

UDC 621.45.046.8:  
629.7.036

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-389

デジタル式燃料制御装置の試作

西尾健二・遠藤征紀・杉山七契

越沼 威・松田幸雄

1974年9月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. まえがき	1 頁
2. 一般仕様、機能及び構成	1
(1) 一般仕様	2
(2) 構成	4
(3) 機能	8
3. 実機運転試験	11
(1) 制御方法及びプログラミング	11
(i) 回転数制御	12
(ii) 加減速制御	15
(iii) タービン出口ガス温度制御	15
(2) 制御性能	15
(i) 回転数制御特性	15
a 静特性	15
b 過渡特性	15
(ii) 加減速制御性能	21
(iii) タービン出口ガス温度制御性能	23
4. まとめ	23
付録 加速燃料スケジュールの計算について	25

### 記号及び文字

$N_g$	エンジン回転数 (rpm)	$\theta$	温度修正係数 $\theta = (273.5 + T_2) / 288.3$
$W_f$	燃料流量 ( $Kg/hr$ )	$\delta$	圧力修正係数 $\delta = P_2 / 1033$
$T_3$	タービン出口ガス温度		
$T_2$	圧縮機入口空気温度 ( $^{\circ}C$ )		
$P_2$	圧縮機入口空気圧力 ( $Kg/cm^2$ )		
$P_3$	圧縮機出口圧力 ( $Kg/cm^2$ )		
$T/A$	スロットルレバー設定角度 (度)		
$N_T$	指令回転数 (rpm)		
$K_F$	電気油圧式燃料制御器ゲイン ( $Kg/hr/V$ )		
$K_d$	計算機内部での計算に用いる回転数制御ゲイン		
$K_p$	P I D制御回路ゲイン		
$K_{T_2}$	$T_2$ 増幅器ゲイン		
$K_{T_3}$	$T_3$ 増幅器ゲイン		
$K_{P_3}$	$P_3$ ローパスフィルタゲイン		
$T_3 \text{ ref}$	$T_3$ 設定温度 ( $^{\circ}C$ )		
$T_f$	電気油圧式燃料制御器時定数 (秒)		
$T_{TD}$	$T_3$ 用熱電対の遅れ補償回路時定数 (秒)		
$T$	$P_3$ ローパスフィルタ積分部時定数 (秒)		
$T_D$	P I D微分時定数 (秒)		
$T_I$	P I D制御回路積分時定数 (秒)		

# デジタル式燃料制御装置の試作\*

西尾健二\*\* 遠藤征紀\*\* 杉山七契\*\*  
越沼 威\*\* 松田幸雄\*\*

## Digital Fuel Controller for Lift Jet Engine

By Kenji NISHIO, Masanori ENDO, Nanahisa SUGIYAMA, Takeshi KOSHINUMA  
and Yukio MATSUDA

With the increasing demand of high mission capability and fuel economy of modern aircrafts, the need for improvements in control system technology has become more evident. Among the state-of-the-art of technology, the digital electronic controller with hydraulic actuators seems to be the most hopeful one.

NAL started exploratory research program of digital electronic engine controller in 1971 with the on-line control of lift jet engine JR-100H with a mini-computer. This step was followed by building a demonstrator unit.

This paper describes the results of design program and fabrication of the demonstrator unit, along with the test results of on-line control of JR-100H.

### 1 ま え が き

近年デジタル式エンジン制御装置の研究開発が世界各国で盛んに行なわれるようになった。これはデジタル式エンジン制御装置が従来の油圧機械式エンジン制御装置に比較して融通性という観点からはるかに優るためであり、これが最近の高性能ジェットエンジンの制御装置に要求されている最も重要な特質の一つであるためである。このデジタル式エンジン制御装置は最近の半導体集積化技術の発達で、電子部品の信頼性が飛躍的に向上したことにより初めて実現可能になった。

我々はデジタル式エンジン制御装置の将来性、実現性について検討した結果<sup>1)</sup>、有望かつ実現可能と判断し、その方向に沿った研究を進めてきた。<sup>2), 3)</sup>ここで報告するデジタル式燃料制御装置は、これ等の研究調査の結果をもとに試作したもので、制御対象エン

ジンとしてJR100Hを想定し、機上搭載可能なことを目的として設計製作した。本制御装置をシュミレータにより動作確認試験をした後、試験用エンジンとしてリフトジェットエンジンJR100Hを用い実機運転試験を行なった。その結果機能的に十分初期の目標を達成できたので、ここにその構成と実機運転試験の結果を報告する。

### 2 一般仕様、機能及び構成

#### (1) 一般仕様

本デジタル燃料制御装置は制御対象として単軸幾何学的形状固定のリフトジェットエンジンJR100Hを想定しており、次のような制御機能を有する(表1にJR100Hの主要諸元を示す)。

(i)回転数制御によるFLAT RATING 運転及び自動タービン出口ガス温度制限(EGT( $T_s$ )制限)ができる。

(ii)エンジン回転数( $N_g$ )、圧縮機入口空気温度( $T_c$ )、圧縮機出口圧力( $P_c$ )を入力信号とする加速制御

\* 昭和49年5月21日受付

\*\*原動機部

表1 JR100Hの主要諸元

エンジン形式	ターボジェット	
圧縮機	6段軸流	
燃焼器	環型噴霧式	
タービン	1段軸流	
ベアリング	2個(ボールおよびローラ)	
スタータ	エアインピンデ式	
エンジン姿勢	垂直	
(性能)		
推力(Kg)	抽気なし	1520
	抽気時	1439
燃料消費率 (Kg/hr/Kg)	抽気なし	1.13
	抽気時	1.15
圧縮機 (6段軸流圧縮機)	空気量(Kg/s)	27.5
	圧力比	3.9
	回転速度(r.p.m)	13500
	抽気量(Kg/s)	15
燃焼器 (環型燃焼器)	空気量(Kg/s)	26
	出口温度(℃)	850
タービン (1段軸流タービン)	ガス量(Kg/s)	26
	圧力比	0.02

を行なう。即ち、式

$$W_f/P_s < f(N_g, T_2) \dots\dots\dots(1)$$

に従った加速時燃料流量制限を行なう。

(iii) 圧縮機出口圧力( $P_s$ )を入力信号とする減速制御を行なう。即ち、式

$$W_f > f(P_s) \dots\dots\dots(2)$$

に従った減速時燃料制限を行なう。

以上の制御機能を果たすための設計目標値は次の通り

である。

(i) 使用環境条件

高度 0~15000m

温度 -54℃~125℃

湿度 0~95±5%

振動 70~200HZ, 30mil以下

(ii) 回転数設定範囲

50~105%, 精度はMIL Spec\*に準拠する。

(iii)  $T_2$  設定範囲

0~900℃の範囲で設定でき、設定は半固定とする。

(iv) 加速, 減速燃料スケジューリング設定範囲

回転速度に対し, 20~105%範囲で設定可能とする。温度, 圧力に関しては-54~+125℃, 0~5 Kg/cm<sup>2</sup>aの範囲で設定可能とする。

(2) 構成

本制御装置は制御装置本体, コアメモリスタック(図1), オペレーションコンソール(図2)から構成されており, このうち制御装置本体とコアメモリスタックは機上搭載を目的として設計製作し, 小形軽量化を図った。

(i) 制御装置本体

制御装置本体は本制御装置の中心部分であり, デジタル回路にアナログ回路を付加したハイブリッド方式で作られた演算装置である。各回路は小規模又は中規

\* MIL Spec では回転数設定精度は±0.2%以内とされている。

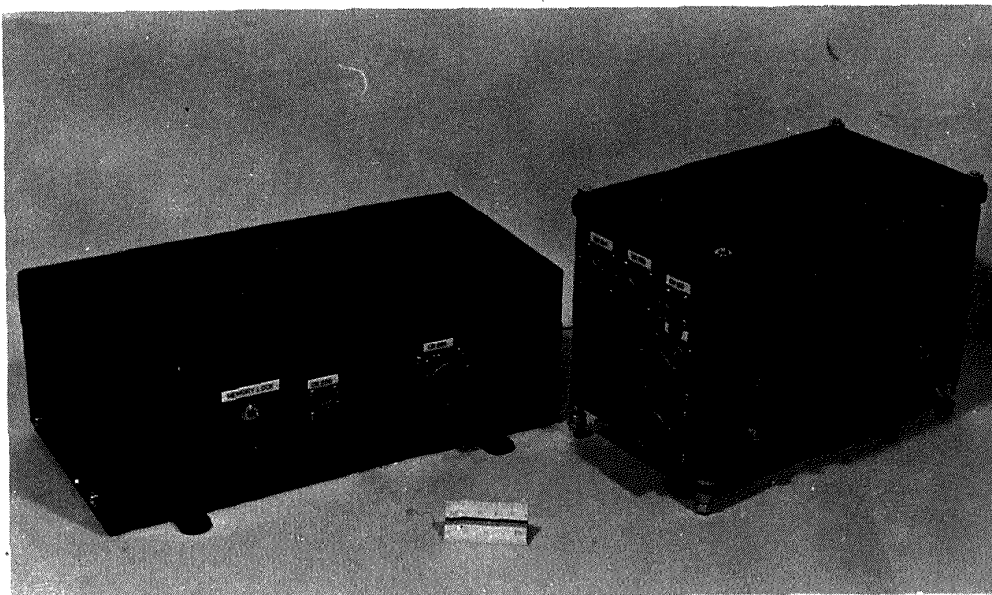


図1 デジタル式燃料制御装置本体(右)とコアメモリスタック(左)

模集積回路を中心とした電子部品で構成し、これを1枚のプリント基板上に配備した上、電源、水晶発振器等と共に密封した筐体内に格納した。プリント基板は各々にあけた穴を貫ぬく6本の柱により棚状に配列固定した後筐体に固定した。各プリント基板はスペーサーにより一定の距離だけ隔てられている。図3にプリント基板を示す。筐体はアルミ製で容積は160mm×200mm×350mm、重量は約4Kgである。側面には検出器、他の制御装置との配線のためのコネクタが取付けられている。

(ii) コアメモリスタック

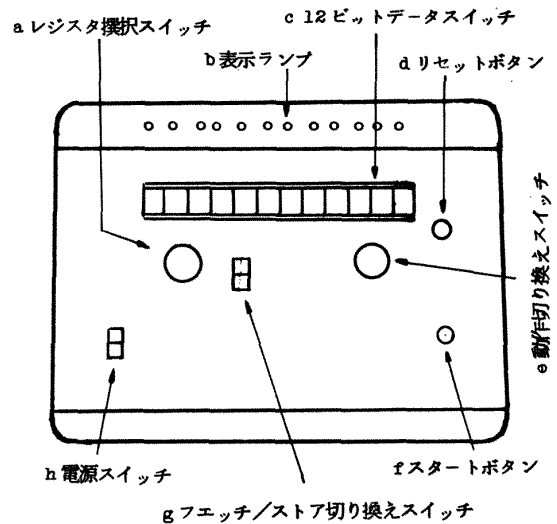
コアメモリスタックは、ケーブルを介して制御装置本体と連結して使用され、122mm×83mm×212mmの筐体の内部に12ビット、512語のコアメモリを格納するものである。±5V、40Wの電源を必要とする。コアスタックは4枚の基板より成り、次の回路を含む。

アドレスデコーダ、選択回路、スタック、読み出しアンプ、入出力レジスタ、禁止回路、タイミング回路

本コアメモリは本来8ビット、1024語、サイクルタイム1.6μsecであるが、2度アクセスすることにより12ビット、512語として使用している。従ってサイクルタイムは余裕をみて4.0μsecにしている。

(iii) オペレーションコンソール

オペレーションコンソールは、制御装置本体の各レジスタやコアの内容を外部から書き込み又は読み出ししたり、制御装置のスタート及びストップを指令する外



- |                 |                        |
|-----------------|------------------------|
| a. レジスタ選択スイッチ   | A.B.P.Y.M各レジスタを選択する。   |
| b. 表示ランプ        | データスイッチに対応して「1」なら点灯する。 |
| c. 12ビットデータスイッチ | スイッチを「0」で「1」に設定される。    |
| d. リセットボタン      | 押してレジスタはクリアされる。        |
| e. 動作切り換えスイッチ   | 単一命令実行は「SI」にセットする。     |
| f. スタートボタン      | eを「RUN」にセットしてスタートさせる。  |
| g. フェッチ/ストア切り換え | 読み出し、書き込み機能を選択する。      |
| h. 電源スイッチ       |                        |

図4 オペレーションコンソール上の各種スイッチの名称と機能

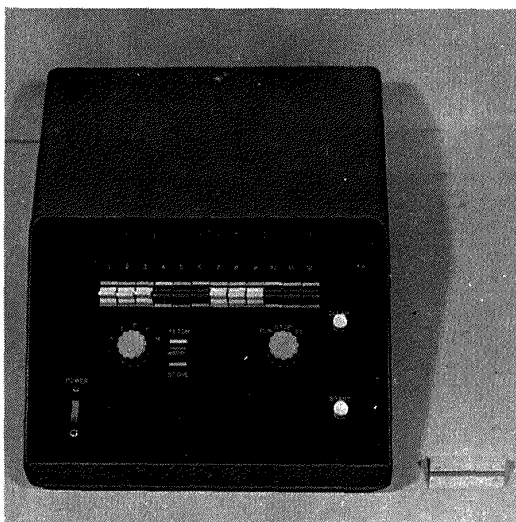


図2 オペレーションコンソール

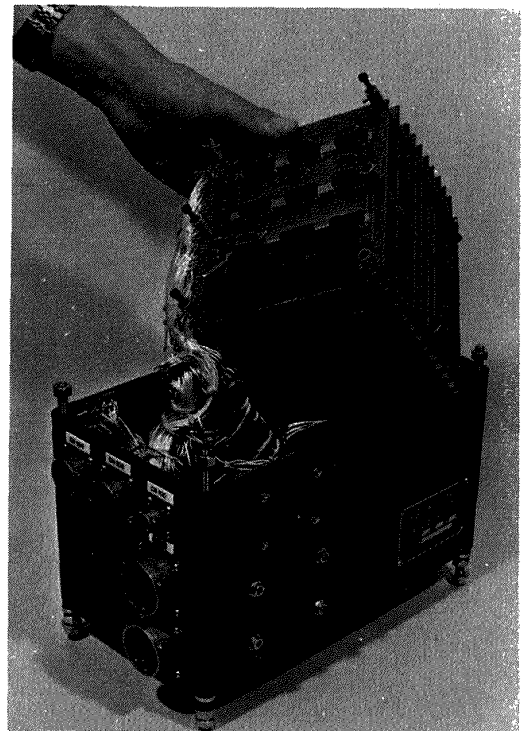


図3 プリント基板

部コンソールである。図4にコンソール上の各種スイッチ及び表示装置の名称と機能を示す。電源はAC400Hz, 115V及びDC+5V, 1Aを必要とする。

(3) 機能

本制御装置を用いて(1)に挙げた制御機能を果たするためには図5に示す制御系を構成する必要がある。図において検出器部の各種検出器はデジタル又はアナログ形の電気信号を本制御装置に提供する。ただし検出器

出力信号を増幅及びノイズの除去のための増幅器やフィルターは本制御装置に内蔵されている。作動部は本制御装置の電気的出力信号に比例した燃料流量を供給し、かつ適当な速さの応答速度を有するものであればよい。

