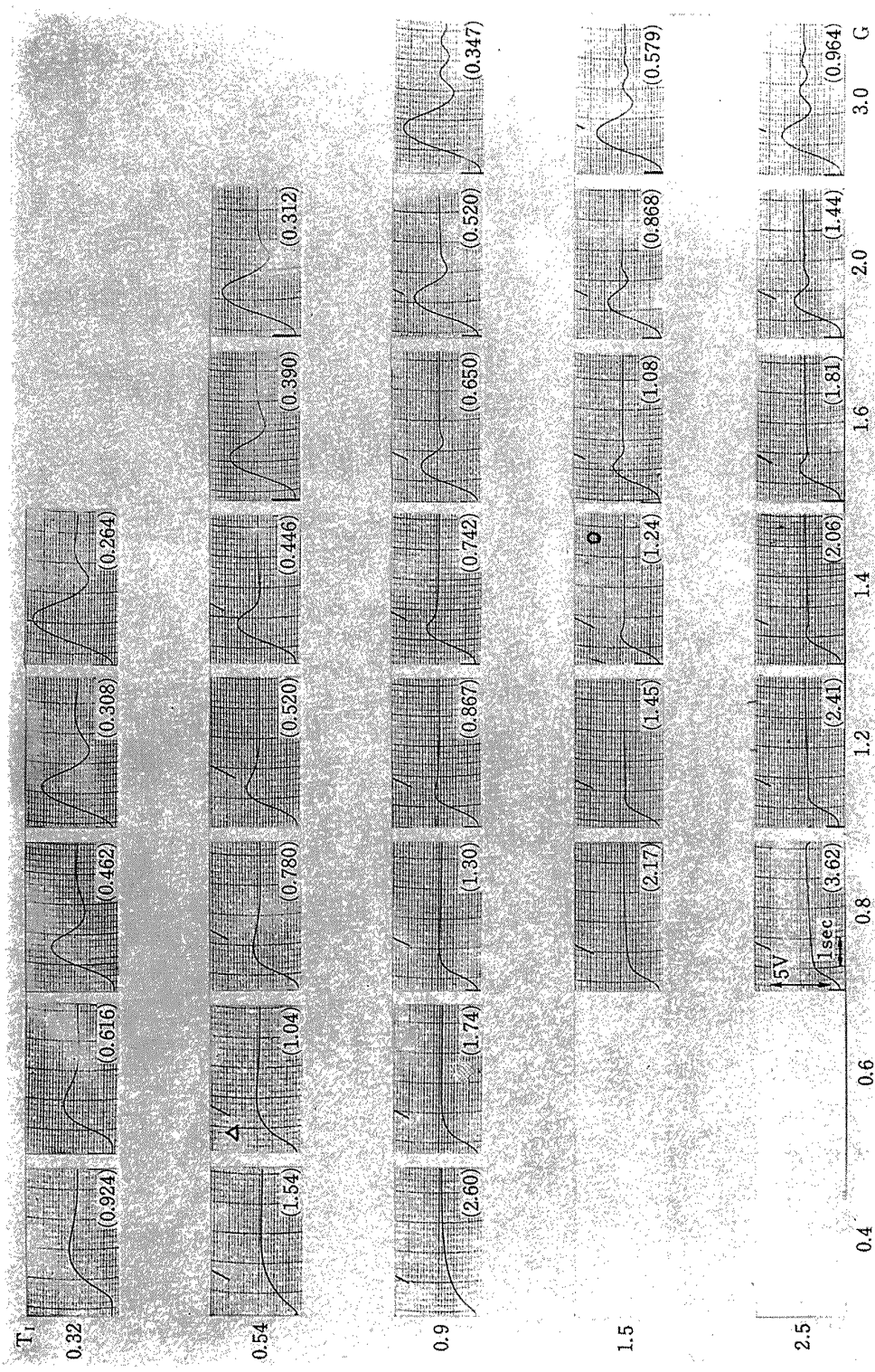


図 4.3 PI 動作制御方式による集合胴圧力の応答波形 M 2.5

設定圧 $2.0 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ P_{Ti} $19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

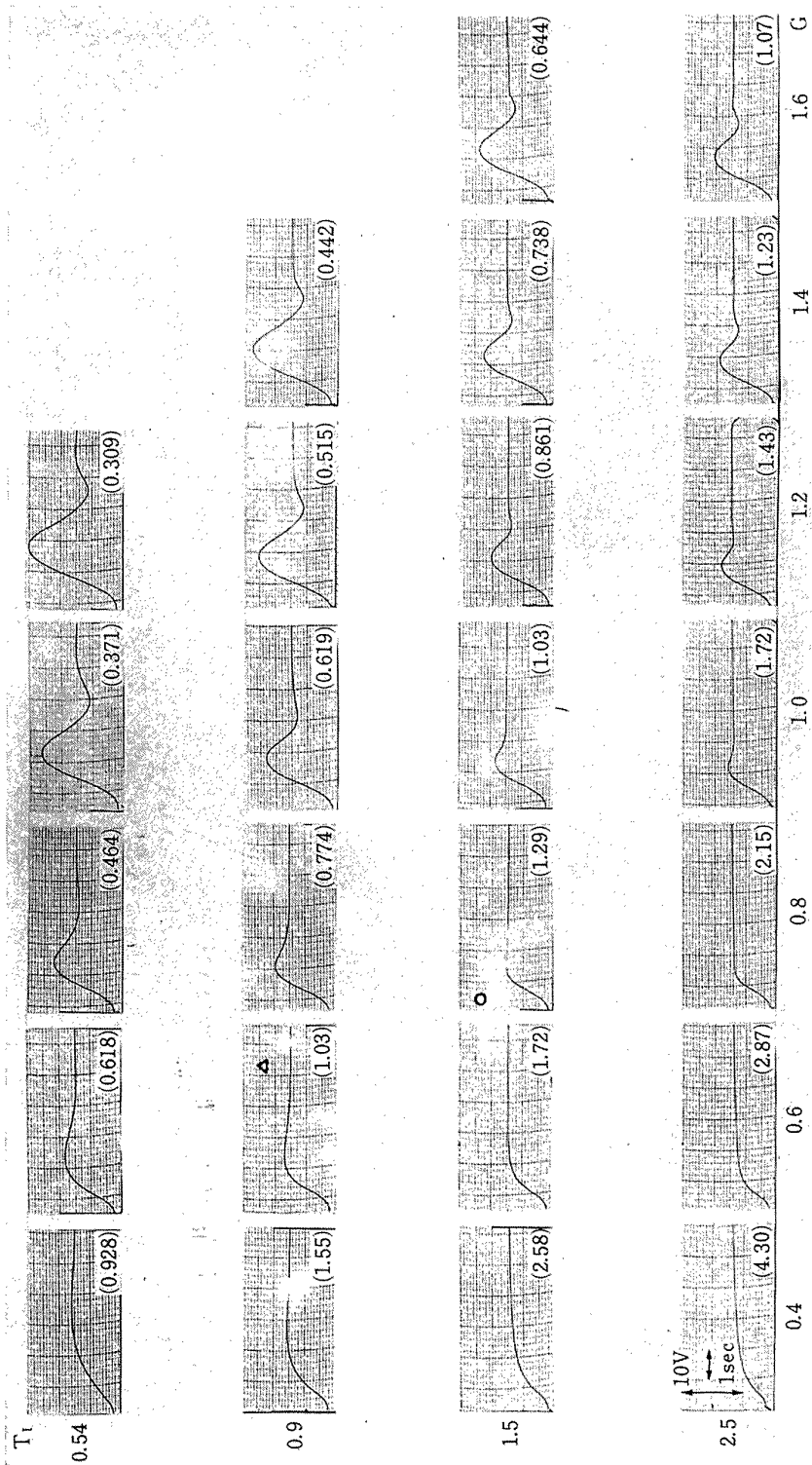


図 4.4 PI 動作制御方式による集合胴圧力の応答波形 $M 3.0$

設定圧 $3.9 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ $P_{Ti} 19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

