

UDC 533.6.01.5:  
533.6.071.1:  
62-54

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-404

航技研1m×1m吹出式超音速風洞運転制御装置における  
デジタル技術の導入と若干の改良について

外立政隆・野田順一・清水福寿

1980年1月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 航技研1m×1m吹出式超音速風洞運転制御装置における デジタル技術の導入と若干の改良について\*

外 立 政 隆\*\* 野 田 順 一\*\* 清 水 福 寿\*\*

## On an Introduction of Digital Techniques and Some Improvements in NAL 1m×1m Supersonic Blow-down Wind-tunnel Control System.

By Masataka HASHIDATE, Junichi NODA and Fukuju SHIMIZU

### 概 要

この報告書は吹出式超音速風洞運転制御装置における、集合胴圧力のデジタル制御、ノズルマッハ数制御、模型迎角制御等において制御精度の向上と省力化、安全対策を目的として次に示す改良を行ない所定の成果を得たので、その結果について記述したものである。

- (1) 集合胴圧力制御系における風洞伝達特性モデルの改良と、この制御系にP I 制御、P I + 弁開度制限制御、P I + 最適 on off 制御を適用したときの制御特性の比較
- (2) 圧力制御の精度向上を目的としてマイクロコンピュータを使ったデジタルコントローラの製作
- (3) 安全対策を目的としたアナログシミュレート回路の製作
- (4) ノズルマッハ数設定の省力化のための改良
- (5) 模型制御装置の精度向上のための改良

### 1. ま え が き

吹出式超音速風洞は圧縮機で15~30分かけて貯気槽に高压空気を貯え、これを10~30秒間、ノズルを通して放出し、超音速気流を得て、その気流中に取付けられる航空機またはロケット等の模型が受ける空気力を研究する間歇式風洞である。

この風洞試験設備において、測定部に所定の気流を得るには、集合胴圧力とノズルスロート断面積をあらかじめ決められた値にセットし、通風中には集合胴圧力をその断面積分布に対応する値に制御する必要がある。航空宇宙技術研究所1m×1m吹出式超音速風洞(以下当風洞と云う)の場合、通常に通風時間は10~20秒であり、このうち集合胴圧力の整定に従来2.0~5.0秒を要していた。この整定時間を $\frac{1}{2}$ 程度に短縮できれば、それだけ計

測開始時刻を早くすることができ、高压空気の使用量を節約することができる。また当風洞は毎秒250~700kgの空気を放出するため、貯気槽圧力の低下が著しく、限られた空気量を有効に使って、測定部に精度のよい気流を出来るだけ長時間保持させるために集合胴の圧力制御はきわめて重要である。

当風洞は昭和36年建設以来、今日まで8800ランに及ぶ風洞実験を行なってきたが、建設当時、製作した制御装置はほとんど真空管式であり、4~5年使用すると部品の劣化による故障が頻発する状態であった。またアナログ式であったため、①マッハ数ごとに異なる制御パラメータを調節器前面のつまみでアナログ量で設定するので設定精度が悪い。②煩雑なパラメータ設定では設定ミスをし易く、このため集合胴圧力が異常上昇して危険を生じることがある。③使用前に5個のDCアンプのドリフト調整を必要とする等の欠点があった。

さらに従来の調節器の機能はP I 制御方式(以下PICと云う)とP I + 弁開度制限制御方式(以下VLCと云

\* 昭和54年12月3日受付

\*\* 空気力学第二部

う)の2通りの制御方式を備えていたが、これらの制御方式には次のような欠点があった。

① P I C方式

ゲインを大きくすると集合胴圧力の立ち上がりは早くなるが、オーバシュートも大きくなる。またゲインを小さくするとオーバシュートは生じないが整定時間が長くなり、かつ整定後の定常偏差が大きくなる。

② V L C方式

定常偏差を小さく押えるためにゲインを大きくし、オーバシュートを押えるために操作量(弁開度)を制限する方式で、当然定常偏差は小さくなるが、整定時間が長く

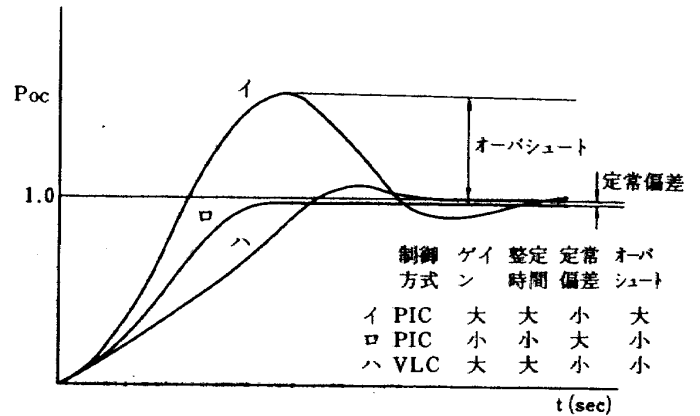


図1 各種制御方式の比較

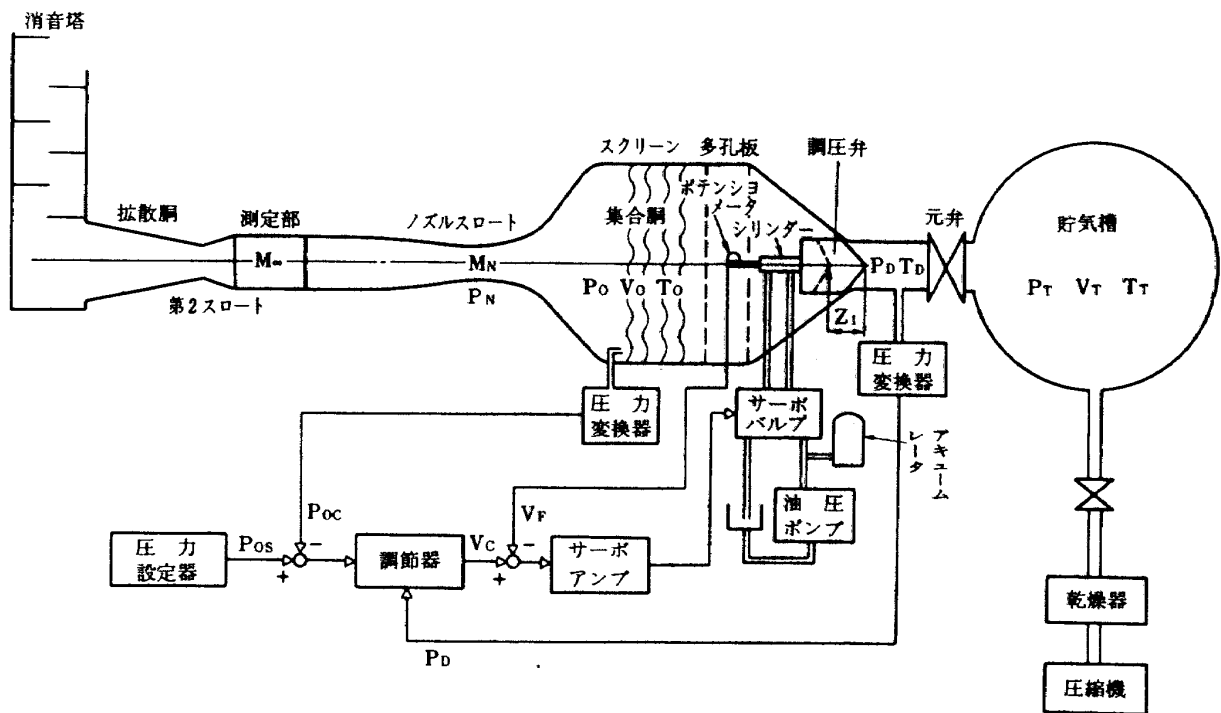


図2 圧力制御系構成要素

なる。これらの関係を図1に示す。

これらの欠点を改善し、運転時における制御パラメータの設定作業を容易にするためにマイクロコンピュータを使ったデジタル調節器を製作した。図2に集合胴圧力制御系の構成要素を示す。著者等は以前、この系の伝達関数を実験的に求めた。<sup>2)</sup>それによると調圧弁の伝達特性はむだ時間と飽和要素を含む一次遅れで表わされ、風胴の伝達特性はむだ時間と一次遅れで近似できた。

今回著者等は弁と風胴が直列に結ばれた、このようなむだ時間と高次の遅れを持った制御対象に対し、偏差の大きいときに最大操作量を与えて最短時間で目標値に近づけ、偏差がある値以下になったとき、負の最大操作量を与え、次に偏差が十分小さくなったところでP I 制御に切換えることにより過渡特性と定常特性を共に改善す

る最適 on off 制御(1種の非線型最適制御、以下OC方式と云う)を試みた。

まず、このOC方式を風胴制御に適用するために、風胴伝達特性のモデルをより実際に近い型に改良し、次に、このモデルを使って、当所計算センターに設置されているFACOM230型計算機でデジタルシミュレーションを行なった。その結果を基にマイクロコンピュータを使ったデジタルコントローラを製作し、集合胴圧力制御に使用して過渡特性と定常特性の両方を改善し、さらに制御パラメータ設定の自動化を行ない運転制御作業の省力化を達成した。

ノズルマッハ数設定装置は厚さ25mmの鋼製ノズル可換板を44個の油圧ジャッキで支持し、測定部で所定のマッハ数になるよう、ノズルスロート断面積を制御している。

建設当時、このノズル形状を所定のマッハ数に変更する作業に最低 5 人を必要としていた。そこで、この作業を省力化し、かつ、ノズルマッハ数の設定精度を高めることを目的として、風洞の上下壁に設置されている 6 個のメカニカルロックの着脱操作を自動化し、さらに、ノズルマッハ数自動設定装置を製作した。その結果、改良後は制御室において 1 人の操作でマッハ数設定が可能になった。

模型迎角は風洞実験において、空気力を測定する場合の重要なパラメータであり、その値を正確に知ることは測定精度を向上させるために必要である。当風洞ではスティングに連動して動くポテンシヨメータにより迎角信号を得ているが、ポテンシヨメータに供給する電源電圧の変動や模型支持装置のリンク機構のがた、サーボアンプのドリフト等でポテンシヨメータの出力 0 V が、かならずしもスティングの迎角 0 度と一致せず、迎角測定に誤差の生じる原因になっていた。そこでストラット上で 1 mm の移動が判別できる模型定位置検出装置を製作し、スティング(模型)が正確に迎角 0 度になっているときの信号を得て、そのときのポテンシヨメータの出力を 0 V (0 度)と調整するように改良した。

以上の各種装置に関する改良点の構成、精度等について報告する。

## 2. 記 号

$A_V$  : 調圧弁開口面積 ( $cm^2$ )  
 $A_N$  : ノズルスロート断面積 ( $cm^2$ )  
 $e_1$  : 誤差圧  $P_{OS} - P_{OC}$  ( $kg/cm^2$ )  
 $e_2$  : 第一切換点誤差圧 ( $kg/cm^2$ )  
 $e_3$  : 第二切換点誤差圧 ( $kg/cm^2$ )  
 $g$  : 重力加速度 ( $cm/sec^2$ )  
 $G$  : 調節器ゲイン  
 $L$  : むだ時間 (sec)  
 $m$  : 流 量 ( $kg/sec$ )  
 $M$  : マッハ数  
 $OC$  : 最適 on off 制御方式  
 $P$  : 圧 力 ( $kg/cm^2$ )  
 $PIC$  : 比例+積分制御方式  
 $P_{OS}$  : 設定圧力 ( $kg/cm^2$ )  
 $P_{OC}$  : コントロール圧力(圧力変換器を通して得られる集合胴圧力) ( $kg/cm^2$ )  
 $P_T$  : 貯気槽圧力 ( $kg/cm^2$ )  
 $P'_T$  : 貯気槽圧力の関数発生器を通った後の信号 ( $kg/cm^2$ )  
 $R$  : 気体定数 ( $kg \cdot cm / kg \cdot ^\circ K$ )  
 $T$  : 絶対温度 ( $^\circ K$ )

$TC$  : 調節器時定数 (sec)  
 $\Delta T$  : 大気温度からの温度差 ( $^\circ C$ )  
 $t_p$  : ステップ応答でピーク値までの時間 (sec)  
 $V$  : 体 積 ( $cm^3$ )  
 $V_C$  : 調圧弁制御信号 (v)  
 $V_F$  : 調圧弁フィードバック信号(弁開度) (v)  
 $V_i$  : 第二切換点における弁開度の初期値 (v)  
 $V_L$  : 弁開度制限値  
 $VLC$  : 弁開度制限制御方式  
 $v$  : 気流速度 ( $cm/sec$ )  
 $Z_1$  : 調圧弁ストローク (cm)  
 $Z_2$  : (16) 式で定義される速度 ( $cm/sec$ )  
 $\omega_n$  : ステップ応答の固有円振動数  
 $\zeta$  : ステップ応答の減衰係数  
 $\rho$  : 空気密度  $kg \cdot sec^2 / cm^4$   
 $\gamma$  : 空気の比熱比  
 $\Gamma$  :  $\Gamma = \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \cdot \gamma}$   
 $S$  : ラプラス演算子

## 添 字

$a$  : 大気状態  
 $D$  : 主管内部  
 $i$  : 初期値  
 $N$  : ノズルスロート部  
 $O$  : 集合胴内部  
 $T$  : 貯気槽内部  
 $*$  : 音速点  
 $\infty$  : 測定部における一様流  
 $\oplus$  : 特に指示なき圧力は絶対圧を示す

## 3. 集合胴圧力制御について

### 3.1 風洞伝達特性モデルの改良

風洞伝達特性のモデルに関して、以前著者等は単純な一次遅れとむだ時間で近似した<sup>2)</sup>。また著者等が調査した範囲の資料によると、ほとんどが次に示す式により解析を行なっている。まず貯気槽の圧力降下率は

$$\frac{dP_T}{dt} = \frac{\Gamma \sqrt{gRT_T}}{V_T} P_T A_V \quad (1)$$

集合胴圧力の変化率は

$$\frac{dP_O}{dt} = \frac{\Gamma \sqrt{gRT_O}}{V_O} (P_T A_V - P_O A_N) \quad (2)$$

$$\text{但し } \Gamma = \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \cdot \gamma}$$

起動時のごく短時間のみを対象とすれば貯気槽圧力  $P_T$

は一定値とみてもよい。すると(2)式は一次遅れとなり、著者等が以前行った近似式と一致する<sup>2)</sup>

さて、この(1)、(2)式を導びくために、次の仮定を行なっている。

- (1) 調圧弁のスロート部で常に音速とする。
- (2) ノズルのスロート部で常に音速とする。
- (3) 貯気槽内の空気の状態変化は等温変化とする。
- (4) 流路管(主管)内の空気流は等エントロピー流とする。

(1)の仮定は貯気槽圧力 $P_T = 20 \text{ kg/cm}^2$ のとき、集合胴圧力が $P_0 = 10.6 \text{ kg/cm}^2$ 以下なら成立する。当風胴に適用すれば、測定部マッハ数 $M_\infty = 1.4 \sim 3.5$ の実験で $P_0$ は $1.55 \sim 7.9 \text{ kg/cm}^2$ であり、通風時間が20秒以下なら成立する。今までの実験実績で90%~95%までが、この仮定の成立する範囲である。

(2)の仮定は起動初期の $P_0$ の低いときには成立しない。それは、ノズルスロートにおける気流速度は最初 $0 \text{ m/sec}$ から徐々に増して、ある時点で音速となるためである。低マッハ数( $M_\infty = 1.4 \sim 2.0$ )の起動時における過渡特性を問題にするとき(2)の仮定が成立しない範囲が広いので注意する必要がある。

(3)の仮定は貯気槽内の定温装置の働きにより、ほぼ成立しているものと思われる。

(4)の仮定は起動初期の過渡時には成立しない。実験前の調圧弁の上流(主管)と下流(集合胴)は大気で満たされている。当風胴の実験方法として、実験直前に調圧弁より上流の主管に3インチの側路弁を通して徐々に圧縮空気を充填する。そして、主管の圧力と貯気槽圧力が一致したところで元弁を開く。このような場合、最初から主管内にある空気は約5分間で貯気槽圧力まで圧縮されるから当然温度が上昇する。その際、主管壁との間で熱の授受が生じるから断熱変化にはならない。しかし貯気槽圧力まで充填した後、約5分程放置するとほぼ貯気槽温度まで低下する。また、日に数ラン実験を行なう場合は2ラン目から貯気槽と同温、同圧の空気が残るので等エントロピー流であると仮定してもさほど大きな誤差はないと思われる。集合胴内でも主管と同様、調圧弁が開き始めたとき、最初にあった空気が圧縮されて温度上昇を生じる。この現象は実験ごとにくりかえされて、流れは非定常な間(4)の仮定は成立しない。

著者等は集合胴圧力制御において過渡特性と定常特性の両方の改善を目ざしているので、前記した起動時における非定常な風胴特性を求めることから検討を始めた。

貯気槽より調圧弁を通して単位時間あたりに流出する空気量 $m_T$ は

$$m_T = g \rho^* v^* A_v \quad (3)$$

で表わされる。

流れは等エントロピー流であると仮定し、さらに調圧弁の最小断面で音速になっていると仮定すると、

$$m_T = \sqrt{\frac{\gamma g}{RT_T} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} A_v P_T \quad (4)$$

となる。

この流出量 $m_T$ による貯気槽圧力の低下率は

$$\frac{dP_T}{dt} = -\frac{1}{V_T} \left( \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \gamma g R T_T P_T A_v \right) \quad (5)$$

となる。

また集合胴から流出する空気量は

$$m_N = g \rho_N v_N A_N$$

となる。集合胴内の空気の状態 $T_0$   $\rho_0$ が時間と共に変化し、集合胴からノズルスロートの間で等エントロピー流であると仮定すると

$$\rho_N = \rho_0 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_N^2\right)^{-\frac{1}{\gamma-1}} \quad (6)$$

$$T_N = T_0 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_N^2\right)^{-1} \quad (7)$$

$$v_N = M_N \sqrt{\gamma g R T_N} = \frac{\sqrt{\gamma g R T_0}}{\sqrt{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_N^2}} M_N \quad (8)$$

$$m_N = \frac{P_0 \sqrt{\gamma g} M_N A_N}{\sqrt{R T_0} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_N^2\right)^{\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)}} \quad (9)$$

となり、集合胴圧力の変化率は

$$\frac{dP_0}{dt} = \frac{\sqrt{\gamma g R}}{V_0} \left\{ \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} T_T P_T A_v - \frac{T_0}{\sqrt{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_N^2\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} P_0 M_N A_N} \right\} \quad (10)$$

となる。

さて、(2)式と(10)式の違いを見ると、(10)式では $T_T$ 、 $T_0$ 、 $M_N$ を未知関数として扱っていることである。

そこで、主なマッハ数について主管圧力 $P_D$ 、主管総温度 $T_D$ 、集合胴圧力 $P_{0c}$ 、集合胴温度 $T_0$ 、ノズルスロート静圧 $P_N$ を実験で求めた。起動時における主管の圧力 $P_D$ は図3に示すように、約2秒間およそ2Hzで振動しながら圧力が低下してゆく。この振動の原因は約50mの主管の中を衝撃波が移動するためと思われる。さて、貯気槽初期圧 $P_{Ti}$ は起動前にブルドン管圧力計で計測するが、(10)式の $P_T$ は調圧弁直前の圧力を意味し、 $P_{Ti}$ より小さい

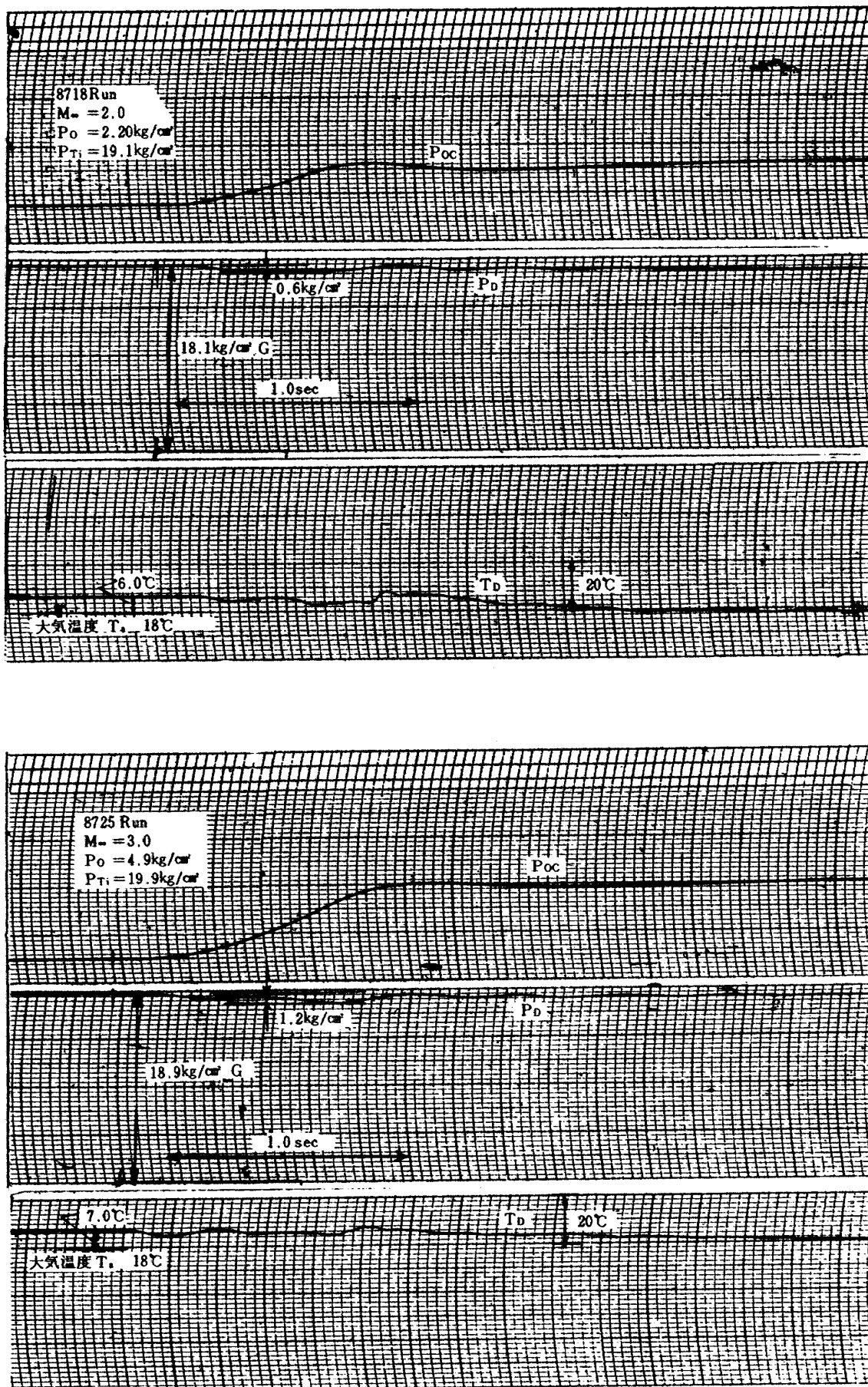


図3 起動時における主管の圧力、温度変化

はずである。ではどのくらい小さくなるかを推定してみる。図3から圧力降下の大きいところで  $0.6 \text{ kg/cm}^2$  ( $M_\infty=2.0$ )  $\sim 1.2 \text{ kg/cm}^2$  ( $M_\infty=3.0$ ) 位である。この圧力孔は調圧弁の上流1mのところにある静圧孔より得ているので、流速の増加と共に圧力が降下する。管内の推定流速は流量より計算すると  $M_\infty=2.0$  で  $42 \text{ m/sec}$ ,  $M_\infty=3.0$  で  $60 \text{ m/sec}$  となる。このため、静圧と総圧の差は  $M_\infty=2.0$  で  $0.24 \text{ kg/cm}^2$ ,  $M_\infty=3.0$  で  $0.40 \text{ kg/cm}^2$  となる。したがって正味の  $P_{T_i}$  はブルドン管の指示値より、 $M_\infty=2.0$  で  $0.6 - 0.24 = 0.36 \text{ kg/cm}^2$ ,  $M_\infty=3.0$  で  $1.2 - 0.40 = 0.8 \text{ kg/cm}^2$  ほど低い値であると思われる。同じ測定孔に熱電対を挿入して主管

