

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-392

大型低速風洞データ処理システムについて II

—自動圧力計測とその処理—

室田勝一・桑野尚明・星野秀雄

1979年9月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 大型低速風洞データ処理システムについて II\*

## —自動圧力計測とその処理—

室田勝一\*\* 桑野尚明\*\* 星野秀雄\*\*

### 概 要

当所の 5.5 m × 6.5 m 大型低速風洞は、昭和40年完成以来、各種の試験を行ってきた。本風洞の計測装置の概要については、すでに文献 1 に述べられており、電子計算機システムの更新ともなうオンライン計測については、文献 2 で第 I 報として報告した。

しかし第 I 報では 6 分力計測を中心にして取扱われており、今回は第 I 報の補遺の意味もあって、最近当風洞試験で数多く使用されているスキュニバルブ方式による圧力計測についての概要とその処理方式について、報告することにした。

### 1. ま え が き

近年、航空機の大型化、STOL 化に伴ない主翼に働く空気力とともに、機体の局所的な気流状態を調べる圧力計測が、風洞試験の重要な項目になってきた。

従来の大型低速風洞における圧力計測系<sup>1)~2)</sup>は、圧力走査器や圧力変換器などの測定機器が大型のため風洞測定部外に設置され、これらの機器と模型表面上の測圧孔とは、模型支持支柱を經由して多数の圧力導管により接続されていた。その上、圧力走査器などの内容積が非常に大きいため応答が遅くデータ収集に多大な時間を要した。また古い形式の機器のため誤動作が多く圧力計測法の改善が要求されるようになった。

最近、小型で高精度の圧力変換器と組み合わせ、模型に内蔵して多点圧力測定が高速にできる超小型圧力走査器が開発され、各種の風洞試験<sup>3)~7)</sup>などで数多く用いられるようになった。

そこで当風洞データ処理システムの更新を機に、超小型圧力走査器について市販のもの数機種にわたって比較検討した結果、米国 Scanivalve 社製 4 連式 J9 型スキュニバルブが最適であると認め、これを導入した。さらに本システムに高速 A/D 変換及びタイマー機能を補足してスキュニバルブとの結合を行い、自動圧力計測系を昭和

51年6月に試作した。その後、圧力測定系の特性改善やデータ収集法の改良を計り、実用試験に応用して良い成果を収めた。

本報告は、主として風洞試験を実施し、その結果を検討する計測業務担当者の立場より、自動圧力計測の概要とその処理について述べるとともに、測定系の応答特性および総合精度について明らかにする。

### 2. ハードウェア構成と性能

自動圧力計測の実用化に際して、小型圧力変換器を内蔵したスキュニバルブを採用するとともに、本システムに高速の A/D 変換およびタイマー機能を補足し専用コントローラを試作して、本システムと結合させた。また一様流の動圧、静圧などの風洞パラメータ、模型姿勢制御、風速表示などの測定器は、第 I 報で報告されているものを使用することにして、図 1 に示すような計測系を構成した。

模型表面上の測圧孔やピトー静圧管（基準圧、校正圧に使用）の圧力は、多数の導管により模型内部に装着されたスキュニバルブに導き、演算処理装置（TACC-1200 M）からの指令に従って圧力ポートが順次切換られ、圧力変換器で電気量に変換される（図 2 参照）。変換器出力はシグナル・コンディショナー<sup>8)</sup>でデータの中に含まれている不要な雑音を取除き、電圧増幅して高速 A/D 変換装置によりデジタル量に変換され、タイマーのタイミングに従って自動的にデータ収集される。