図6に制御装置本体のブロック図を示す。これをデジタル回路を主とし、アナログ回路を付加したハイブリッド方式で構成した。これはデジタル方式とア

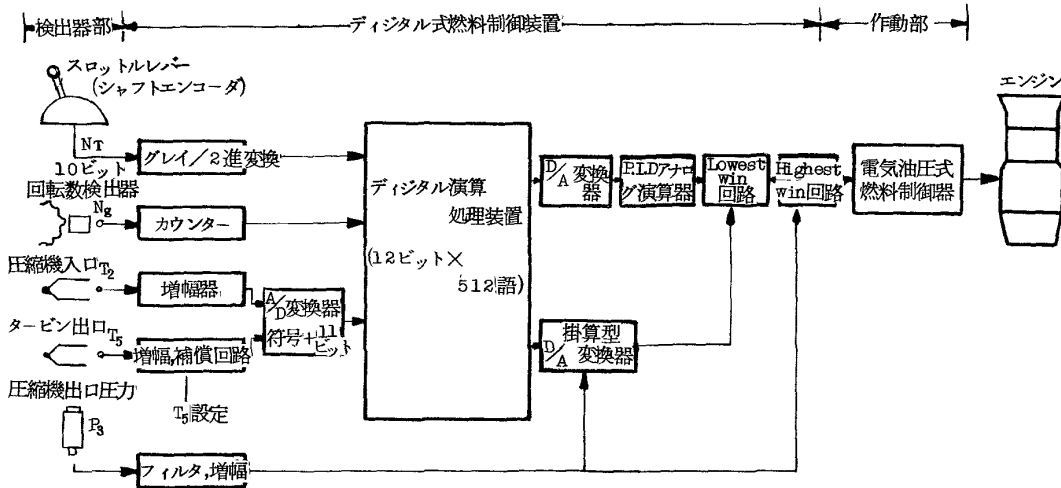


図5 デジタル式燃料制御装置によるエンジン制御系

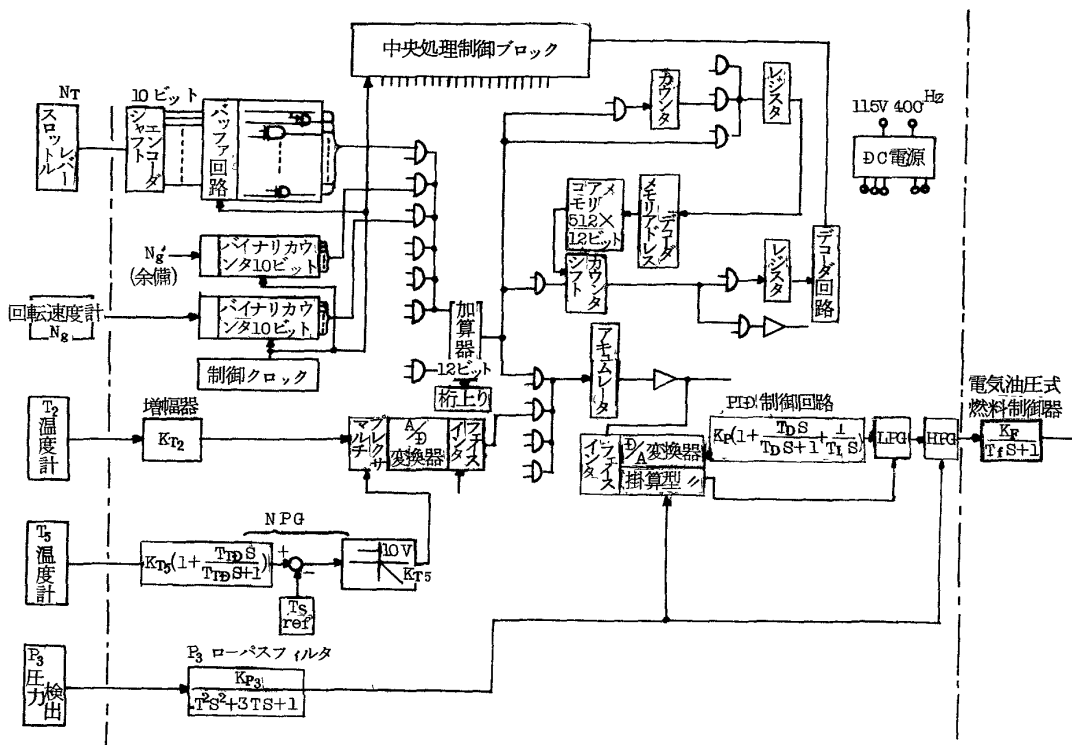


図6 デジタル式燃料制御装置ブロック図(---内部)

ナログ方式の長所を生かすことと、デジタル部分の必要記憶容量がむやみに増加するのを避けるためである。デジタル部分(一種の小規模なデジタル計算機であるから、以後単にデジタル計算機又は計算機と呼ぶ)は、高い精度を必要とする計算、複雑な論理判断、データの入れ替えが比較的多い関数発生器としての働き等をする。アナログ部分には、入力信号の増幅及びフィルタによるノイズの除去、デジタル部分の出力信号をもとにした回転数制御のためのPID動作、加減速制御のための比較選択動作等を行なわせた。また $T_s$ 信号の熱電対による遅れを補償するための補償回路、設定温度以上になると設定温度との差に比例した負電圧を発生するネガティブパスゲート(Negative Pass Gate、以後NPGと略記する)等もアナログ部分に属する。これらのデジタル部分とアナログ部分を結ぶAD変換器、DA変換器もまた制御装置内に組み込んだ。

次に本制御装置内部の機能を、情報の流れに沿って順次説明する。回転数指令( $N_T$ )は図7に示すスロットルレバーにより与えられる。スロットルレバー設定位置( $T/A$ )は、内蔵した10ビット、グレイコード信号を発生するシャフトエンコーダにより検出する。グレイコード信号は制御装置本体内のグレイ/純2進変換器により純2進数に変換した。スロットルレバー設定角度 $0\sim 100^\circ$ に対して計算機に読み込まれる値の範囲は $253)_{10}\sim 532)_{10}$ となっている。\*\*後述するように、これは回転数指令にして $6750\text{rpm}$ (50%) $\sim 14175\text{rpm}$ (105%)に匹敵する。

回転数検出器は電磁ピックアップ形のもので、エンジン回転軸1回転当り90のパルス電気信号を発生する。本制御装置には、このピックアップからのパルス

\*\*  $253)_{10}$ は10進数の253を意味する。

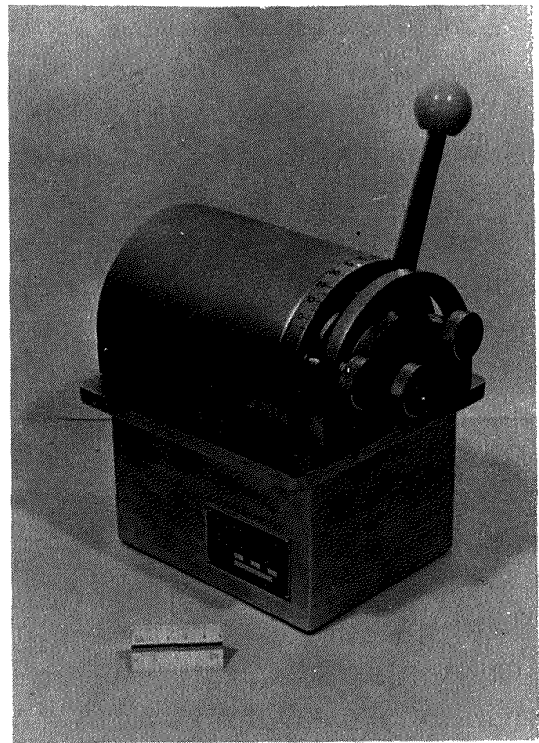


図7 スロットルレバー

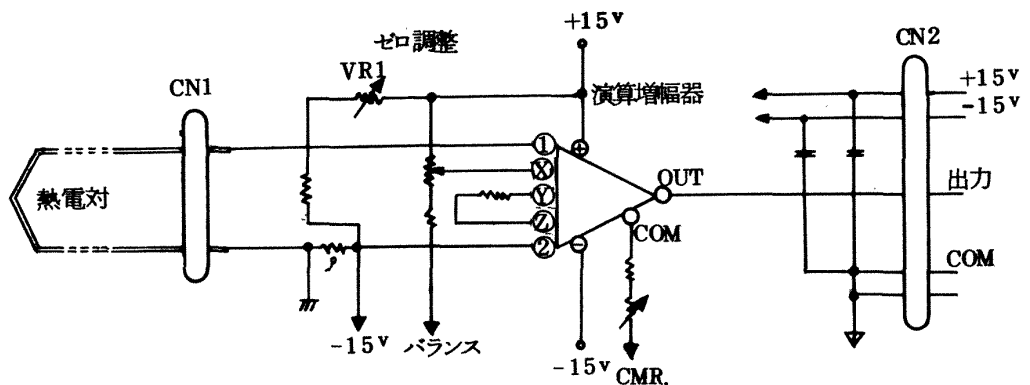
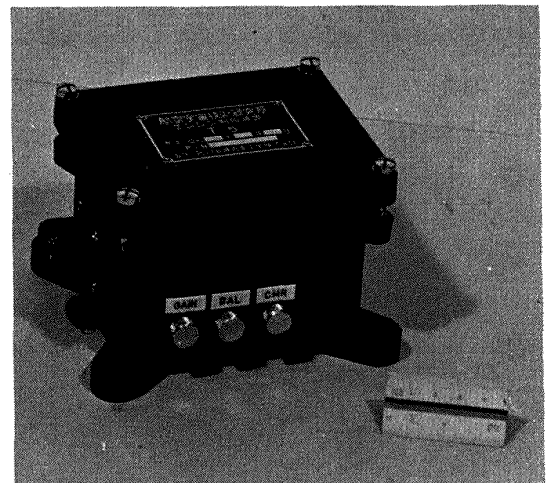


図8  $T_s$ 増幅器と回路図

信号をゲートタイム25msecで計数する2進カウンタを2台備えた(1台は予備である)。この場合、エンジン回転数6750rpm(50%)~14175rpm(105%)に対して計算機には253)10~532)10という値が読み込まれる。これはスロットルレバーにより与えられる回転数指令と一致する。グレイ/純2進変換器出力レジスタ及び2進カウンタ出力レジスタの内容は計算機命令(INA命令)により、計算機内部のAレジスタの内容と加算される形で読み込まれる。計数用のクロックパルスは100KH<sub>z</sub>の水晶発振器を1/2500に落して発生させた。

圧縮機入口空気温度(T<sub>2</sub>)、タービン出口ガス温度(T<sub>3</sub>)信号は適当に増幅した後で(図8にT<sub>2</sub>増幅器と回路図を示す)3チャンネルマルチプレキサを経て、符号+11ビットのAD変換器によりデジタル化した後計算機に読み込んだ。T<sub>2</sub>信号は熱電対による遅れを補償する機能と、T<sub>2</sub>がT<sub>2</sub>設定値を越えた場合に、その差に比例した負電圧を発生する機能とを果すNPG(図9)を経た後マルチプレキサに送られる。圧縮機出口圧力(P<sub>3</sub>)信号は図10に示すローパスフィルタを経て、掛算型DA変換器の一方の入力及び低値選択回路(Lowest Pass Gate, 以後LPGと略記する)の入力となる。図6中に示す伝達函数中、K<sub>T<sub>2</sub></sub>, K<sub>P<sub>3</sub></sub>, T<sub>TD</sub>, T<sub>2</sub> refは半固定のポテンショメータにより調整できる。それぞれの調整可能範囲は0~∞, 4~20, 0~0.833秒, 0~900℃である。

以上の4入力信号(N<sub>g</sub>, N<sub>T</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>)を読み込んだデジタル計算機は回転数制御、加減速制御、タービン出口ガス温度制御に必要な計算を行ない、その結果を符号+11ビットDA変換器によりアナログ信号に変換した後出力としている。計算機の記憶容量は12ビット、512語であり、サイクルタイムは4.0μsecである。10MH<sub>z</sub>の水晶発振器の出力信号周波数を1/10

に落した1MH<sub>z</sub>を基本クロックパルスとするストアードプログラム方式の演算を行なう。A~Mの6個のレジスタを備えているが、命令によりデータの出し入れができるのはAレジスタ(12ビット)とBレジスタ(4ビット)のみである。命令は23種類(表2)ある。計算機の出力即ち計算結果には、回転数制御用のものと、加減速制御用のものとがある。回転数制御用は(N<sub>T</sub>-N<sub>g</sub>)×K<sub>g</sub>なる式と、タービン出口ガス温度制御のための演算によって求められた値(以後ΔN\*信号と呼ぶ)であり、加減速制御用は(Wf/P<sub>3</sub>)<f(N<sub>g</sub>, T<sub>2</sub>)なる式を満たすように決められたWf/P<sub>3</sub>の値(以後Wf/P<sub>3</sub>\*信号と呼ぶ)である。ΔN\*信号は通常の符号+11ビットDA変換器を経て、PID制御回路の入力信号になり、Wf/P<sub>3</sub>\*信号はアナログ形掛算器と1体になった符号+11ビットDA変換器においてP<sub>3</sub>用ローパスフィルタ出力信号と掛け合わせられ、その出力信号(以後Wf\*信号と記す)はLPGへ入力される。PID制御回路を図11に示す。積分回路には、図11に示すようにFETを用いて上限方向に飽和特性を持たせた。これは回転数の変化範囲の大きい加速を行なうときに、積分動作が原因で起こる回転数のオーバシュート<sup>3)</sup>を防ぐためである。図12に積分回路入力電圧に対する飽和電圧特性を示す。図6中に示すPID回路の伝達函数中、ゲインK<sub>P</sub>, 積分時定

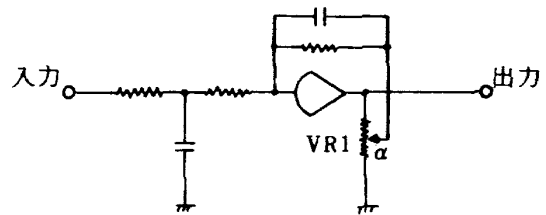


図10 P<sub>3</sub>用ローパスフィルタ回路図

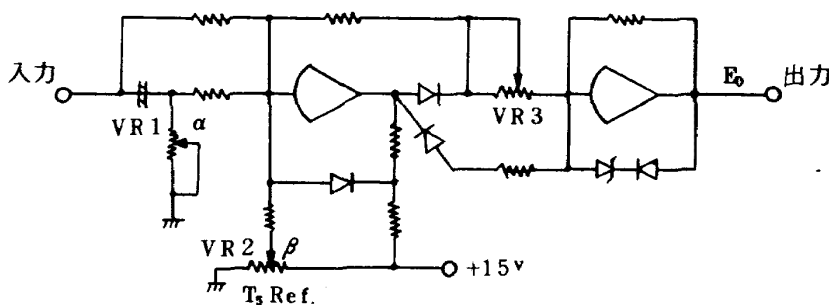
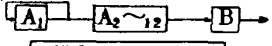
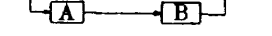
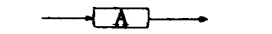
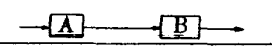