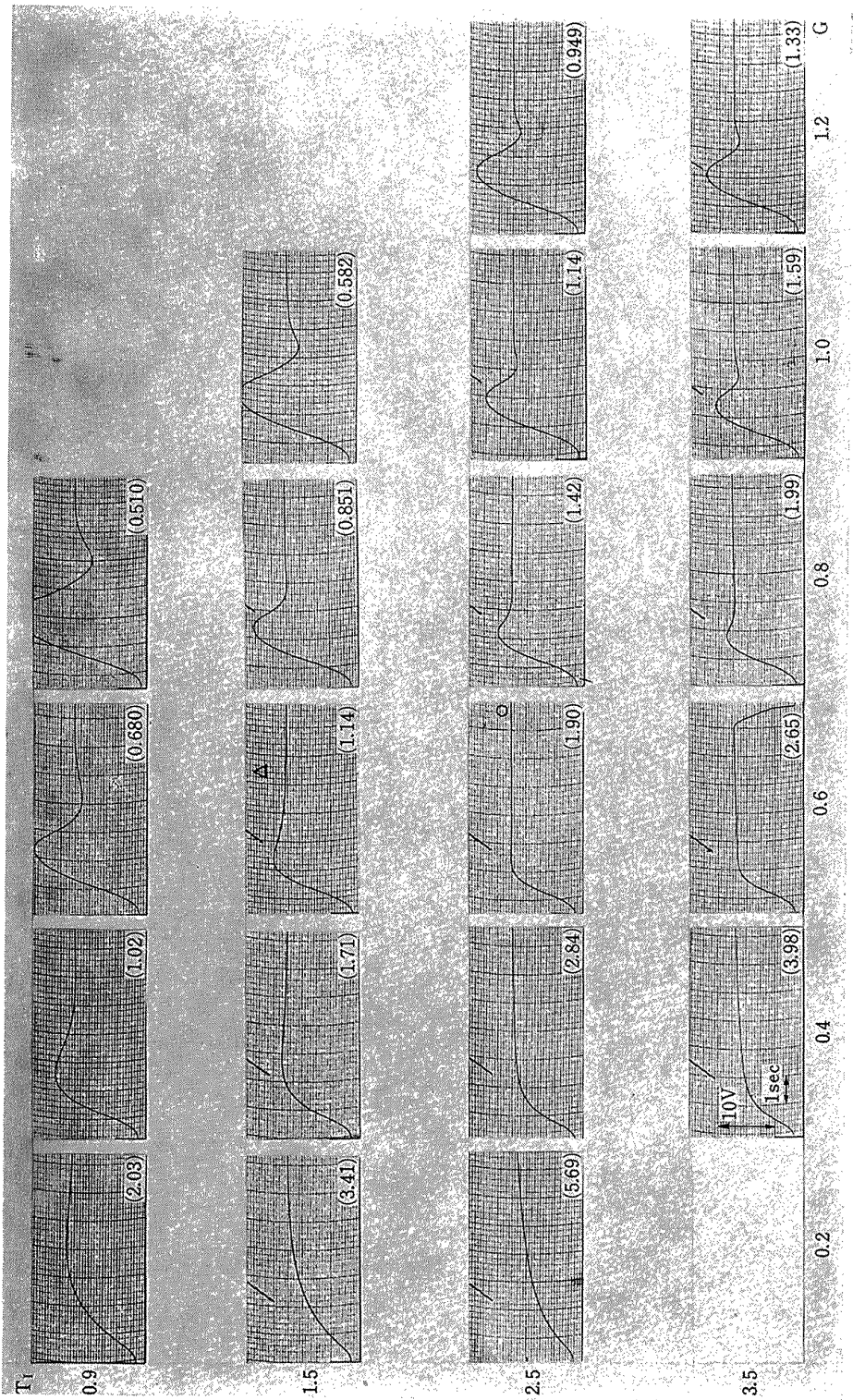


図 4.5 PI 動作制御方式による集合胴圧力の応答波形 M 3.5
設定圧 $6.9 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ P_{Ti} $19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