の気流総温度を計ると図3に示す応答が得られる。起動前の貯気槽温度は大気温度より  $6\sim 7^\circ\text{C}$  高くなっており、起動と同時に低下を始め、約2秒で大気温度と等しくなり以後、漸減してゆく。したがって、起動時を対象とした解析においては(10式)の  $T_T$  を一定と見なしても大差ない。

起動時における調圧弁開度  $V_F$ , 集合胴圧力  $P_{oc}$ , 大気からの温度上昇量  $\Delta T_o$  の応答を図4に示す。 $\Delta T_o$  は  $P_{oc}$  の変化量に比例して上昇し、 $V_F$  の最大値 ( $\frac{dP_{oc}}{dt}$  の最大値にほぼ同じ) で最高となり、その後急速に減少して、大気温度  $T_a$  に近づいたところからゆるやかな勾配で漸減してゆく。 $P_{oc}$  を増すと図5に示すように  $\Delta T_o$  の最大値も

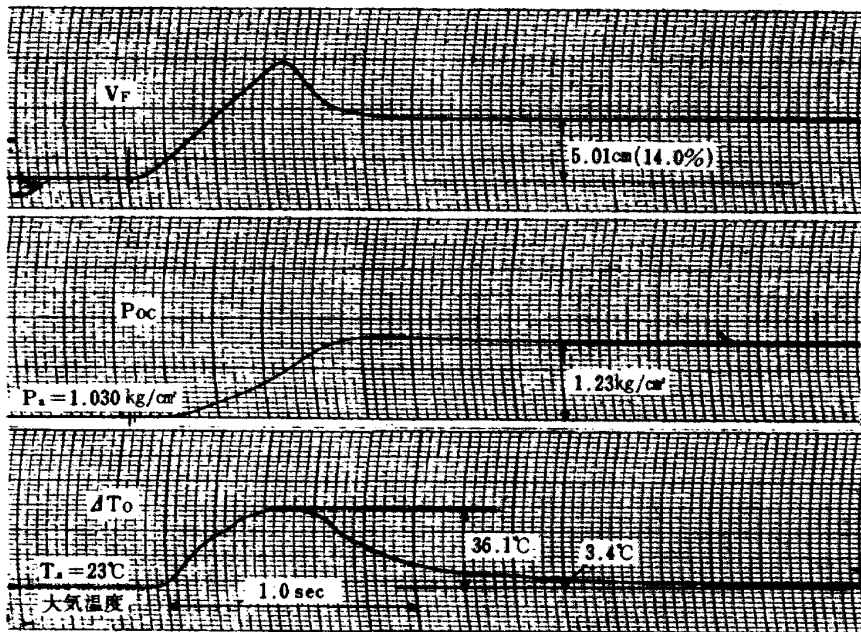


図4 8789 Run  $M_\infty=2.0$   $P_0=2.2 \text{ kg/cm}^2$  の応答例

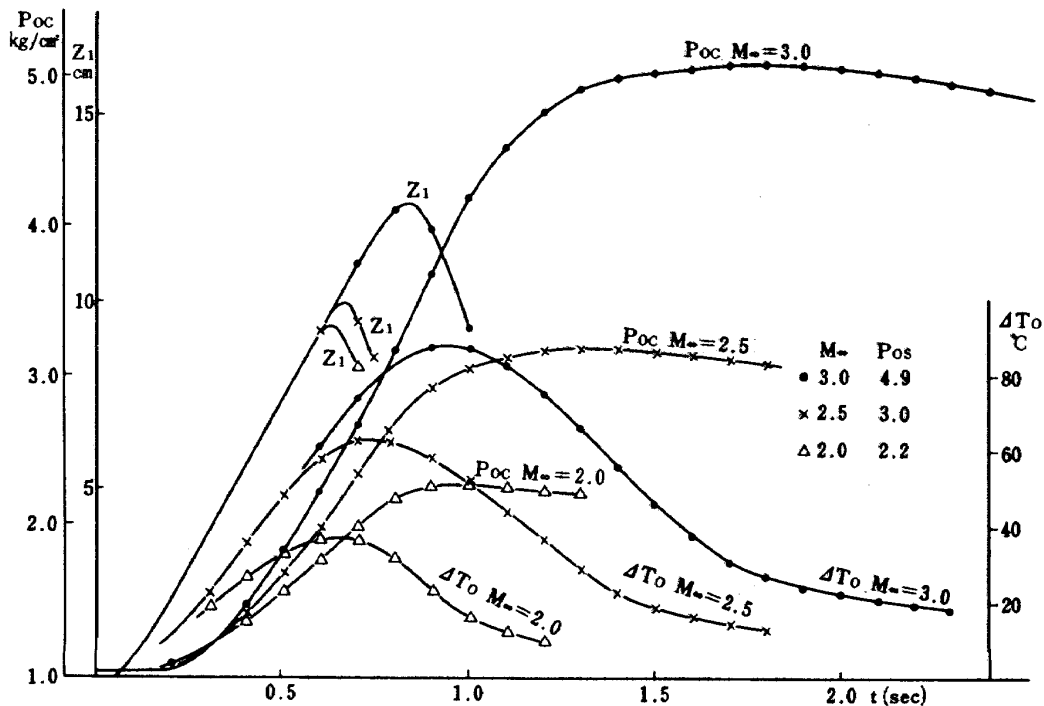


図5  $P_{oc}$ ,  $\Delta T_o$ ,  $Z_1$  の応答例

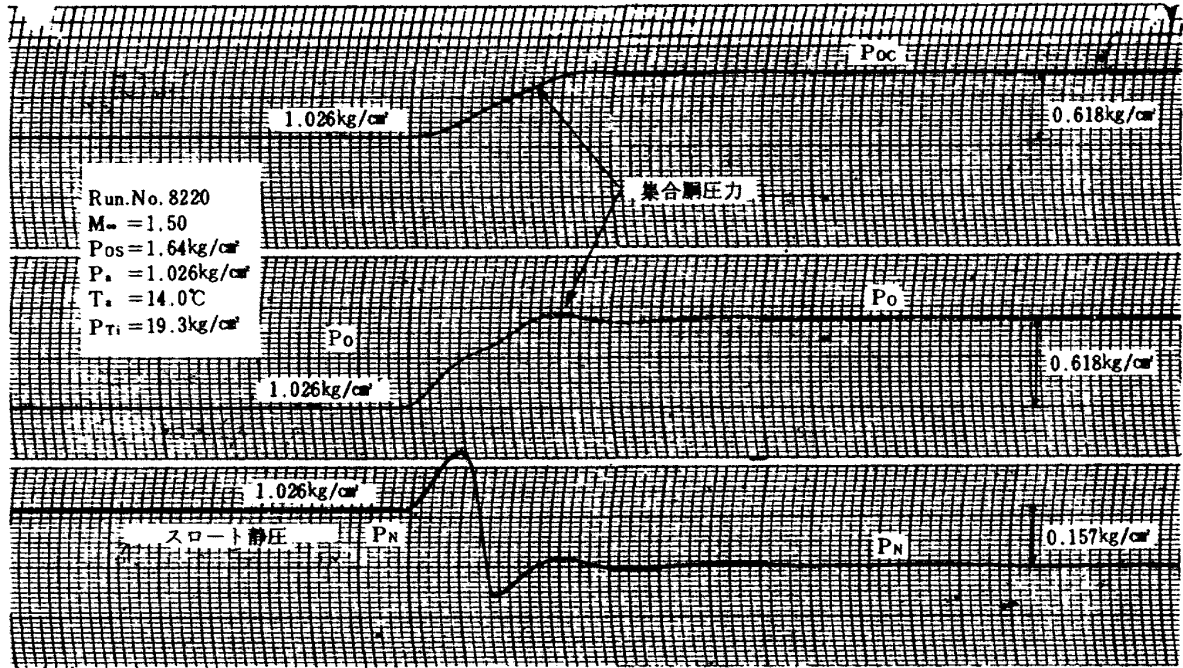


図6  $P_{oc}$ ,  $P_o$ ,  $P_N$ の応答の1例

大きくなる。非定常な気流中の早い応答の温度測定は容易でない。今回はクロメルアルメル線の直径  $100\mu m$  と  $25\mu m$  の熱電対で集合胴中心附近の気流温度を測ったがほぼ同じ結果を得たので妥当な測定方法であると判断している。

次にノズルスロート部の壁圧  $P_N$  を測定すると図6に示す応答を得る。 $P_{oc}$  は通常の制御用に使用している集合胴圧力であり、図7に示す5mの導管を通して力平衡型圧力計(精度0.2%)に入れて得た応答である。 $P_o$  は導管を15cm以下におさえて、周波数特性のよい圧力変換器(固有振動数約700Hz, 精度0.5%)で得た集合胴圧力の応答である(図7)。この $P_o$ ,  $P_N$ よりスロートのマッハ数  $M_N$  を計算すると図8のようになる。 $P_o$  と  $P_{oc}$  の差が導管系と力平衡型圧力計の遅れであり、その時定数はお

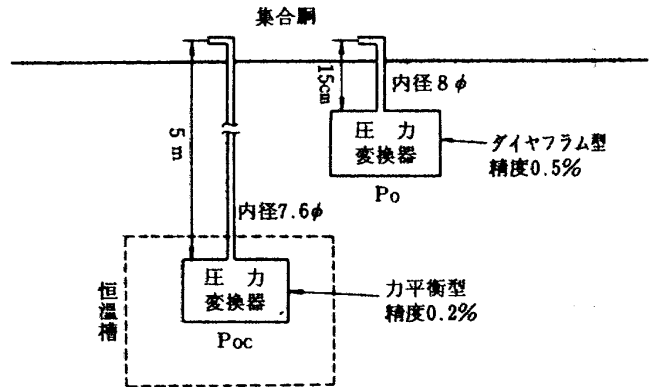


図7 圧力変換器の取付方法

およそ0.12秒である。 $M_N$  は  $P_o$  の増加と共に増し、 $P_o = 1.6\text{ kg/cm}^2$  付近で  $M_N = 1.0$  となる。横軸に  $P_o$ , 縦軸に  $M_N$  をとり、主なマッハ数について  $M_N$  の変化を見ると図9の

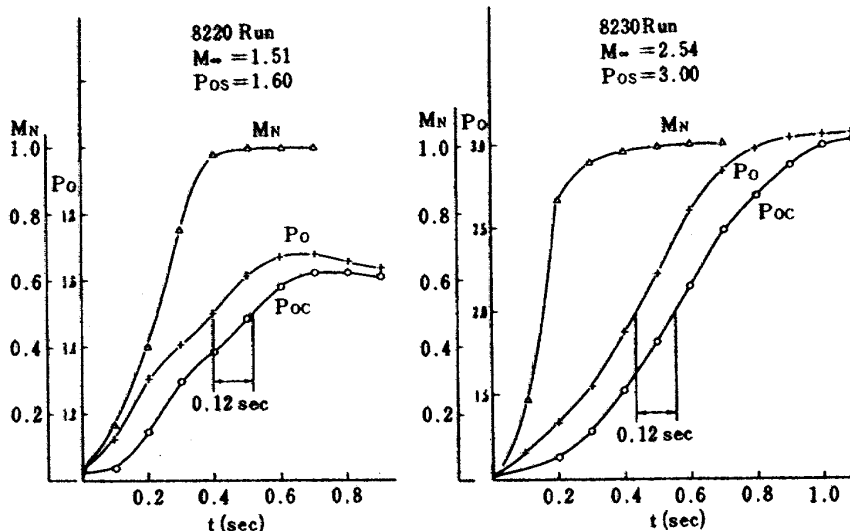


図8  $P_o$ ,  $P_{oc}$ ,  $M_N$ の応答例



ようになる。マッハ数によるバラツキが多いが、巨視的に見て $M_N$ は $P_0$ に比例していると云える。そこで、計算では図に示す実線で近似することにした。

各マッハ数に対するノズルスロート断面積 $A_N$ を図10に示す。

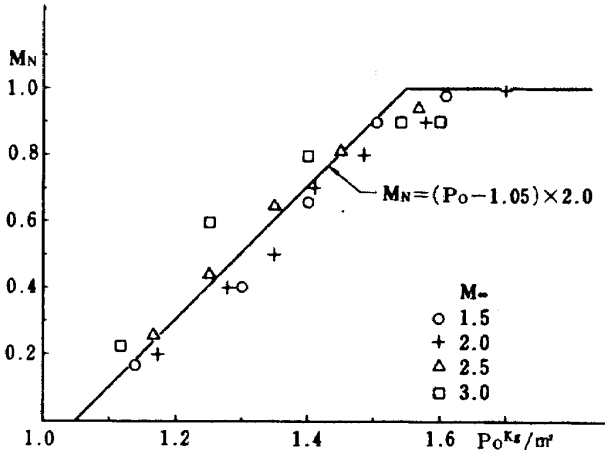


図9  $P_0$ と $M_N$ の関係

### 3.2 調圧弁の伝達特性

サーボアンプ、サーボバルブ(パイロットバルブ)、調圧弁シリンダーから構成された油圧式調圧弁制御系を図2に示す。この系の伝達特性を調べるためにサーボアンプにステップ状入力を加えると図11に示す応答を得る。サーボアンプに開信号が入ると弁は $L_1$ のむだ時間を経て動き出し、一定速度で開いてゆく。つぎに閉信号が入ると $L_2$ のむだ時間を経て閉動作が始まり、約17%( $Z_1 = 6.0\text{ cm}$ )付近で速度が変わる。図に示すように開方向は一定速度で開くが、閉方向は開度により速度が変わる複雑な特性を持っている。この弁の特性が油温度、主管圧力

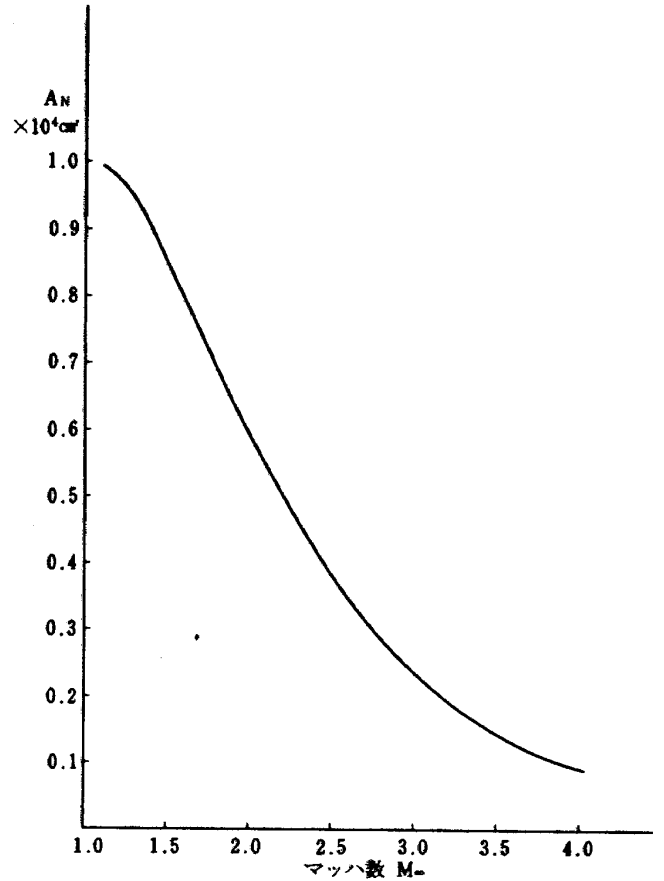


図10 マッハ数とノズルスロート断面積

により変わるか、否かを調べた結果が図12である。油温度による影響は認められない。主管圧力による影響は $P_D = 0\text{ kg/cm}^2$ で $\frac{dz_1}{dt} = 18.1\text{ cm/sec}$ であるのに対し、 $P_D = 20\text{ kg/cm}^2$ では $\frac{dz_1}{dt} = 16.9\text{ cm/sec}$ と遅くなり、 $P_D$ が $1\text{ kg/cm}^2$ 増すごとに速度は $\frac{dz_1}{dt} = 0.06\text{ cm/sec}$ 小さくなる計算となる。この遅くなる原因は主管の圧力が高くなると、空気力が弁を閉める方向に働く構造になっているためである。閉方向

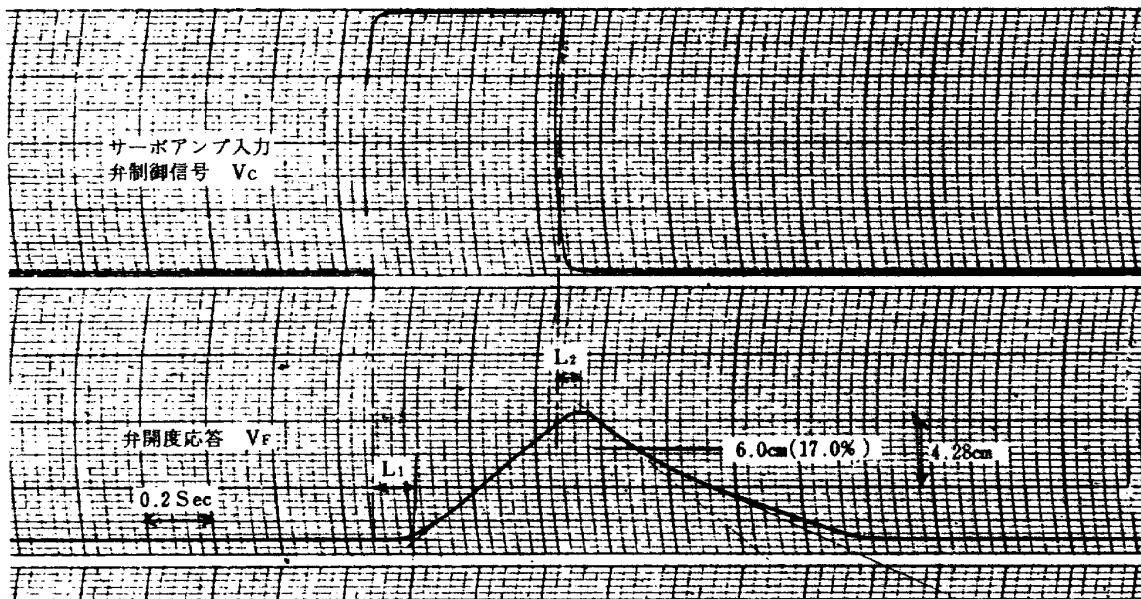


図11 調圧弁の応答

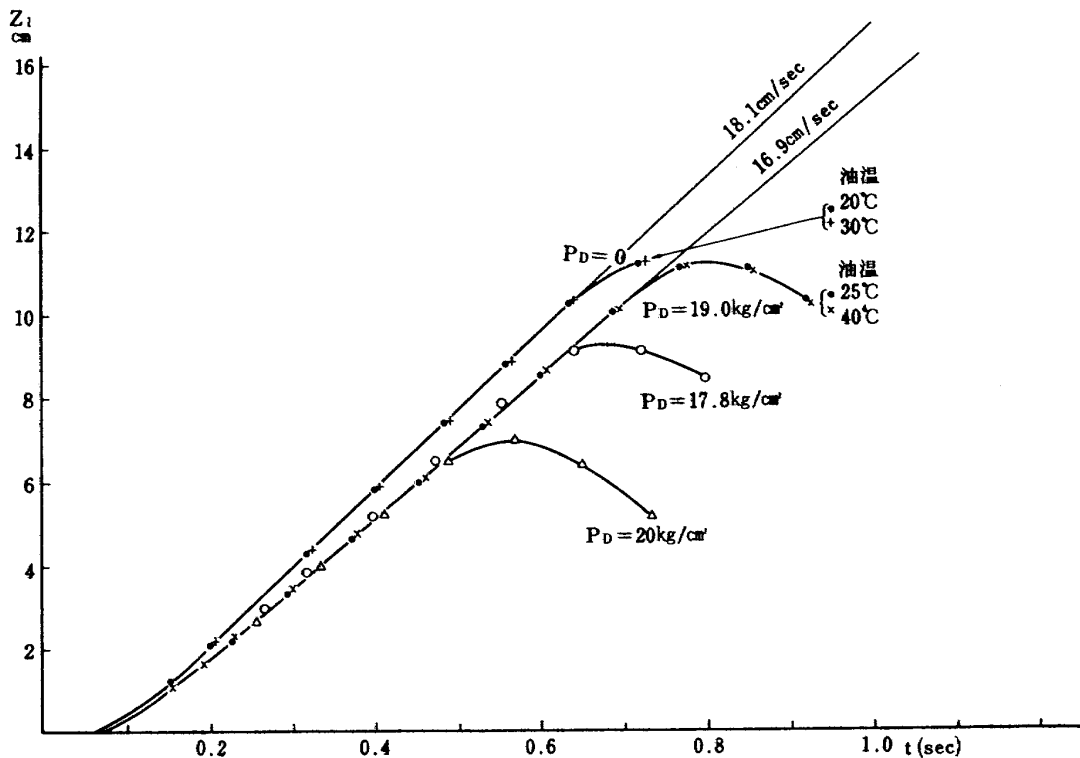


図12 主管圧, 油温による調圧弁開速度での影響

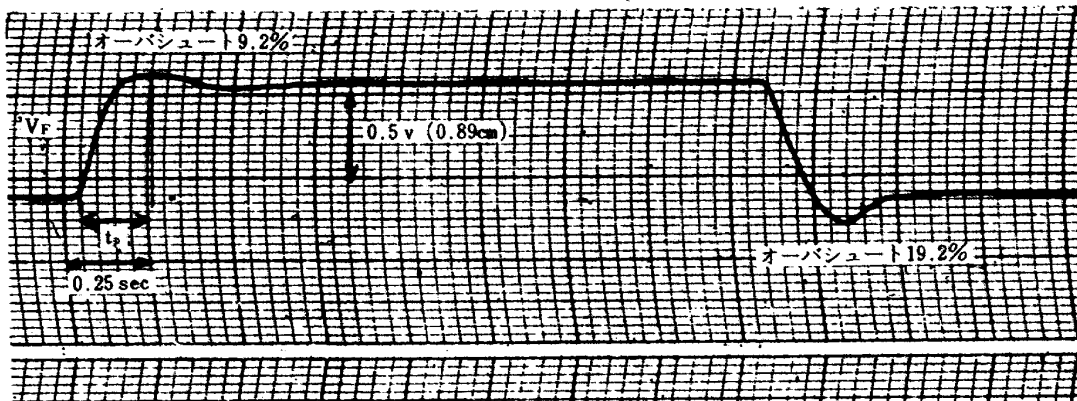


図13 調圧弁制御系の微小入力に対する応答

にも主管圧による影響は理論的に現われるはずであるが前記したように複雑な動きをするので、ペンシログラフ上ではっきりした変化は認められなかった。また弁の開方向の速度は開度17%以上の領域で26.5cm/sec、17%以下の領域では曲線となるが、直線で近似して約12.8cm/secとなる。

線形領域の伝達関数を求めるために微小入力に対する応答を求めると図13の通りとなる。この応答を2次遅れの次式で近似し、固有円振動数 $\omega_n$ と減衰係数 $\zeta$ を求める。

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

まず減衰係数 $\zeta$ はオーバーシュート量がわかれば図14から求められる。<sup>4)</sup>オーバーシュートは図13から開方向9.2%閉方向19.2%となる。したがって減衰係数は図14より開方