図9 N·P·G(ネガティブパスゲート)回路



種類命令	命令の内容	型式	備考
ロード ストア	LDA [EA]→(A) STA (A)→[EA] CRA 0→(A)	MR	[EA] エクステンド アキュムレー タの内容
演算	ADD (A)+[EA] ANA (A) [EA]→(A) TCA 2の補数 AOA (A)+1→(A)	GE	(A) アキュムレー タの内容
制御	JMP [EA]→(P) IRS [EA]+1→[EA] JST (P <sub>5,12</sub> )→[EA <sub>5,12</sub> ] [EA]+1→(P) HLT halt SPL (A)≥0 SKIP SMI (A)<0 SKIP SZE (A)=0 SKIP SLN (B) <sub>j</sub> =1 SKIP	MR SK	(B) レジスタの 内容  (P) パルスカウン タの内容
シフト	ARS  LRR  LGR  LRL 	SH	
入出力	OCP AD変換開始指令 INA 入力命令 OTA 出力命令 SKS タイマ状態検出	IO	OCP, INA に対して使用

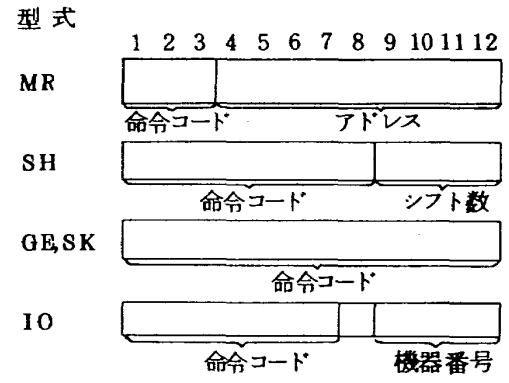


表 2 計算機に用意されている命令

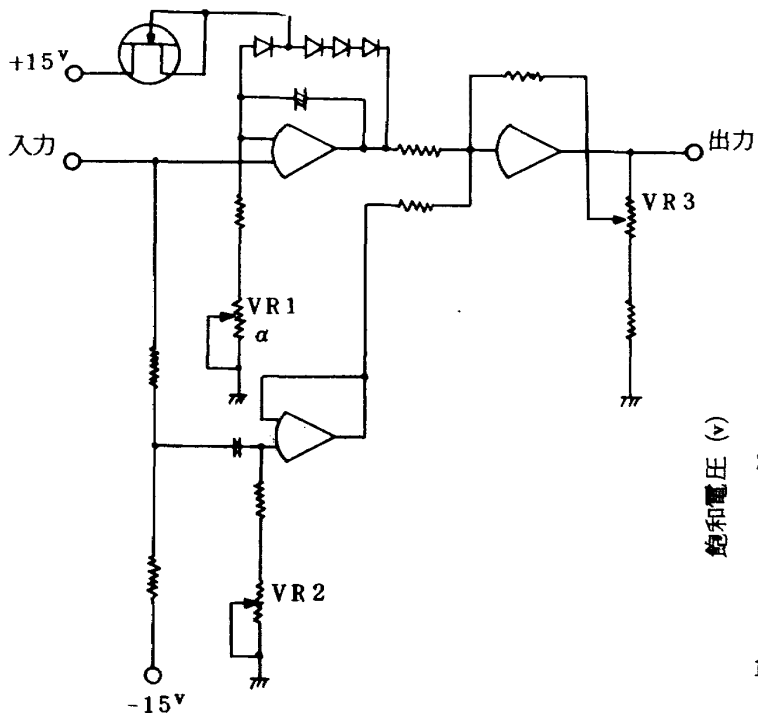


図 11 P・I・D 制御回路

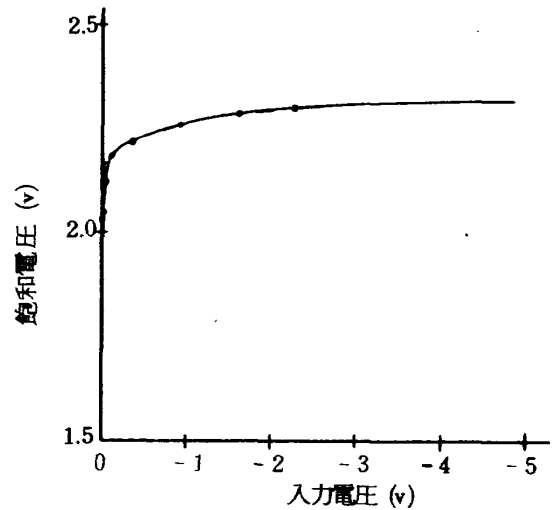


図 12 積分回路入力電圧に対する飽和電圧特性

数 $T_I$ , 時定数 $T_D$ は半固定になっており, それぞれ1~20, 0.2~5.2秒, 0.082~0582秒の範囲内で調整可能になっている。

PID回路出力信号と $W_f^*$ 信号はLPGの入力となる。LPGを図13に示す。これによって, 回転数制御系の過大な燃料流量供給により圧縮機がサージングに突入するのを防止している。

LPG出力信号は高値選択回路(Highest Pass Gate, HPGと略記する)に送られ, もう1つの入力信号である $P_3$ ローパスフィルタ出力信号と比較され, 値の大きい方が出力される。HPGを図14に示す。

HPGの出力信号は回転数制御, 加減速制御, タービン出口ガス温度制御に必要な演算, 論理判断等の過程を経たものであるから, これによって電気油圧式燃料制御装置を駆動してもエンジンには安全な作動が保証されている。

### 3 実機運転試験

本制御装置の制御性能を知り, 同時に新たな問題点を見出すために試験用エンジンとしてリフトジェット

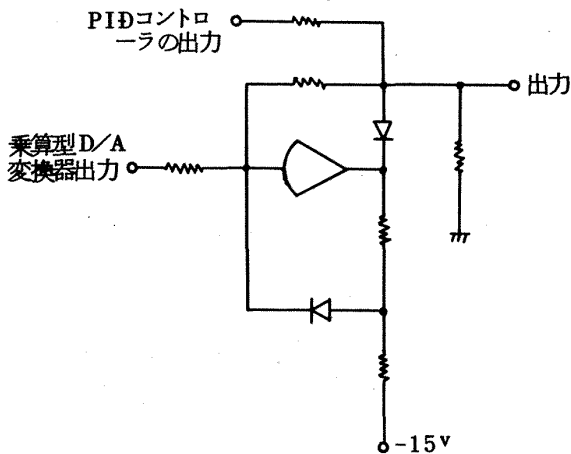


図13 L・P・G(ローウェストパスゲート)回路図

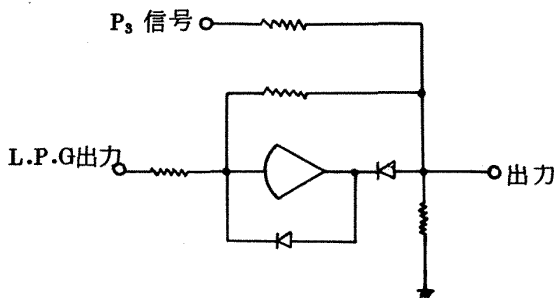
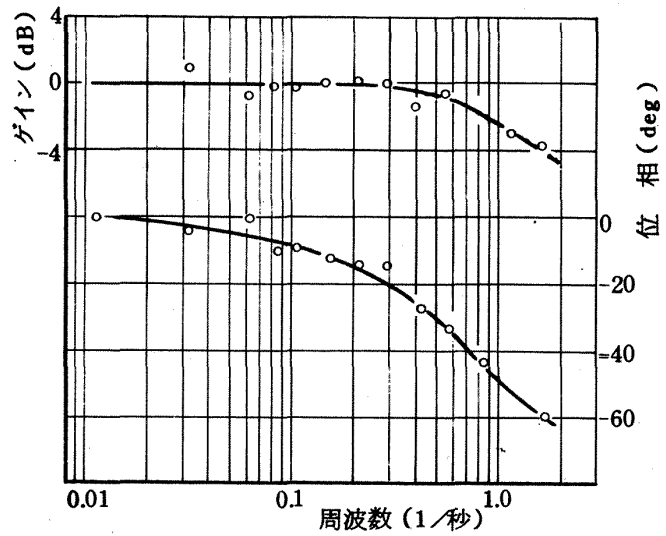


図14 H・P・G(ハイレフトパスゲート)回路図

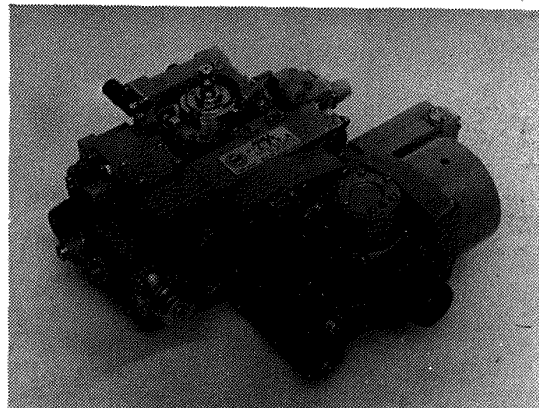
エンジンJR100Hを用い実機運転試験を行なった。試験に先立ってリアルタイムシミュレータ<sup>2)</sup>を用い, 確認試験を行なった。

試験時の制御系は図5と同じである。図15~17に各種検出器を, 図18に使用した電気油圧式燃料制御装置の写真と周波数特性を示す。\*\*表3には本制御装置のうちアナログ回路で半固定になっている変数の設定値を示した。図19に計測系統を示す。種々の性能測定のためのデータを迅速かつ精度よく処理するためにデジタル計算機を中心とした計測方法を採用した。試験項目としては, 次のものがある。

\*\* 本電気油圧式燃料制御装置は磁気増幅器と電気油圧式の燃料規正弁とから成り, アイドリングまでは機械的なスロットル弁により燃料流量が規正され, それ以後最大燃料流量までは図20に示すような関係で入力電圧に応じた燃料流量を供給する。従って入力電圧が05V以下の場合には740Kg/hrの燃料流量を供給する。



電気-油圧式燃料制御器周波数特性



電気-油圧式燃料制御装置

図18 電気油圧式燃料制御装置

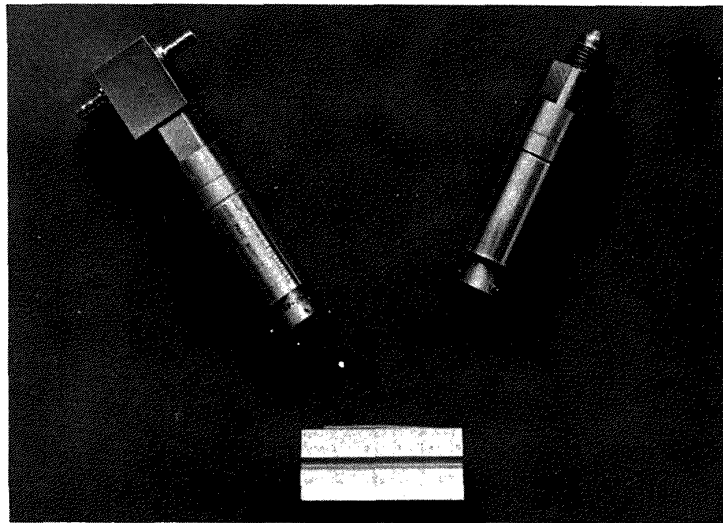


図15 P<sub>3</sub>圧力変換器(左)とP<sub>2</sub>圧力変換器

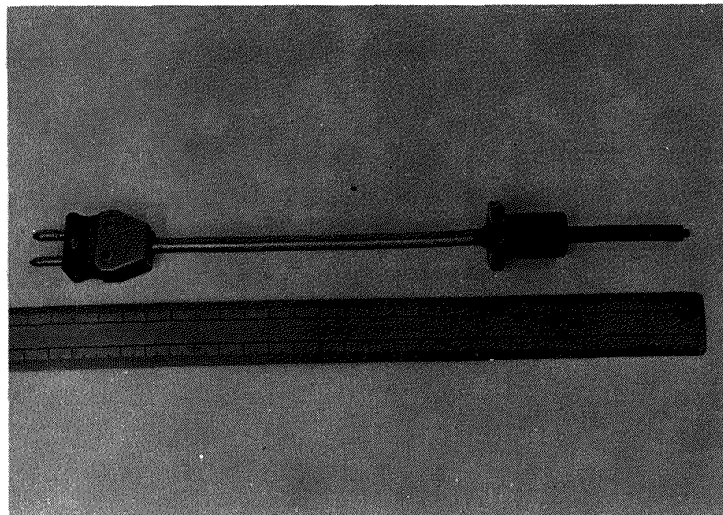


図16 T<sub>3</sub>温度計(CA熱電対)

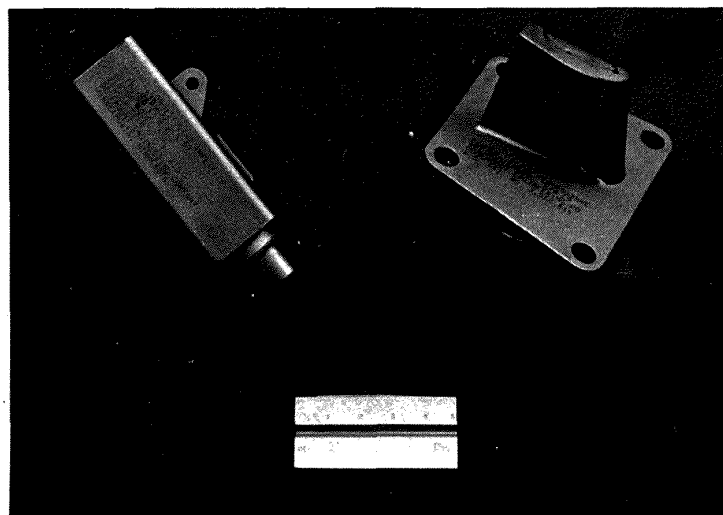


図17 T<sub>2</sub>温度計 [抵抗温度検出部(左)とブリッジおよび増幅部(右)]