\* 昭和 54 年 7 月 18 日受付

\*\* 空気力学第二部

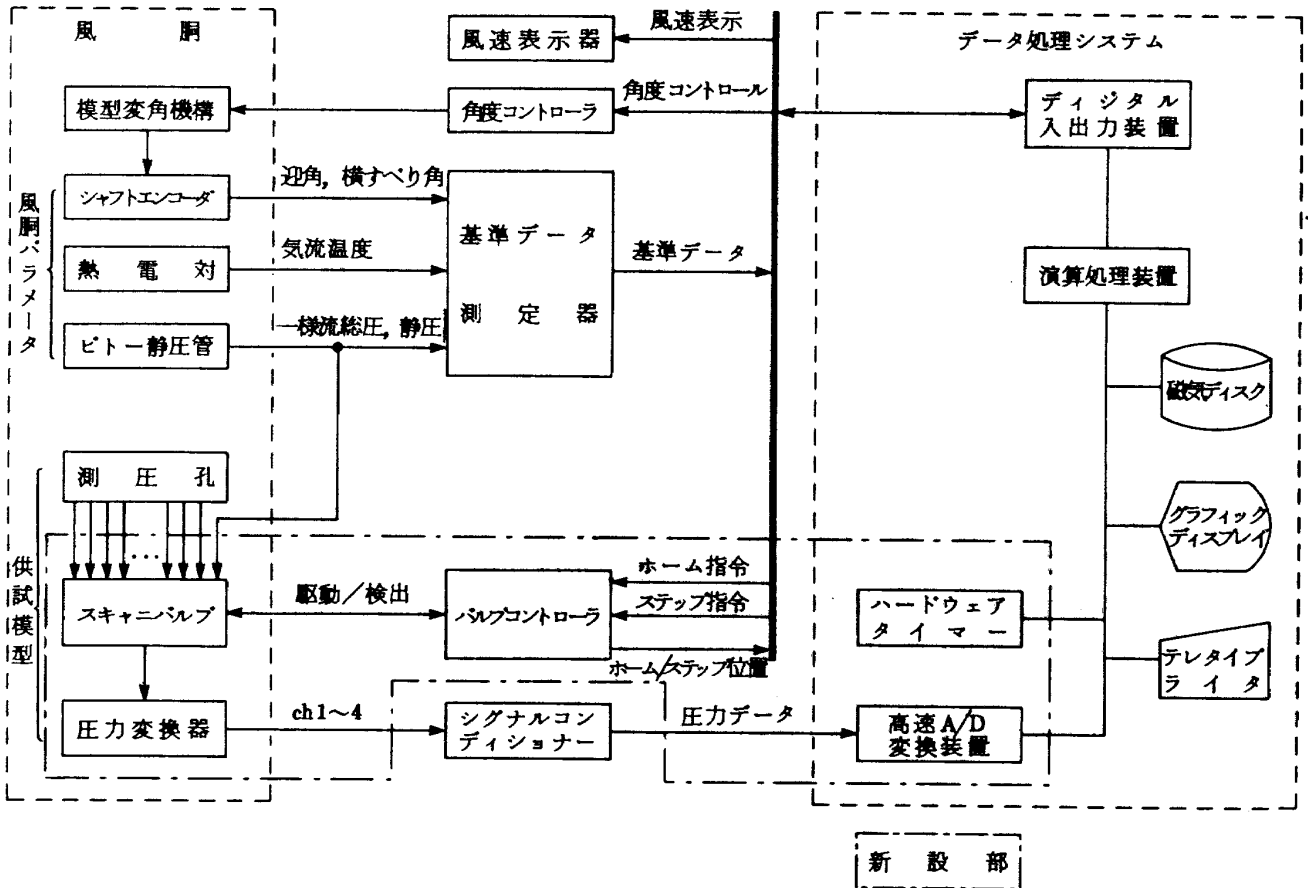


図1 自動圧力計測の系統図

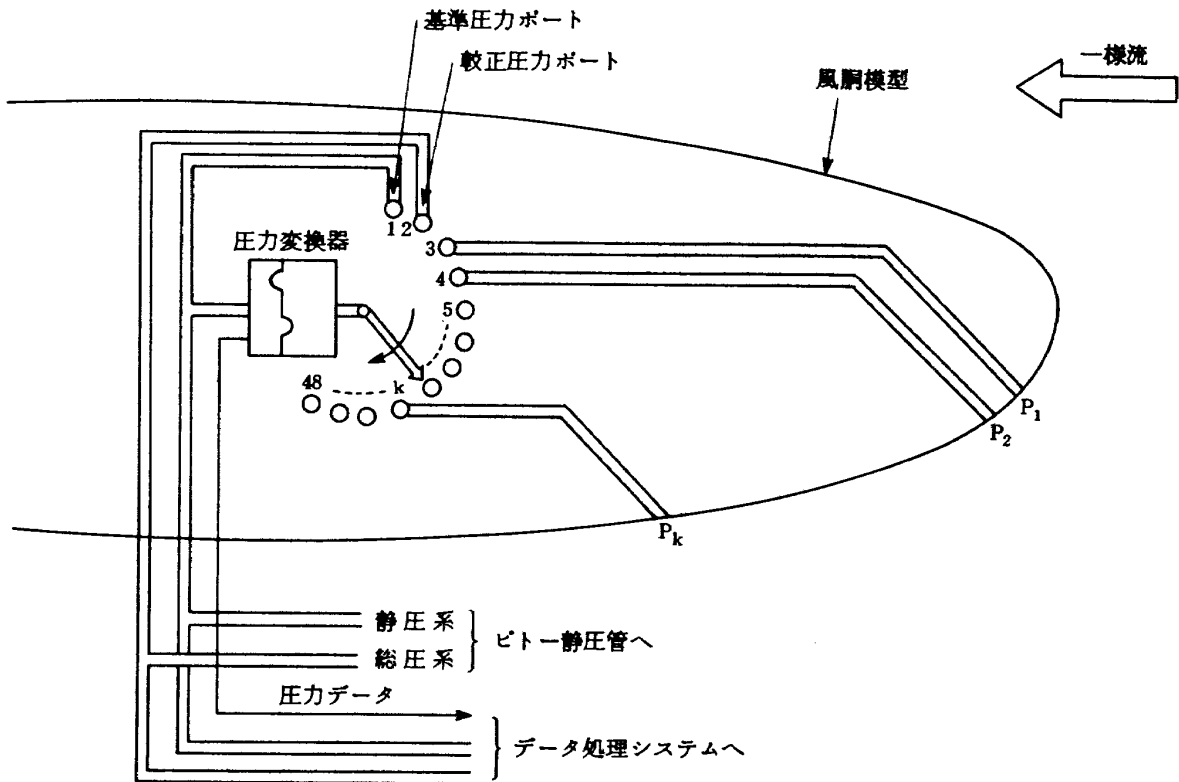


図2 模型内のスキャニバルブ動作概要

これらの圧力データは、風洞パラメータとともに磁気ディスク上に編集処理されると同時に、圧力係数など必要な結果については、グラフィック・ディスプレイ上に図形表示を行い、データの追加修正や実験パラメータの変更がテレタイプライタで、すみやかにできるようにした。又、これらの処理と並行して模型の姿勢制御や風速の計算表示を自動的に行うことができる。

本システムの補足機器およびシグナル・コンディショナーの主要性能は次の通りである。

#### 高速 A/D 変換装置 (図 3 参照)

入力数	16 ch
入力電圧レンジ	$\pm 1.024 / \pm 2.048 / \pm 5.12 / \pm 10.24$ V FS
変換ビット数	符号 + 12 ビット
変換速度	最大 87 $\mu$ s
変換精度	$\pm 0.1$ % FS $\pm 1/2$ LSB

#### ハードウェア・タイマー

レジスタ長	2 進 16 ビット
最大計数容量	65535 カウント
基準クロック	1 ms
精 度	$\pm 1$ $\mu$ s

#### シグナル・コンディショナー

入力数	8 ch
入力抵抗	10 M $\Omega$
利 得	1/2 ~ 5000 倍, 13 段階
利得精度	$\pm 0.1$ %