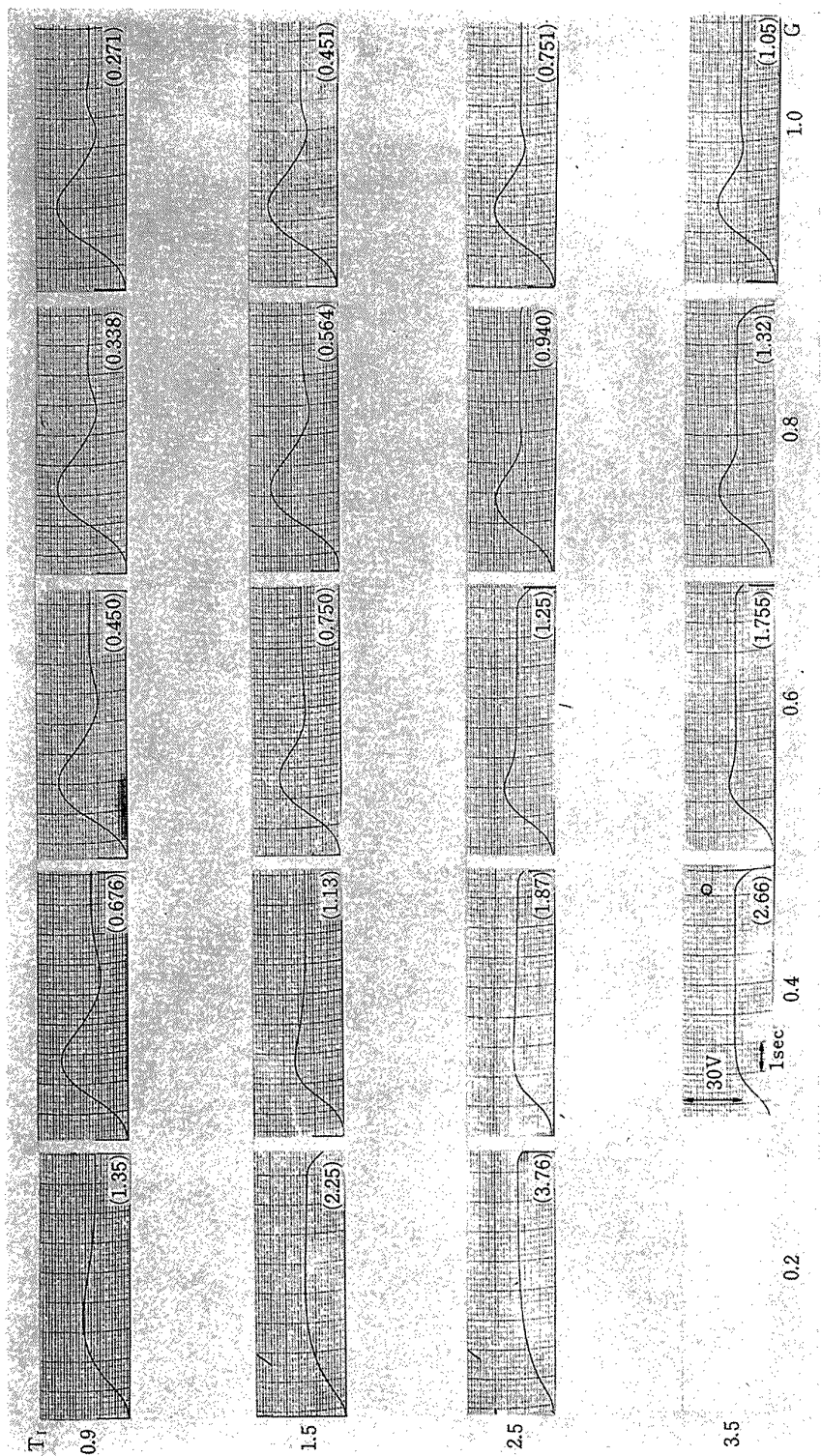


図 4.6 PI 動作制御方式による集合胴圧力の応答波形 M 4.0
設定圧 $11.0 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ P_{Ti} $19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

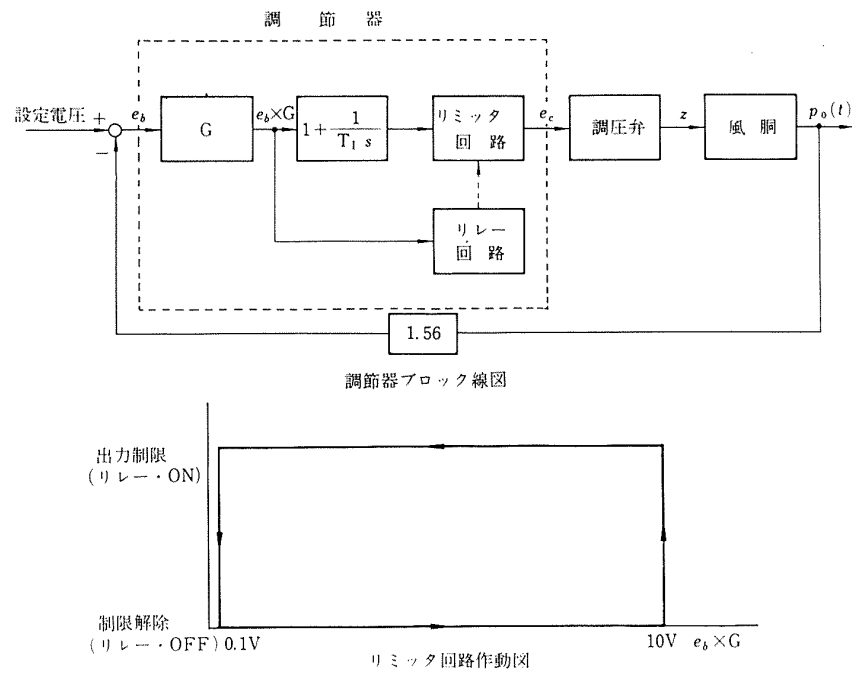


図 4.7 弁開度制限動作原理図

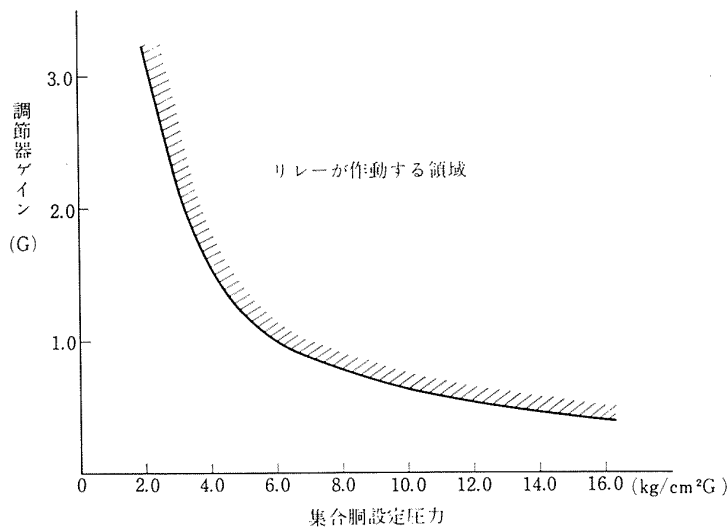


図 4.8 リレー作動範囲

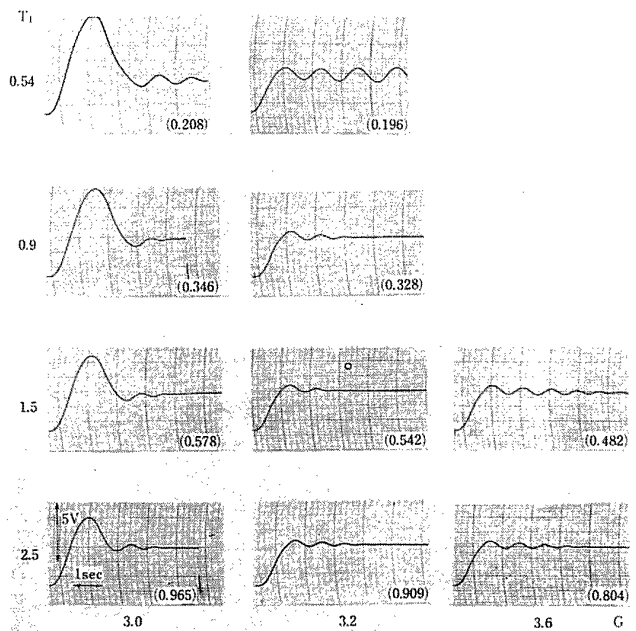


図 4.9 PI+弁開度制限方式による
集合胴圧力の応答波形 $M 2.5$
弁開度制限値 20% 設定圧 $2.0 \text{ kg/cm}^2\text{G}$
 $P_{Ti} 19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