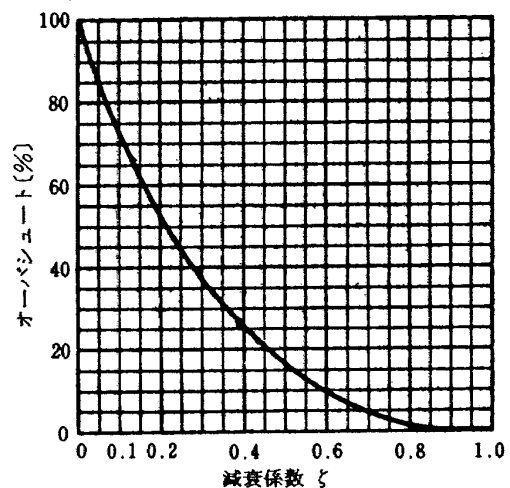


図14 行きすぎ量から減衰係数を求める図

向  $\zeta = 0.60$ , 閉方向  $\zeta = 0.47$  となる。また最大行き過ぎ量に到る時間  $t_p$  と  $\zeta$ ,  $\omega_n$  の間に次式が成り立つ。<sup>4)</sup>

$$t_p = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n} \quad (12)$$

$t_p$  も図 13 から開方向 0.18 秒, 閉方向 0.20 秒と読みとれるから(12)式より固有円振動数  $\omega_n$  を計算すると,

開方向  $\omega_n = 21.81 \text{ (rad/sec)}$

閉方向  $\omega_n = 17.79 \text{ (rad/sec)}$

となる。デジタルシミュレーションで線形領域の開方向, 閉方向の特性をそれぞれ考慮したプログラムは煩雑になるので両方の平均値  $\zeta = 0.54$   $\omega_n = 19.8 \text{ rad/sec}$  を使うことにした。したがって(11)式は次のように書きかえられる。

$$G(s) = \frac{V_F(s)}{V_C(s)} = \frac{1}{0.0025 S^2 + 0.054 S + 1} \quad (13)$$

フィードバックポテンシオメータの変換係数は 0.561 ( $\frac{V}{cm}$ ) であるから,  $Z_1$  を弁ストロークとすると

$$Z_1 = \frac{V_F}{0.561} \text{ (cm)} \quad (14)$$

最終的に調圧弁の線形領域における伝達関数は

$$\frac{Z_1(s)}{V_C(s)} = \frac{1}{0.0014 S^2 + 0.030 S + 0.561} \quad (15)$$

となる。

以上の結果をブロック図で示すと図 15 となる。

次に弁ストローク  $Z_1$  と弁開口面積  $A_v$  の関係は調圧弁の製作図面から作図的に求められ図 16 となる。 $A_v$  は  $Z_1 = 0$  から  $Z_1 = 6.0 \text{ cm}$  (17%) まで比例関係とならない。ところが, 起動から 2~3 秒の過渡特性の解析にはこの範囲が大きな影響を与える。今回のデジタルシミュレーションでは曲線を図に示すイ,ロ,ハ,ニの 4 段階に分けて直線で近似した。

以上, 調圧弁伝達特性, 風洞伝達特性を微分方程式の形でまとめる。(16)式の右のカッコ内は主管の圧力変化による, 速度の補正項である。

$$\frac{dz_1}{dt} = Z_2 (1.0 + (20 - P_T) 0.06) \quad (16)$$

$$\frac{dz_2}{dt} = \frac{1}{0.0014} (V_C - 0.030 Z_2 - 0.561 Z_1) \quad (17)$$

ここで  $Z_2$  ( $\frac{dz_1}{dt}$  にほぼ同じ) を計算し, 開方向で  $Z_2$  が 16.9  $cm/sec$  を越えたとき  $Z_2 = 16.9 \text{ cm/sec}$  で制限する。閉方向の速度は  $Z_1 = 6.0 \text{ cm}$  付近で変化する。そこで  $Z_1 > 6.0 \text{ cm}$  の範囲で速度が  $-26.5 \text{ cm/sec}$  を越える部分は  $-26.5 \text{ cm/sec}$  で制限し,  $Z_1 < 6.0 \text{ cm}$  の範囲で  $-12.8 \text{ cm/sec}$  を越える部分は  $-12.8 \text{ cm/sec}$  で制限する。

(16)式, (17)式で  $Z_1$  を求め, 図 16 の点線から  $A_v$  を求める。すなわち,

領域イ.  $Z_1 \leq 3.5 \text{ cm}$  のとき,  $A_v = 192.0 \times Z_1 \text{ (cm}^2\text{)}$

領域ロ.  $3.5 \text{ cm} < Z_1 \leq 6.0 \text{ cm}$  のとき,  $A_v = 48.0 \times Z_1 + 504 \text{ (cm}^2\text{)}$

領域ハ.  $6.0 \text{ cm} < Z_1 \leq 8.5 \text{ cm}$  のとき,  $A_v = 95.0 \times Z_1 + 222 \text{ (cm}^2\text{)}$

領域ニ.  $Z_1 > 8.5 \text{ cm}$  のとき,  $A_v = 120 \times Z_1 \text{ (cm}^2\text{)}$

となる。

貯気槽の圧力降下率は(5)式で  $\gamma = 1.4$ ,  $R = 2927 \text{ cm}^2/\text{kg}$

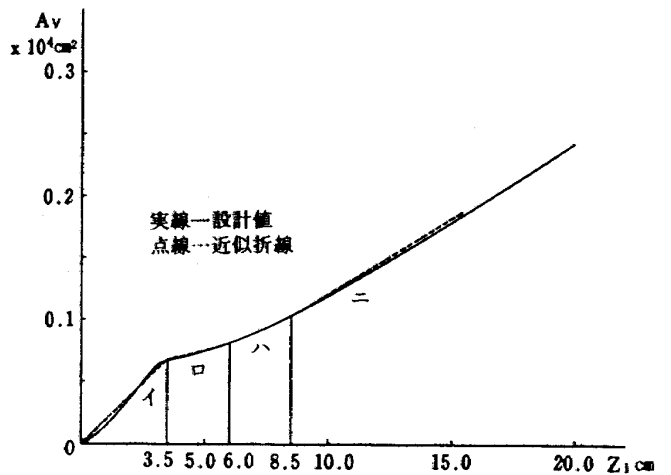


図 16 調圧弁  $A_v$  特性

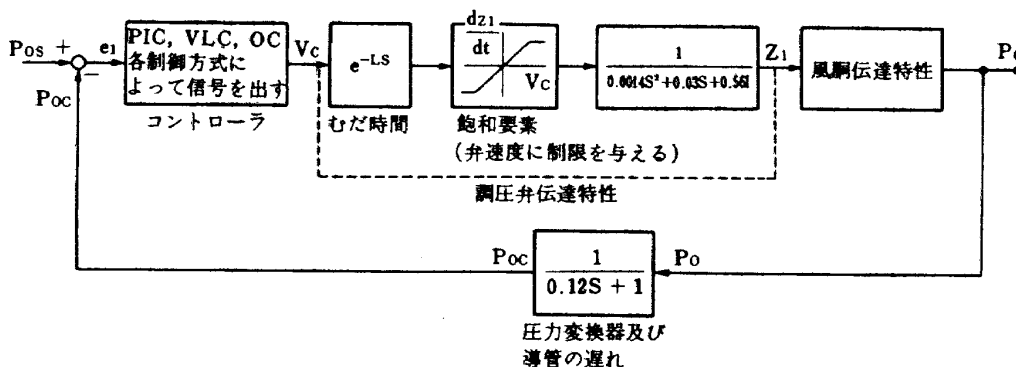


図 15 制御系のブロックダイアグラム

$g = 980 \text{ cm/sec}^2$  として計算すると(18)式となる。

$$\frac{dP_T}{dt} = -\frac{1159.7}{V_T} \sqrt{T_T} P_T A_V \quad (18)$$

集合胴圧力変化率は(19), (20)式となる。

$$\frac{dP_0}{dt} = \frac{1159.7}{V_0} \sqrt{T_T} P_T A_V - \frac{2003.8 \sqrt{T_0} M_N A_N P_0}{V_0 (1 + 0.2 M_N^2)^3} \quad (19)$$

$$\frac{dP_{Oc}}{dt} = \frac{1}{0.12} (P_0 - P_{Oc}) \quad (20)$$

(18)式で貯気槽容積  $V_T$  は 1 球 ~ 3 球の選択の方法により異なる。現在, 2, 3 球を併用しているので合計の容積は  $V_T = 1540 \text{ m}^3$  である。貯気槽温度  $T_T$  は大気温度より 7 °C 高いとする。貯気槽圧力  $P_T$  は起動前の圧力をブルドン管圧力計で読み, その値から主管の圧力降下量 (マッハ数により異なるが  $0.4 \sim 0.8 \text{ kg/cm}^2$ ) を差引いた値を与える。

(19)式の集合胴容積は  $V_0 = 72.5 \text{ m}^3$  である。  $T_0$  は図 6 に示すようにマッハ数により異なるが, それぞれを折線で近似し, 絶対温度で与える。また  $M_N$  は図 9 で示す実線で与える。以上, 各マッハ数ごとにそれぞれの数値を入れて(18)式~(20)式を Runge-Kutta 法で解く。

### 3.3 デジタルシミュレーション

制御系の各要素の伝達特性がわかれば, 調節器に比例 + 積分制御 (PIC), 弁開度制限制御 (VLC), 最適 on/off 制御 (OC) 等の機能をもたせた, デジタルシミュレーションを行なうことができる。計算手順のフローチャートを図 17 に, 制御信号のタイムチャートを図 18 に示す。

3 方式のうち一番複雑な OC 方式について計算の手順を述べる。OC 方式は制御系に最大操作量 (ここでは弁全開信号) を与えて  $P_{Oc}$  を目標値に近づけ, 適当な時刻で負の最大操作量 (ここでは弁全閉信号) に切り換えて, 最小時間で応答を終らせる制御方式である。まず調圧弁のサーボアンプに最大操作量 (全開信号) が入ると弁は  $L_1$  のむだ時間をおいた後一定速度で開く (実際の弁は高次の遅れ要素であるから最初から一定速度とならず, 図 18 a の点線のように動く)。ところが(17)式で  $V_C$  (コントローラ出力 = 操作量) に弁開度 100% に対応する  $20v$  の値を入れると, 計算初期には  $Z_2$  ( $\equiv \frac{dZ_1}{dt}$ ) は実際上あり得ない非常に大きな値になるが, 前述したように, 速度制限機構により開方向で  $16.9 \text{ cm/sec}$ , 閉方向では  $Z_1$  の値により異なるが最大で  $-26.5 \text{ cm/sec}$  以下に制限される。そこで, 弁の移動量  $Z_1$  を解くにあたり, (18)式の  $Z_2$  を強制的に一定値に指定する。たとえば, 最高速度で開かせたいときは  $Z_2 = 16.9 \text{ cm/sec}$  を与え, 最高速度で閉めたいときは  $Z_1$  により異なり,  $Z_1 > 6.0 \text{ cm}$  のとき  $Z_2 = -26.5 \text{ cm/sec}$ ,  $Z_1 < 6.0$

$\text{cm}$  のとき,  $Z_2 = -12.8 \text{ cm/sec}$  を与える。以上の条件のもとに(18)~(20)式を解きながら偏差  $e_1 (= P_{Os} - P_{Oc})$  と第 1 切換値  $e_2$  を比較し,  $e_1 < e_2$  時点で操作量を 0 V にする (全閉信号を加える)。すると弁は  $L_2$  のむだ時間だけ開方向に動き, その後閉方向に動き出す。この時間的關係を図 18 a に示す。  $P_{Oc}$  はしだいに  $P_{Os}$  に近づき,  $e_1$  は増々小さくなってゆき, 次に適当な値  $e_3$  になったとき (第 2 切換点と云う) PI 制御に切替える。弁は第 2 切換点のときと同様,  $L_3$  だけ進む ( $L_3$  は  $L_2$  に近い値である)。ここで第 2 切換点 ( $t_3$ ) における弁開度を  $V_3'$  とする。第 2 切換点から  $L_3$  だけ進み弁が  $V_3'$  になったとき, 同時に  $e_1 = 0$  となるような  $V_3'$  の値を初期値として PI 制御に切替えたとき最適の応答が得られる。ところが PI 制御は図 18 a に示すように  $L_3$  時間 (実測すると約  $0.07 \text{ sec}$ ) だけ早くスタートする。ここに第 2 切換点におけるむずかしさがある。  $L_3$  の時間に進む弁の量は  $Z_1 < 6.0$  の範囲で  $V_F = 0.45v$  ( $Z_1 = 0.82 \text{ cm}$ ) である。 ( $Z_1 > 6.0$  では弁の閉方向速度が変わるので  $0.45v$  の値が変わってくる)。PI 制御に入っても弁の速度に限界がある。(17)式を計算して  $Z_2$  を求め,  $Z_2 > 16.9 \text{ cm/sec}$  のときは  $Z_2 = 16.9 \text{ cm/sec}$  とし, 閉方向では  $Z_1 > 6.0 \text{ cm}$  で  $Z_2 < -26.5 \text{ cm/sec}$  のとき,  $Z_2 = -26.5 \text{ cm/sec}$  を与え,  $Z_1 < 6.0 \text{ cm}$  で  $Z_2 < -12.8 \text{ cm/sec}$  のとき,  $Z_2 = -12.8 \text{ cm/sec}$  を与えて計算する (図 17 b 参照)

マッハ数 2.0 と 3.0 で風洞実験したときの  $Z_1$  及び  $P_{Oc}$  の応答の結果とデジタルシミュレーションの結果を図 19 で比較する。点線が実験値, 実線が今回改良した風洞モデルによる計算値, 一点鎖線が改良前のモデル(2)式による計算値である。明らかに改良したモデルの方が実験に近い。偏差の小さくなった部分で実験値と計算値に差が生じるが, 各要素の特性が細部において近似式と若干異なるためである。

また低マッハ数で(2)式による計算値と実験値が大巾にずれる。この原因は(2)式では  $M_N$  を起動初期から 1.0 と仮定するが, 実際の  $M_N$  は図 9 に示すように  $P_0 = 1.6 \text{ kg/cm}^2$  付近まで 1.0 より小さな値となるためである。

OC 方式を風洞の圧力制御に適用するにあたり, あらかじめ検討しなければならない問題点は次の通りである。

- (1) おもなマッハ数について最適切換点  $e_2$ ,  $e_3$  を求める。
  - (2)  $e_2$ ,  $e_3$  が最適値からずれたときの影響
  - (3) OC と PIC または VLC との比較
  - (4) PIC 領域に切り換えたとき, 調節器のゲイン G 時定数 TC の違いによる影響
  - (5) 貯気槽の初期圧力, 初期温度の違いによる影響
- 各マッハ数ごとにデジタルシミュレーションを行ない前記の