出 力	$\pm 10$ V, $\pm 100$ mA, 0.1 $\Omega$
直 線 性	$\pm 0.01$ % FS

ドリフト	3 $\mu$ V/°C, 10 $\mu$ V/日
周波数特性	DC ~ 20 KHz, $\pm 10$ %
内部雑音(最大利得時)	5 $\mu$ V P-P (入力換算)
ローパス・フィルタ	3 次バターワース型 10 / 100 / 1K / 10K / 20 KHz

#### 2.1 スキャニバルブの構造

スキャニバルブは切換部、駆動部と切換位置の表示を行う検出部から構成されており、各モジュールは使用目的に応じて最適な組み合わせができるように、多くの機種が用意されている。<sup>9)</sup>

本バルブの導入にあたり、市販のもの数機種(表 1 参照)について比較検討した結果、次のように決定した。

- (1) 切換部については、圧力応答特性が良く配管作業が容易で耐久性があり、しかもオイル注入や背圧が不要で、供試模型の大きさに適した J 9 型を採用した。
- (2) 駆動部にはポート切換の同期特性や起動・停止特性が良く、コントロール方法が簡単で計算機との結合が容易なソレノイド方式を採用した。
- (3) ポート位置の表示を行う検出部は信頼性の高い非接触型(光学式)を採用することにした。
- (4) さらにポート切換時の同期性や経済性を考慮して、連結式を採用した。これによって切換モジュール 4 台が 1 台の駆動、検出モジュールおよびコントローラで使用でき、しかもコントロール系の配線も簡素化される。図 4 に本バルブの外観図を、表 2 にその主要性能を示す。各モジュールの構造と動作概要を以下に示す。