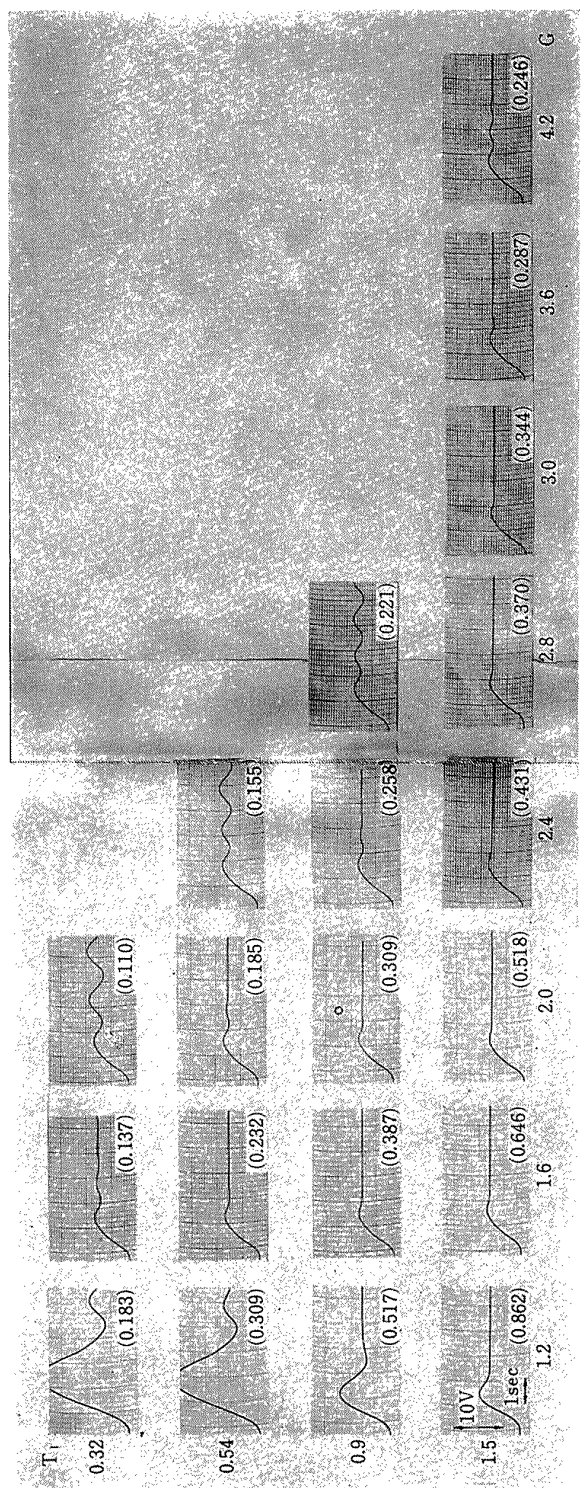


図 4.10 PI+弁開度制限方式による集合胴の応答波形 M 3.0
弁開度制限値 20% 設定圧 3.9 kg/cm²G P_{Ti} 19 kg/cm²G

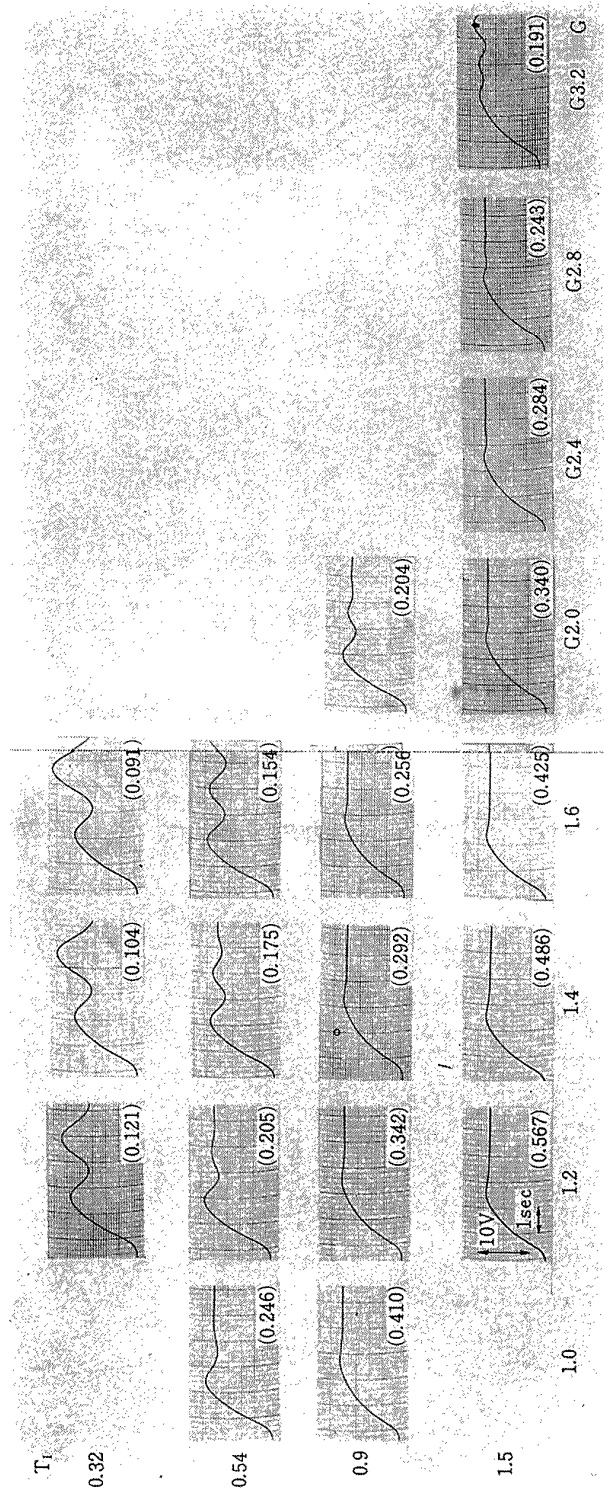


図 4.11 PI+弁開度制限方式による集合胴圧力の応答波形 M 3.5
弁開度制限値 23% 設定圧 6.9 kg/cm²G P_{Ti} 19 kg/cm²G

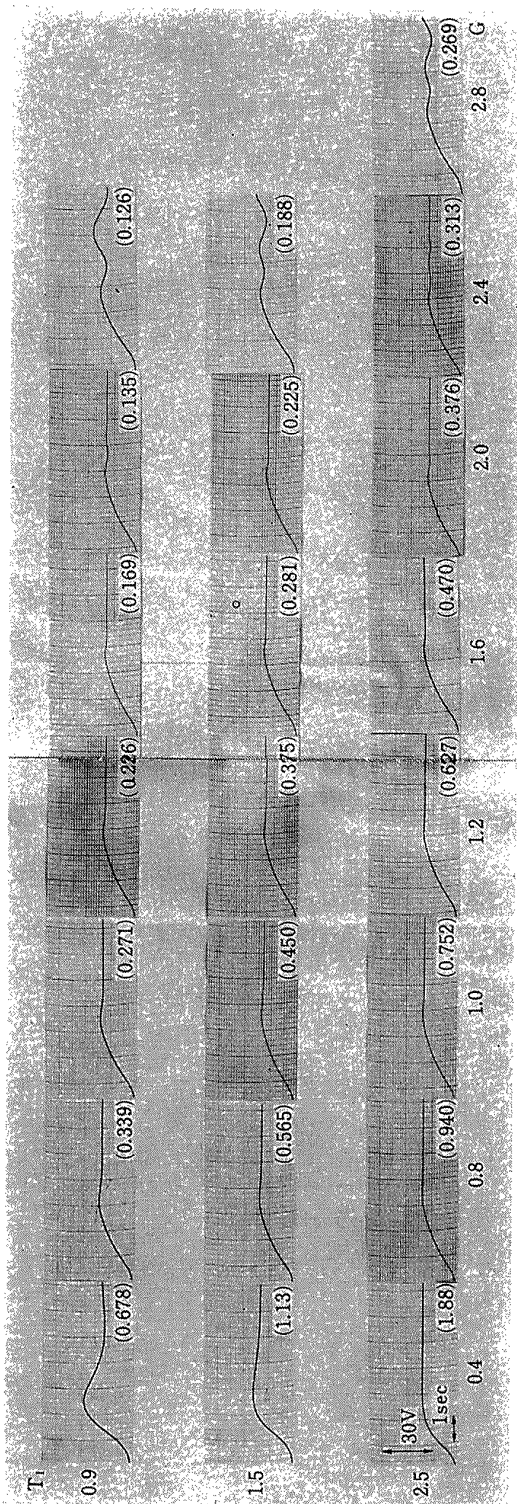


図 4.12 PI+弁開度制限方式による集合胴の応答波形 $M=4.0$
弁開度制限値 23% 設定圧 $11.0 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ $P_r=19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