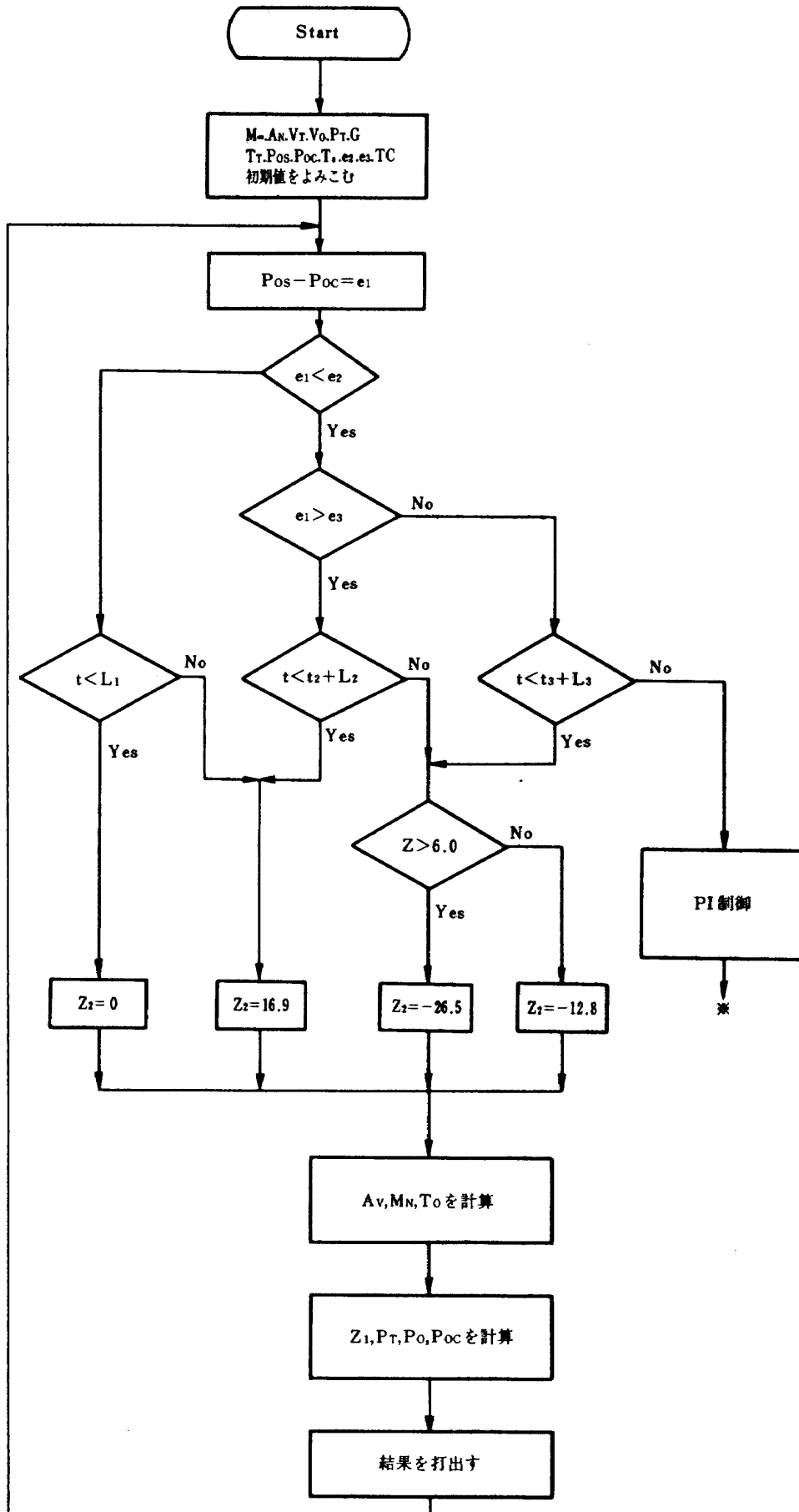


図17・a デジタルシミュレーション プログラムフローチャート OC方式

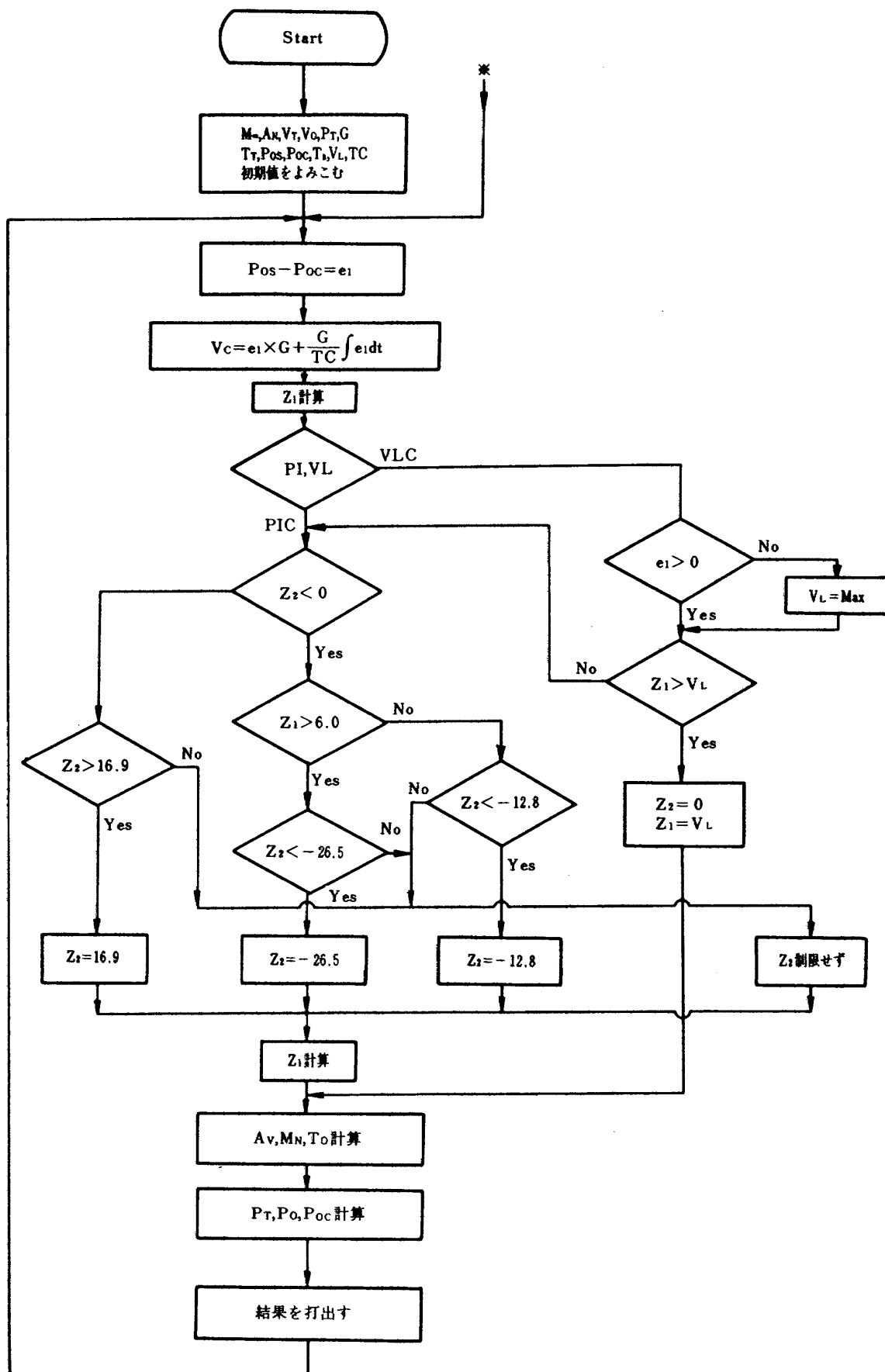


図17・b デジタルシミュレーション プログラムフローチャート PIC, VLC方式

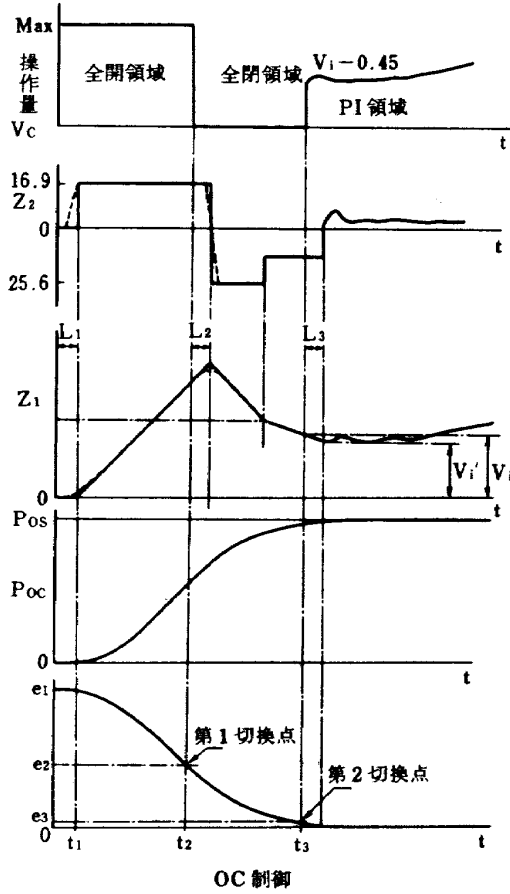


図18・a 各信号の時間的關係

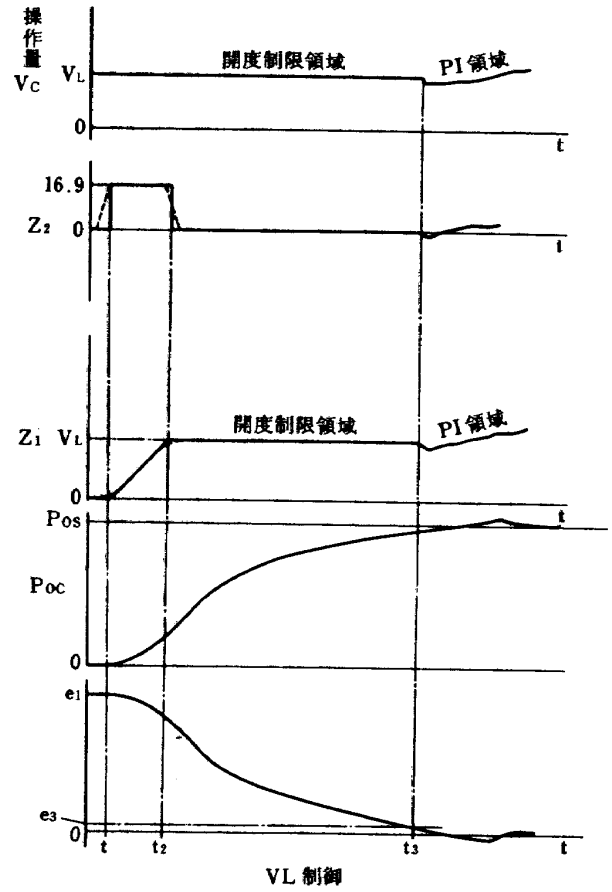


図18・b 各信号の時間的關係

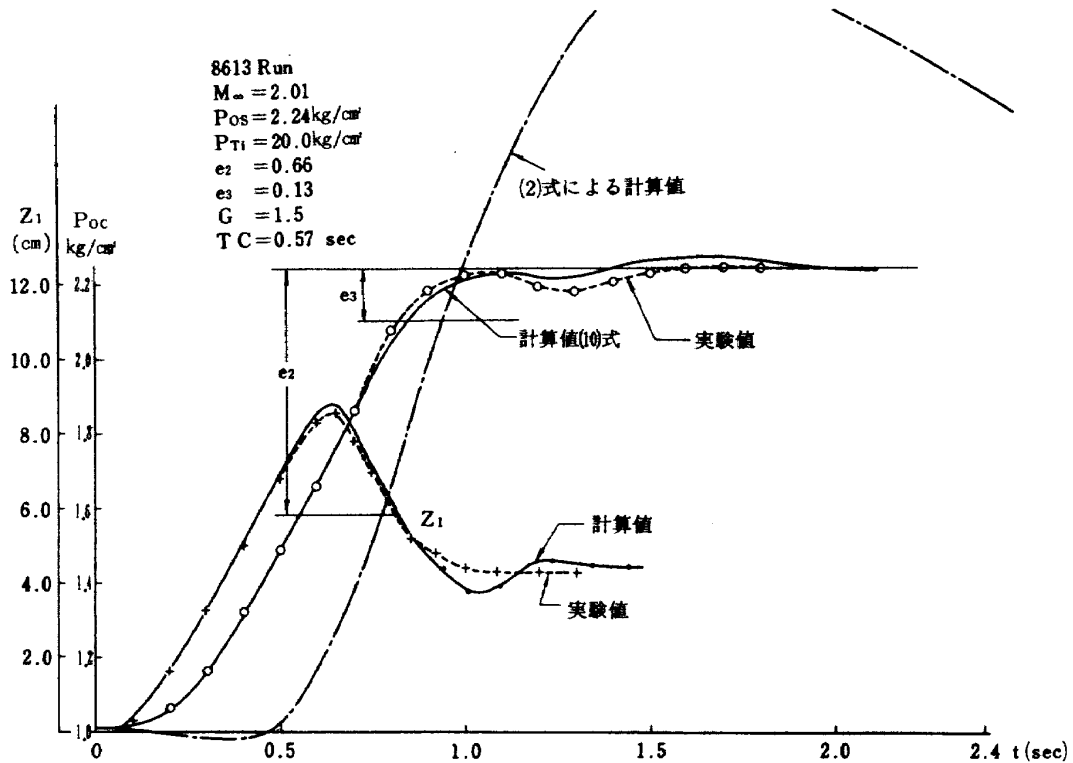


図19・a Poc, Z1の実験値と計算値の比較

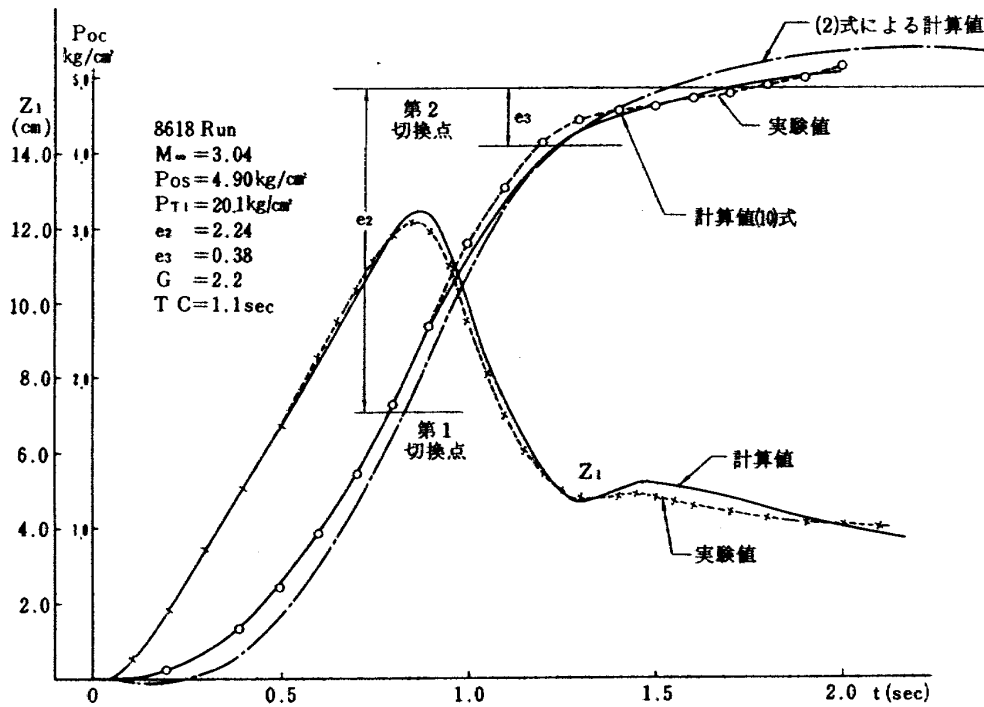


図19・b Poc, Z<sub>1</sub>の実験値と計算値の比較

問題点を明らかにし、デジタル調節器の設計資料を得た。

図20に制御パラメータを種々かえたときの応答例を示す。各応答を比較するために、一部パラメータを変えた一群の応答を5種類(M=3.0では3種類)縦軸と横軸を少しづつ移動して重ね合せた。図下の弁Z<sub>1</sub>の応答はA群に対応する。A群はe<sub>2</sub>以外のパラメータを一定にしておいて、e<sub>2</sub>を最適値の前後で変えた応答、B群は時定数TCを1/2の値にした応答、C群はゲインを2倍の値にした応答、D群は貯気槽圧力を変えた応答、E群はe<sub>3</sub>を変えた応答である。これらのシミュレーションの結果より云えることは

- (1) e<sub>2</sub>の最適値は図21に示すようになる。
- (2) e<sub>2</sub>は最適値より小さいとP<sub>OC</sub>はオーバーシュートぎみになり、大きいとアンダーシュートぎみとなる。(A群参照)
- (3) e<sub>2</sub>の最適値からのずれが±5%以内ならばP<sub>OC</sub>応答のオーバーシュートまたはアンダーシュートは±10%以下となる。(A群参照)
- (4) e<sub>3</sub>の最適値はP<sub>OS</sub>の4～5%が望ましい。(図21参照) e<sub>3</sub>をこの値より小さく与えるとき、e<sub>2</sub>も最適値より小さな値にかえないと最適応答が得られない。しかし応答への影響はe<sub>2</sub>の方が大きい(図20 aのA群とE群の比較)
- (5) OC方式ではG, TCを大巾に変えてもオーバーシュートに影響なく、整定時間を短縮できる。これはOC方式の最大の利点である。(A群とB, C群の比較)

(6) 貯気槽初期圧力P<sub>T1</sub>の影響は顕著に現われる。(D群参照) P<sub>T1</sub>が1.0 kg/cm<sup>2</sup>低下するごとにe<sub>2</sub>を2.5%小さい値にするとよい応答が得られる。

(7) 貯気槽初期温度による影響は顕著でない。

(8) PI制御領域の定常偏差を同一にしたとき(GとTCを同一とする)のOC, PIC, VLCの各方式による応答はA群に示すように大きな違いが生じる。OC方式はオーバーシュートも、整定時間も小さくなる。

(9) e<sub>3</sub>の最小分解能は少なくとも0.01 kg/cm<sup>2</sup>以下とする必要がある。

### 3.4 デジタルコントローラの製作

#### 3.4.1 最小分解能とサンプリングタイムについて

デジタルコントローラを製作するにあたり、最小分解能をいくりにするかと云うことは精度と製作費の両面から重要な事柄である。精度を高めるには最小分解能を高めることが必要であるが系のノイズレベル以下にいくら高めても意味がない。ただし、データを統計処理をする場合は別であるが、この場合計算時間が長くなり、サンプリングタイムに制限が加わる。ここでは製作費を廉価におさえるために統計処理は行なわないことにした。したがって最小分解能は風洞起動時の圧力変換器の出力に現われるノイズと同程度に決めた。図22に示すようにP<sub>OC</sub>のノイズはマッハ数2.0でP-P値で0.01 kg/cm<sup>2</sup> マッハ数3.0で同じく0.02 kg/cm<sup>2</sup>程度である。したがって、



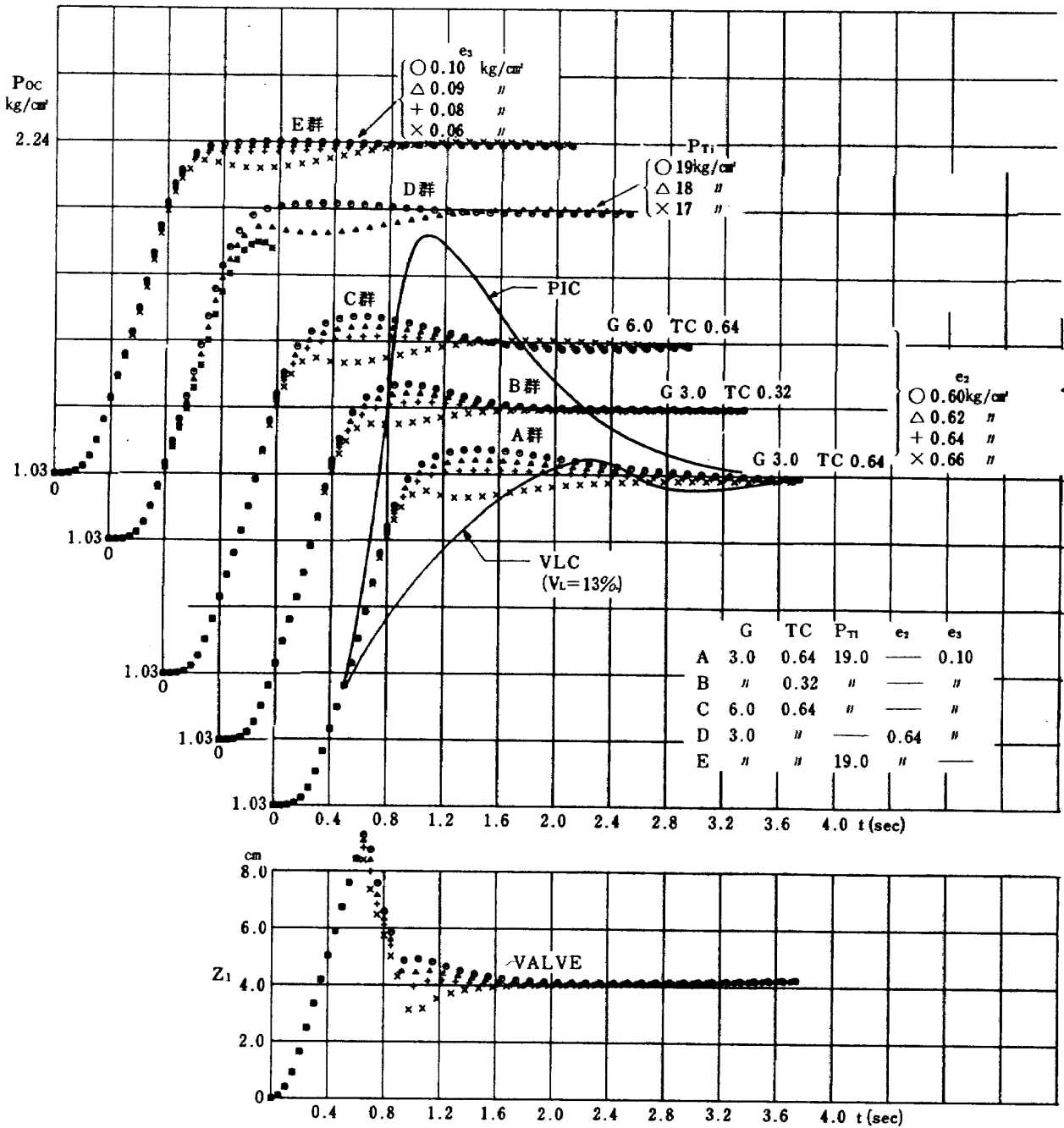


図20・a デジタルシミュレーションによる P<sub>OC</sub> の応答 M<sub>∞</sub>=2.0, P<sub>0S</sub>=2.24 kg/cm<sup>2</sup>

最小ビット数を 0.01 kg/cm<sup>2</sup> とした。また、当風胴の集合胴設定圧力 P<sub>0S</sub> は超音速気流を得るために図23に示すように 1.55~12.5 kg/cm<sup>2</sup> の範囲をとる。P<sub>0</sub> の変換器の入力はオーバーシュートを考慮しても 20 kg/cm<sup>2</sup> を越えることはない。そこで12BitのAD変換器を使うことにした。

サンプリングタイムは短い方がよい制御が得られる。しかし、むやみに短くすることは早い演算速度のコンピュータを使わなければならないと製作費が高くなる。制御対象としている集合胴圧力がゆるやかに変化するときにはサンプリングタイムも当然長くてよい。一番、小さざみにサンプリングする必要のある部分は起動初期の過渡応答の部分である。おもなマッハ数について起動時の P<sub>OC</sub>

と  $\frac{dP_{OC}}{dt}$  をプロットすると図24に示すようになる。低いマッハ数で  $\frac{dP_{OC}}{dt}$  の最大値は 2.0 kg/cm<sup>2</sup> sec程度、高いマッハ数では 6.0 kg/cm<sup>2</sup> sec程度である。そこでサンプリングタイムを 10 msec とすると 1 サンプルの間に变化する量は M<sub>∞</sub>=2.0 で 0.02 kg/cm<sup>2</sup>, M<sub>∞</sub>=3.0 で 0.06 kg/cm<sup>2</sup> となる。この値は前記の最小分解能 0.01 kg/cm<sup>2</sup> とほぼ一致し、少なくとも 10 msec 以下することが望ましい。しかし、後に記述するようにクロック周波数 1 MHz 8 Bit 並列処理のコンピュータを使うとデータの処理時間が 7 msec 程度かかり、この面からもサンプリングタイムは 10 msec が妥当な値となる。

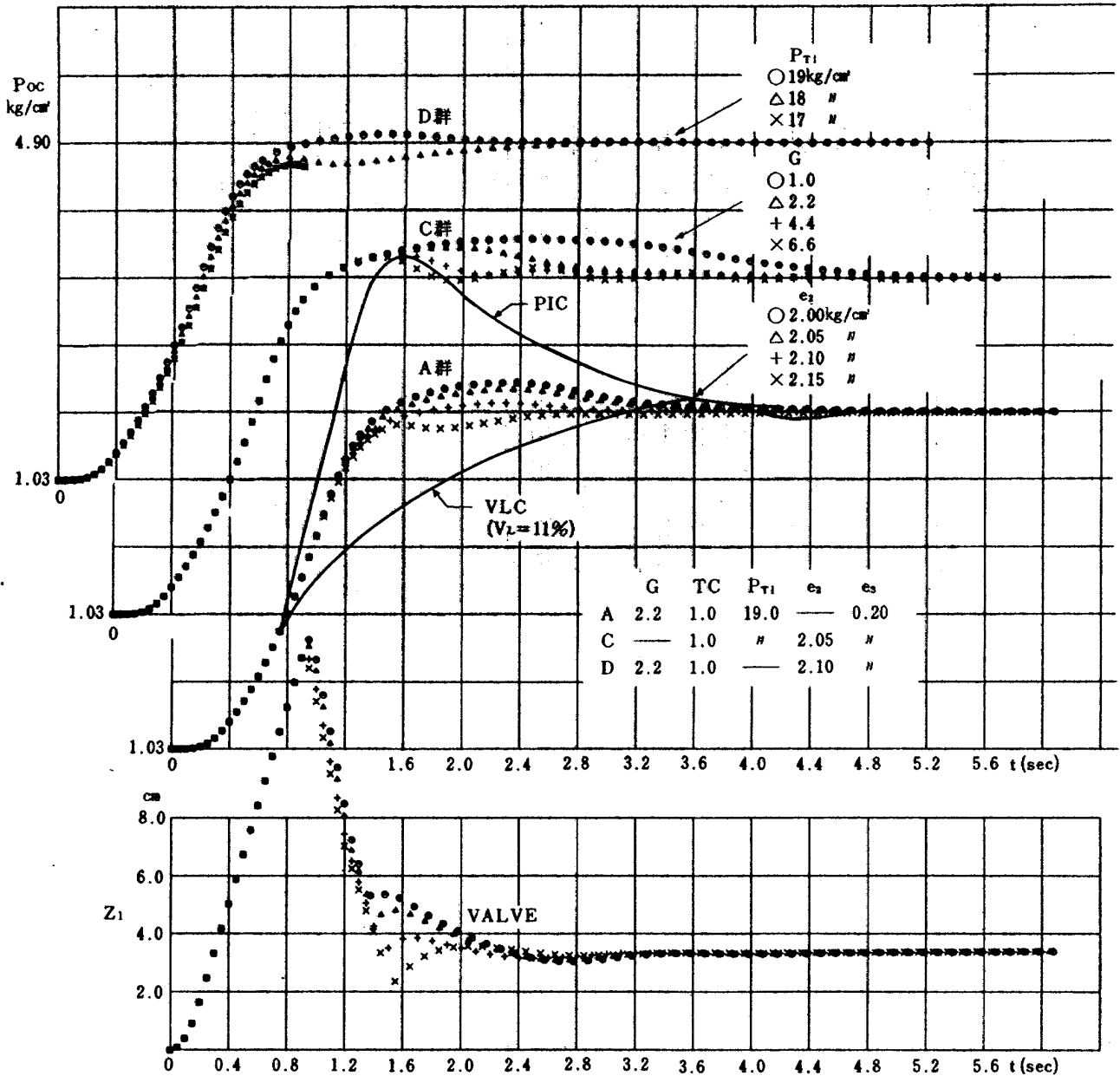


図20・b デジタルシミュレーションによる  $P_{OC}$  応答  $M_\infty=3.0$ ,  $P_{OS}=4.90 \text{ kg/cm}^2$

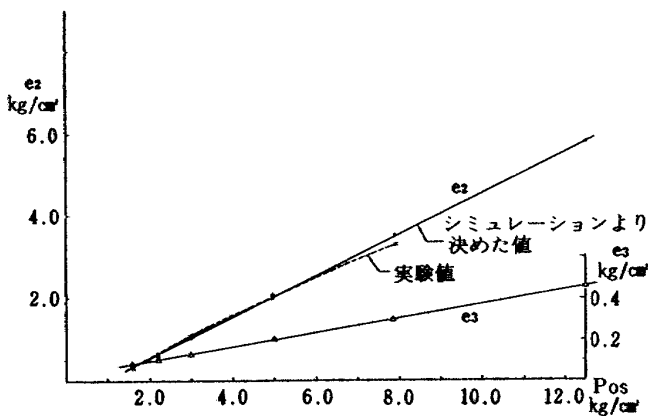
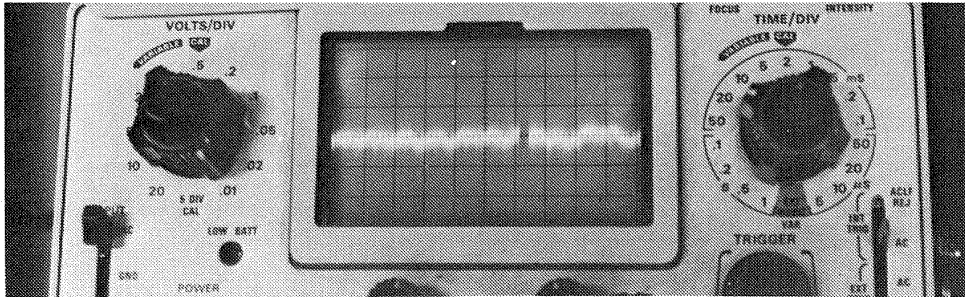


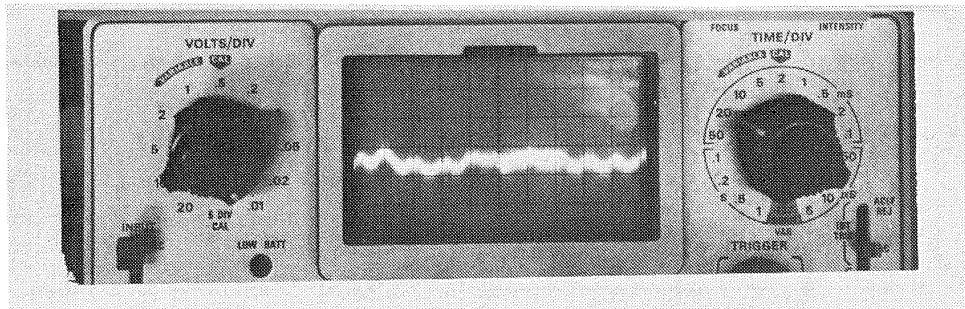
図21  $e_2$ ,  $e_3$  と  $P_{OS}$  の関係

### 3.4.2 デジタルコントローラへのデータ処理

コントローラを設計するにあたり操作手順を出来るだけ簡単化し、操作ミスをなくすようにつとめた。図25にデータ処理の原理図を、写真1にコントローラの全体写真を示す。制御方式はOC, VLC, PICの3方式とした。ただしPICはVLCの弁開度値  $V_L$  を100%に設定することにより可能であるから制御方式の選択スイッチはOC, VLCの2種類となる。風洞起動前の操作手順は図25に示すように、①ノズルマッハ数設定装置に連動している18通りのマッハ数のうちから1つを選択する。②  $P_{OS}$  の割増率を Normal, 10% up, 50% up, 100% up の4通りのうちから1種類を選択する (Normal  $P_{OS}$  とは起動に必要な最低限の圧力を云い、必要に応じ割増圧力で実験できるようにした)、③制御方式OC,



8733 Run  $M_\infty=2.0$   $P_0=2.24 \text{ Kg/cm}^2$   
 P - P 値で  $0.01 \text{ kg/cm}^2$



8728 Run  $M_\infty=3.0$   $P_0=4.9 \text{ Kg/cm}^2$   
 P - P 値で  $0.02 \text{ kg/cm}^2$

図22 集合胴圧力信号のノイズレベル

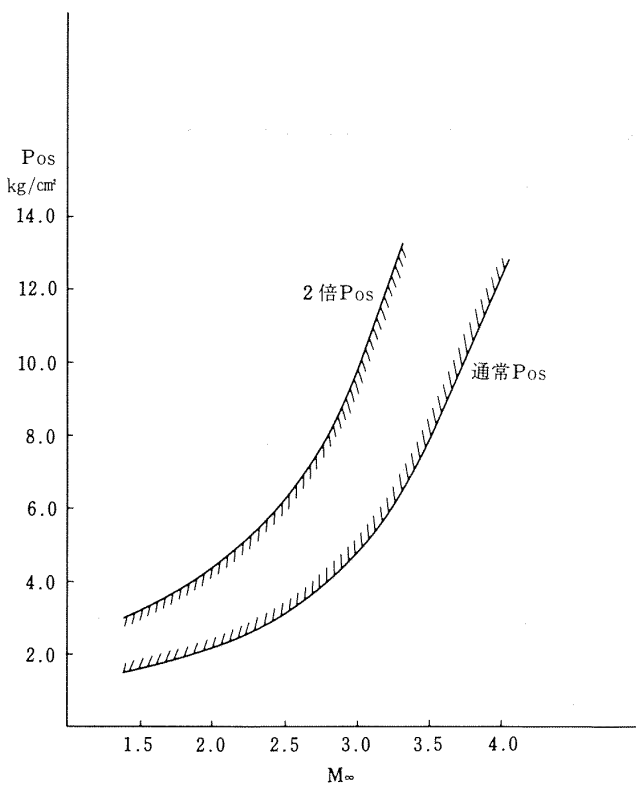


図23 設定圧力範囲

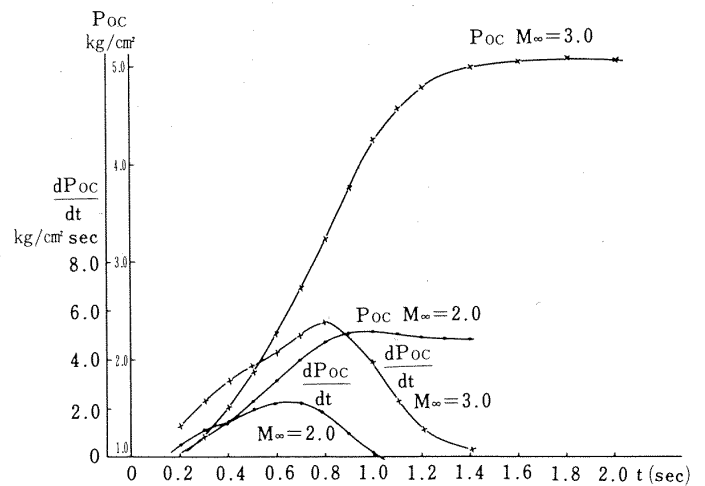


図24  $P_{oc}$ 及び $\frac{dP_{oc}}{dt}$ の関係

VLCのいずれかを選択する。以上3種類の選択スイッチを操作することにより、制御に必要なパラメータをす

べてメモリーから読み出すことができる。

入力信号は  $P_{oc}$ ,  $P_T$ ,  $V_F$  の3種類で12Bit・A/D変換器を通して取り込む。データ処理は、1サンプリングごとに図に示す偏差圧 ( $P_{os} - P_{oc} = e_1$ ) を計算し、あらかじめ与えられた  $e_2$ , または  $e_3$  と比較しながら表1に示す操作信号を出す。これらの操作量判別のフローチャートを図26に示す。なお  $P_T$  は貯気槽圧力  $P_T$  の低下によるゲイン補正量であり、図32の左下に示す函数発生器を通し