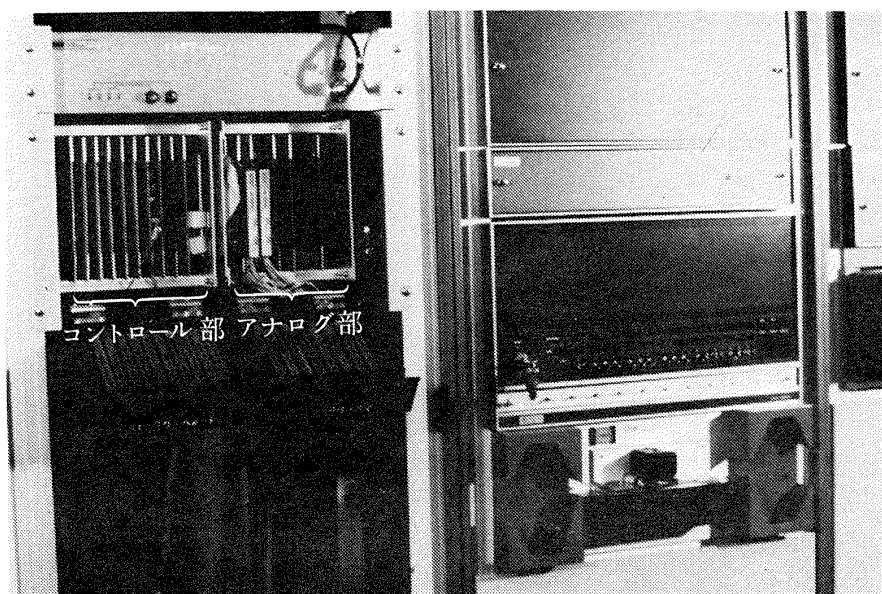


図 3 高速 A/D 変換装置の構成外観図

表1 スキャニバルブの機種比較 (文献9より引用)

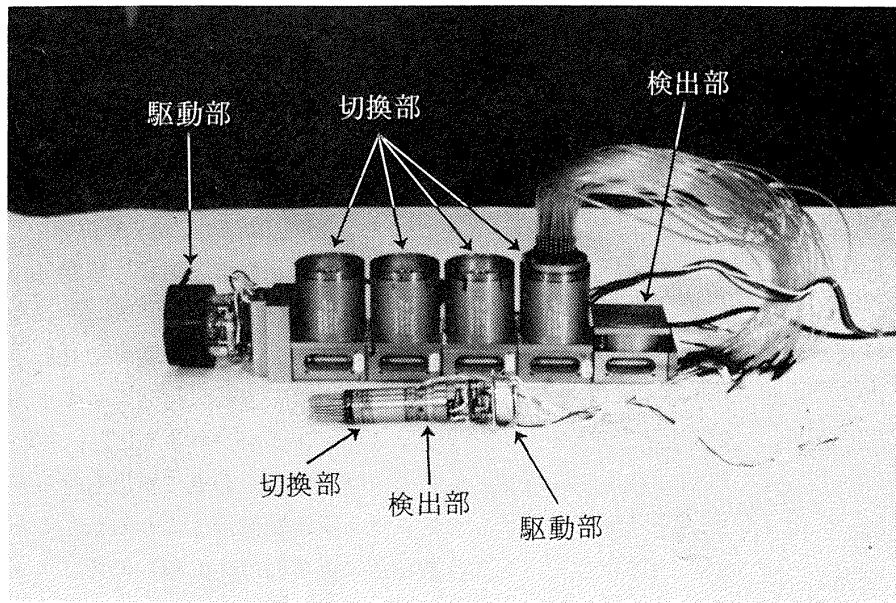
型式	切 換 部				駆 動 部			検 出 部	
	本体外径	パイプ外径	ポート数/台	耐圧(PSIa)	エ ア	モータ	ソレノイド	接 触	非接触
T □	0.63"	0.04"	36	50, 150	○	○		○	
S □	0.9"	0.04"	24, 48	50, 200	○	○	○	○	
D □	1.25"	0.063"	12, 24, 48	50, 300	○	○	○	○	○
J □	2.0"	0.063"	24, 48	500		○	○	○	○
L □	3.0"	0.063"	24, 48	2000		○	○	○	○