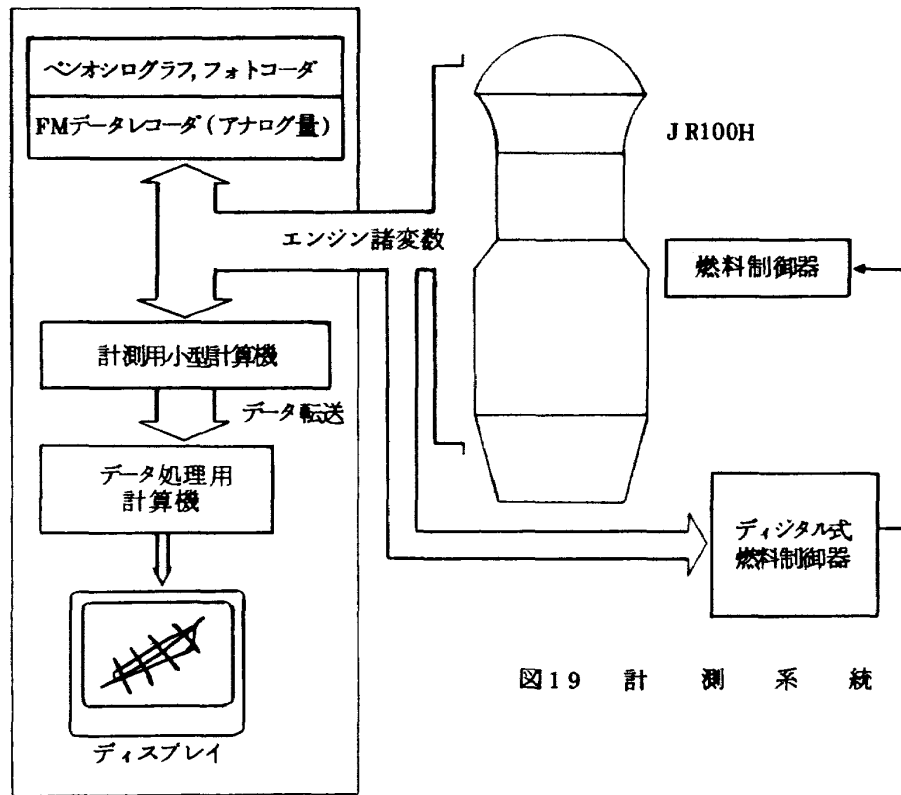


図19 計測系統

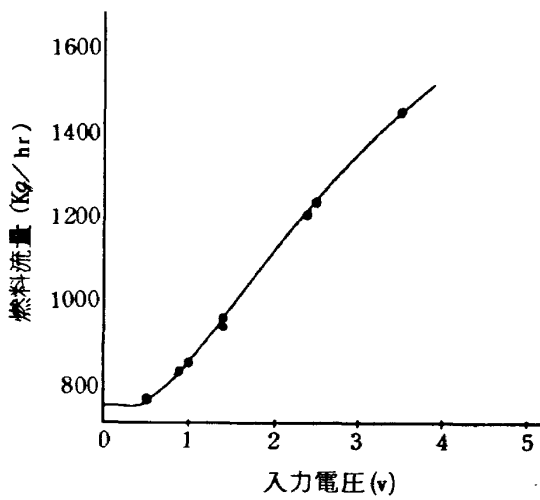


図20 電気油圧式燃料制御器特性

ゲイン		時定数(秒)	
$K_{T_2}$	0~105℃で 0~5Vの出力	$T_{TD}$	0.4
$K_{T_3}$	200	T	0.267
$K_{P_3}$	16	$T_D$	0.082
$K_P$	2.05	$T_I$	1.22
$K_F$	160 (kg/hr/V)	$T_f$	0.07

表3 ゲイン及び時定数の設定値

- (a) 回転数制御特性(動特性, 静特性)
- (b) 加減速制御特性(加速時間, 加速経路)
- (c) タービン出口ガス温度制御特性

(1) 制御方法及びプログラミング

今回の実験は本制御装置の実機運転試験が目的であるから制御の方法あるいはプログラムの書き方等は、必ずしもエンジンが航空機に装着され、広範囲な環境条件の下に置かれることを想定していない。従って各制御方式は、各々の制御方式自体の検討もこの試験によってなされていると言える。計算は整数形演算を主とし、小数形演算も適宜用いた。また、 $\delta=1, \theta=1$ と仮定した。

(i) 回転数制御

アナログ回路の半固定の制御変数を表3に示すように決めると、回転数制御に関してはそのブロック図は図21のようになる。この制御方式及び制御変数の値は文献<sup>3)</sup>に示した解析及び実験の結果に依っている。ただし電気油圧式燃料制御装置のゲインは作動点により変わり一定ではない(図19)が、平均値を採用している。ディジタル計算機内で回転数誤差 $N_T - N_g$ に

掛け合わせるべきゲイン $K_d$ は、文献<sup>3)</sup>で用いた一巡ゲイン( $K_C$ ), 進み補償値( $a$ ), 燃料制御器時定数( $T_F$ )との関係,

$$K_C \cdot a \cdot T_F = \frac{K_d}{26.7} \times \frac{160 \times 4.09}{2} \dots\dots\dots(3)$$

から、 $K_d = 0.0057 K_C a$ と求まる。 $K_C K_E K_F = 3.0$ が最適とされているから結局,

$$K_d = 0.0171 \frac{a}{K_E K_F} \dots\dots\dots(4)$$

整数形の演算を行なう場合、 $(N_T - N_g) \times K_d$ はDA変換器にそのままセットできたほうが便利である。その場合の $K_D$ は[11ビットDA変換器の整数形入力最大値(10Vに対応)は2047であることを考慮して]

$$K_D = 0.0171 \times \frac{2047}{10} \times \frac{a}{K_E K_F} = 35 \frac{a}{K_E K_F} \dots\dots\dots(5)$$

となる。 $\delta=1, \theta=1$ としたことから、 $a, K_E K_F$ は回転数とともに変わるものである。 $K_E$ ( $K_F$ は一定である)はJR100Hの特性から図22のように、 $a$ は文献<sup>3)</sup>により図23のように与えられているから結

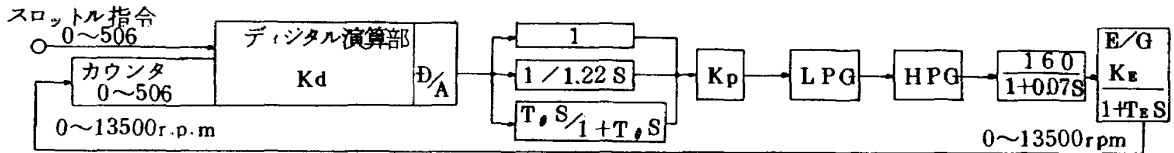


図21 回転数制御系のブロック図

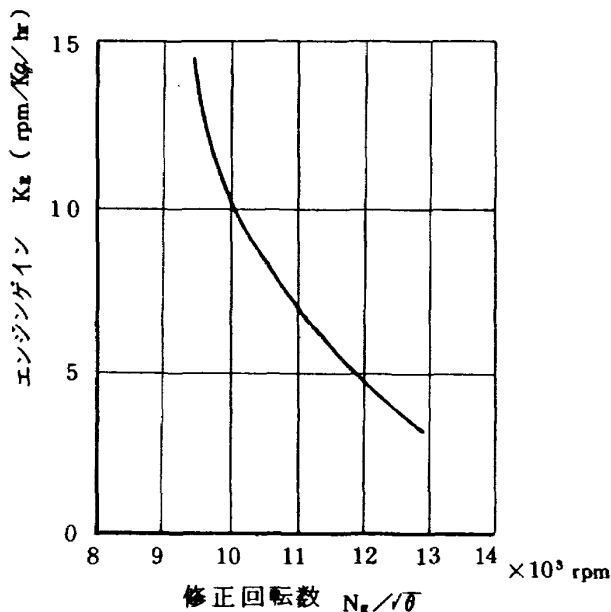


図22 回転数に対するエンジンゲインの値

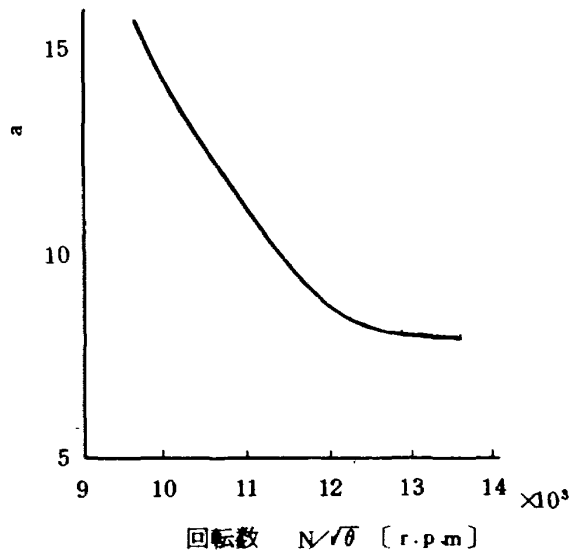


図23 回転数に対する a の値

局,  $K_d$  は図24中曲線(I)のようになる。図中には試験に用いた他の $K_d$ の値(II), (III)も示した。

図25に回転数制御関係のプログラムの流れ図を示す。ただし $N_g$ を $320 \times 10^3$ (8534 rpm に対応して計算機に読み込まれる)及び $506 \times 10^3$ (13494 rpm に対応する)と比較し, その処理操作をしているのは,

加減速制御のときに燃料スケジュールをメモリから読み出す時の便宜のためと, 回転数が13494 rpmを越えたらすぐに燃料流量を減少させて計算機を停止するためである。

(ii)加減速制御

図26に加減速制御に関するブロック図を示す。各

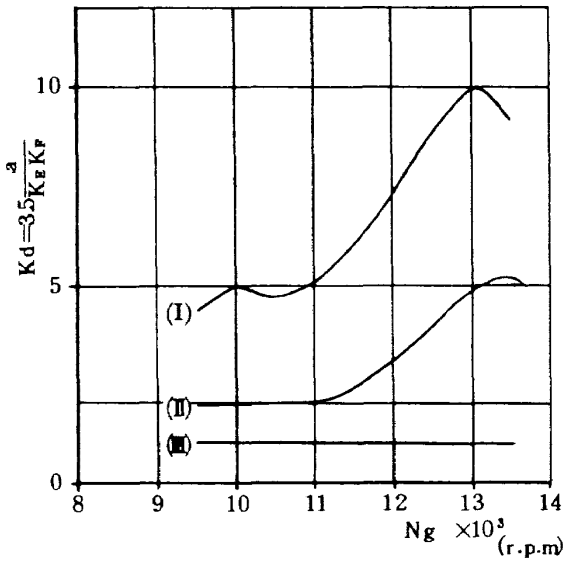


図24 回転数に対する $K_d$ の値

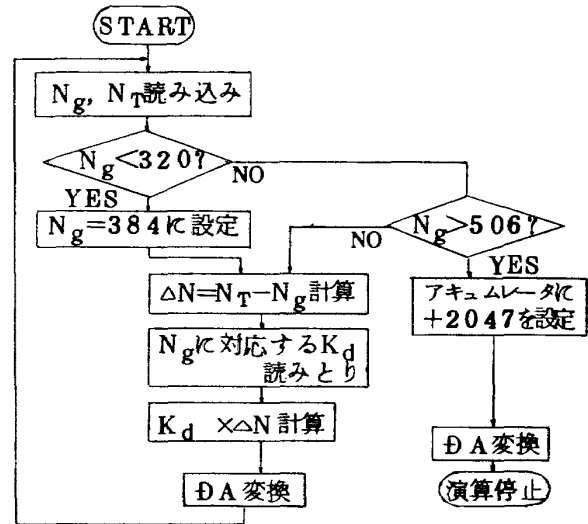


図25 回転数制御系プログラムの流れ図

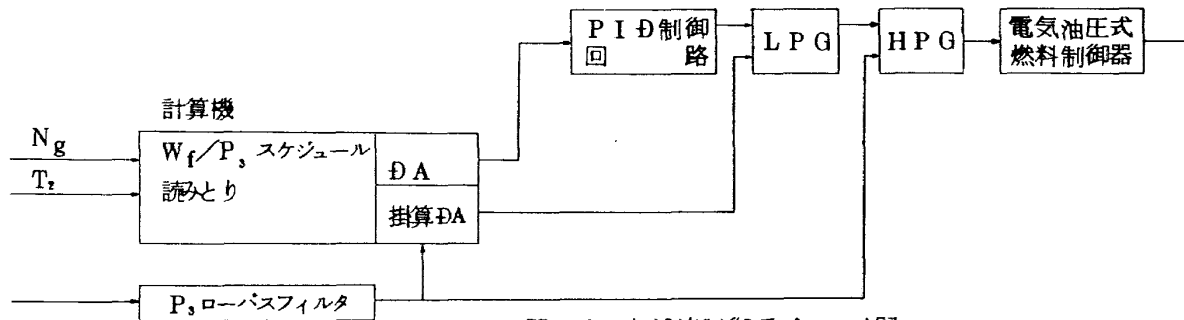


図26 加減速制御系ブロック図

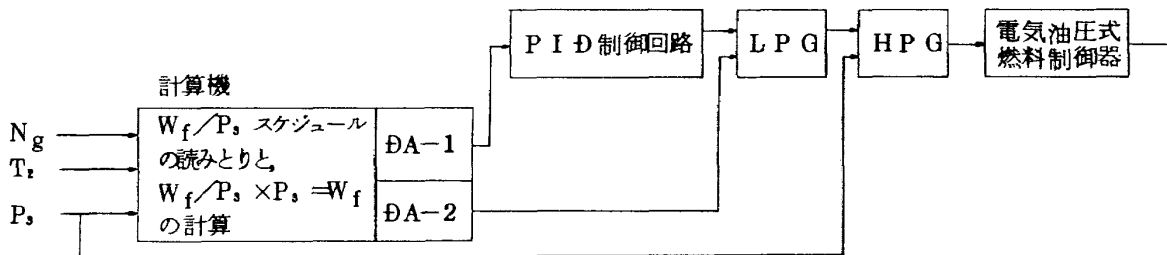


図27  $\delta$ の変化, 電気油圧式燃料制御器の非線形性を考慮した加減速制御系

部分の動作については2の(3)で説明したので省略する。  
 加速制御を行なうにはまず、加速時の燃料スケジュールを計算する必要がある。本制御装置のように(1)式に従った加速制御を行なった場合には、 $N_g$ ,  $T_2$ の種々の値の組み合わせに対応した $W_f/P_s$ をあらかじめエンジン特性から計算しておき、メモリに格納するわけであるが、図26に示す制御系を構成した場合には、 $N_g$ ,  $T_2$ の値に対応する $W_f/P_s$ が一義的に決まらない(付録参照)。ただし電気油圧式燃料制御器の燃料流量が入力電圧に比例する場合と、 $\delta$ の変動範囲が小さい場合には、正常な加速が可能な $W_f/P_s$ を決定できる。もしどちらも実現不可能であれば、制御系を図27のようにすることで、何の条件もなしに $N_g$ ,  $T_2$ に対して $W_f/P_s$ を決定することができる。今回の試