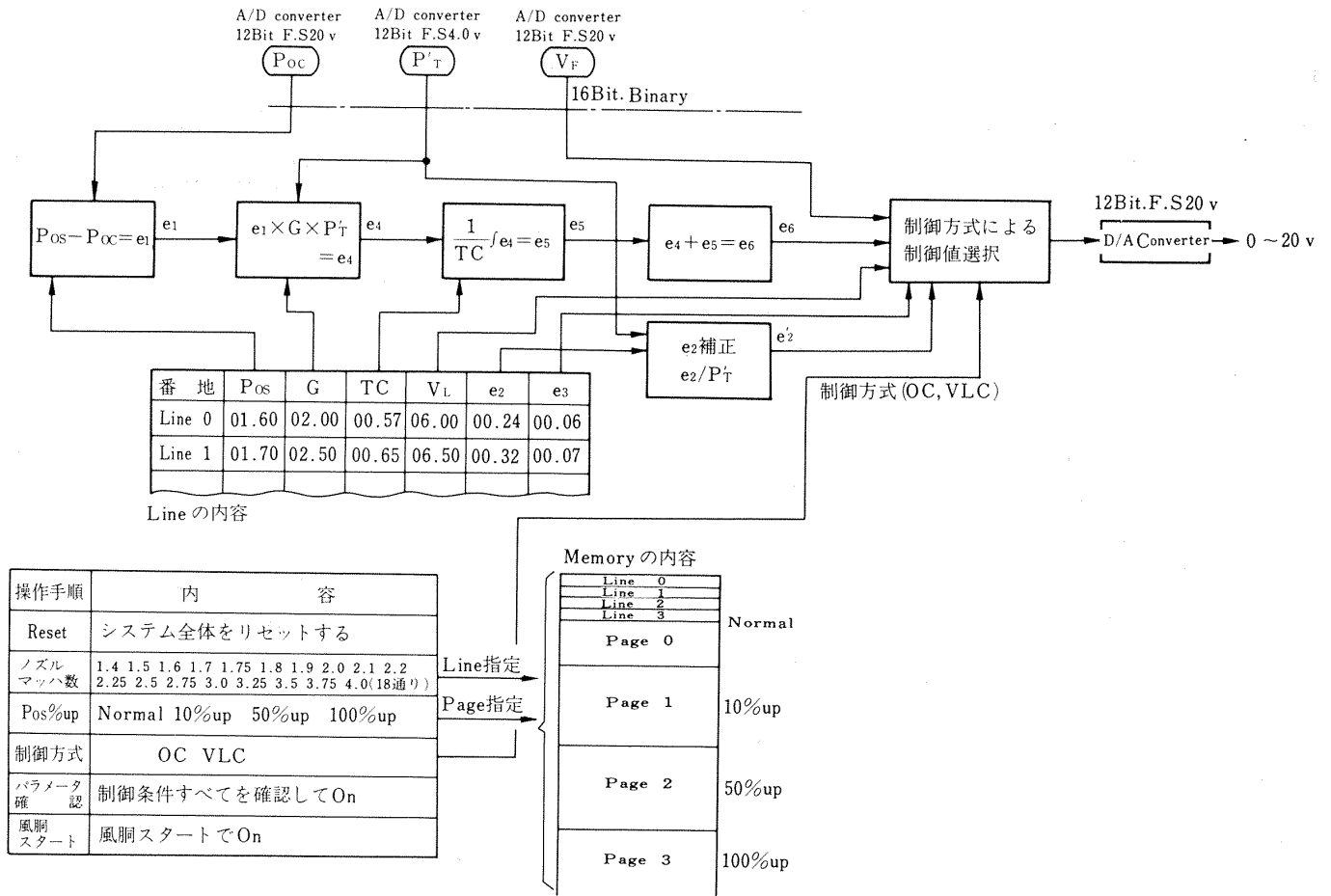


図25 デジタルコントローラの詳細図

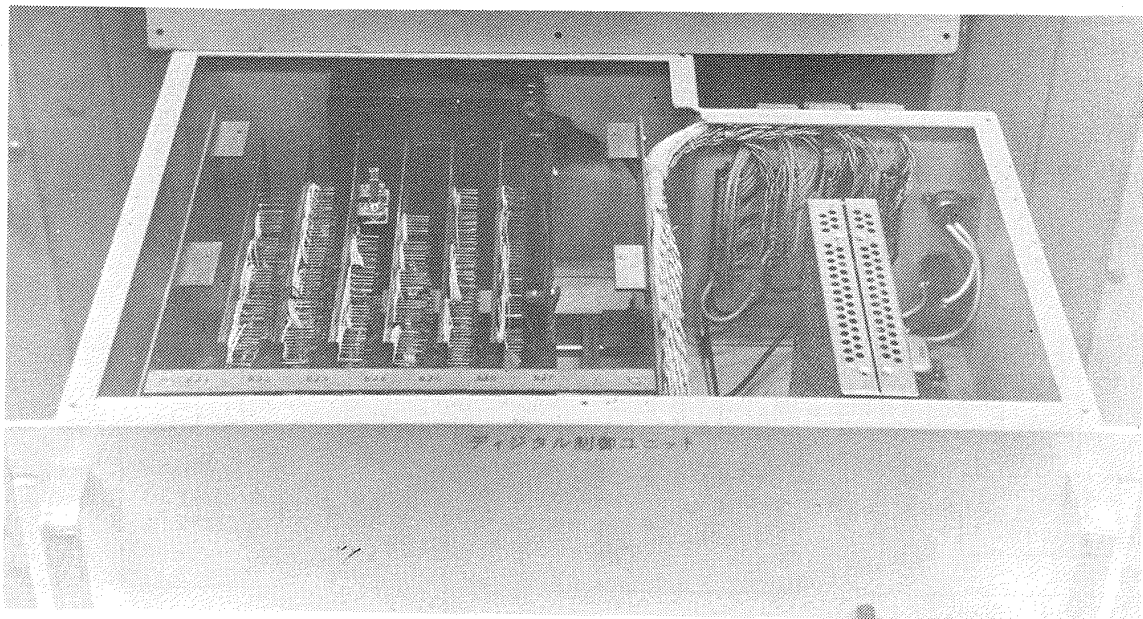


写真1 デジタルコントローラ

た後の値である。表1で $\dot{e}_1=0$ の条件とは、 $e_2$ の値が適正值より大きすぎて、第一切換点が早まり、 $e_1$ が0とならない場合( $P_{oc}$ が目標値に達しない場合)である。このときは $\dot{e}_1 (= \frac{de_1}{dt}) = 0$ でPI制御に切換えることを示す。

前記のデータ処理機能を持たせたマイクロコンピュータのブロックダイアグラムを図27に示す。マイクロコンピュータは表2に示す機能を有するMotorola社製MC6800を使い、RAM(Random access memory)に8

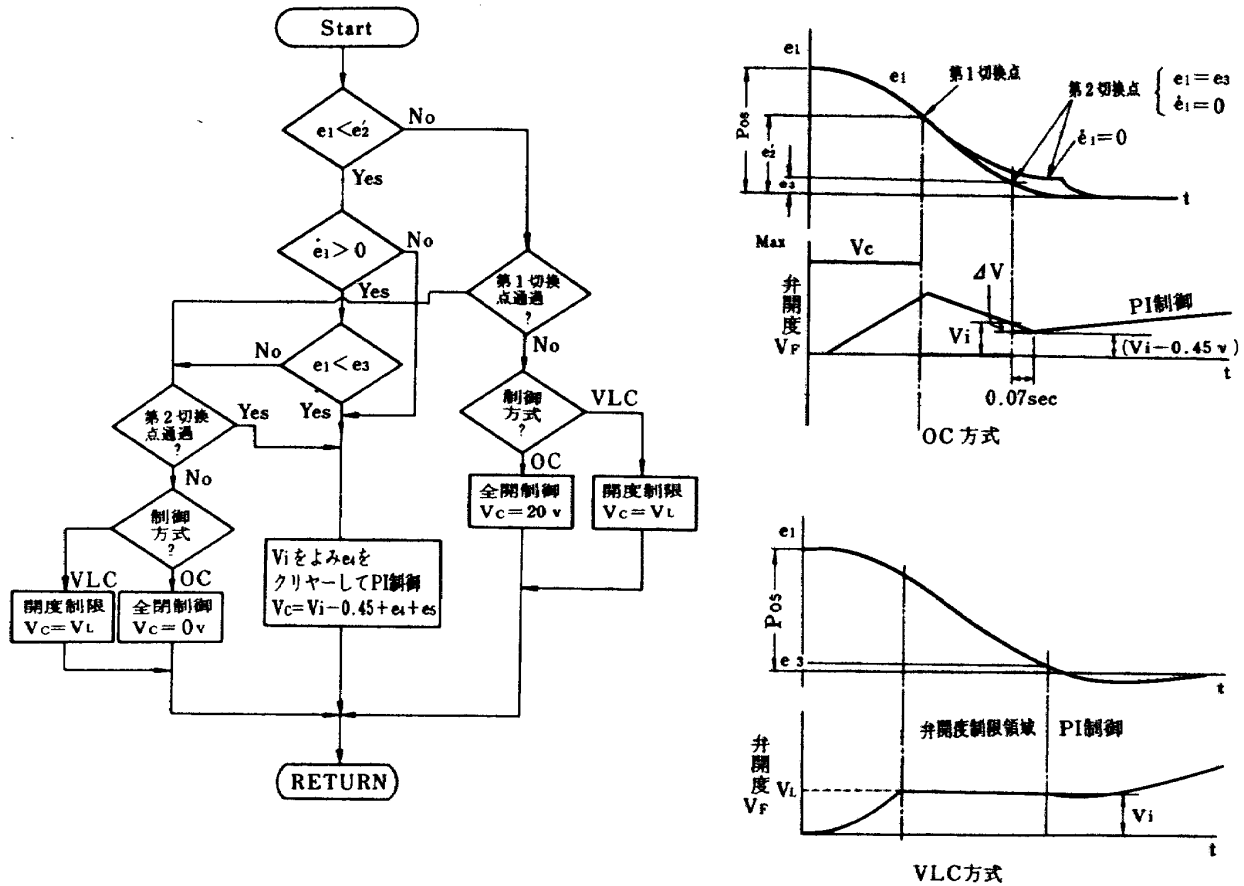


図26 操作量判別フローチャート

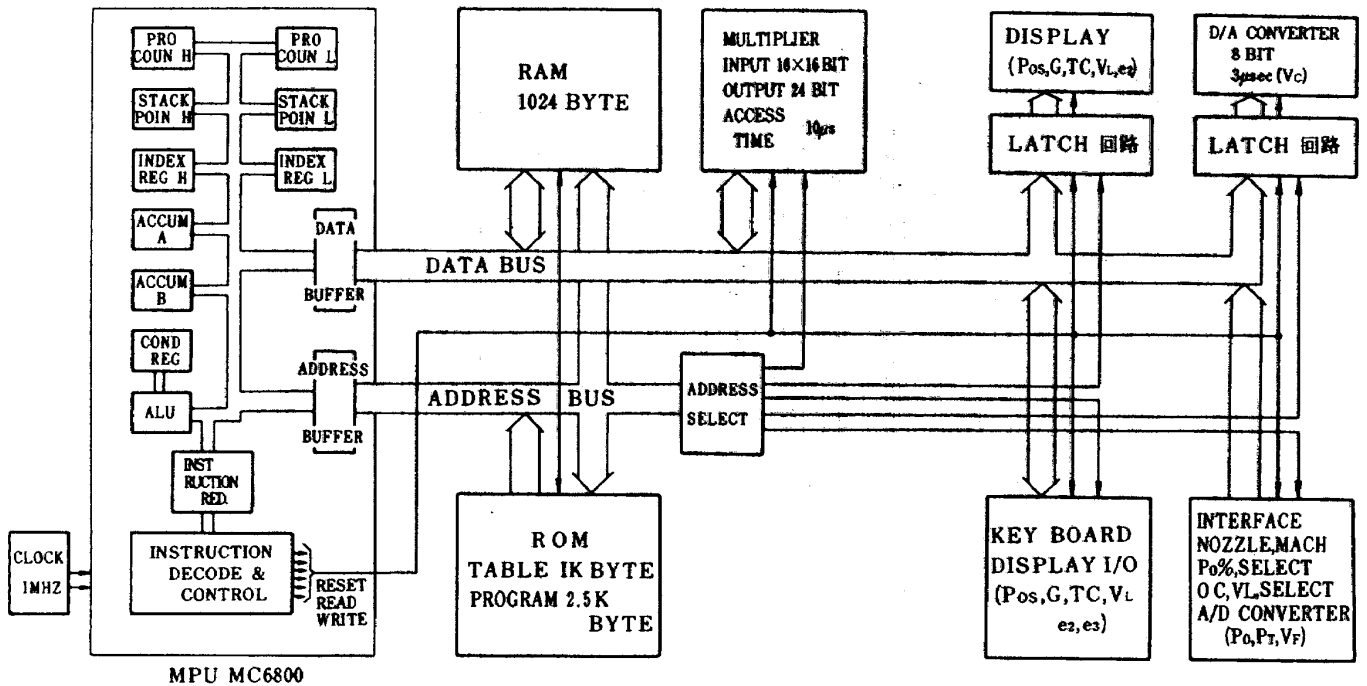


図27 デジタルコントローラ, ブロックダイアグラム

Bit×1KByte, ROM (Read only memory)に 8Bit × 3.5 KByte を設け, さらにデータ処理の乗算のみを受けもつ Input 16×16 Bit, Output 24 Bit アクセスタ

イム 10µsの乗算機を特別に設けた。通常使用する18通りのマッハ数と各マッハ数ごとに4通りのPosで合計72通の実験ケースの制御パラメータをROMに記憶させて

表 1

	制御条件	制御内容	出力信号
OC 制 御	$e_1 > e'_2$	全開制御	20 v
	$e_1 \leq e'_2$	全閉制御	0 v
	$e_1 > e'_3$		
	$e_1 \leq e_3$ $\dot{e}_1 = 0$	PI 制御	$e_6$
VL 制 御	$e_1 > e_3$	開度制限	$V_L$
	$e_1 \leq e_3$	PI 制御	$e_6$
	$e_1 = 0$		

表 2 マイクロコンピュータ仕様  
品名 Motorola MC 6800

8 Bit 並列処理
双方向性 Data bus
16 Bit Address
72 命令可変長
Clock 1MHz
最小命令実行時間 2μs

いる。

パラメータの一部を変更したい場合が生じたときは図 27, 写真 6 に示すキーボードで入力できる。この値はキーボードに付いている表示板に表示して修正値を確認することができる。入力信号は  $P_{oc}$ ,  $P'_T$ ,  $V_F$  の 3 種類を 12Bit の A/D 変換器で 2 ward に分けて取り込み、出力信号は 12Bit の D/A 変換器を通してアナログ量で取り出している。

### 3.4.3 デジタルコントローラのプログラム

プログラムのフローチャートを図 28 に示す。システムのリセットは電源の投入か、運転制御監視盤のリセット S.W を操作することより行なわれる。リセット動作は、Working Area Clear, Out put 0 set, Flay sw off, A/D Reset など、すべての初期設定を行なう。サンプリングタイムは前記したように 10 msec と決めてあるので 10 msec ごとに IRQ (Interrupt Request) 信号が入りプログラムが実行される。制御状態により 4 本のプログラム、すなわち①操作モード、②制御前処理モード、③制御モード、④操作ミスモードのいずれかが選択されて実行される。キーボード (K/B) の入力と表示及び制御パ

ラメータの選択と表示はどのモードでも行なえるようにモード選択の前に入れてある。

システムはイニシャライズすると次のサンプリングタイムで操作モードに入る。そして (1) Pos% (Normal 10% up, 50% up, 100% up) が選択されているか、(2) ノズルマッハ数 (18 通りのうちより 1 つ選択する) が選択されているか、(3) K/B でパラメータ変更があるか、(4) 制御方式 (OC と VLC) が選択されているか、等を判別し、Yes ならメモリ番地を指定してパラメータをレジスタに書き込む、No ならこの部分をパスして次に進む、次にパラメータ設定確認 SW が On か (この確認操作は起動準備作業の最終段階で行なうもので、運転制御監視盤の実験準備確認 SW で行なう)、Yes なら設定確認 Flag をたて、パラメータ設定が完了しているか、否かを判別し、Yes なら次に進み、No ならミスモードに入り、エラーコードを表示する。確認 SW が押される前は確認 SW Off → Pos%, Nozzle M 設定済 → テーブル転送 → 起動 Off → IRQ で元にもどり、このルートで 10 msec ごとにくりかえしている。さてパラメータ設定完了が Yes なら、起動 SW に入り、Off なら RTI にもどり、On なら再度、Pos%, Nozzle M, 制御方式、設定確認をチェックして Yes なら制御前処理モードに入り No ならミスモードに行く。

制御前処理モードは、A/D コンバータをスタートさせパラメータ数値を BCD Code からバイナリーに変換し、貯気槽圧力  $P'_T$  の大きさにより  $e_2$  を補正し、制御モードに移る。Code 変換に時間がかかるため、この作業は 7 フレーム (70 msec) に分けて行なう。

制御モードはまず Pos,  $P'_T$ ,  $V_F$  の A/D コンバータをスタートさせ、データを読み込み図 25 に示す処理を行ない、制御量を決定して D/A コンバータに入れアナログ量で出力させる。この動作を 10 msec 間隔で風洞停止信号が入るまでくりかえす。この途中でレジスタがオーバーフローするか A/D コンバータが異常になると制御量をゼロにしてミスモードに入りエラーコードを表示する。停止信号が入るとイニシャライズ 2 を行ない計算機は最初の操作モードにもどる。操作ミスモードに入った場合はシステム・リセット操作により操作モードに入る。以上の制御モードに要する時間は 7 msec を必要とし、サンプリングタイムの 10 msec という値は妥当な値である。

### 3.5 デジタルコントローラを使った風洞運転結果

図 29, 30 に OC 方式, PIC 方式, VLC 方式で制御したときの  $P_{oc}$  応答の 1 例を示す。図 29 の応答例①は  $e_2$  が最適値より小さ目の応答、②は少し大き目の応答、③

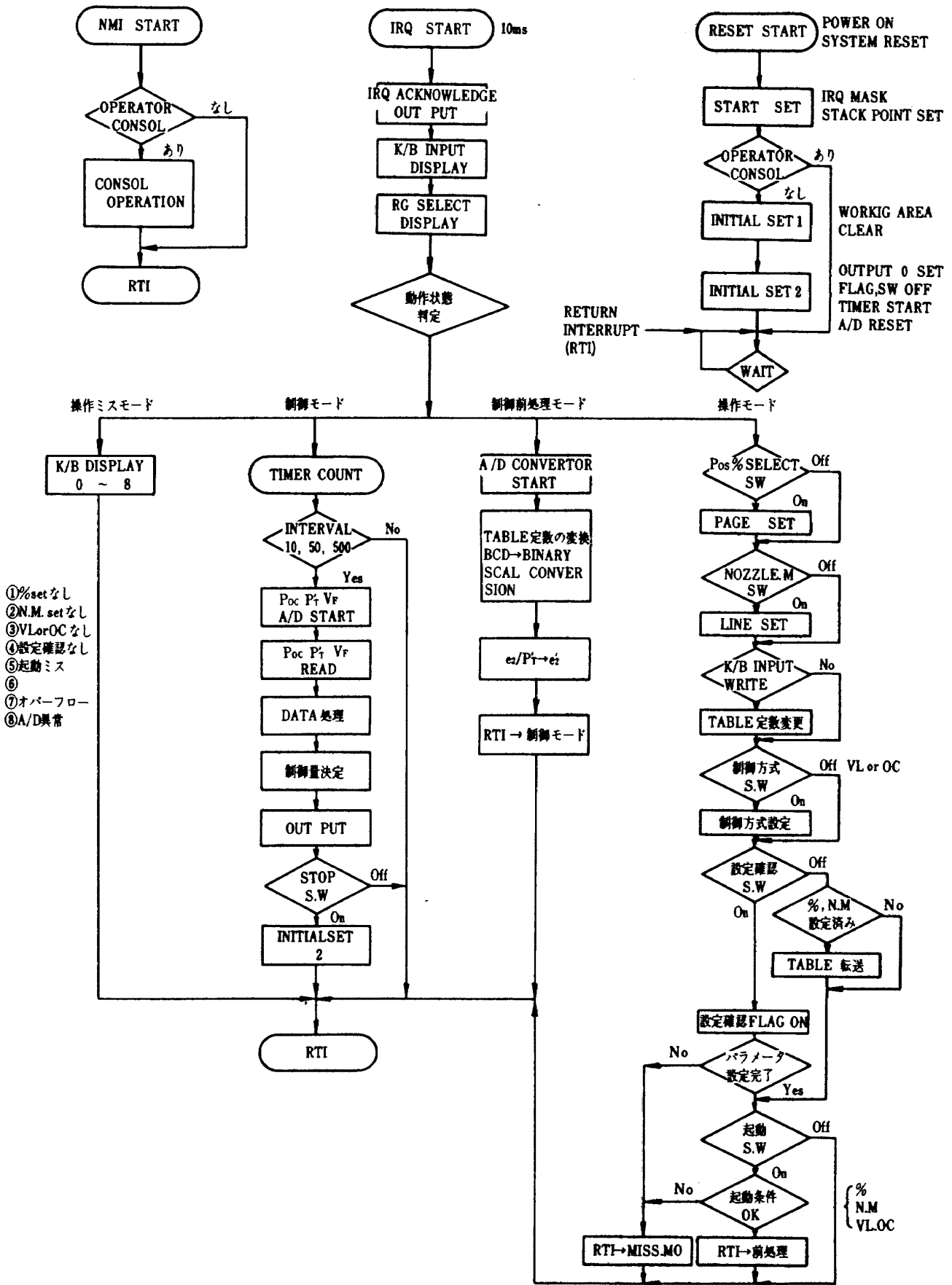


図28 デジタル制御プログラム フローチャート

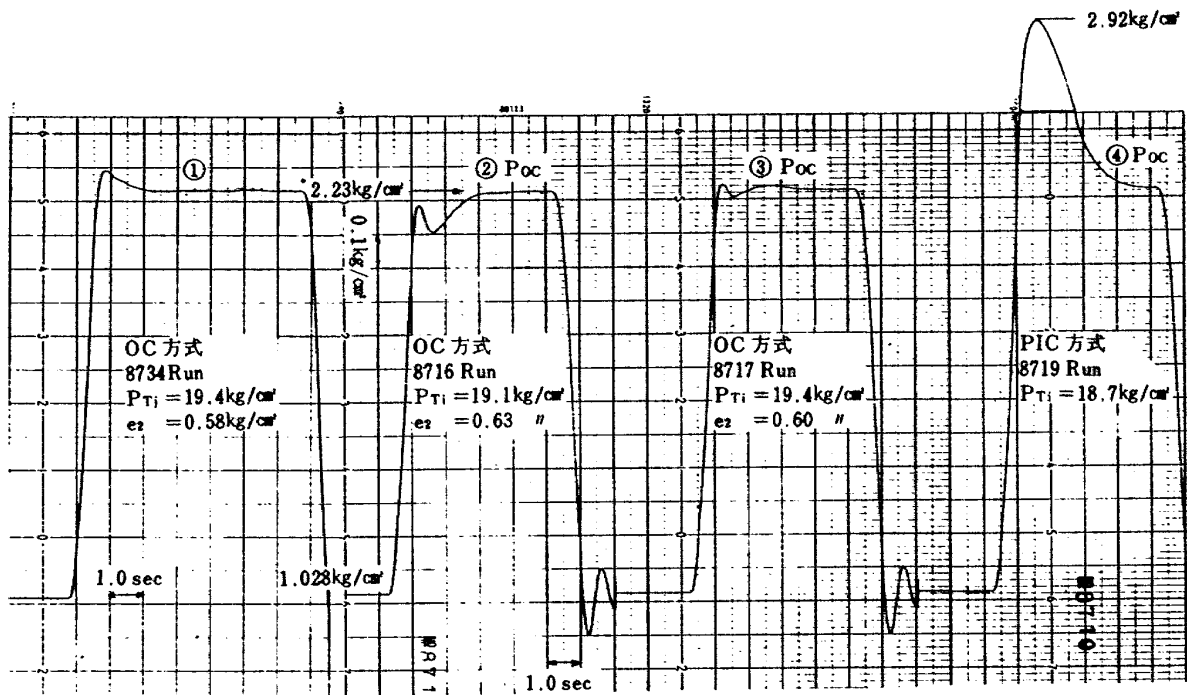


図29 Pocの応答実験結果 ( $M_\infty=2.0$ )  
 実験条件  $M_\infty=2.0$   $P_{0s}=2.24$   $e_s=0.10$   $G=2.0$   $TC=0.57$