注1 □印は、バージョン・アップ番号

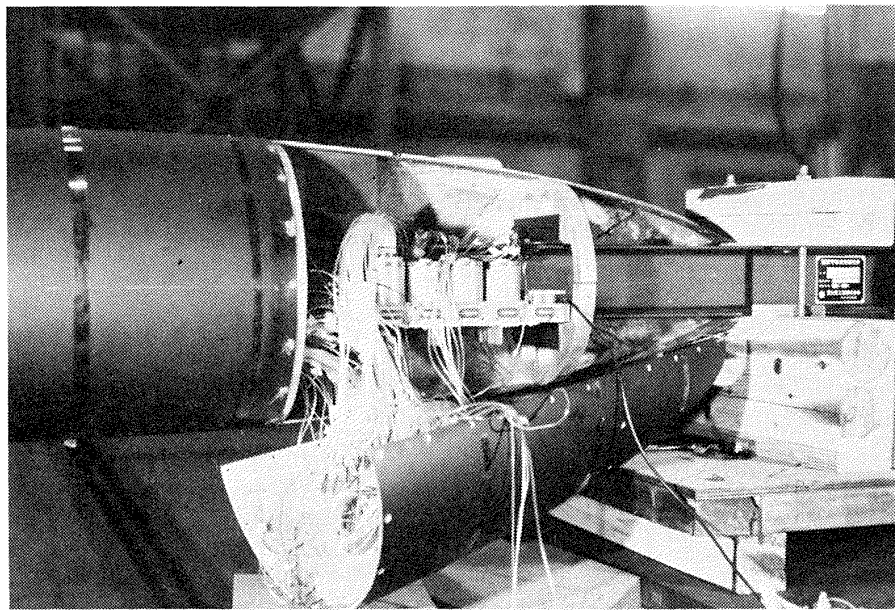
注2 検出器の接触型にはアナログ式とデジタル式がある。

表2 スキャニバルブ及び圧力変換器の主要性能

機器名 (数量)	性 能 諸 元
1. スキャニバルブ (1式)	型 名 : 4連式J9型(米国 Scanivalve社製)
(1) 切 換 部 (4台)	圧 力 点 数 : 48点/台 本 体 外 径 : 2.0" (50.8 mm) パ イ プ 外 径 : 0.063" (1.59 mm) 耐 圧 : 500 PSIa (36 kg/cm <sup>2</sup> )
(2) 駆 動 部 (1台)	型 式 : ソレノイド方式 励 起 電 圧 : 24 VDC 最 大 負 荷 : 6モジュール ホーミング時間 : 3.2 s以下 ステップ速度 : 67 ms以下
(3) 検 出 部 (1台)	型 式 : 非接触光学方式 出 力 型 式 : オープン・コレクタ 出 力 コー ド : バイナリー型式
2. 圧力変換器 (4台)	型 名 : PDCR-22 (英国 Druck社製) 型 式 : ダイヤフラム・半導体ゲージ方式 測 定 範 囲 : ±0.5 PSIa (±360 mm H <sub>2</sub> O) 励 起 電 圧 : DC 12V一定 精 度 : ±0.06% B.S.L. 温 度 特 性 : 感度変化 0.02%/°C 零点移動 0.02% FS/°C
3. 圧力変換器 (1台)	外 径 : 0.5" (12.7 mm) 型 名 : PM131 TC (米国 Statham社製) 型 式 : ダイヤフラム・ストレインゲージ方式 測 定 範 囲 : ±2.5 PSIa (±1800 mm H <sub>2</sub> O) 励 起 電 圧 : 5VDCまたはAC 精 度 : ±0.75% FS 温 度 特 性 : 感度変化 0.018%/°C 零点移動 0.018% FS/°C 外 径 : 0.5" (12.7 mm)



(上) 4連式J9型, (下) 単式S2型  
(a) スキャニバルブの比較



(b) 模型内の設置, 配管状況

図4 4連式J9型スキャニバルブの外観図

### 2.1.1 切 換 部

本部分は、図5に示すように円板状のロータをまわし、最大48点の圧力ポートを順次切換えて共通の圧力変換器へ測定圧を導くもので、変換器を本部分に内蔵させ導入口との距離を短縮して、圧力の時間遅れを極力少くしている。また、ロータには303ステンレスを、ステータにはカーボン・グラファイトをそれぞれ使用し、しゅう

動面の気密はベローズの圧縮により行っている。

### 2.1.2 駆 動 部 (図6参照)

本部分は、切換部、検出部を含め最大6モジュールの駆動を高速に行うもので、ソレノイド・ドライバー、ギヤーボックスおよびカムスイッチより構成される。

ソレノイド・ドライバーは1回転当り12ステップ割り

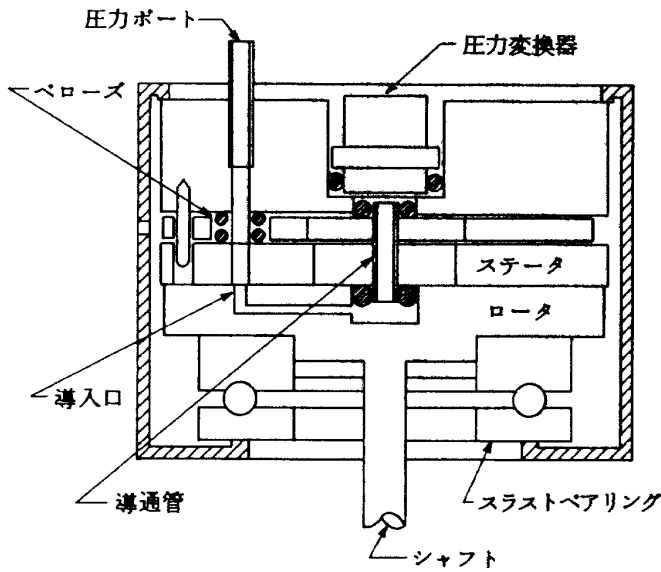


図5 切換部の構造 (文献9より引用)