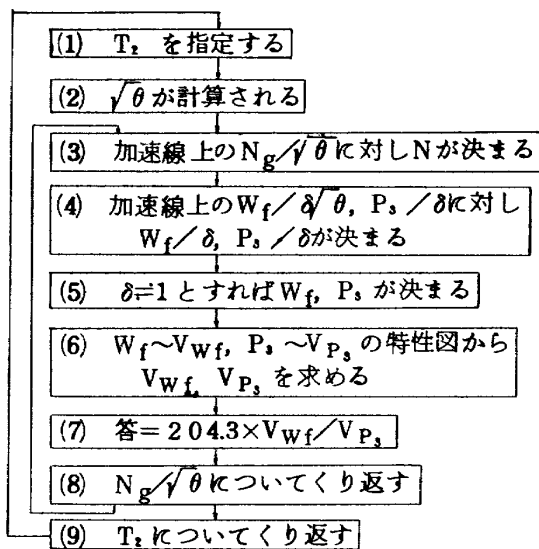


図28 加速燃料スケジュール計算流れ図

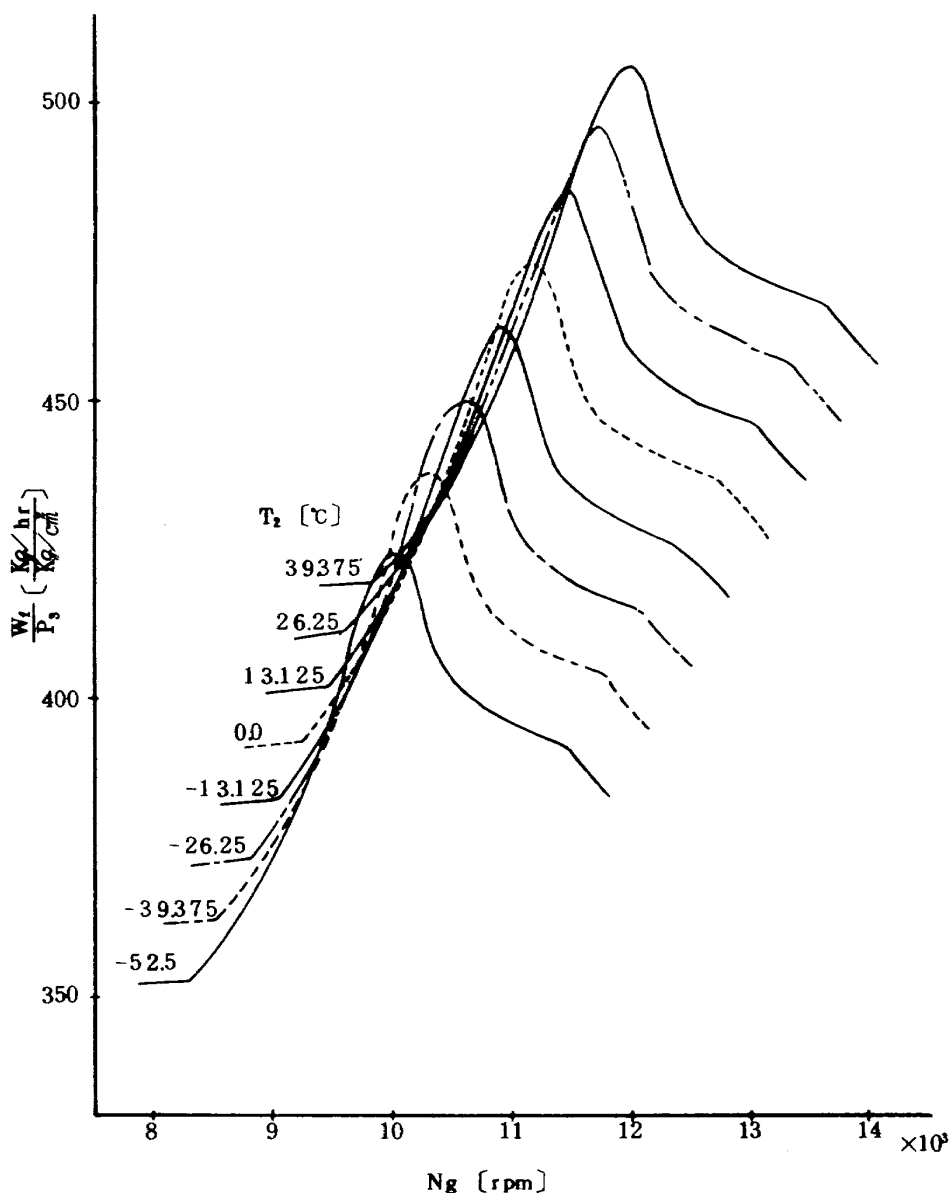


図29 加速燃料スケジュール

験では  $\delta=1$  であるから、図26に示す制御系を採用した(これを図27に示す制御系に変更することは容易である)。図28に加速燃料スケジュール計算の流れ図を示す。図29に実機運転試験に用いた加速燃料スケジュールを示す。入力信号である  $N_g$ 、 $T_s$  の変化範囲は  $8534 \text{ rpm} \leq N_g \leq 13654 \text{ rpm}$  及び  $-5.25^\circ\text{C} \leq T_s \leq 39.375^\circ\text{C}$  とし、これを  $N_g$  の場合には13個の代表点で、 $T_s$  の場合には8個の代表点で代表してメモリにはこれらの代表点に対応する  $W_f/P_s$  の計算

値 ( $8 \times 13 = 104$  個) を格納した。これらの代表点間の入力データに対しては内そう法により  $W_f/P_s$  値を算出した。

次に減速制御について説明する。図30に圧縮機出口圧力  $P_s$ 、ローパスフィルター出力電圧を、HPG出力すなわち電気油圧式燃料制御器入力点における電圧に換算して示した。またアイドリングから最高回転数までの電気油圧式燃料制御装置の入力電圧の変化範囲も図中に示した。図中斜線を施した部分では減速制御

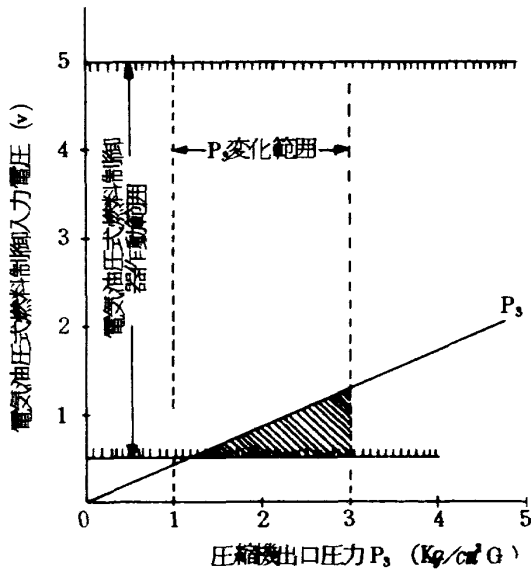


図30 減速制御動作範囲

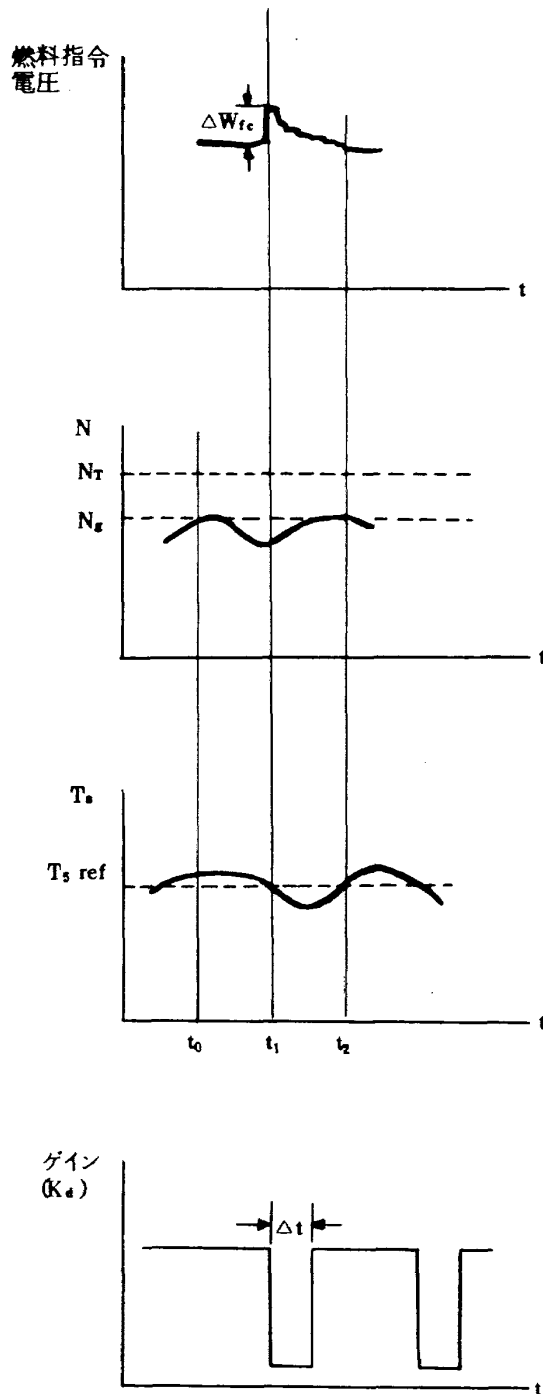
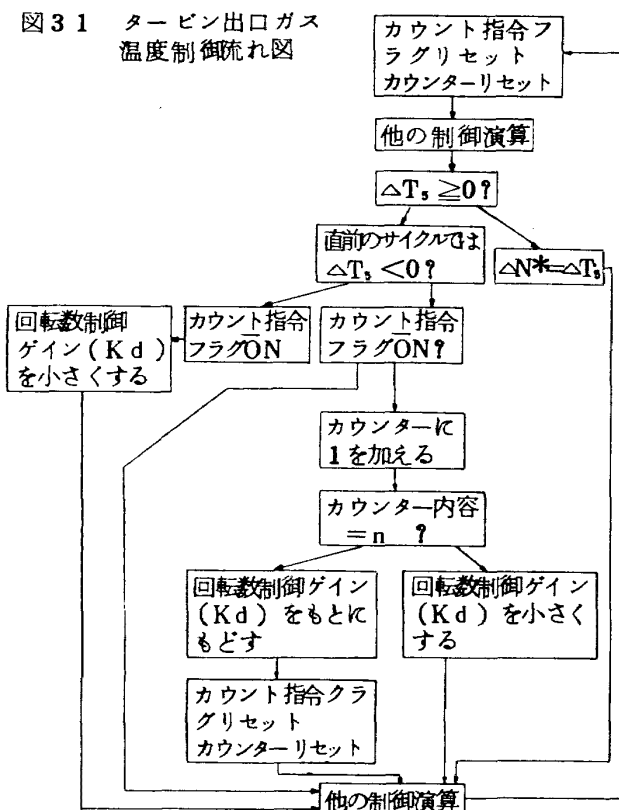


図32 タービン出口ガス温度制御説明図

図31 タービン出口ガス温度制御流れ図





が働く。

### (iii) タービン出口ガス温度制御

タービン出口ガス温度制御は NPG 出力信号と  $\Delta N = N_T - N_g$  信号とをを入力信号とする LPG の動作を、計算機内部で実行することにより達成した。T<sub>s</sub> が T<sub>s,ref</sub> より低い値であれば NPG 出力信号は 10V となり、これが計算機に読み込まれた時には  $\Delta N$  のいかなる値よりも大きくなるから、計算機の LPG 的動作により温度制御系は切り離され、回転数制御系が働く。T<sub>s</sub> が T<sub>s,ref</sub> より高い値であれば、NPG 出力信号は T<sub>s,ref</sub> - T<sub>s</sub> に比例した負の電圧になる。これを計算機に読み込んだ値と  $\Delta N$  とを比較して値の小さい方に制御系を構成させる。この場合、温度制御系と回転数制御系とが相互に干渉し合うので、この影響を少なくするための工夫が必要となる。図 31 に本試験で用いた T<sub>s</sub> 制御法のプログラムの流れ図を、また図 32 にその動作説明図を示す。図 32 において、時刻 t<sub>0</sub> においてエンジン回転数 N<sub>g</sub> は指令回転数 N<sub>T</sub> より低いところにある。これは t<sub>0</sub> において T<sub>s</sub> が T<sub>s,ref</sub> を越えているために  $\Delta T_s = T_s - T_{s,ref} < 0$  となり、図 31 に示す流れ図において  $\Delta N > \Delta T_s$  であるために回転数制御系が切れて温度制御系が働いているためである（圧縮機入口空気温度が高いため、タービン出口ガス温度が上昇し、T<sub>s</sub> 制御系が働いている通常の状態はこれに属する）。T<sub>s</sub> 制御系が働けば燃料流量は減少するから T<sub>s</sub> も時刻 t<sub>1</sub> には設定値にもどり、更に降下する。このときに、もし単純に制御系を回転数制御系に切りかえると、t<sub>1</sub> における回転数誤差  $\Delta N = N_T - N_g$  に回転数制御ゲイン K<sub>d</sub> を掛け合わせた、通常はかなり大きな燃料流量の急激な増加が指令される。これによって T<sub>s</sub> は再び急激に上昇し、以後同じ過程をくり返す。これは定常状態において燃料流量が大きな変動をくり返す結果となり好ましくない。そこで流れ図にも示したように、 $\Delta T_s < 0$  から  $\Delta T_s > 0$  に変わった瞬間から、n 演算サイクルの間（時間にして  $\Delta t = nT$  秒間）はエンジン回転数制御ゲインを低くして、制御系が回転数制御系に切り替わった時に燃料が急激に増加するのを防いだ。本試験では n=20 とした。

## (2) 制御性能

以上に述べた装置と制御方法によって行なった試験結果を、回転数制御特性、加減速制御特性、タービン出口ガス温度制御特性に分けて説明する。

### (i) 回転数制御特性

#### a 静特性

静特性の測定は、スロットルレバーを一定の位置に設定しておいて、その時の回転数をデジタルポルトメータにより約 20 秒間、約 0.1 秒の周期でサンプルし測定した。図 33, 34 にスロットルレバーを 90° と 80° に設定した（この値はスロットルレバーに刻まれている精度のあらい目盛で読みとったものである）ときの、静特性データを図 24 に示す 3 種類のゲイン定数 K<sub>d</sub> について示した（スロットルレバー角度 90° のときの K<sub>d</sub>=Ⅲ のデータはない）。図には約 20 秒間にサンプルしたデータを再びプロットして各データ間を直線で結んだものと、平均回転数からの変動幅に対する度数分布を示す棒グラフが描かれている。度数は各変動幅内に存在するデータ数の全サンプルデータに対する割合（%）で示した。

T/A=80°, 90° のいずれの場合にも、K<sub>d</sub>=Ⅲ と小さい値にした時には回転数に比較的周期の長い変動が現われ、平均値から ±0.2% 以上変動することもある。しかし K<sub>d</sub>=Ⅰ又はⅡにした場合には 99% 以上が ±0.2% の変動幅内にある。これは初期の設定精度目標を満すものである。

#### b 過渡特性

過渡特性は T/A に対する回転数の周波数応答で示すのが一般的であるが、今回の試験では周波数応答を求める実験は行なわなかった。<sup>\*</sup> 図 35~37 に K<sub>d</sub> を Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ の 3 通りに変え、T/A を 60° から 80° に急速に進めた場合における制御系及びエンジン各部変数の過渡的变化を示す。K<sub>d</sub>=Ⅰ, Ⅱ とゲインを大きくした場合には加速時間は 1 秒程度であるが、ゲインを K<sub>d</sub>=Ⅲ とより小さくした場合には 2 秒近くに伸びている。本制御装置の制御対象エンジンである J R 100H は VTOL 機用のリフトジェットエンジンであり、加速時間はできるだけ短かいことが要求されるから、ゲインとして K<sub>d</sub>=Ⅲ に選ぶことは好ましくない。

次に回転数の過渡制御特性の 1 つにオーバーシュート、アンダーシュートの問題がある。図 38~40 を見ると、加速時にはオーバーシュートは 1~2% 程度であり、ゲインが大きくなるほど大きくなるが、この程度の大きさは通常許容されている。減速時には 5%~7% であり、やはりゲインが大きくなるほど増加している。通常オーバーシュート、アンダーシュートは 2%~3% 以下が望ましいとされているから、減速時のアン