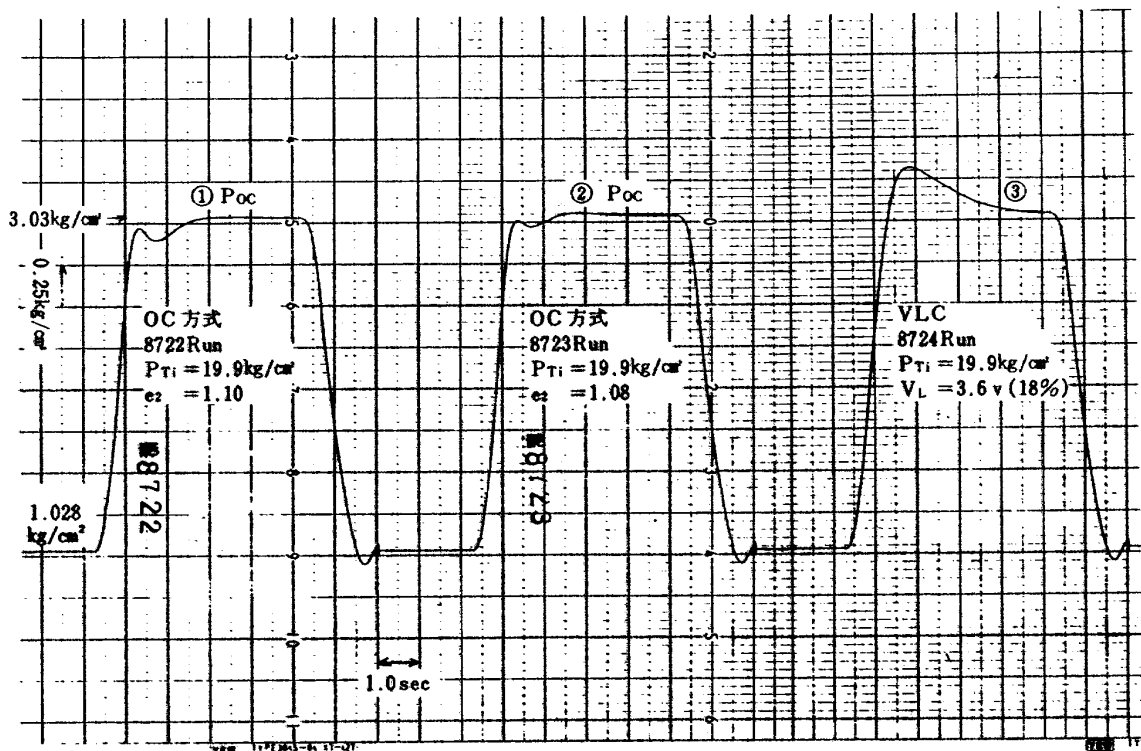


図30 Pocの応答実験結果 ( $M_\infty=2.5$ )  
 実験条件  $M_\infty=2.5$   $P_{0s}=3.04$   $e_s=0.13$   $G=2.0$   $TC=0.76$

はほぼ最適な応答である。また④はゲインGと時定数TCを①～③のケースと同じに設定したときのPIC方式の応答例である。図30の応答例はマッハ数の異なる場合で、右より① $e_s$ が最適値より大きい応答、②ほぼ最適応答、③GとTCを①、②のケースと同じに設定したときのVLC方式の応答である。全般的にデジタルシミュレシヨ

ンの結果とよく一致して、OC方式の優位性を確認できた。しかし、過渡応答の終了時(偏差が0となる付近)のPI制御への切換点で若干振動が生じ、理想的な応答を得ることのむずかしいことがわかった。この現象はデジタルシミュレーションでも現われたが、実風洞の方がより大きく振動することが明らかになった。また低マッハ



数の場合、 $e_2$  の  $0.01 \text{ kg/cm}^2$  の違いによる  $P_{oc}$  応答の影響が予想以上に大きいことが判明した。そこで、この原因を調べてみた。図31に  $e_2$ 、 $e_3$  と  $V_F$ 、 $P_{oc}$  の関係を示す。 $e_2$  の最適値の応答を実線(a)で示し、最適値より大き目の応答を鎖線(b)で、小さ目の応答を一点鎖線(c)で示す。 $e_2$  が大き目のときは第1切換点が  $t_b$  となり、最適点  $t_a$  より早くなる。当然弁も最適点より早く閉まり始め、 $P_{oc}$  の立ち上がりがゆるやかになる(応答 b)，すると  $e_3$  に到達する時点が遅くなり、弁は最適値よりますます閉方向

に進む。このため  $P_{oc}$  はアンダーシュートぎみとなる。ところが、 $e_2$  が最適値より小さ目になると第1切換点  $t_c$  は遅れ、弁も最適値より開きぎみになる(一点鎖線)，すると  $P_{oc}$  の立ちあがり之急になり、第2切換点が早まる。この第2切換点の  $V_i$  が P I 制御の初期値となるから、弁は開度の大きいところで P I 制御に切り換わる(応答 c) 結果として、ますますオーバーシュートぎみとなるのである。図29で  $e_2$  を  $0.02 \text{ kg/cm}^2$  かえただけで応答が大きくかわるのはこの理由による。実際マッハ数 1.5~2.0 で  $e_2$

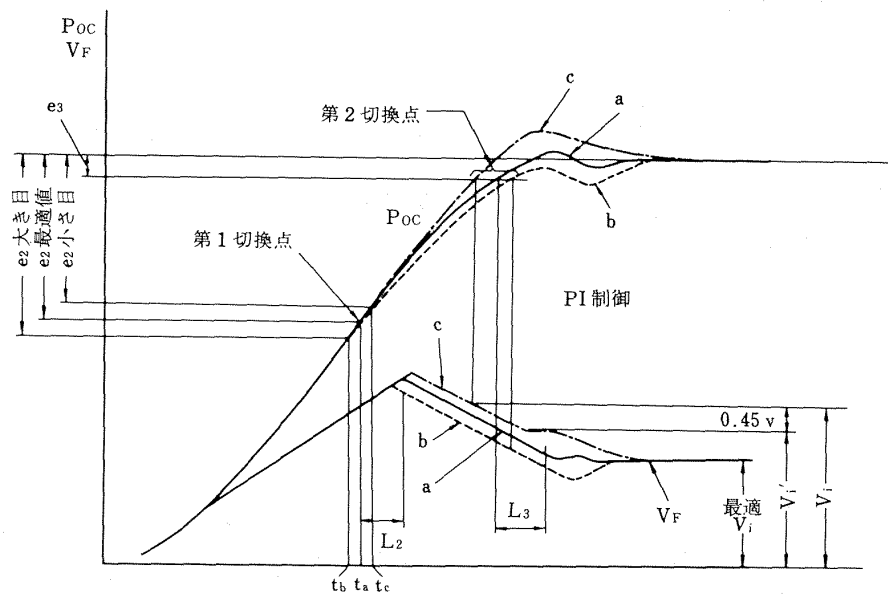


図31  $e_2$  のずれによる弁と  $P_{oc}$  の応答

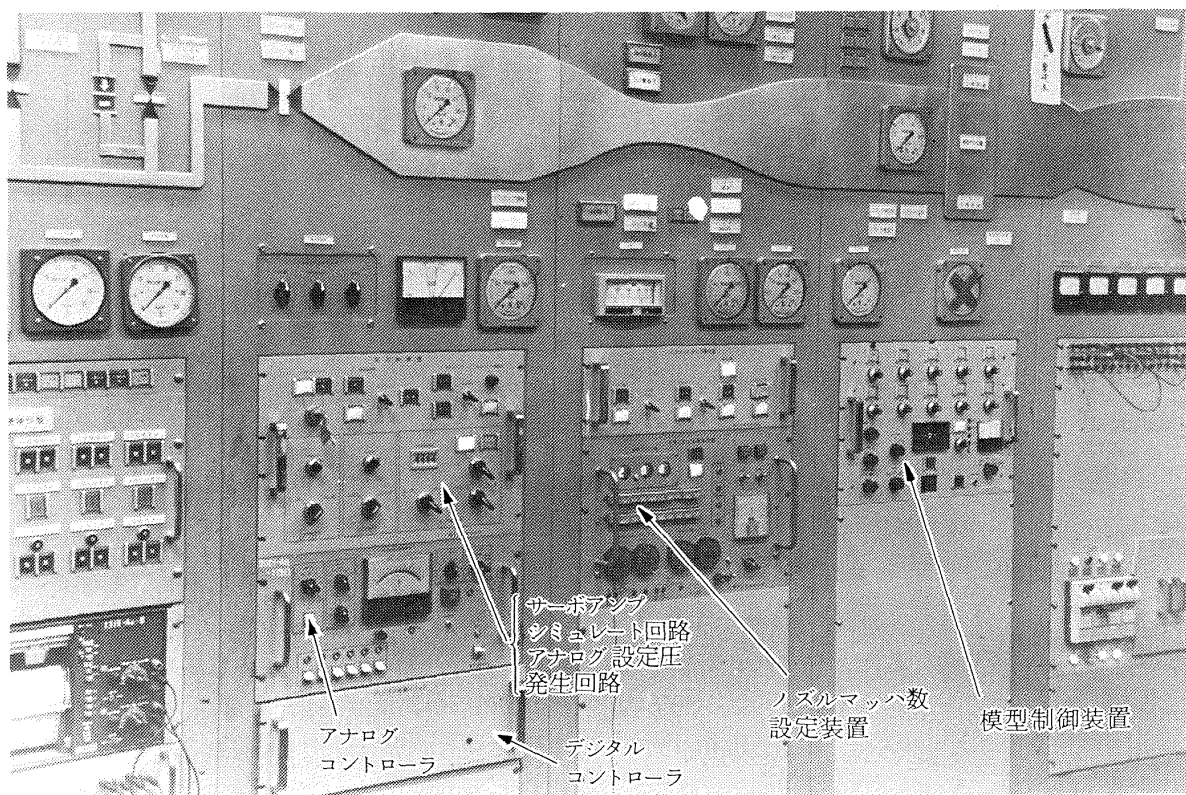


写真2 運転制御盤

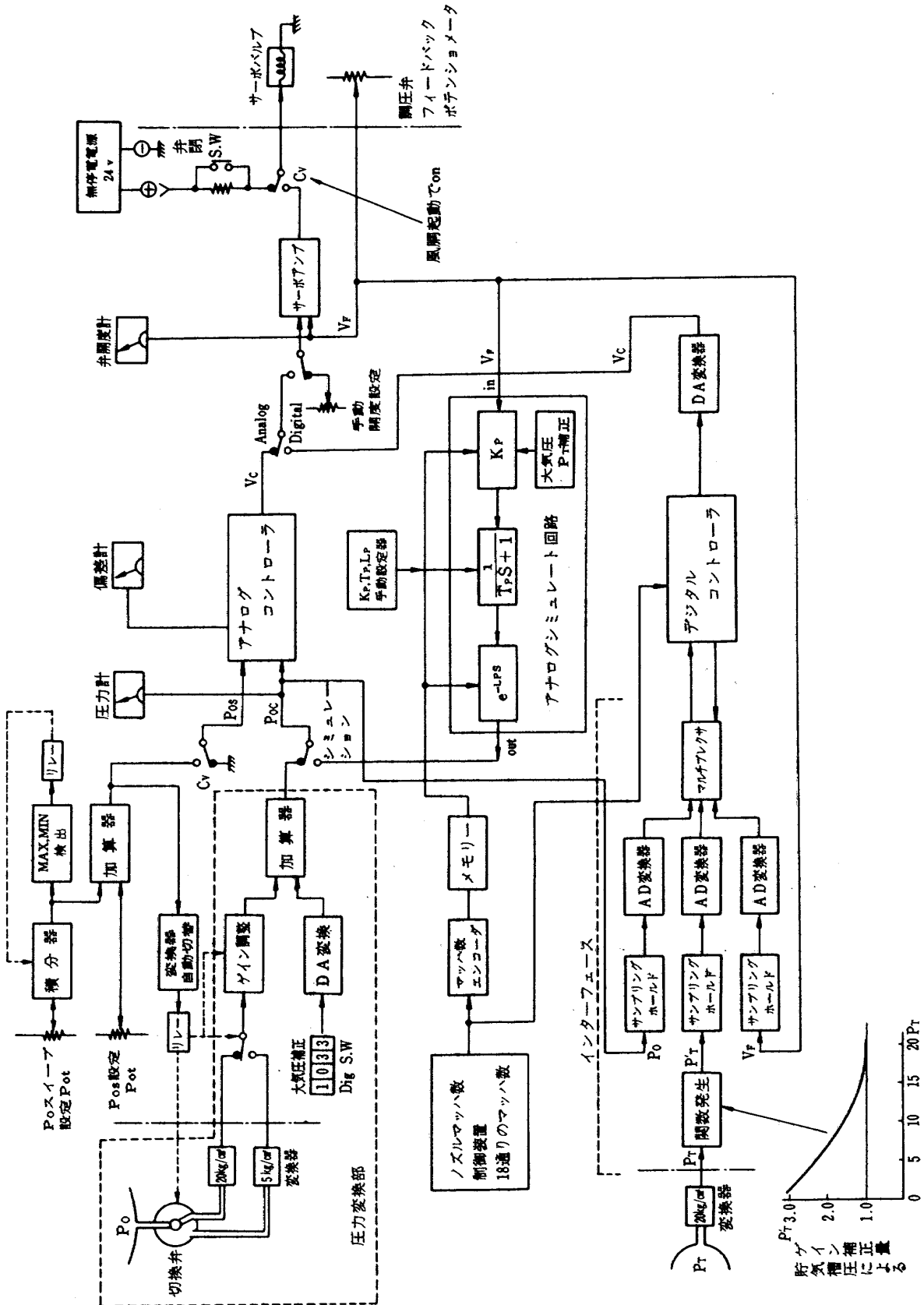


図32 Po圧力制御系とアナログシミュレート回路

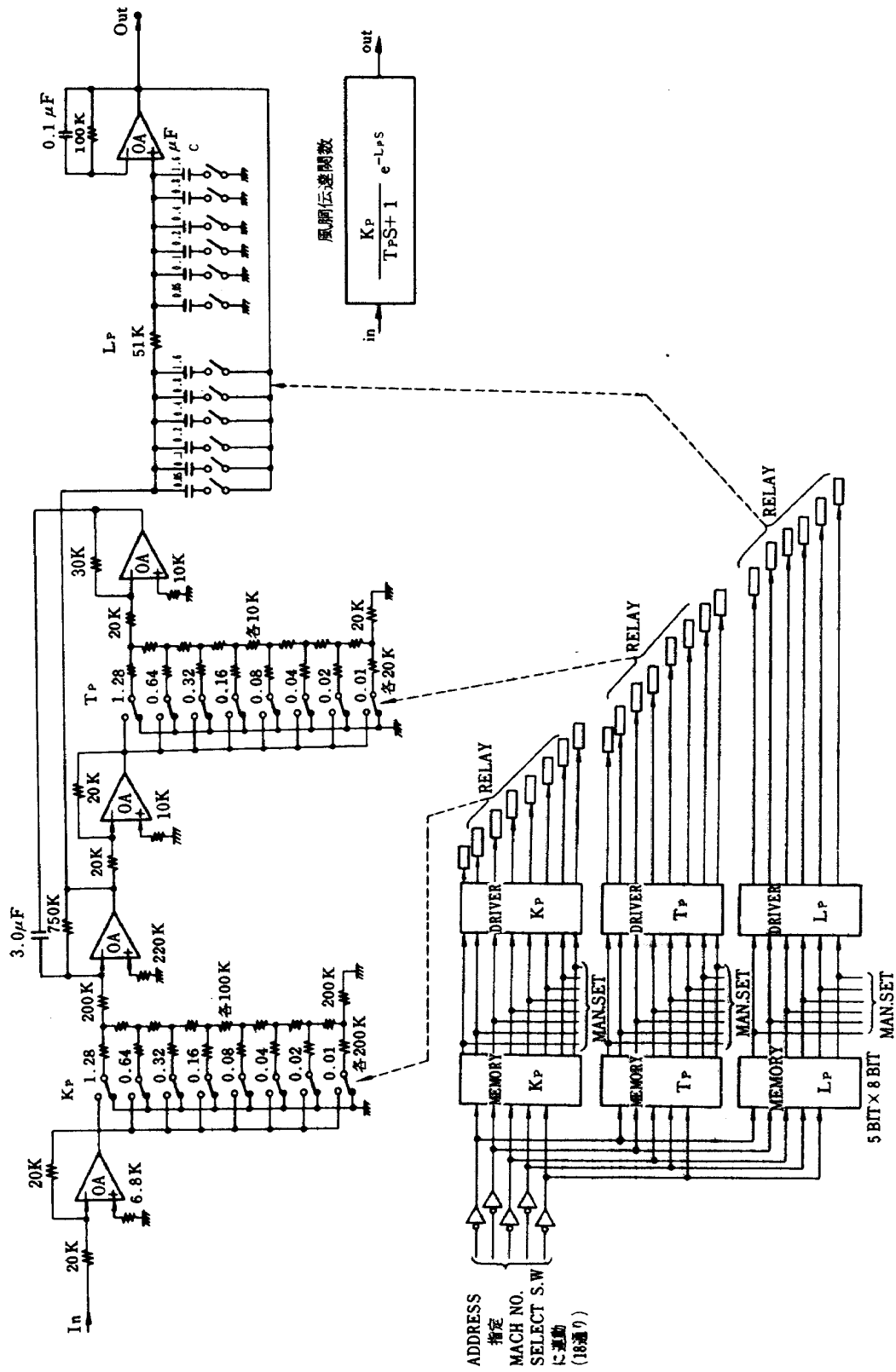


図 33 シミュレート回路

を最適値から±0.01変化すると応答 b から応答 c にステップ的に変化し、応答 a を得るのはなかなかむずかしい。一度 c (又は b) に変わるとそれから  $e_a$  を同じ数値 0.01 だけ小さく (又は大きく) しても応答はさほど影響はない。最適応答の P I 制御切換方法になお改良する余地がある。

### 3.6 アナログシミュレート回路

圧力制御系の構成機器の故障により、制御不能になったことは今までに何回か経験した。このようなとき、通常の数倍の流量が流れ、風洞各部や模型に過大な空気力が加わり、きわめて危険な状態となる。この構成機器の異常を未然に発見し、また制御パラメータの設定が適正か、否かを事前に知ることは風洞運転の安全上重要である。

制御系が正常に作動することを確認するためには、すべての構成機器が含まれることが望ましい。しかしシミュレーションのための付加機器が複雑になることは費用がかさむことと付加機器の故障による危険率が増加することを考えると回路は出来るだけ簡単にすることが望ましい。今回製作したシミュレート回路と制御機器の構成図を図32、運転制御盤の写真を写真2に示す。この回路でチェックできる機器はデジタルコントローラ及び A/D 変換器を含むインターフェース、アナログコントローラ、サーボアンプ、サーボバルブ、調圧弁、調圧弁フィードバックポテンシオメータ、等である(図32の左上の圧力変換部は含まれない)。

シミュレート回路は風洞の伝達関数を図32の枠内に示すように1次遅れとむだ時間で近似し、ノズルマッハ数制御装置で選択できるマッハ数(18通り)ごとに  $L_p$ ,  $K_p$ ,  $T_p$  の値を実験的に求め、これを ROM に記憶させて、選択スイッチを操作することにより、シミュレート回路に

転送する方法をもちいた。メモリーを含むシミュレート回路図を図33に示す。このシミュレート回路は実際の風洞伝達関数をどのくらい正確に近似しているか、が問題である。著者等が以前に行なった報告書で明らかにしているように、貯気槽圧力 19~20 kg/cm<sup>2</sup> 付近で起動時の過渡応答のみに着目すれば比較的よい近似が得られる。この回路を使った  $P_{oc}$  の応答と同一制御パラメータによる実風洞の  $P_{oc}$  応答を図34に示す。制御系の構成機器の異常と制御パラメータの設定値の適否をチェックすることを目的とするなら、この程度の近似で十分である。このシミュレート回路は比較的簡単であるが風洞運転の安全性と信頼性の向上に大きな効果のあることが認められた。

### 4. マッハ数設定装置の改良

ノズルのマッハ数設定はマッハ数 1.5~4.0 の範囲で任意のマッハ数を出し得るように、厚さ 25mm の鋼製可撓板を 44 個の油圧ジャッキで制御している。建設当時、このノズルを所定のマッハ数へ変更する作業に、メカニカルロック上、下操作員 2 人、カム回転角監視員 1 人、制御室の運転盤操作員に 2 人、合計 5 人を必要としていた。それをメカニカルロック着脱操作と、ノズルのマッハ数設定操作を 1 人で制御室より行なえるように改造した。

ノズル部と第二スロート部の構造図を図35、36に示す。また、ノズルマッハ数設定装置の原理図を図37、写真3に示す。この設定装置は大きく分けて 2 つの機能を持っている。第一の機能はノズルプレートのメカニカルロックの自動着脱操作、第二の機能はノズルマッハ数自動設定操作である。まず第一の機能から説明する。ノズルプレートは風洞の上面と下面から上下方向に油圧シリンダーで支えられている。図37に示すようにカム、パイロ