になっており、ロータに十分なトルクを与えるために4対1のギヤボックスで減速している。ギヤボックスの前後にカムスイッチが連動されており、これらのスイッチからはリセット、ホーム完了信号が出力 (接点) される。リセット信号は、圧力ポートを1点毎に切換えるステップ動作の完了時に出力される。またホーム完

了信号は、任意のポートからホームポート (48番目) に復帰させるホーミング動作の完了時に出される。バルブ・コントローラはこれらの信号をもとに駆動部の制御を行う。

2.1.3 検出部 (図9参照)

本部分は、切換部と同様に駆動部に連結してポート切換の表示に用いるもので、光学的2進交番形式になっている。すなわち、ポート番号に対応させてコーディングした回転スリットに、発光ダイオード (LED<sub>1</sub>, LED<sub>2</sub>) とフォト・トランジスタ (PT<sub>1</sub>, PT<sub>2</sub>) とによるフォト・カップラを組合わせて検出を行っている。

スリットが駆動部により回転すると、ポート番号が奇数位置にある時は、LED<sub>1</sub>の光はスリットにさえぎられPT<sub>1</sub>はOFFとなる。そしてポート番号が偶数位置にある時には、ONになり、ポート番号に対応してON-OFF信号が出力される。一方、ポート番号が48番の位置になったときに、PT<sub>2</sub>はLED<sub>2</sub>の光を受けてONになる。