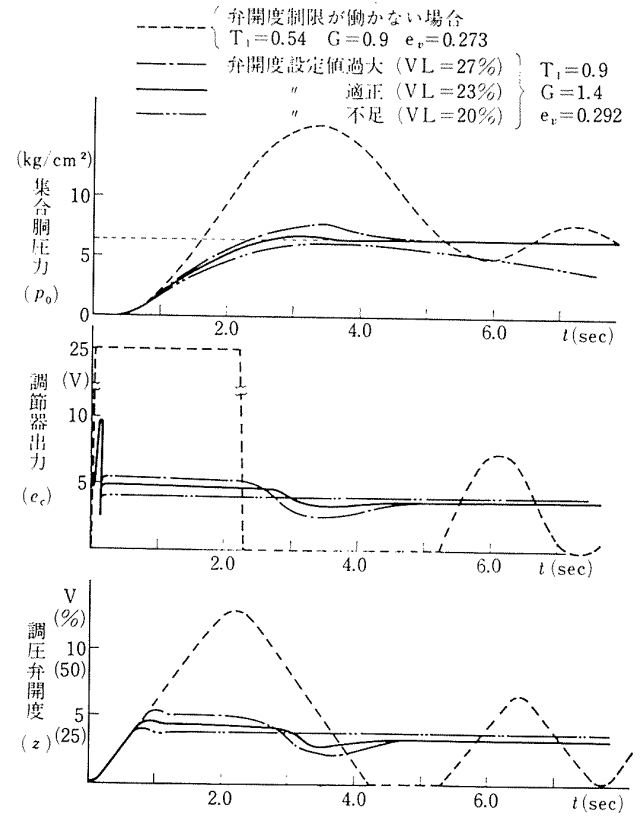


図 4.13 弁開度制限を使った場合と使わない場合の応答の比較 $M=3.5$

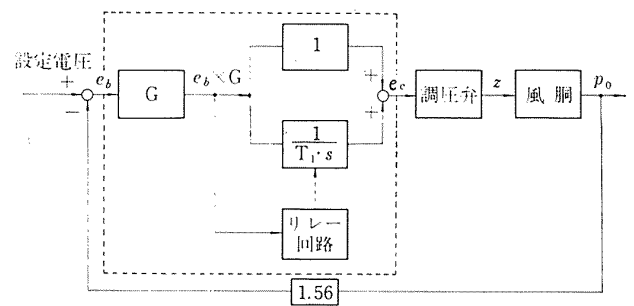


図 4.14 PI+積分時間切換制御の調節器
ブロック線図

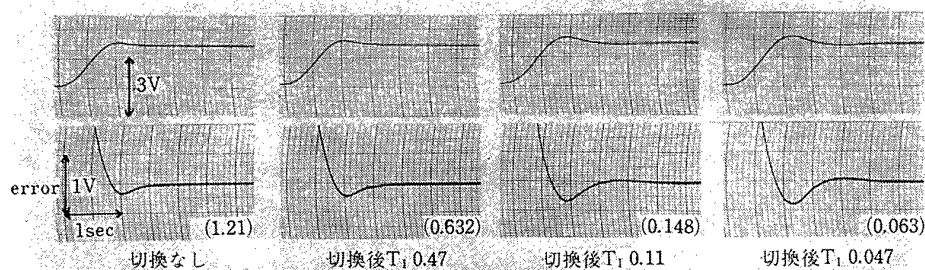


図 4.15 PI+積分時間切換方式による集合胴圧力の応答波形 M 2.0
 G 1.6 初期 T_I 0.9 設定圧 $1.2 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ P_{Ti} $19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

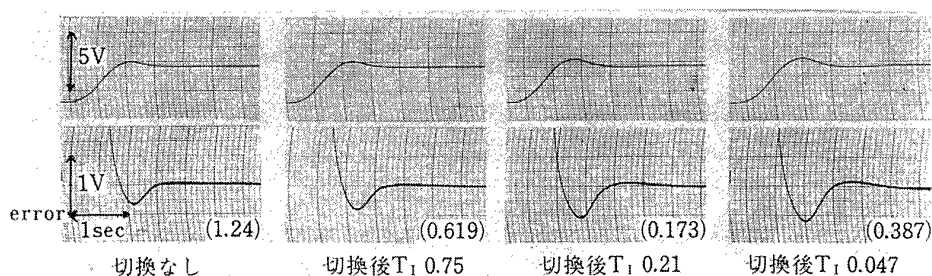


図 4.16 PI+積分時間切換方式による集合胴圧力の応答波形 M 2.5
 G 1.4 初期 T_I 1.5 設定圧 $2.0 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ P_{Ti} $19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

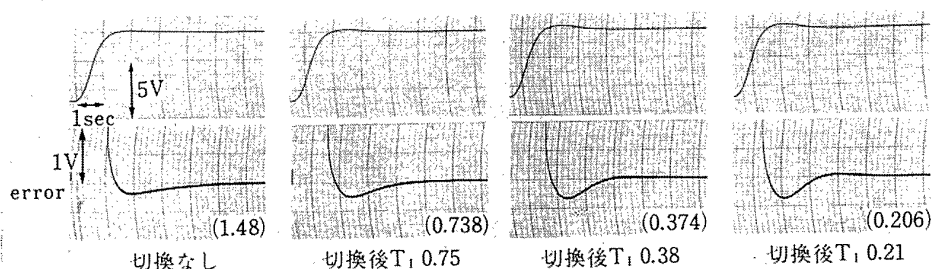


図 4.17 PI+積分時間切換方式による集合胴圧力の応答波形 M 3.0
 G 0.7 初期 T_I 1.5 設定圧 $3.9 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ P_{Ti} $19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

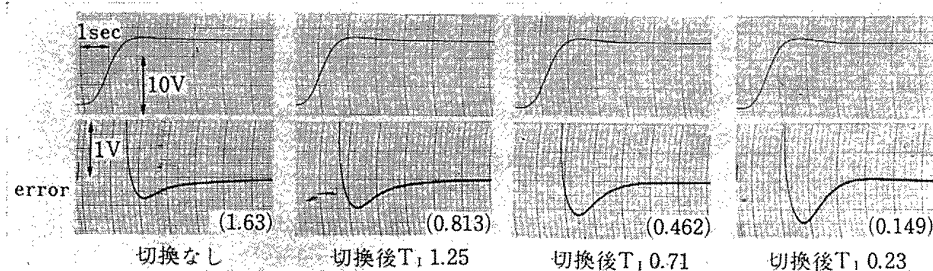


図 4.18 PI+積分時間切換方式による集合胴圧力の応答波形 M 3.5
 G 0.7 初期 T_I 2.5 設定圧 $6.9 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ P_{Ti} $19 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