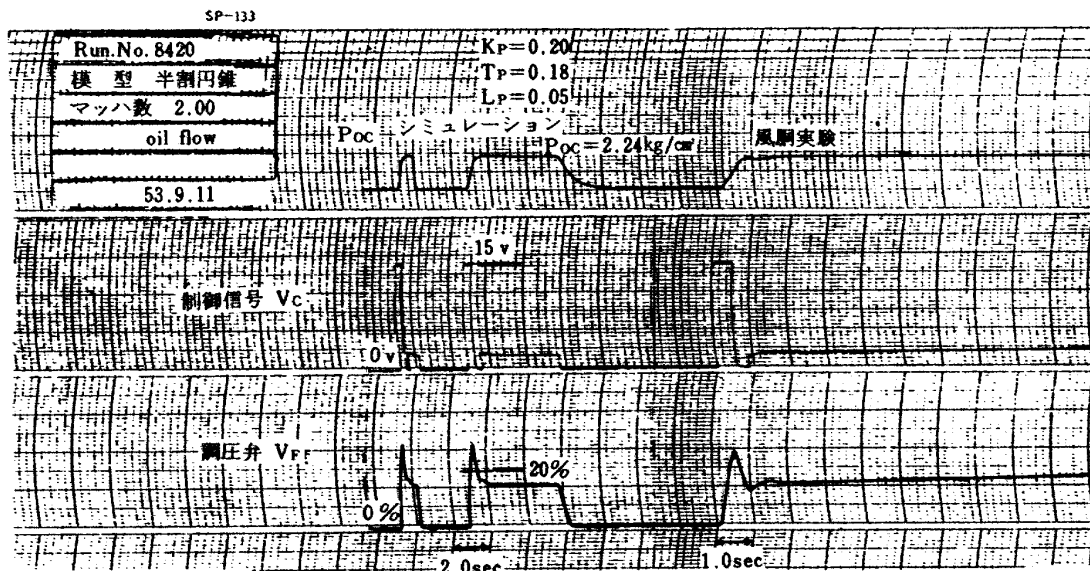


図34  $M_{\infty}=2.0$  における  $P_{oc}$  シミュレーションと実験値の比較

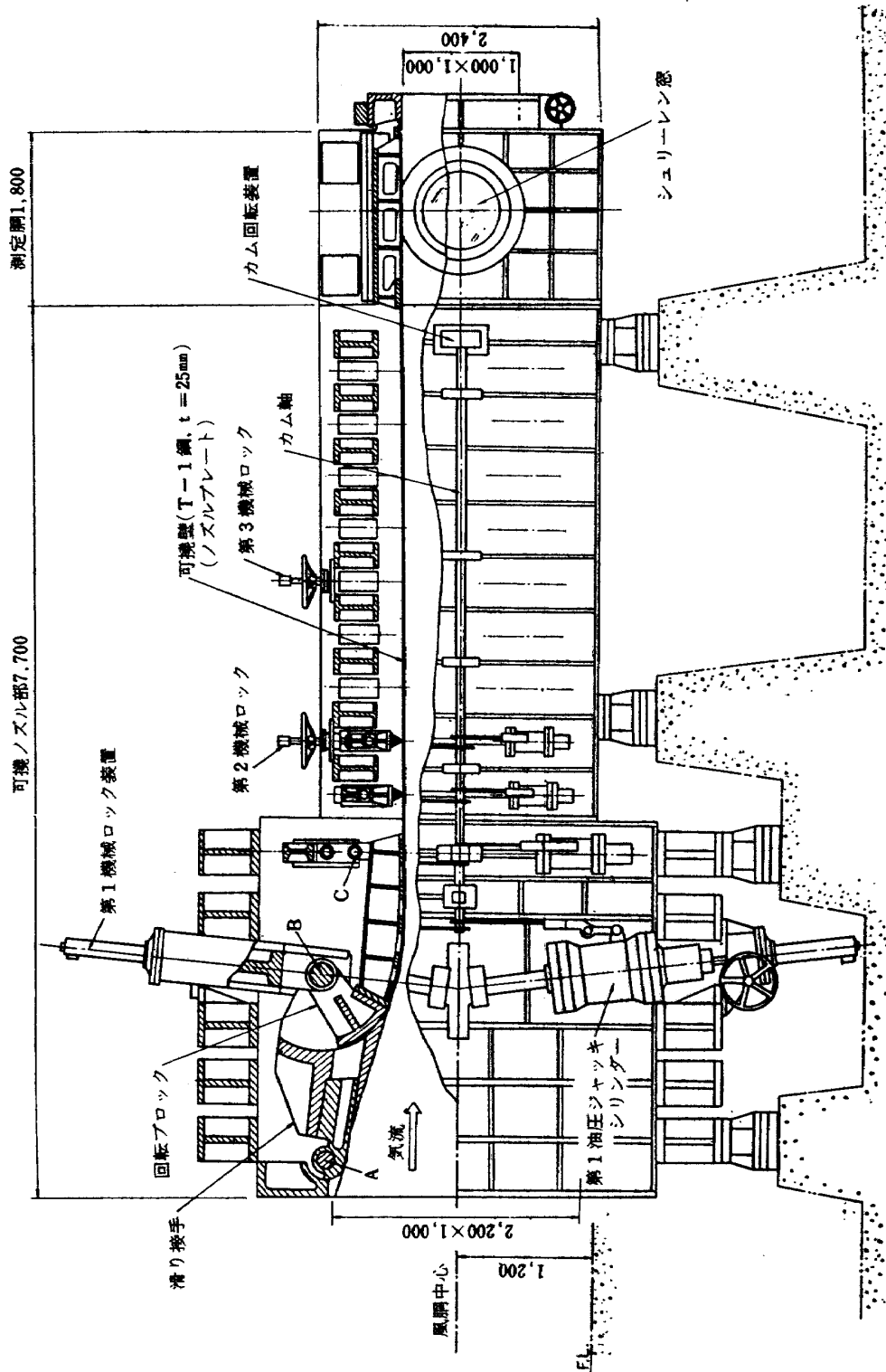


図35 a 可操ノズルおよび測定部

トバルブ、油圧シリンダーでフィードバック系を構成し、カムが回転するとカムの回転中心から輪郭までの偏位量だけ、パイロットバルブが追従し、同時に油圧シリンダーが移動する構造になっている。この油圧シリンダーにノズルプレートが固定されており、カムの偏位量に比例してプレートが任意の形状となる。油圧が無くなると、プレート及びその支持ブロック、油圧シリンダーのすべての重量がカムにかかり、カムを破損してしまう。そこで油圧がなくなってもプレートを落下させないために図

37に示すプレートに連結したロッドを機械的に固定するロック機構を上、下3個づつ設置されている。ロック機構はウォームギヤ、軸受を介して風洞壁に固定するねじ軸の頭部とプレートに連結したロッドの頭部に穴をあけ、この穴にコッターを挿入することによりロッドの落下を防いでいる。油圧の無いとき、図37の右上ロック穴詳細図で上部間隙がなくなっている(ロッドはわずかに落下してコッターの上面で重量を支えている)。油圧が加わるとロッドが2~3mm上昇してコッターの上下に間隙

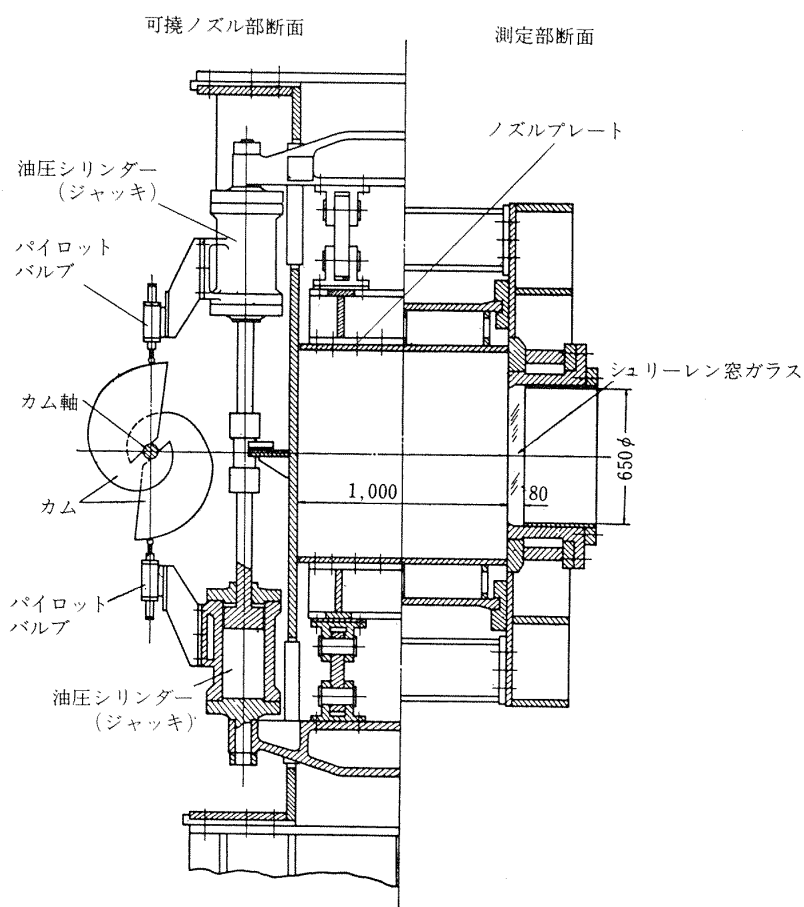


図35 b

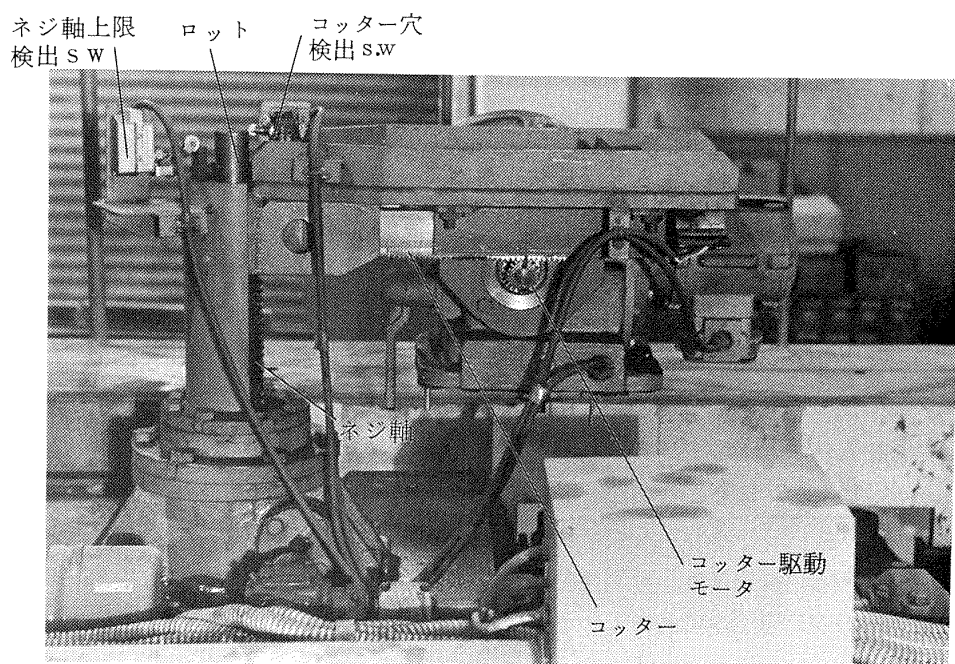


写真3 ノズルロック装置

ができる。この状態でコッターを引き抜く（ロック脱操作）ことが可能となる。ロック脱信号が入ると4-13リレーが働き、コッター出(88F1A22)のリレーが入ってコッ

ターモータが回転を始め、コッター出LS (1FLS22) が働きコッターモータを停止させ、同時にねじ軸モータのリレーが入り、ねじ軸が上昇を始める。ねじ軸上限LS

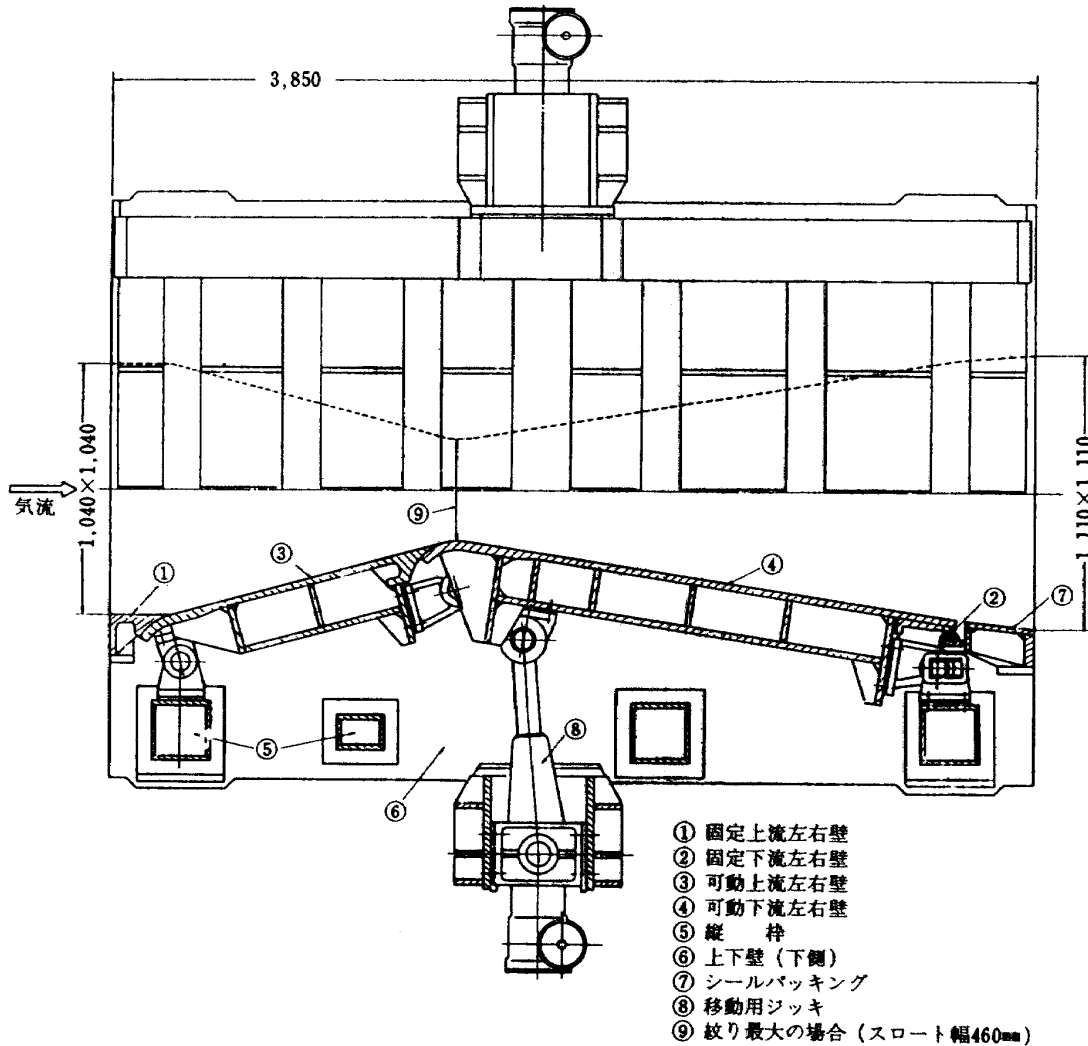


図36 可変拡散胴(第二スロート)

(2FL22)が働いてねじ軸モータを停止させ脱動作は完了する。次にノズルマッハ数を所定の位置に設定した後、着操作を行なうと4-23リレーが入り、ねじ軸が降下をはじめ、コッター穴検出LS (2RLS22)でねじ軸モータは停止、引き続きコッターモータが動き出して、コッター入検出LS (1RLS22)が働きロック着が完了する。図37の右上回路図はこのシーケンスを行なわせるための結線図である。以上の脱、着操作を制御室においておこない、一回の操作で6個のメカニカルロックを同時に動かすことができるようになった。ここで注目したいことはマイクロスイッチを使ってコッター穴をどのくらいの精度で検出できるかと云うことである。検出精度の再現性を試験するために、ねじ軸をあらかじめ上限に移動し、その後、ねじ軸を降下させてロット頭をリミットスイッチ (2RLS22)で検出して、ねじ軸駆動モータを停止させる。数回この動作を繰り返し、ねじ軸とロットの相対位置を差動トランスで測定した。この結果を図38に示す。図中1目盛は0.19mmであり、ほぼ1目盛の範囲のバラツキで停止している。コッターの上下の間隙は約2mmであるから、0.2

mm以下の精度で位置が決まれば、この方法で十分使用できる。なおネジ軸の移動速度は25mm/secである。

図38の下段は油圧 Off から油圧 Onにしたときのロットの移動量である。これは油圧のOn, Offの繰り返しで常に同じ位置に落ちつくことを確認するためのもので繰り返すつど、違う位置に落ちつくことはノズルスロート断面積がそのつど異なることになり、気流マッハ数の誤差となって現われる。図38の測定データを見るとバラツキは0.2目盛程度で約0.025mmとなる。上下で0.05mmノズルスロートが変化するという事は、スロート断面積で0.5cm<sup>2</sup>変わることになり、スロート断面積のもっとも小さい $M_{0.4}$ での断面積比で0.06%である。したがって実際の風洞実験において油圧サーボ系の設定精度は無視してよい。

第二の機能であるマッハ数設定操作は図37右下に示すように、カム軸に連結したポテンショメータとマッハ数設定装置内に設けたポテンショメータ(マッハ数に応じて18通りの電圧を発生する)の電圧をコンパレータに入れ、カム駆動モータを制御している。第二スロートのマ







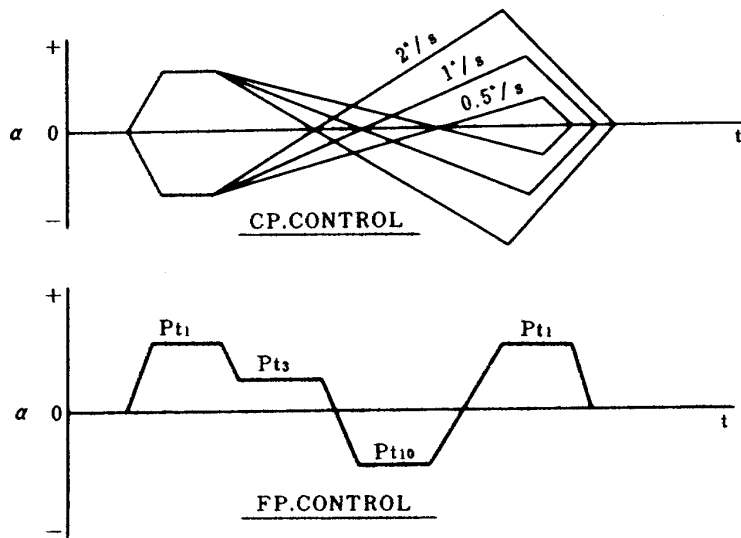
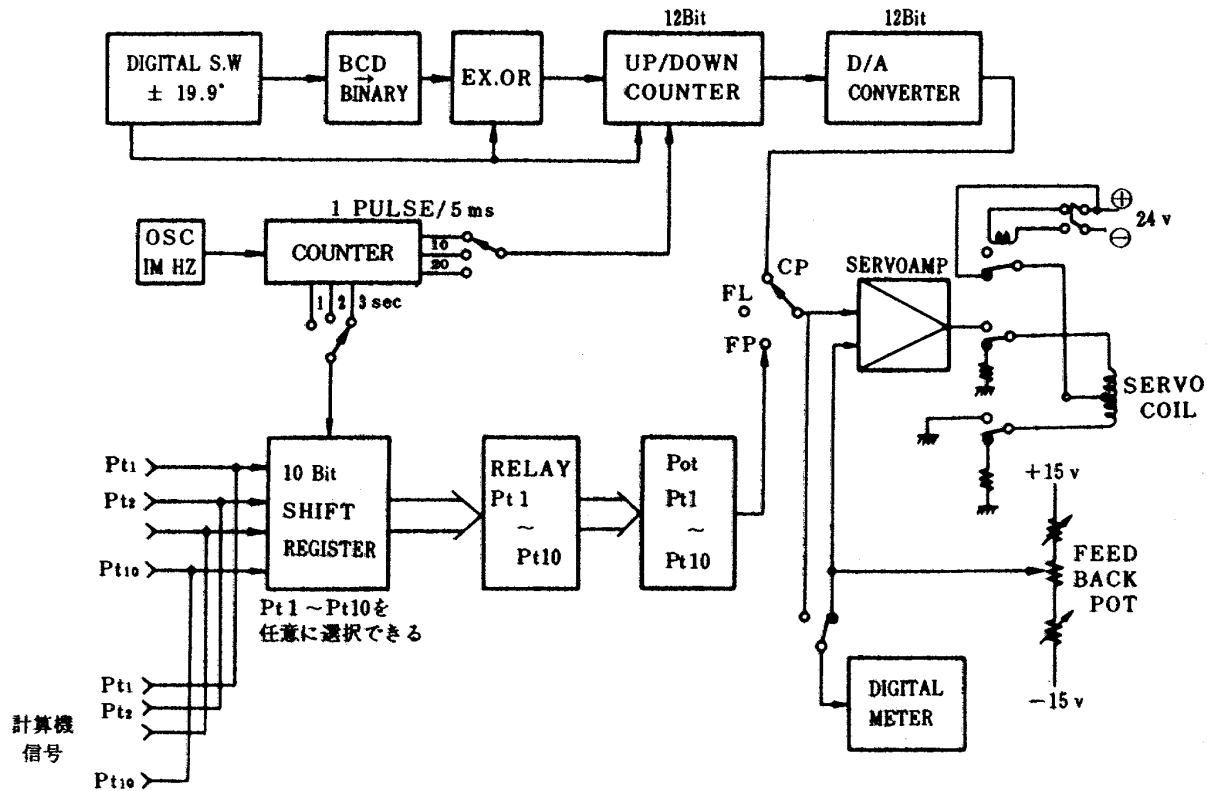


図40 模型支持用迎角制御装置原理図

② ステップ変化(FP)は10個の設定ポテンシヨメータ  $P_t$  を設け、任意のポテンシヨメータを選択することにより、そのポテンシヨメータの設定角度に移り、次のポテンシヨメータの選択操作まで保持する。

③ 内部時計により 1sec, 2sec, 3sec の間隙で  $P_{t1}$  から  $P_{t10}$  まで順次移動する。

④  $P_{t1} \sim P_{t10}$  を計算機信号で操作できる。

模型迎角制御装置のもう一つの改造は定位置検出装置である。風洞実験において模型迎角を正確に知ることは、実験精度を向上させる上からも重要である。そこでスト

ラット上部に写真5、図41に示す定位置検出器を設け、ストラットが  $0.05^\circ$  移動するごとに制御盤にランプ表示するように改造した。図41に示すように5個のフォトトランジスタを  $0.8\text{mm}$  づつ離して等間隔で配置した受光部と一列に配置した光源部を5個 ( $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ ) をそれぞれの迎角に対応した位置に固定し、 $0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$  の位置で  $\pm 0.1^\circ$  の範囲を5段階に表示させた。

図42の上段は模型迎角制御系のステップ入力に対する応答とヒステリシスを示す。試験はステングの付根で  $+1', -1^\circ 10', +1^\circ 05'$  に落ちつく設定電圧を作り、数回