2.2 バルブ・コントローラ

本スキャニバルブの計算機制御を行うため、ソレノイド駆動装置 (Scanivalve社製CTR2型) に、ホームおよび

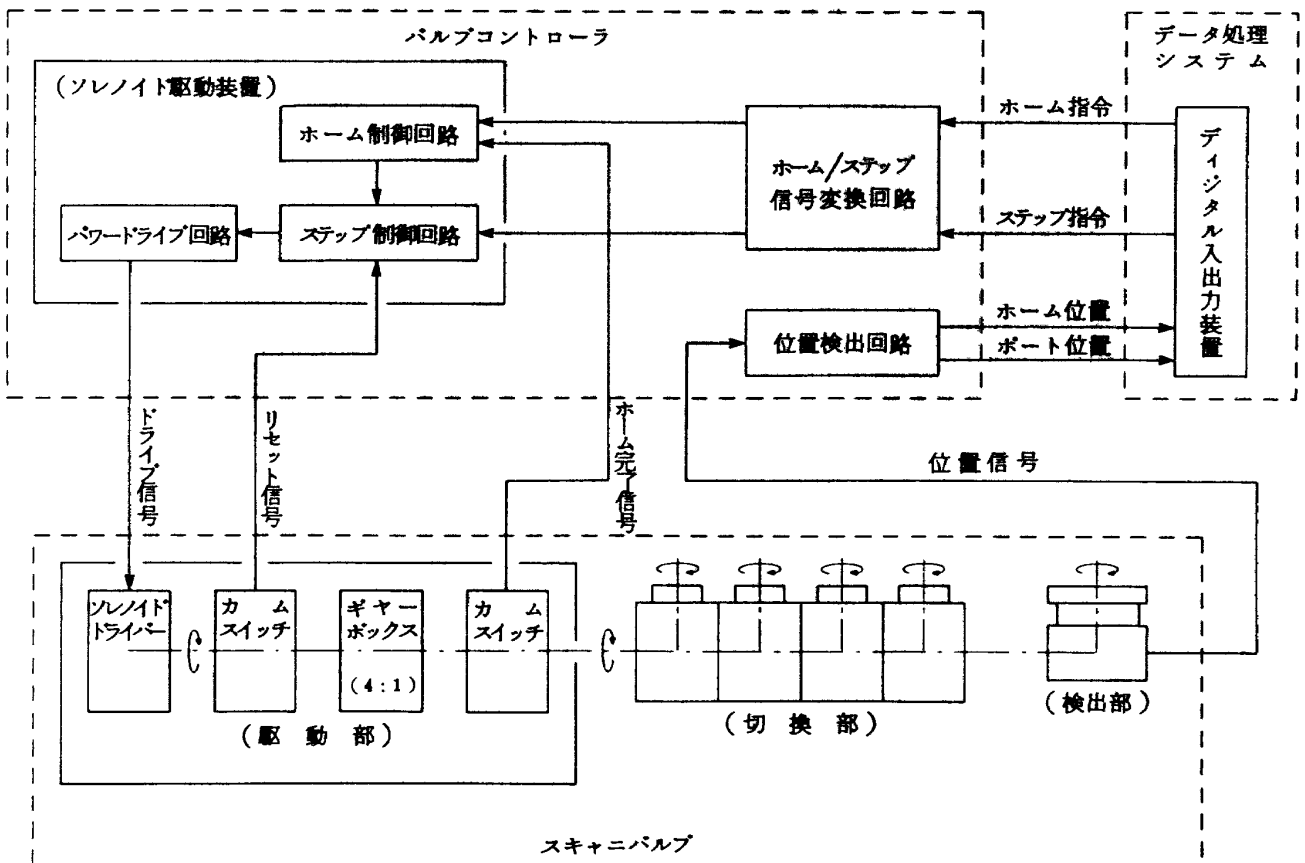


図6 スキャニバルブの計算機コントロール系統図

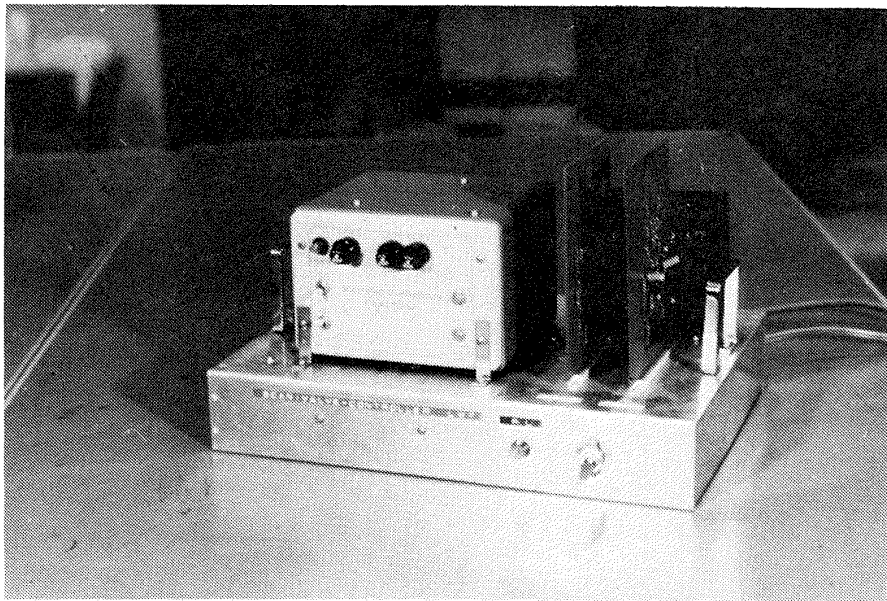


図7 バルブ・コントローラの外観図

びステップ信号変換回路，位置検出回路を付加して，バルブ・コントローラを製作し，本システムのデジタル入出力装置と結合させた。

スキャニバルブのコントロール概要を図6に，本コントローラの外観図を図7に示す。

### 2.2.1 ソレノイド駆動装置

本装置は，スキャニバルブの駆動部を制御するもので，ステップ制御，ホーム制御およびパワードライブ回路から構成される。

ステップ制御回路は，外部からのステップ指令を受けて，パワードライブ回路を動作させドライブ信号を発生させる。その信号によって駆動部のソレノイドが励起され回転を始める。回転の停止時には，カムスイッチからリセット信号が発生し，それをステップ制御回路が検出してドライブ信号を停止させステッピングを完了させる。

ホーム制御回路は，ホーム指令を受信するとステップ制御回路にステップ指令を連続して与え，ポートがホームの位置に達するまでステッピングを繰り返す。ギヤボックスの後に連結されたカムスイッチからホーム完了信号を受けると，ホーム制御回路からのステップ指令を中止し，ホームが完了したことになる。

### 2.2.2 ステップ/ホーム信号変換回路

ステッピング，ホーム動作は，ソレノイド駆動装置の制御回路に指令信号（ステップ，ホーム）を与えて行うが，この信号はオープン・コレクタ形式であり，本システムと直接結合することができない。