\*文献 3) に本試験で採用した制御系及び制御変数のときの周波数応答曲線の計算値が示してある。

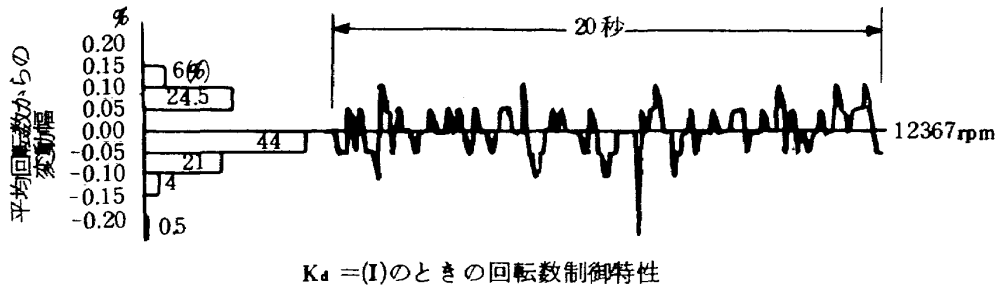
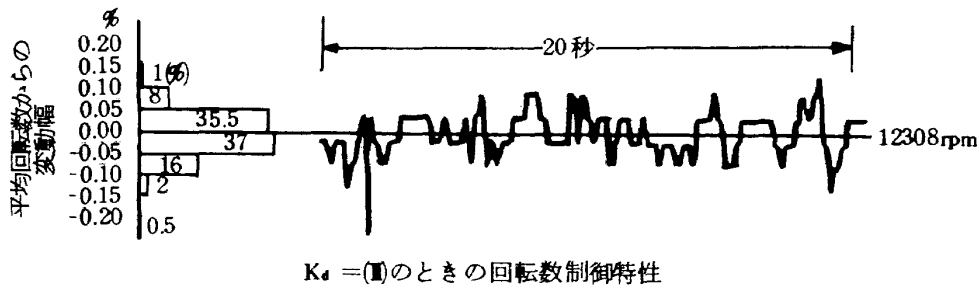
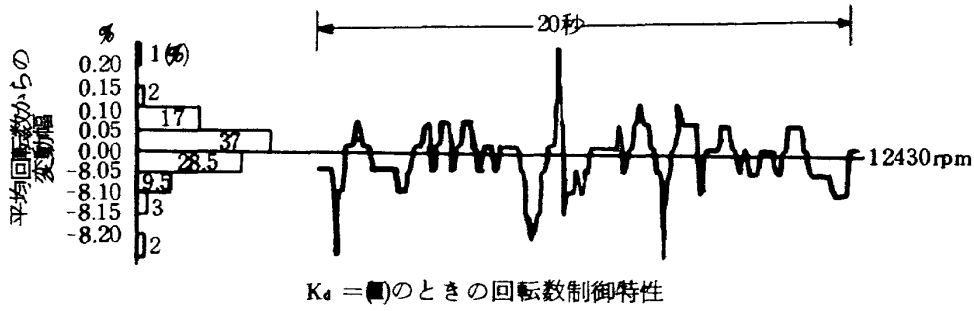


図33 デジタル式燃料制御装置の回転数制御特性  
(スロットルレバー角度 80°)

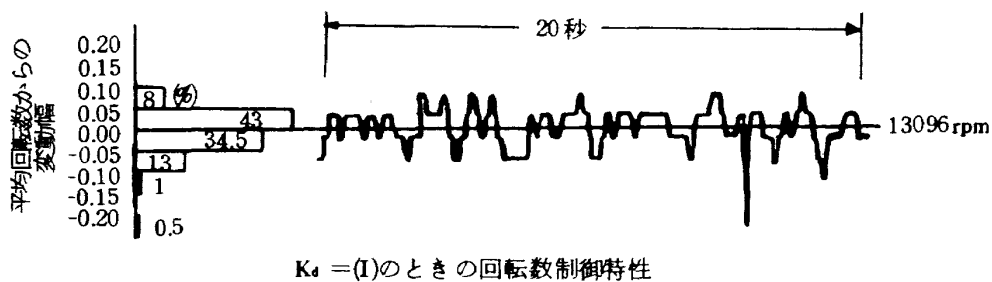
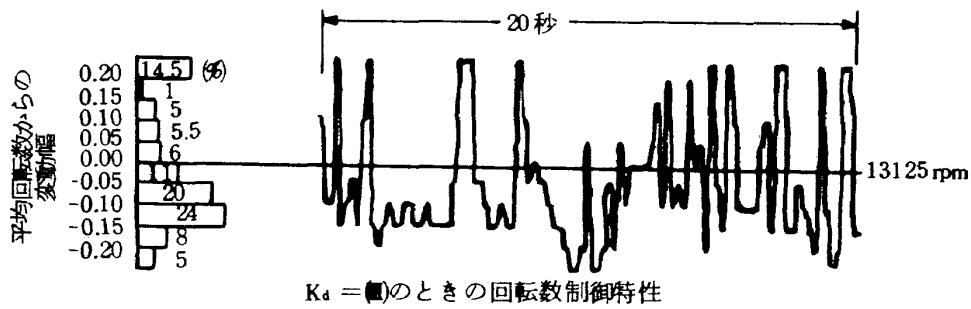


図34 デジタル式燃料制御装置の回転数制御特性  
(スロットルレバー角度 90°)

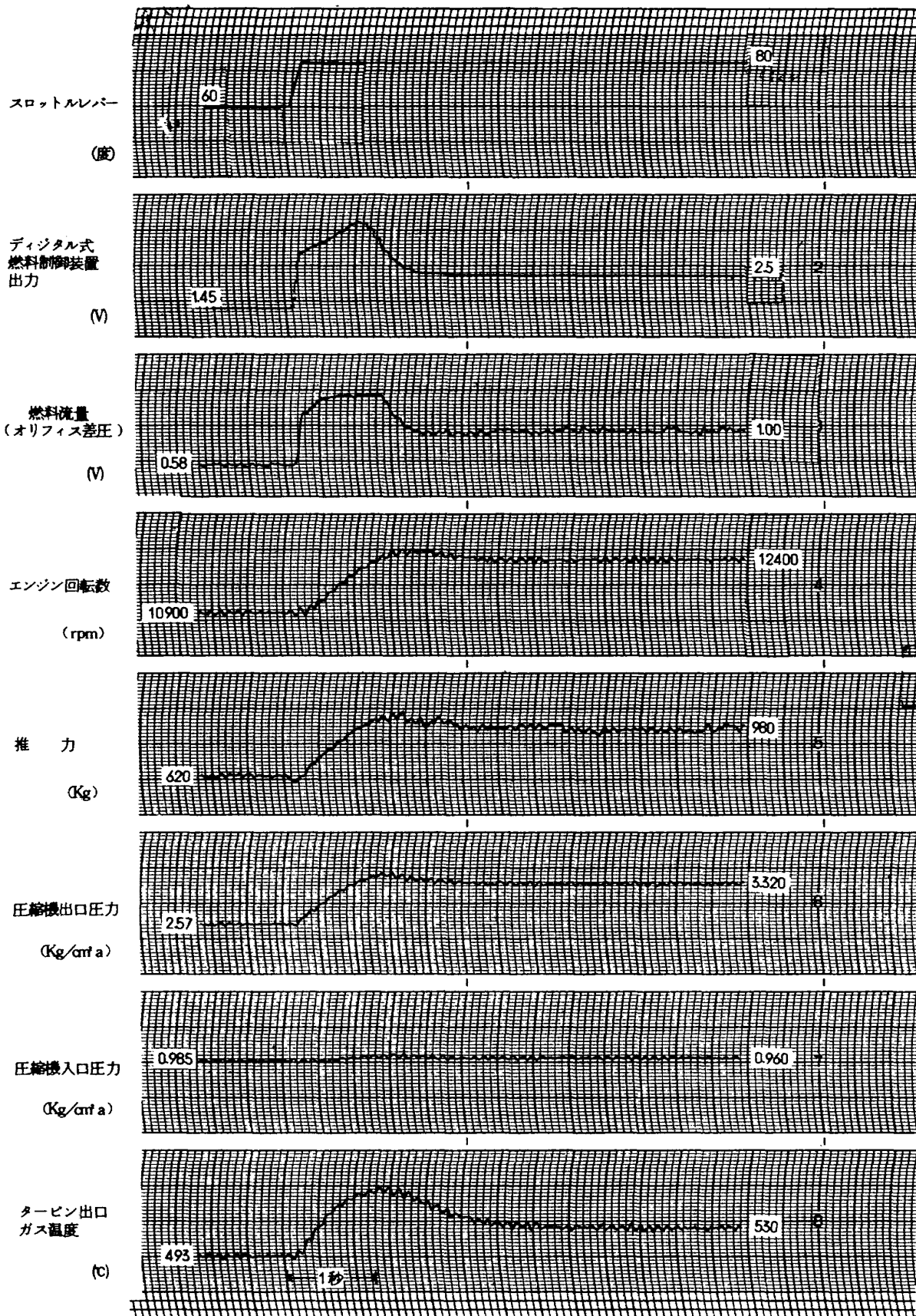


図35 急加速時の過渡特性データ (Kd<sub>φ</sub>(I)の場合)

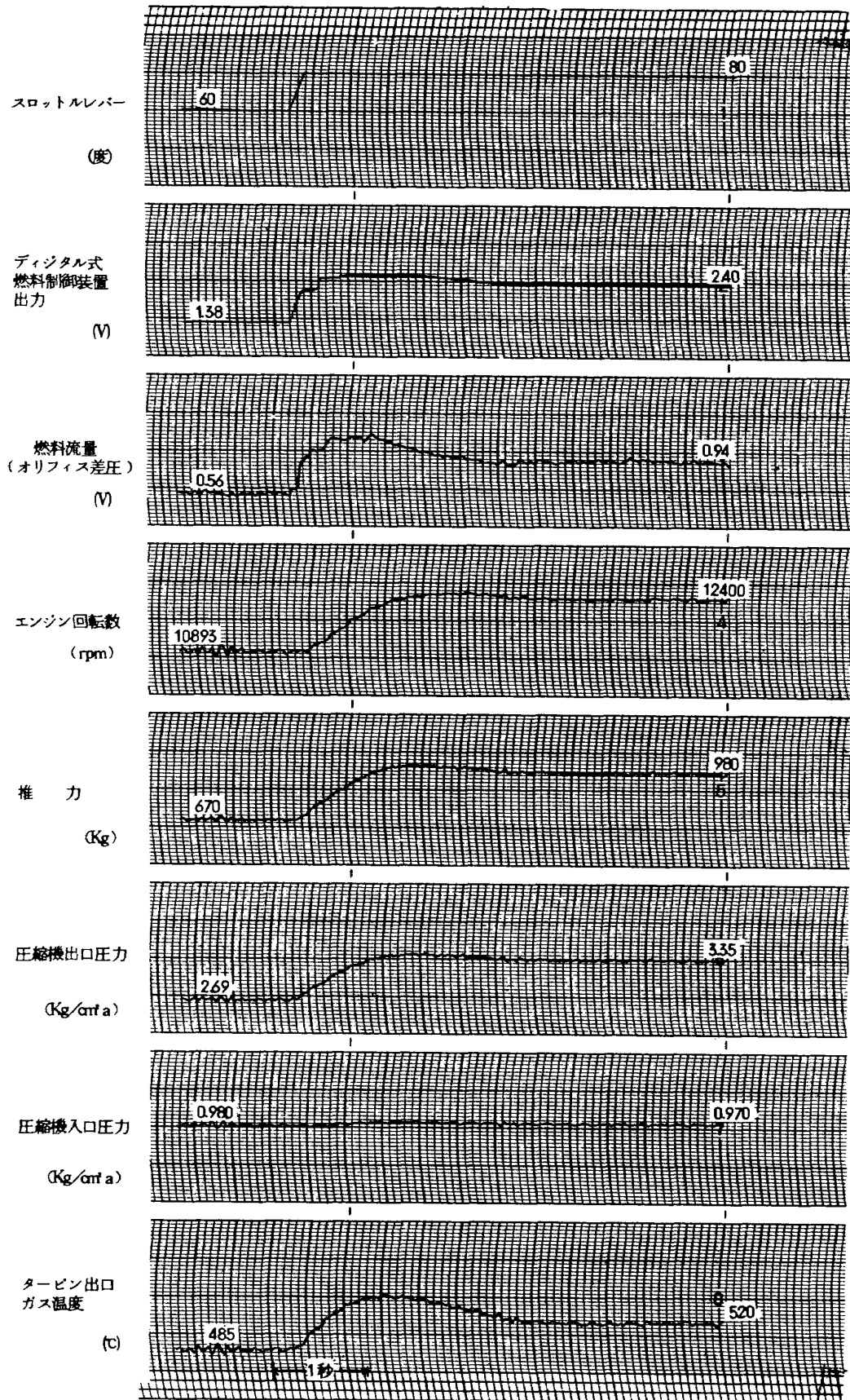


図36 急加速時の過渡特性データ (Kd=0の場合)

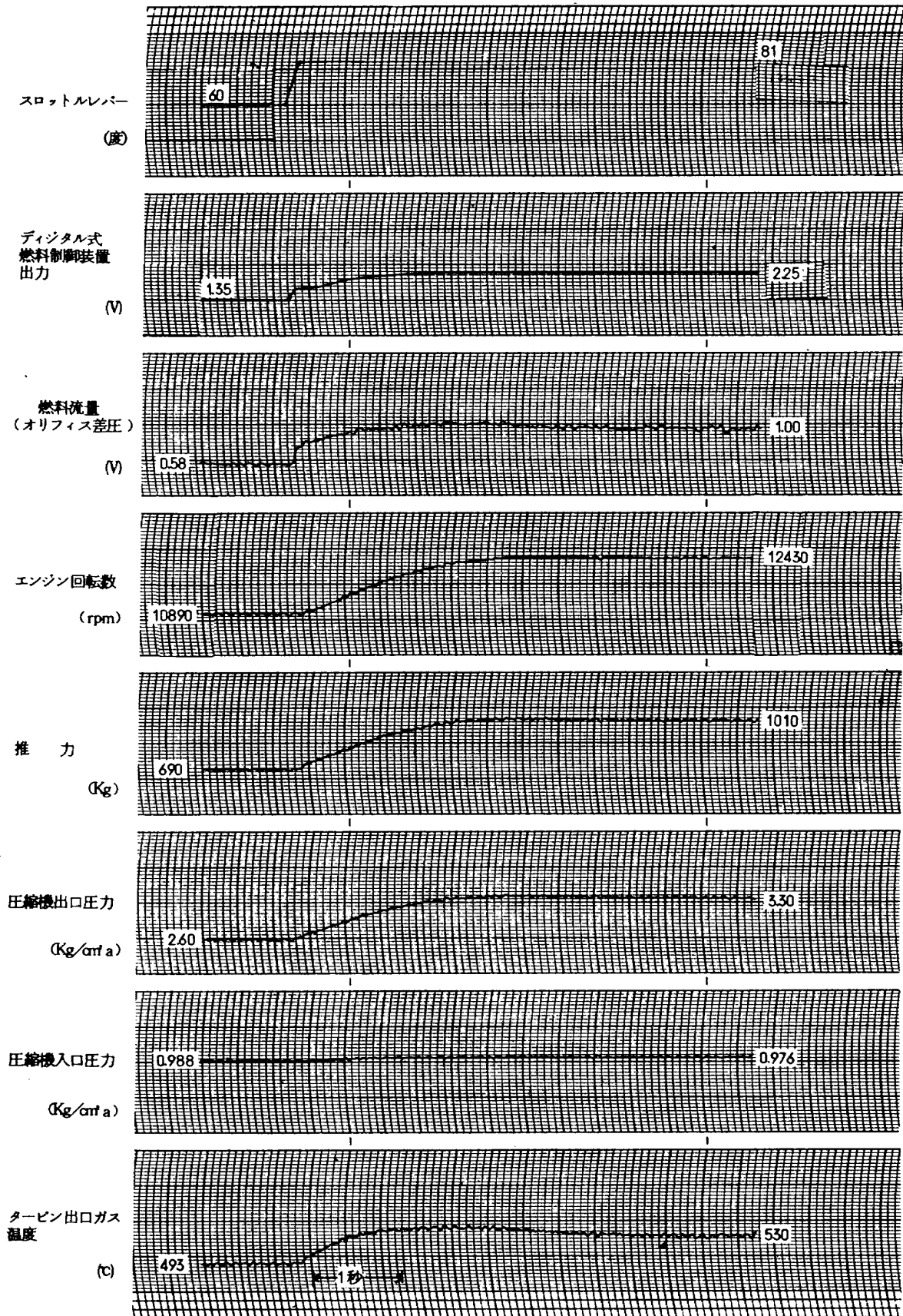


図 37 急加速時の過渡特性データ (Kd=幅の場合)