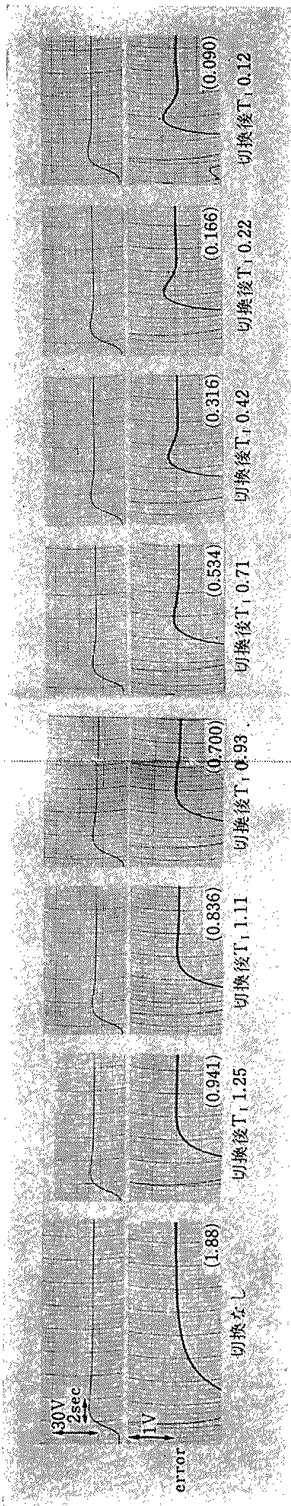


図 4.19 PI+積分時間切換方式による集合胴圧力の応答波形 M 4.0
G 0.4 初期 T_I 2.5 設定圧力 11.0 kg/cm²G P_{Ti} 19 kg/cm²G