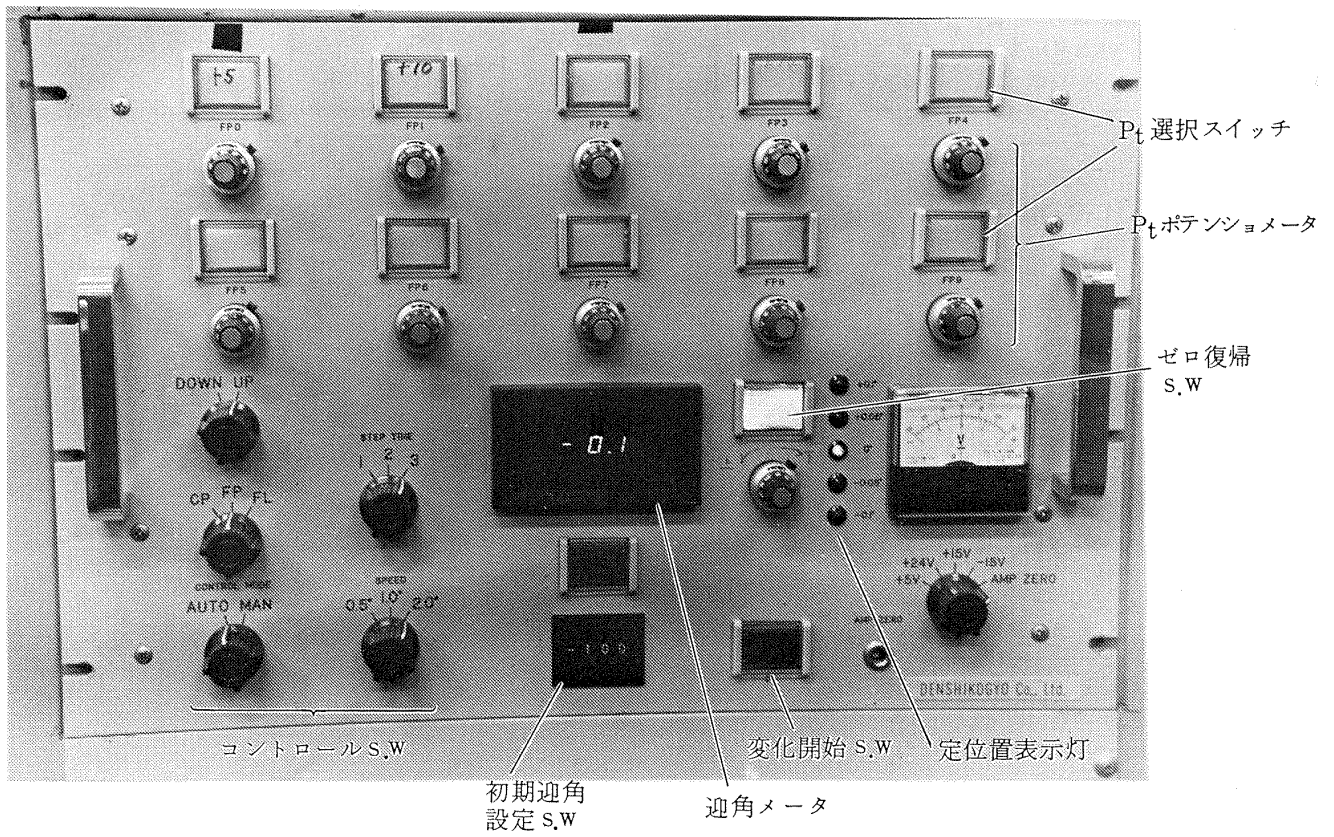


写真4 模型制御装置

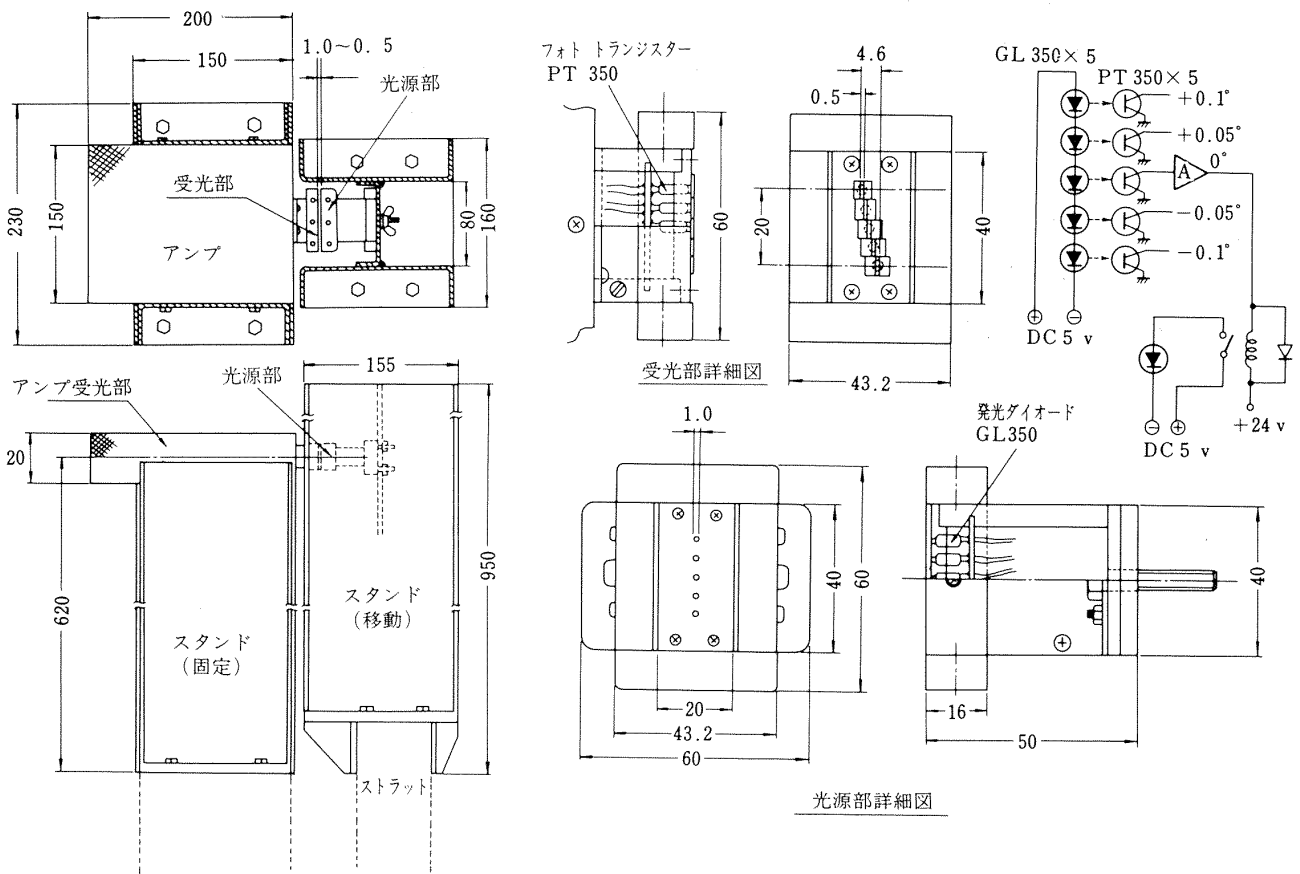


図41 模型定位置検出器

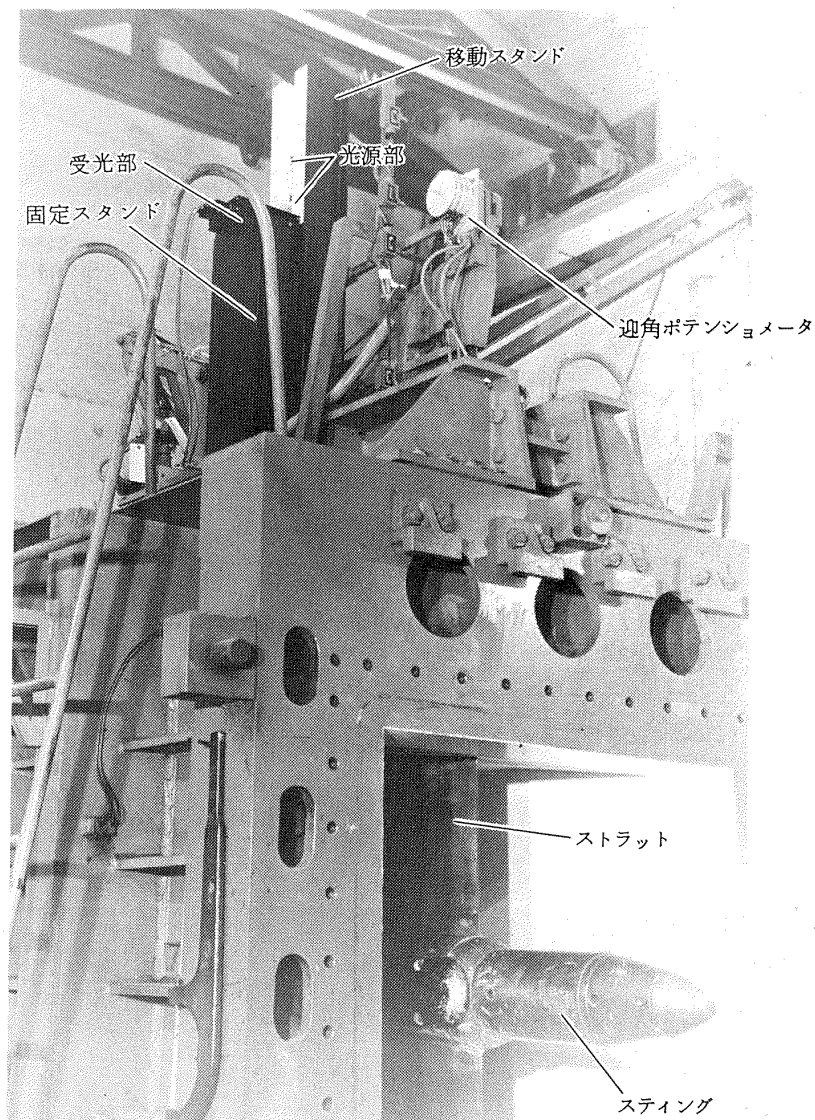


写真5 模型支持装置

3点間を移動させることにより行なった。図で見られるように同一方向より近づける場合は、3'以内に落ちつく。ところがヒステリシスは約8'、ストラットの移動量で約3.5 mmも存在することが判明した。このヒステリシスの原因はサーボ弁の公称ヒステリシス 3.0%にほぼ等しく、サーボ弁によるものと思われる。ヒステリシスを小さくするには、系のゲインを大きくすることにより可能であるが、ゲインを大きくすると振動が生じ好ましくない。下段は迎角の0°付近で微小な変化をさせ、定位装置の点灯ランプを記録した結果である。図で見られるように約10'の間を5段階に表示する。したがって、0°のランプが点灯しているとき、ステイングは±2.6'以内で設定されていることを示している。設定精度としては所期の目的を十分満足しているが、前記したようにヒステリシスは約8'あり、目標とするランプを点灯させる操作は容易

でない。この操作に熟練を要するが同一方向から近づけることにより比較的容易に0°ランプを点灯させることができる。

## 6. 運転制御監視盤(操作卓)の改良

写真2に風洞運転制御装置の全体の写真、写真6,7に運転制御監視盤の改良前と改良後の写真、図43に改良後の系統図を示す。改良の目的は運転の安全性を向上させることにあり、次に示す点を改良した。

- (1) 調圧弁開度、集合胴圧力、測定部動圧は接点付圧力指示計を設け、風洞停止インターロックに接続した。
- (2) 制御パラメータ設定確認表示盤を設け、ノズルスロートマッハ数、第二スロートマッハ数、Pos, G, TC,  $V_L$ ,  $e_2$ を順次、設定値テーブル(マッハ数ごとに交換する)と比較して確認する。選択swを1回押すと赤色ランプ

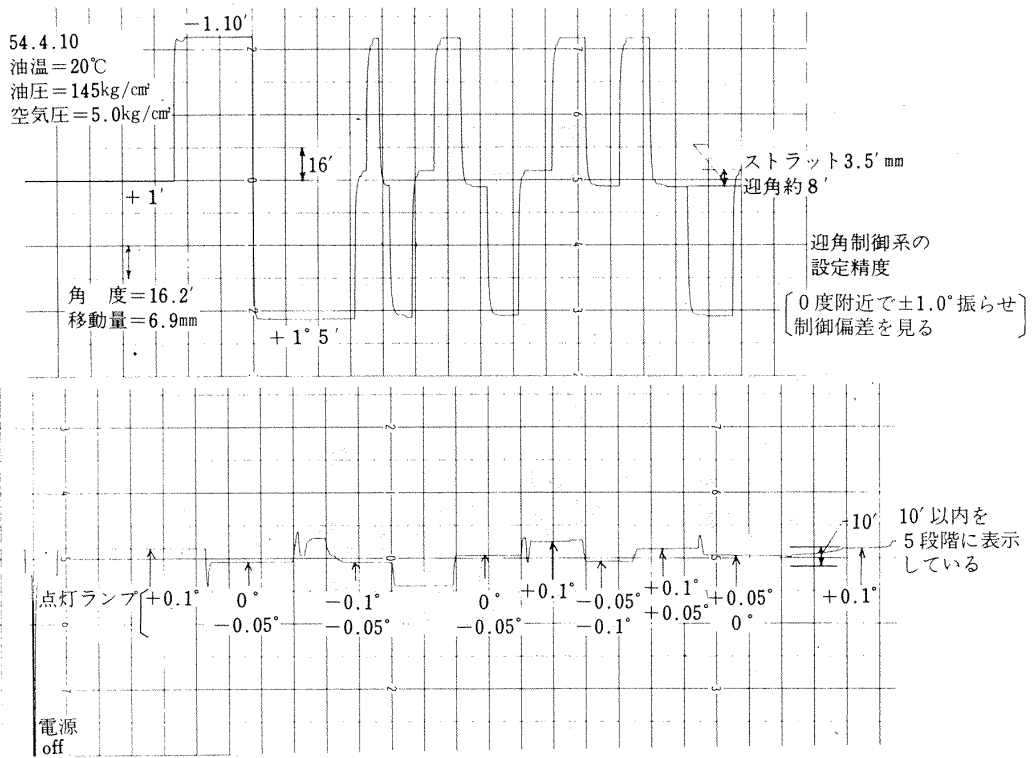


図42 模型 positioning 表示装置の検出精度

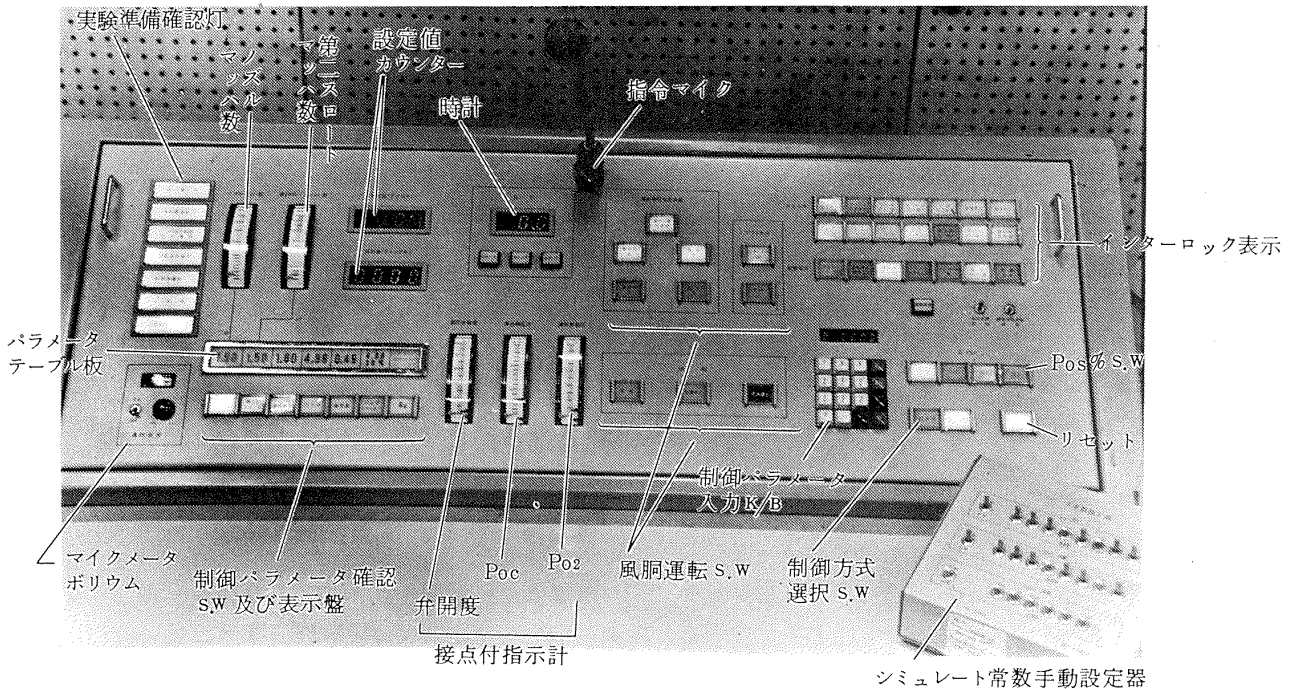


写真6 新運転制御監視盤(改良後)

が点灯し、その設定値がカウンターに表示される。もう一回押すと緑色ランプが点灯し、確認されたことを示す。したがって、すべてのランプが緑色に点灯していれば確認が完了していることを示す。

(3) 実験準備確認灯、担当者が作業終了時点で押し、

すべて点灯して起動準備完了となる。

(4) 風胴運転のインターロックは21項目(図43参照)から成り、すべてのランプが点灯しなければ起動できない。また運転中、何かの原因で風胴が停止すると、その原因の部分のランプが消灯し、異常の発生を知らせる。

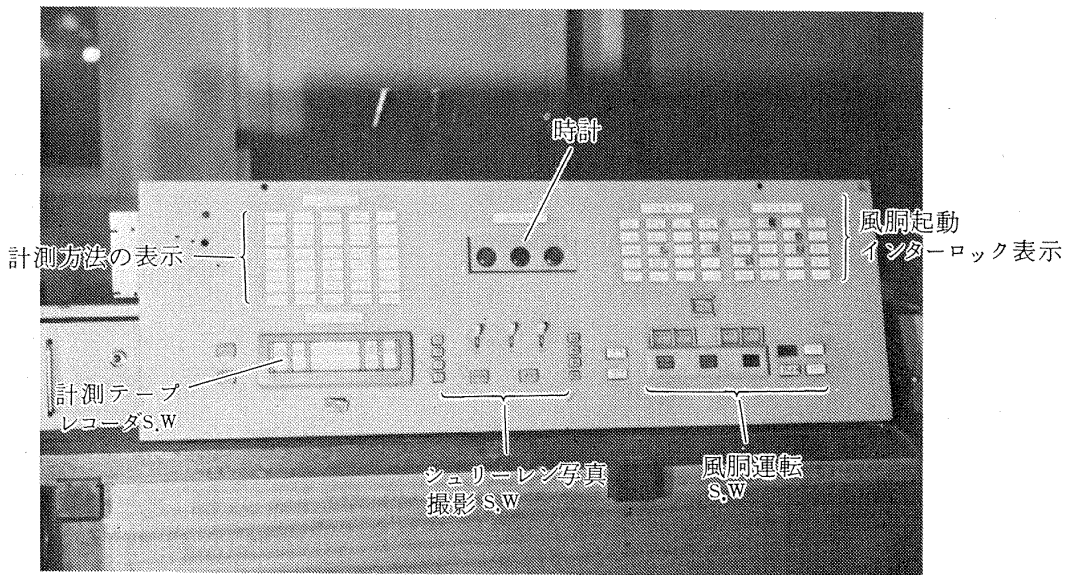


写真7 旧運転制御監視盤

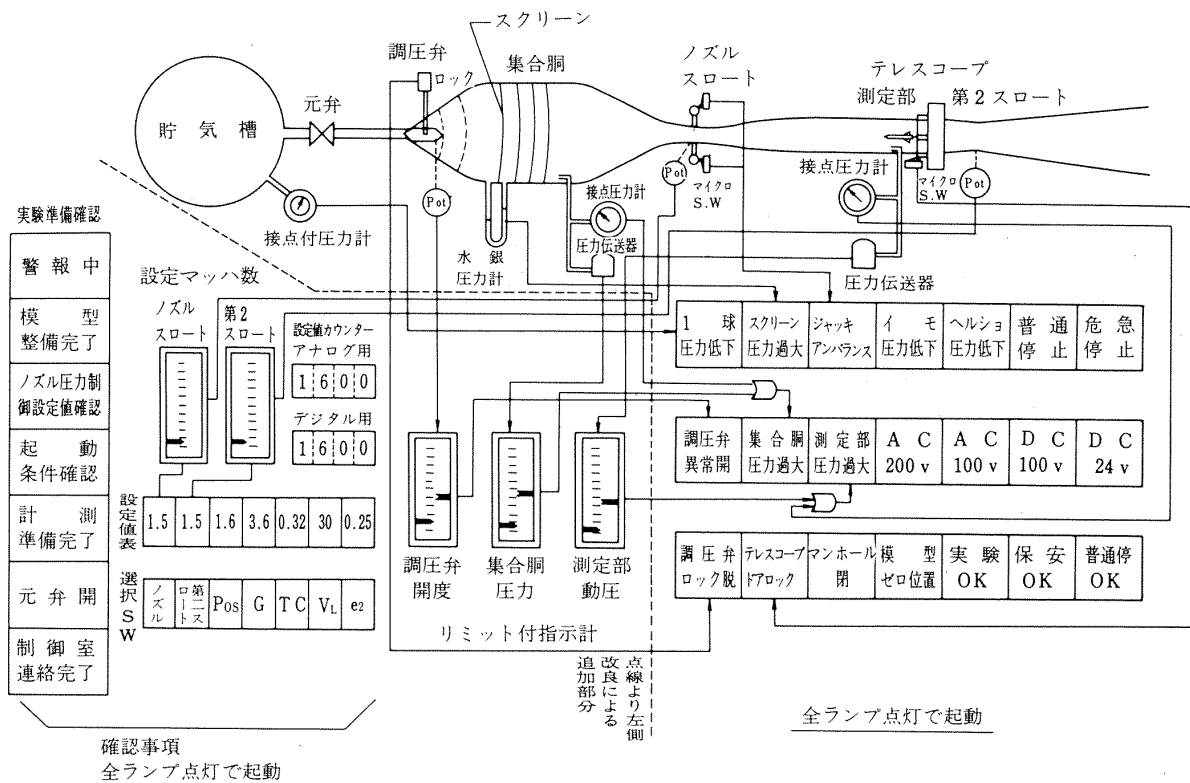


図43 超音速風洞インターロック

(5) 停電対策のため DC 24V, 20AH の無停電電源を新たに設け(従来は他実験棟から DC 100V の供給を受けていた) 制御用リレーに供給すると同時に、この電源を使って停電時には自動的に調圧弁が閉まる回路を設けた。(1)の項は風洞の圧力制御が異常になったとき動作する3重のインターロックであり、このうち調圧弁開度は他の2つに先がけて異常が現われ、風洞の暴走対策に効果大

である。また(2), (3)の項目は起動前のチェック作業でありミスブローを防ぐために有効である。3.6項で記述したアナログシミュレーションと組み合わせることにより風洞運転の安全性と信頼性の向上に、これらの改良は大きな効果があった。

## 7. あとがき

超音速風洞運転制御装置の特別改修にともない、風洞運転の制御精度、安全性の向上と省力化を目的として以下に示す若干の装置の改良を行なった結果について記述した。

(1) 従来の風洞モデルをより実際に近い型に改良し、その改良モデルを使って、集合洞圧力のデジタルシミュレーションを行ない、従来のPI制御、弁開度制限制御と比較し、最適 on off 制御方式が過渡特性、定常特性共にすぐれていることが明らかになった。

(2) マイクロコンピュータを使ったデジタルコントローラを製作し、従来の煩雑な制御パラメータ設定作業を簡単化し、省力化とミス操作の防止を計った。

(3) 最適 on off 制御を実際の風洞制御に適用し、制御特性の向上を計った。

(4) 集合洞圧力制御系の各構成機器の異常を事前に探知するために、一次遅れとむだ時間から成る、アナログシミュレート回路を製作した。この回路を使って、通風直前にシミュレーションすることにより、制御系の異常を事前に知り得るようになり、安全性、信頼性の向上に大きな効果があった。

(5) ノズルのマッハ数設定において、従来現場で行なっていたメカニカルロック脱着操作と、ノズルマッハ数設定操作を自動化し、風洞運転の省力化に寄与した。

(6) 模型迎角制御において、 $0^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ の5点で $\pm 0.1^\circ$ の範囲を5段階に表示する模型定位置表示装置を

製作し、迎角測定精度の向上に寄与した。

なお、最適 on off 制御からPI制御への切換え点で予想以上の振動を生じた、今後さらに検討を必要とする。

終りに、この研究を進めるにあたり、ご意見、ご指導を頂いた、空力第二部遠藤浩部長、河本殿室長、高島一明室長、東京農工大学・谷喬教授に、ならびに装置の製作にご協力頂いた電子工業協会の葛原勝氏、久保田秀人氏、軽部正一氏に深く感謝する次第である。実験にあたっては、超音速風洞計測研究室、遷音速風洞第一制御研究室の各位に協力していただいたことを附記する。

## 参 考 文 献

- 1) 空気力学第二部； $1m \times 1m$ 吹出式超音速風洞の計画と構造 航技研報告TR-29 1962年10月
- 2) 外立，他；吹出式超音速風洞の集合洞圧力制御について、航技研資料TM-124 1967年12月
- 3) 橋爪宏，中井暎一；吹出式風洞の圧力制御（フラッタ試験設備の場合）航技研資料TM-26 1964年1月
- 4) 東京大学；超音速気流総合実験室建設報告，東京大学航空研究所，第3巻 第6号(B) 1963年7月
- 5) Staff of the High Speed Aerodynamics Section; The Nae High Reynolds Number 15 IN.  $\times$  60 IN. Two-dimensional Test Facility Part 1. General Information, CANADA REPORT LTR-HA-4 1970年4月
- 6) 町山忠弘；プロセス制御の実技入門，P 91~P 102 昭和38年 オーム社発行

---

## 航空宇宙技術研究所資料404号

昭和55年1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 三興印刷  
東京都新宿区信濃町12

---