ダーシュートがやや大きい。これはPID制御回路中の積分回路が下限方向の飽和特性をもっていないためである。下限方向にも飽和特性をもたせれば加速時と同程度のオーバシュートにおさえることができる。<sup>3)</sup>

以上、回転数制御特性を静特性、過渡特性の両面から示した。この結果、ゲイン $K_d$ を図24中曲線(I)の

ように選べば静特性、過渡特性共に初期の目標を達成できることがわかった。ただし、減速時のアンダーシュートを小さくするために、積分回路に下限方向の飽和\*

これらの図は、約20msecのサンプル時間でサンプルしたデータをもとに、ブラウン管ディスプレイ装置上に描いたものである。

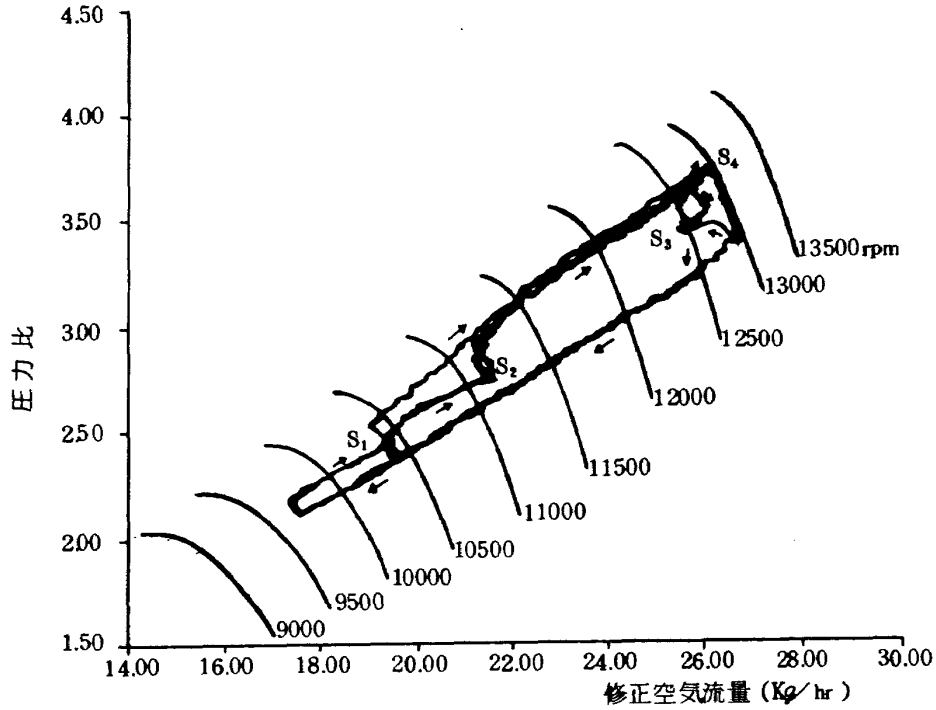


図38 圧縮機特性曲線上の加減速経路 ( $K_d = (I)$ の場合)

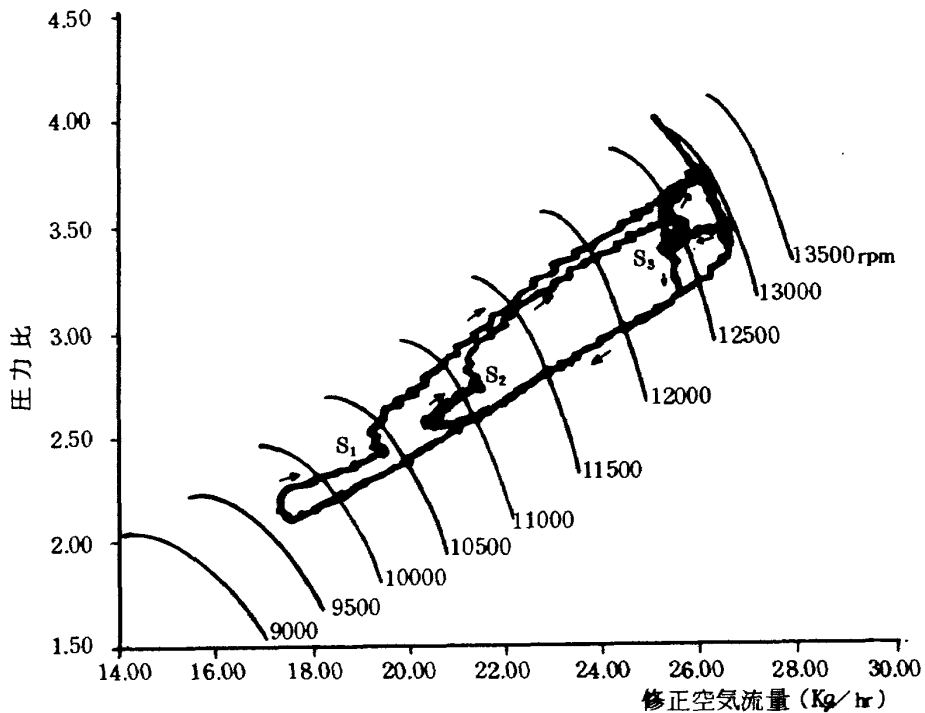


図39 圧縮機特性曲線上の加減速経路 ( $K_d = (II)$ の場合)

和特性をもたせる必要がある。

(II)加減速制御性能

図38~40はゲイン $K_d$ を(I), (II), (III)にした場合の加減速制御試験の結果を圧縮機特性曲線上に示したものである。<sup>\*</sup>スロットルレバーを $50^\circ$ と $90^\circ$ 及び $60^\circ$ と $80^\circ$ の間で急速に移動させた時の加減速経路を示した(ただし $K_d = (III)$ の場合には $50^\circ$ と $90^\circ$ 及び $60^\circ$ と $90^\circ$ の間で移動させた)。図中 $S_1, S_2, S_3$ 等は加減速前後の定常作動点を示す。まずスロットルレバーを $50^\circ$ から $90^\circ$ に進めた場合について、ゲインが(I), (II), (III)のデータを比較してみると、加速のごく初期において若干の相異が見られる以外は、大した差異がない。これは指令回転数変動幅が大きいため、ゲイン $K_d$ にかかわらず2の(3)で述べた $\Delta N^*$ 信号が大きくなり、LPGにおいて加速燃料スケジュール信号 $W_f^*$ が優先選択される結果、加速経路は回転数制御ゲイン $K_d$ の影響を受けないものと思われる。 $\Delta N^*$ が大きくなるまでの加速のごく初期にはその影響が現われるわけである。次にスロットルレバーを $60^\circ$ から $80^\circ$ 又は $90^\circ$ と、指令回転数変動幅をやや小さくした場合を見ると、ゲイン $K_d$ によって加減速経路にはっきりした相異がみとめられる。とくに $K_d = (III)$ にした場合には、 $\Delta N^*$ 信号が加速燃料スケジュール信号 $W_f^*$ に達しないため、 $50^\circ$ から $90^\circ$ に進めた場合よりもずっと低圧力比側を走っている。しか

し $K_d = (II)$ , (I)とゲイン $K_d$ を大きくするにつれて、 $50^\circ$ から $90^\circ$ に進めた時の加速経路に近づいて、 $K_d = (I)$ ではその差がほとんど認められない。これは $K_d$ がじゅうぶん大きければ、 $60^\circ$ から $90^\circ$ に進めた場合でも(指令回転数変動幅が比較的小さい場合でも) $\Delta N^*$ 信号が $W_f^*$ 信号より大きくなり、加速時の燃料は加速燃料スケジュールによって決定されるからである。以上の考察から、ゲイン $K_d$ をじゅうぶん大きくすれば、本制御装置によって加速制御を行なった場合その加速経路は加速前の作動点 $S_1, S_2, S_3$ 等の位置にかかわらずほぼ同一となることがわかる。<sup>\*</sup>図38には図中の $S_2$ 点から $S_3$ 点への加速を2度繰返した時の加速経路を示したが、2つの加速経路はほとんど重なっている。これ等のデータは、本制御装置による加速制御のすぐれた安定性と再現性を示すものである。

図41はスロットルレバーを $90^\circ$ から $60^\circ$ に急激に引いて急減速をしたときのデータである。ただし

<sup>\*</sup>図38において、 $S_1$ から $S_3$ への加速経路と、 $S_2$ から $S_3$ への加速経路に若干のずれが見られるが、これはゲイン $K_d$ の不足というよりは、3の(1)の(ii)で述べた $\delta$ が厳密には1に等しくなく、かつ $S_1$ が低回転領域にあるほど $\delta$ が大きくなり、従って等価的に加速燃料流量が増加するためと考えられる。

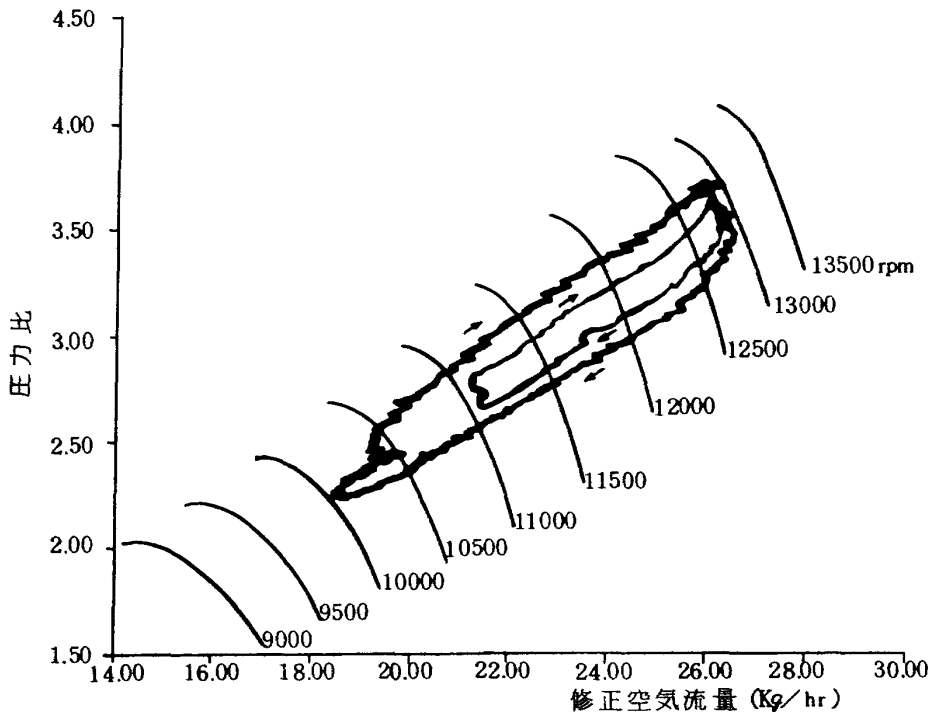


図40 圧縮機特性曲線上の加減速経路 ( $K_d = (III)$ の場合)

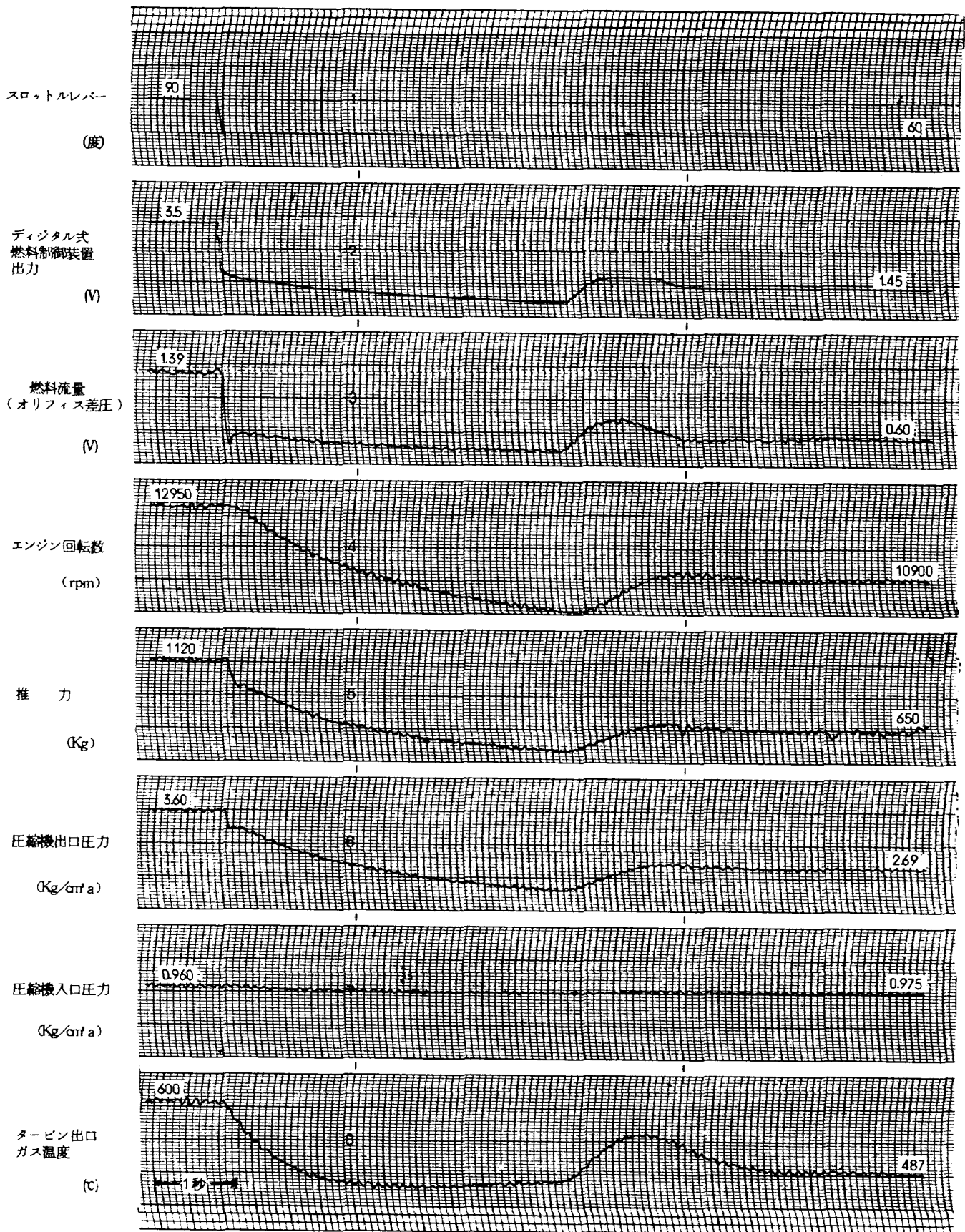


図 41 急減速時の過渡特性データ (Kd=Iの場合)