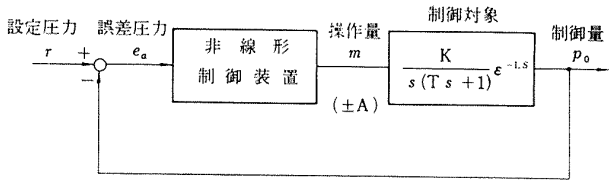


図 4.20 非線形制御系図

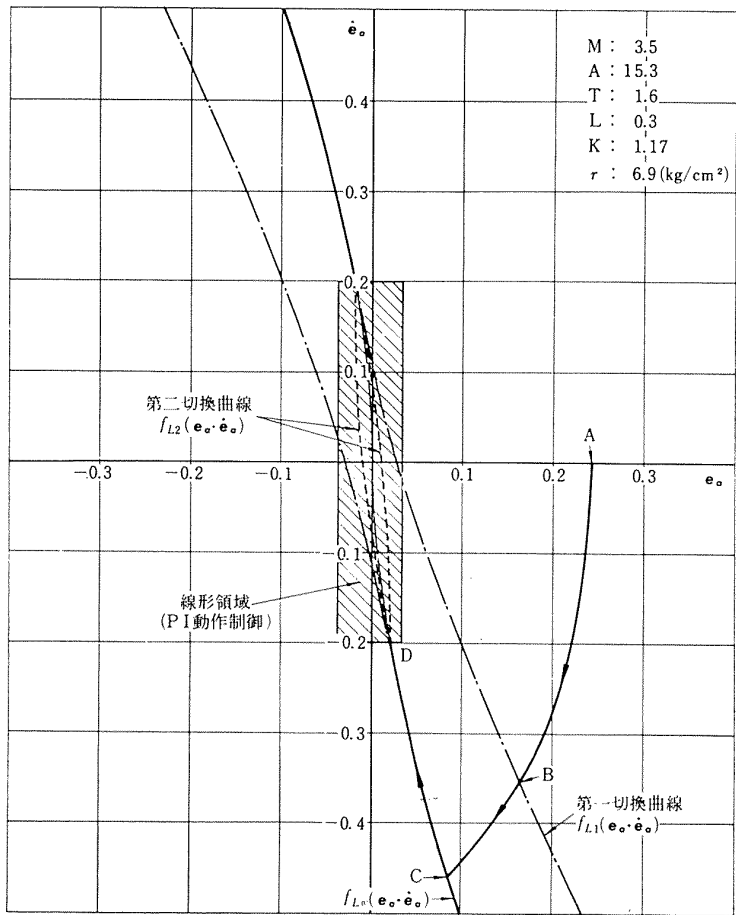


図 4.21 最適切換曲線 M 3.5

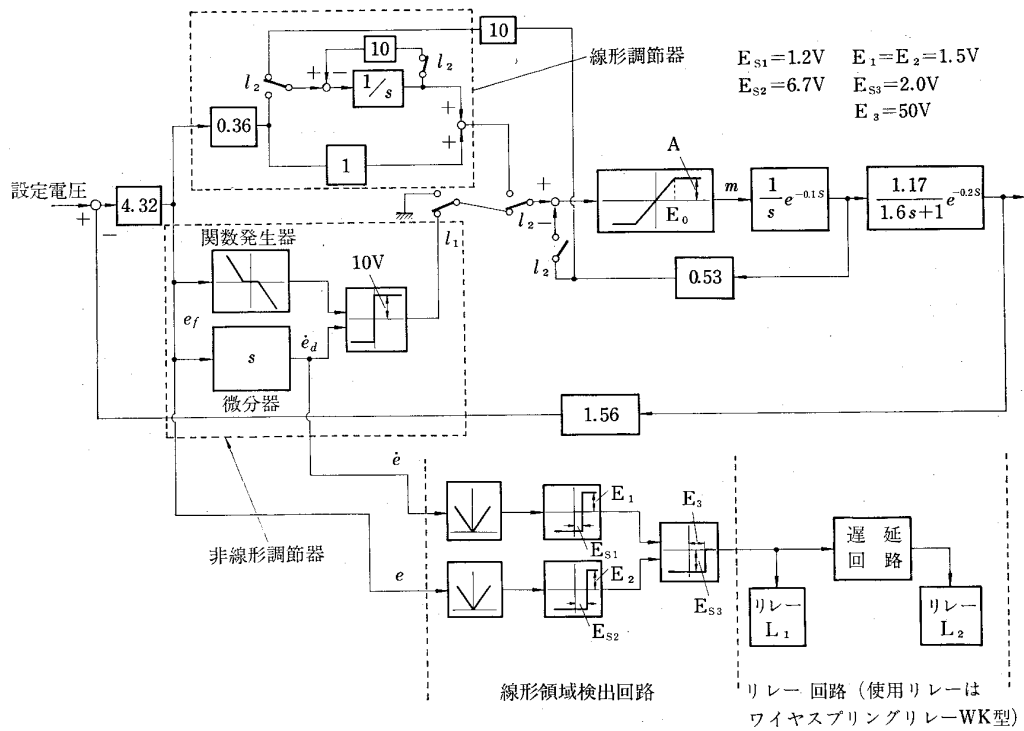


図 4.22 非線形制御方式ブロック線図

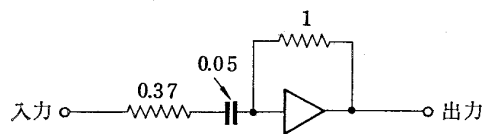


図 4.23 微分回路

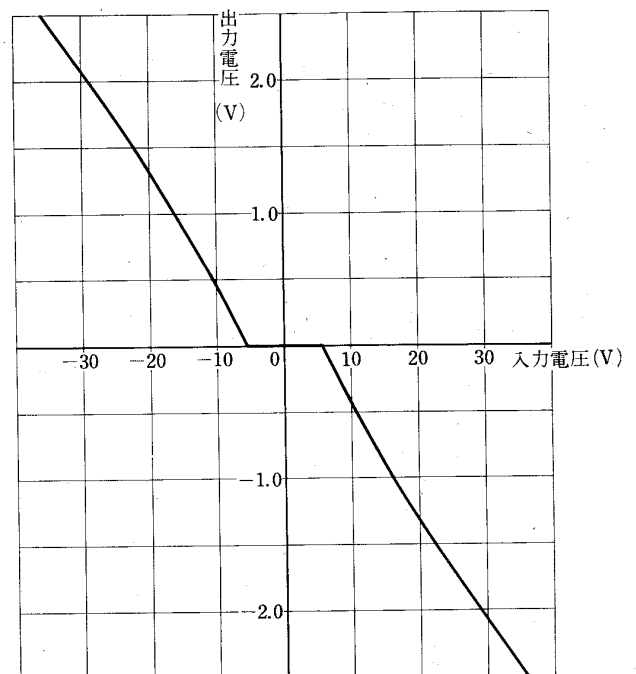


図 4.24 関数発生器入力対出力電圧特性

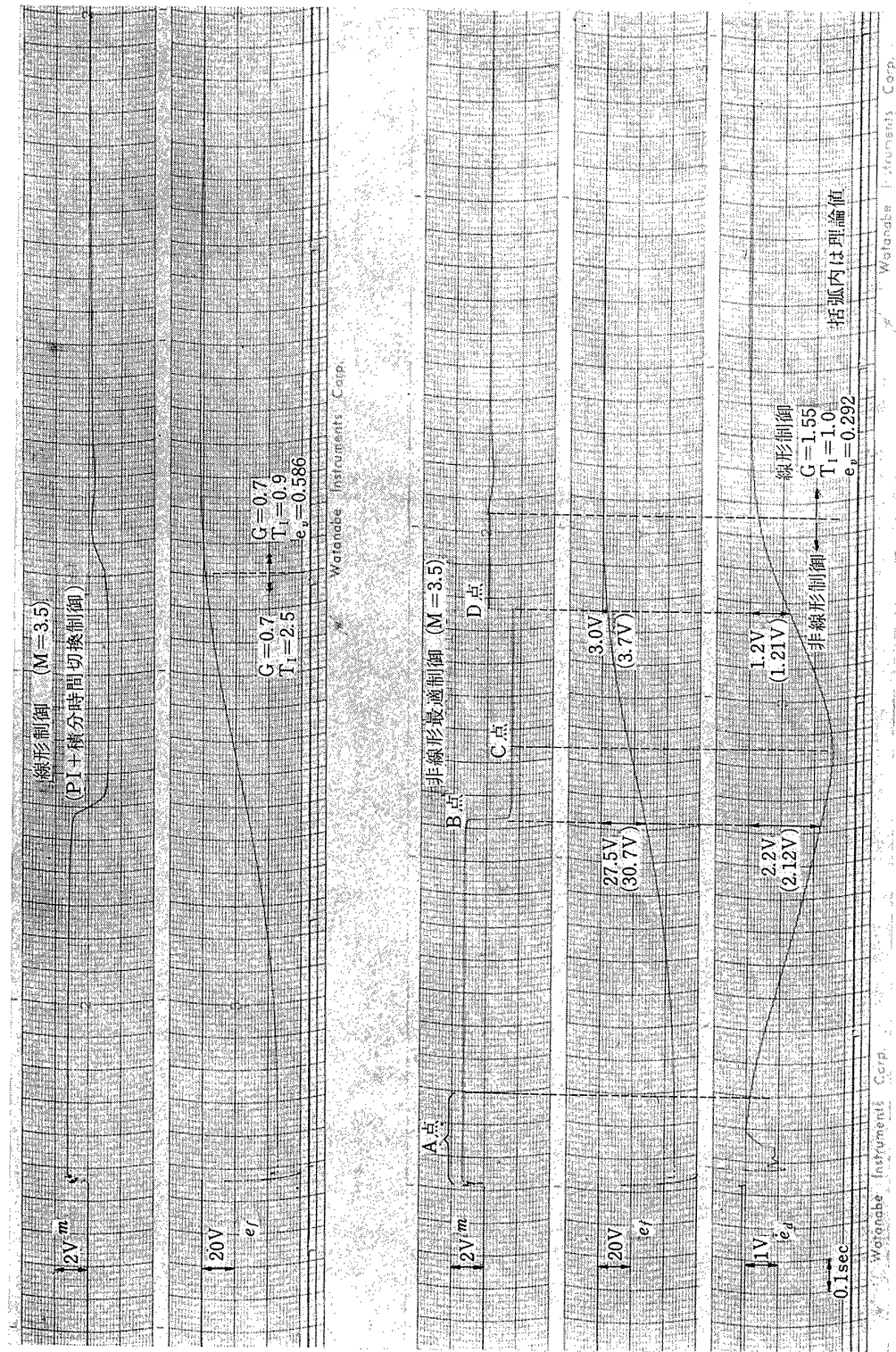
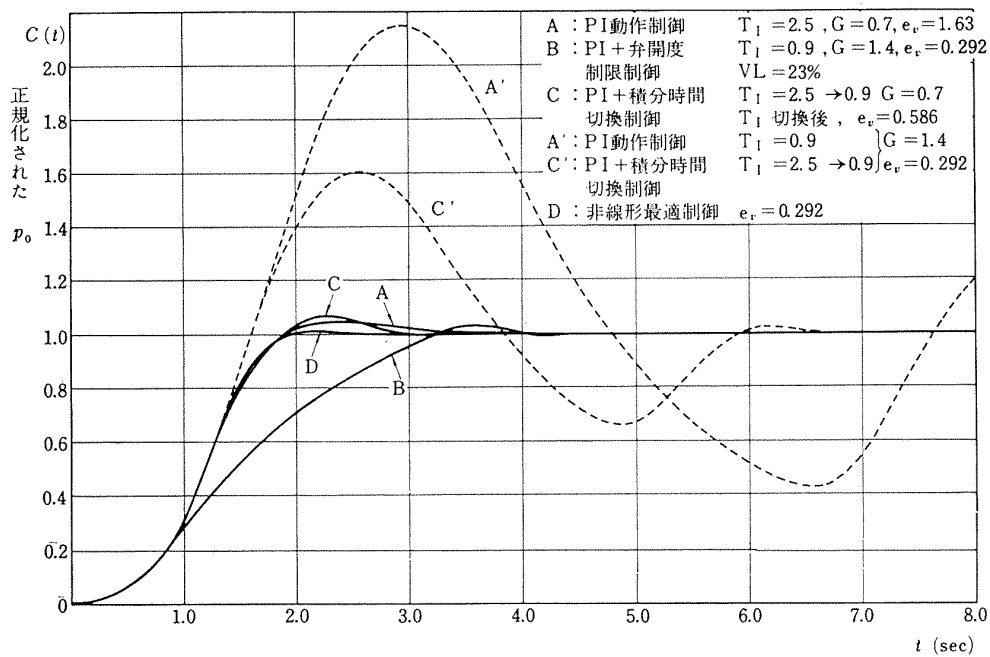
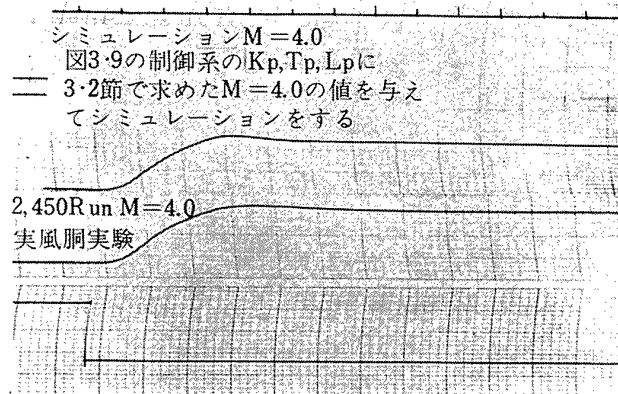