ゲイン $K_d = (I)$ にした。電気油圧式燃料制御器入力電圧を見れば減速時の燃料流量が下限方向に制限されていることが明らかである。今回の試験では $P_3$ ローパスフィルターゲインは16倍に固定したため、減速制御性能の試験データは少ないが、 $P_3$ ローパスフィルターゲインを変えるだけで他の減速燃料スケジュールが実現できるから問題はない。

(iii)タービン出口ガス温度制御性能

図4.2は回転数指令 $N_T = 13125 \text{ rpm}$ にしておいて、 $T_5$ 設定用ポテンショメータを回転させて $T_5 \text{ ref}$ を変えた時の実際のタービン出口ガス温度 $T_5$ と $T_5 \text{ ref}$ との関係を示すデータである。設定温度 $T_5 \text{ ref}$ が低くなるにつれて実際の温度 $T_5$ は $T_5 \text{ ref}$ より高くなる。これはその時の回転数が指令回転数よりかなり低いところにあるため、図3.2中時刻 $t_1$ において比較的大きな燃料指令 $\Delta W_{fc}$ が発せられる結果 $T_5$ が $T_5 \text{ ref}$ 以下にとどまる時間が短くなり、平均値としては $T_5 \text{ ref}$ を越えるからである。設定温度 $T_5 \text{ ref}$ が高くなると、 $\Delta W_{fc}$ は徐々に小さくなり、やがて $T_5$ が $T_5 \text{ ref}$ の上下に存在する時間がほぼ等しくなり、 $T_5$ は $T_5 \text{ ref}$ と等しくなる。更に $T_5 \text{ ref}$ を高くすると $T_5$ 制御系の

ほうが回転数制御系よりも強く働く結果 $T_5$ の平均値は $T_5 \text{ ref}$ 以下になる。

このように $T_5 \text{ ref}$ が $T_5$ と等しくなるところは、 $T_5$ 制御系と回転数制御系の相互作用、主にゲインの関係で決まるものであるが、この一般的な場合の解析は今後の課題とし、ここでは省略する。

図4.3に $T_5 \text{ ref} = 570^\circ\text{C}$ にしておき、スロットルレバーを $60^\circ$ から $90^\circ$ に急速に進めた時の過渡特性データを示す。加速の途中で $T_5$ が $T_5 \text{ ref}$ を越えるため、 $T_5$ 制御系が働いている。これは燃料流量の変動から明らかである。 $T_5$ 制御系の働きによって、 $T_5$ は加速時にもオーバーシュートを生じない。これは図3.5~3.7のデータ( $T_5$ 制御なし)と比較するとはっきりわかる。

4 ま と め

デジタル式燃料制御装置は現在各国において研究開発中のものであり、その内容について詳細に述べた報告はないので、設計思想、電子回路の種類や方式、使用電子部品、実機運転試験とその結果、故障の発生状況等に関する情報は得難い状態にある。

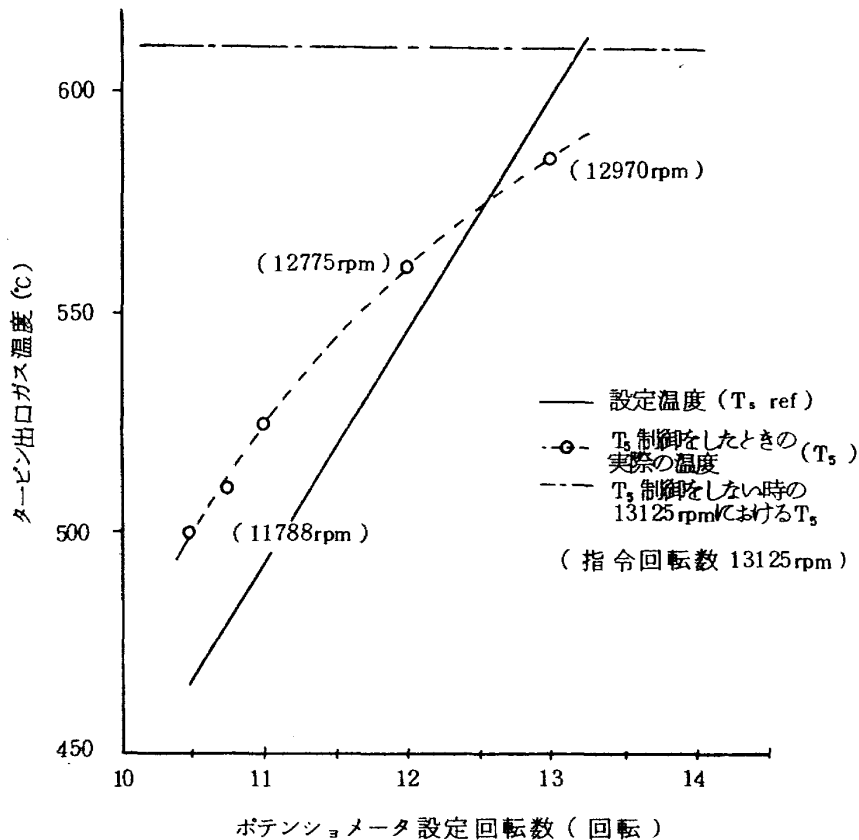


図4.2 タービン出口ガス温度 ( $T_5$ ) 制御特性

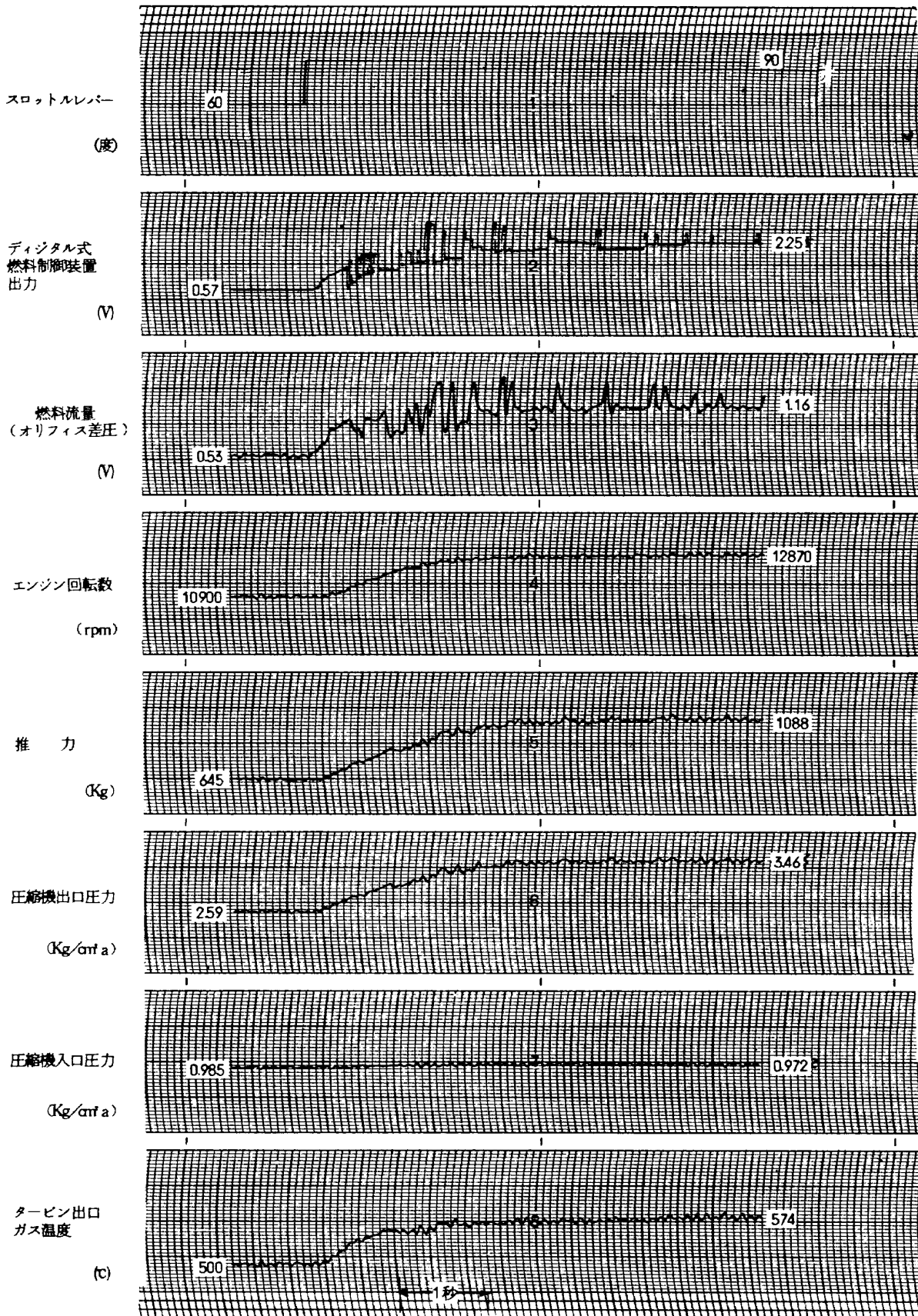


図43 急加速時におけるタービン出口ガス温度制御特性

今回我々は機上搭載を目的としたデジタル式燃料制御装置を試作したが、これは今までに開発が報告されている数少ないものの1つである。本報告においては、更に制御装置の構成、機能、地上での実機運転の方法や結果についても述べた。実機運転の結果、回転数制御機能、加減速制御機能、タービン出口ガス温度制御機能ともにほぼ初期の目標を達成できることが確認された。これ等の制御機能は現在の油圧機械式の燃料制御器に優るとも劣らないものである。

近年の電子技術の発達が目覚しく、世界各国は厚膜回路、薄膜回路、LSI等の最新の技術を積極的に取入れて研究を続けている。我々はこのような状況下で本制御装置の試作をしたのであるが、設計を開始した当時はLSIや厚膜回路、薄膜回路の入手は極めて困難であり、やむを得ずMSI、SSI等で回路を構成した。したがって現時点で見れば、小形軽量化、消費電力の減少、信頼性の向上等の主に製作上の観点から改良すべき問題が少なからず見受けられる。この経験は引続き研究する予定になっている2軸エンジン用デジタルエンジン制御装置にじゅうぶん生かしてゆくつもりである。

末尾ながら本制御装置の製作を担当された石川島播磨重工業株式会社の諸氏に厚くお礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- 1) 西尾, 遠藤, 松田; フロントファンエンジンの制御, 航技研報告 TR-
- 2) 西尾, 杉山, 越沼ほか; エンジン特性の実時間シミュレーション(I), 航技研報告 TR-283
- 3) 西尾, 遠藤, 杉山ほか; ジェットエンジンのデジタル制御(I), (II), 航技研報告 TR-281, TR-

### 付 録 加速燃料スケジュールの計算について

図26で示す制御系によって加減速制御を行なう場合、具体的に計算機のメモリにはどのような値を格納すればよいかを考えてみる。図5のうち、加速制御の部分だけを付図1-(a)のように書き変える。ここで  $V_{P_3}$  はローパスフィルタ出力電圧、 $V_{W_f}$  は電気油圧式燃料制御装置入力電圧、 $f(V_{P_3})$  は  $P_3$  検出器及びローパスフィルタ特性によって決まる  $P_3$  ( $Kg/cm^2$ ) と  $V_{P_3}$  (V) との関係、 $f'(W_f)$  は電気油圧式燃料制御装置の供給燃料流量と入力電圧との関係を示す。付

図1-(a)を付図1-(b)のように等価変換すれば、結局種々の  $N_g$ ,  $T_2$  の値の組み合わせに対して  $W_f/P_3$  を求め、これに応じた  $f'(W_f)/f^{-1}(P_3)$  を計算すればよいことがわかる。しかし、 $N_g$ ,  $T_2$  を与えた場合に決まるのは  $W_f/P_3$  であって、 $W_f$  及び  $P_3$  ではないから、 $f'(W_f)$ ,  $f^{-1}(P_3)$  は決まらず、結局メモリに格納すべき値は求められない。例外として、(a)  $f'(W_f)/f^{-1}(P_3)$  が定数になるか、(b)  $f'(W_f)/f^{-1}(P_3)$  が  $F(N_g, T_2)$  と表わせる、特別な場合には求められる。(a)は  $f'(W_f)$  と  $f^{-1}(P_3)$  が共に定数のとき、即ちローパスフィルタ出力電圧が  $P_3$  に正比例し、供給燃料流量が電気油圧式燃料制御装置の入力電圧に正比例する時に成立する。現在では直線性のよい圧力検出器は容易に入手できる。また電気油圧式燃料制御装置についても、サーボ増幅器に函数発生器的機能を持たせるとか、燃料規正弁(ミータリングバルブ)の形状を適当に選ぶ等の処置により直線性を得ることができる。次に(b)の場合を考える。エンジンの無次元修正変数間の関数関係により、

$$W_f/\delta\sqrt{\theta} = f_1(N_g, T_2) \dots\dots(1)$$

これを变形して、 $W_f = f_2(N_g, T_2, \delta)$  を得るが、今  $\delta = \text{一定}$  とすれば、 $W_f = f_2(N_g, T_2)$ 。故に、

$$f'(W_f) = f'(f_2(N_g, T_2)) = f'(N_g, T_2) \dots\dots(2)$$

一方、 $P_3/P_2 = f_3(N_g, T_2)$  より、

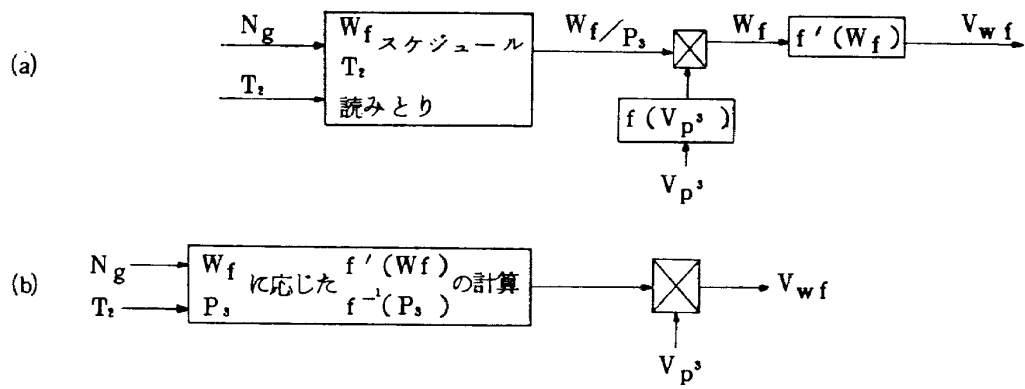
$$P_3 = P_2 f_3(N_g, T_2) = f_4(N_g, T_2, \delta)$$

それ故、 $f^{-1}(P_3) = f^{-1}\{f_4(N_g, T_2, \delta)\}$ 。

$\delta = \text{一定}$  とすれば、 $f^{-1}(P_3) = f^{-1}\{f_4(N_g, T_2)\}$  となる。これと(2)より

$$\frac{f'(W_f)}{f^{-1}(P_3)} = \frac{f'(N_g, T_2)}{f^{-1}\{f_4(N_g, T_2)\}} = F(N_g, T_2)$$

となる。すなわち  $\delta = \text{一定}$  であれば(b)が成立し、したがって加速燃料スケジュールを  $N_g$ ,  $T_2$  の関数として計算することができる。



付図 1 加減速制御系の等価変換

---

## 航空宇宙技術研究所報告 389 号

昭和 49 年 9 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)47-5911(大代表) 182

印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2-27-12

---