図 4.25 線形制御, 非線形最適制御の応答

図 4.26 各種制御応答の比較 $M 3.5$ 図 4.27 シミュレーションと実風洞の比較
(PI + 弁開度制限制御)

$G 0.8 \quad T_I 1.5 \quad LV 35\%$
横軸: 時間 1 cm/sec

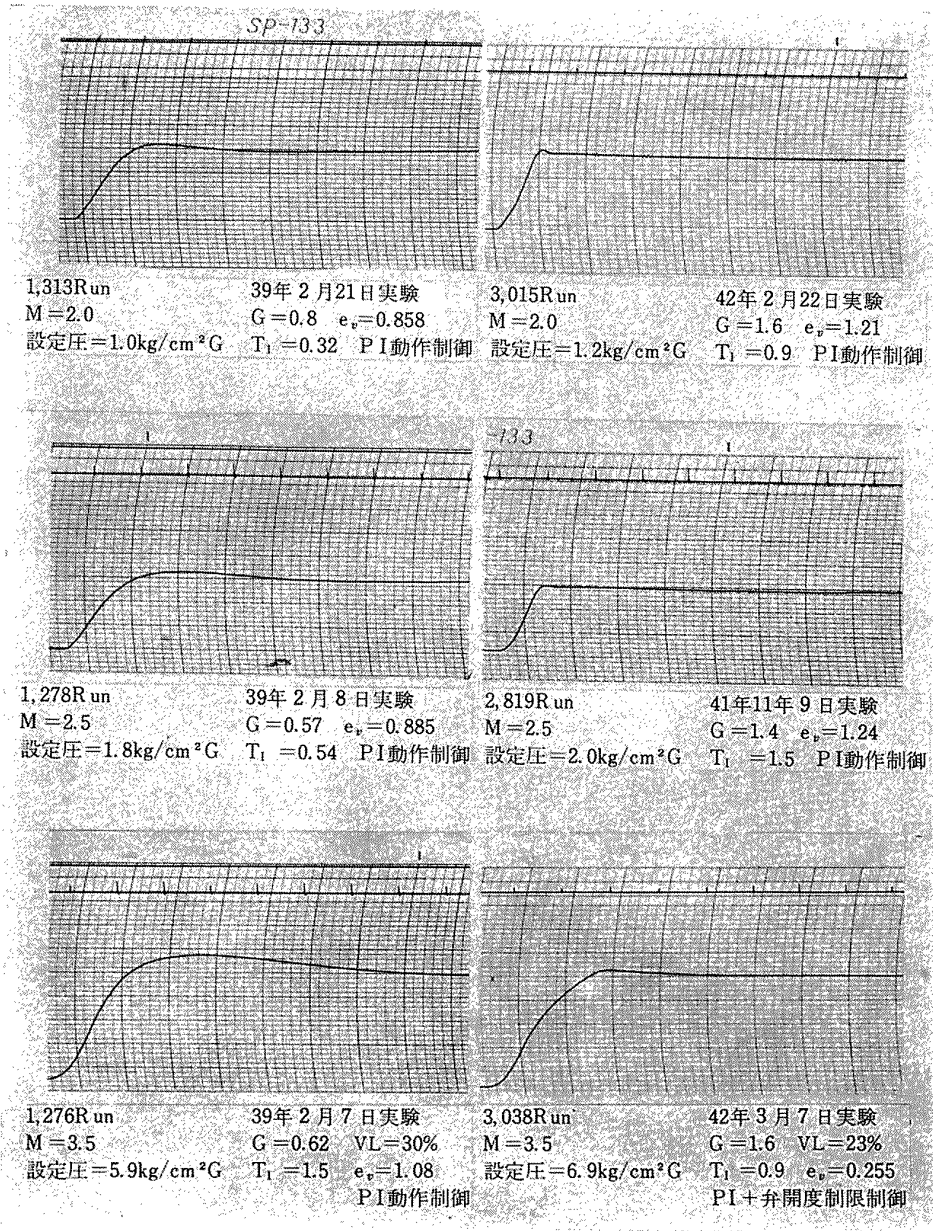


図 4.28 この研究以前と以後の集合胴圧力応答波形 (右側が研究以後)

TM-106	動安定微係数測定用風洞天秤について	1967年5月	高島一明, 榊原盛三 原亘利, 北出大三 金成正好
TM-107	プロペラ後流偏向型 STOL 機の風洞試験 (II)	1967年6月	犬丸矩夫, 岡部祐二郎 北村清美, 川幡長勝 高橋 俣, 木村友昭
TM-108	インダクタンス型小型圧力変換器の試作とその応用	1967年7月	長洲秀夫, 柳沢三憲
TM-109	ロケットの飛しょう径路計算のためのプログラム	1967年7月	戸川隼人, 石黒登美子
TM-110	二次元スラットおよびスロッチッドフラップの実験的研究 (I)	1967年8月	犬丸矩夫, 北村清美 川幡長勝
TM-111	リフトジェット VTOL 機の離陸径路に関する近似解	1967年8月	西村博史
TM-112	極超音速風洞用ペブル加熱器の特性	1967年8月	橋爪 宏, 橋本 登
TM-113	リフトジェットエンジン試験設備 (II)	1967年9月	森田光男, 岩部柱相 関根静雄, 武田克己
TM-114	五段遷音速軸流圧縮機の空力設計	1967年9月	藤井昭一, 松木正勝 五味光男
TM-115	燃料蒸発管に関する研究 (I)	1967年9月	大塚貞吉, 鈴木邦男 田丸 卓, 乙幡安雄
TM-116	高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて (I)	1967年9月	鈴木邦男, 相波哲朗
TM-117	ロケット用テレメータ機上装置の集積回路化	1967年9月	新田慶治, 松崎良継
TM-118	操縦桿レート信号によるアイアンバード制御の安定効果とパイロットのモデルについて	1967年9月	村上 力, 真柳光美
TM-119	ベーン型気流方向検出器の特性	1967年11月	田畑浄治, 松島弘一 成田健一, 塚本憲男
TM-120	円錐管レンズの設計とその応用	1967年11月	山中竜夫, 奥組澄男
TM-121	大きなマトリクスの逆行列計算および連立一次方程式の計算のためのプログラミング技術	1967年11月	戸川隼人, 戸川保子
TM-122	NAL-7-P ロケットの強度および燃焼試験結果	1967年11月	竹中幸彦, 古田敏康 小川鉦一, 朝田洋雄 豊原恒彦, 五代富文 湯沢克宜, 伊藤克弥 西村久男
TM-123	“NAL-16・31” および “NAL-25・31” 二段ロケットの振動試験	1967年11月	中井暎一, 古関昌次 田寺木一, 高木俊朗 安藤泰勝, 森田甫孝 峯岸正勝, 菊地孝男 太田幹雄

注: 欠番は配布先を限定したもの

航空宇宙技術研究所資料124号

昭和42年12月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)44-9171 (代表)

印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2~27~12