そこでデジタル入出力装置より発信されるパルス信号（10 ms 幅，TTLレベル）をオープン・コレクタに変換するステップ・ホーム信号変換回路を試作した。（図8）

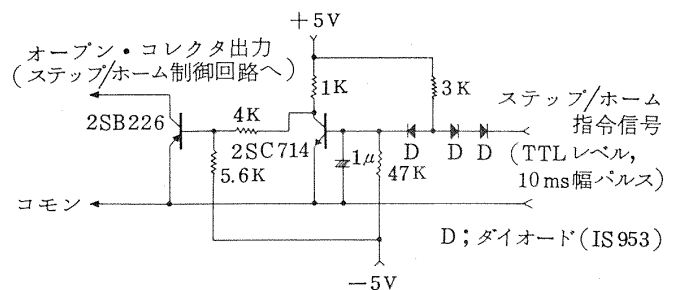


図8 ステップ/ホーム信号変換回路

### 2.2.3 位置検出回路

ポート位置の確認は，ステップ/ホーム動作完了時に出力される検出部からの位置信号を用いて行う。

検出部のフォト・トランジスタは，ON状態においても出力インピーダンスが高く，この信号をデジタル入出力装置に直接入力することができないので，図9に示すような位置検出回路を試作した。

本回路は，検出部からの位置信号を入力インピーダンスの高いエミッタ・フォロア回路で受け，TTLレベル信号に変換している。また，フォト・カップラの発光ダイオードを動作させる定電流源も，あわせて製作した。

## 3. 測定系の特性

圧力測定においては配管系の伝達遅れが大きな問題と



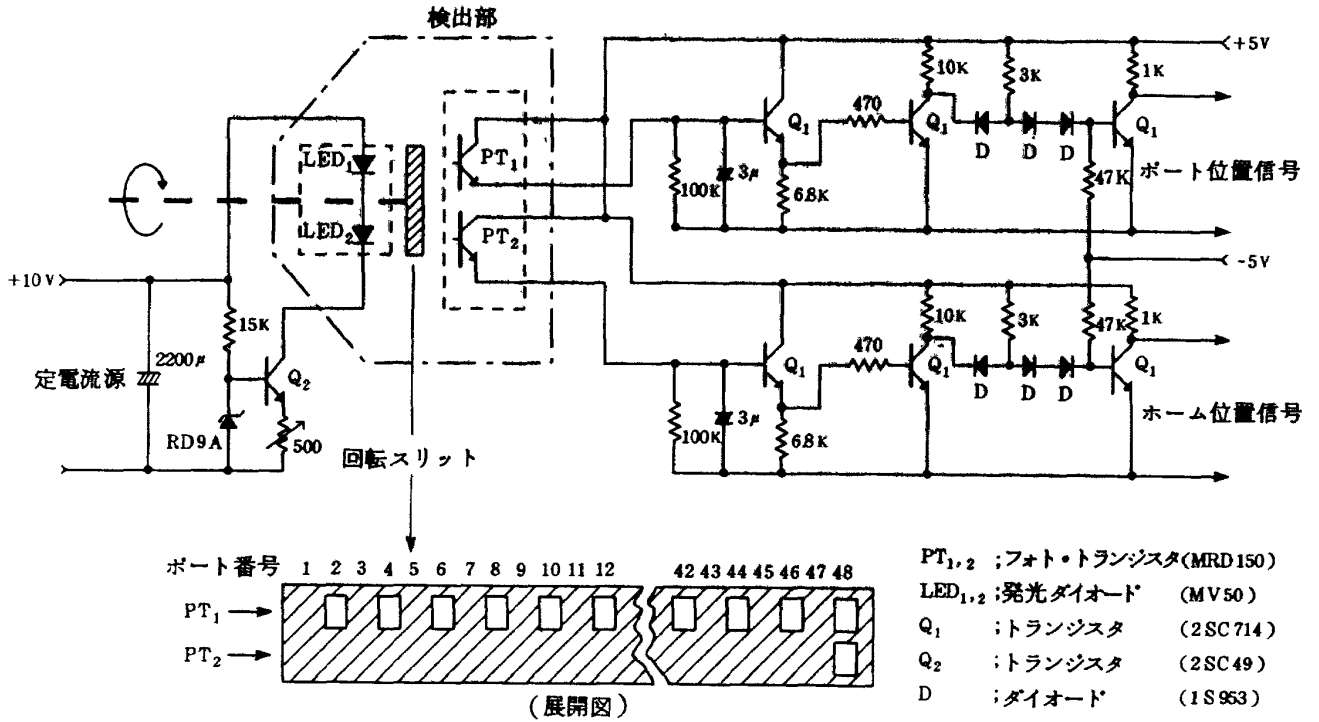


図9 位置検出回路

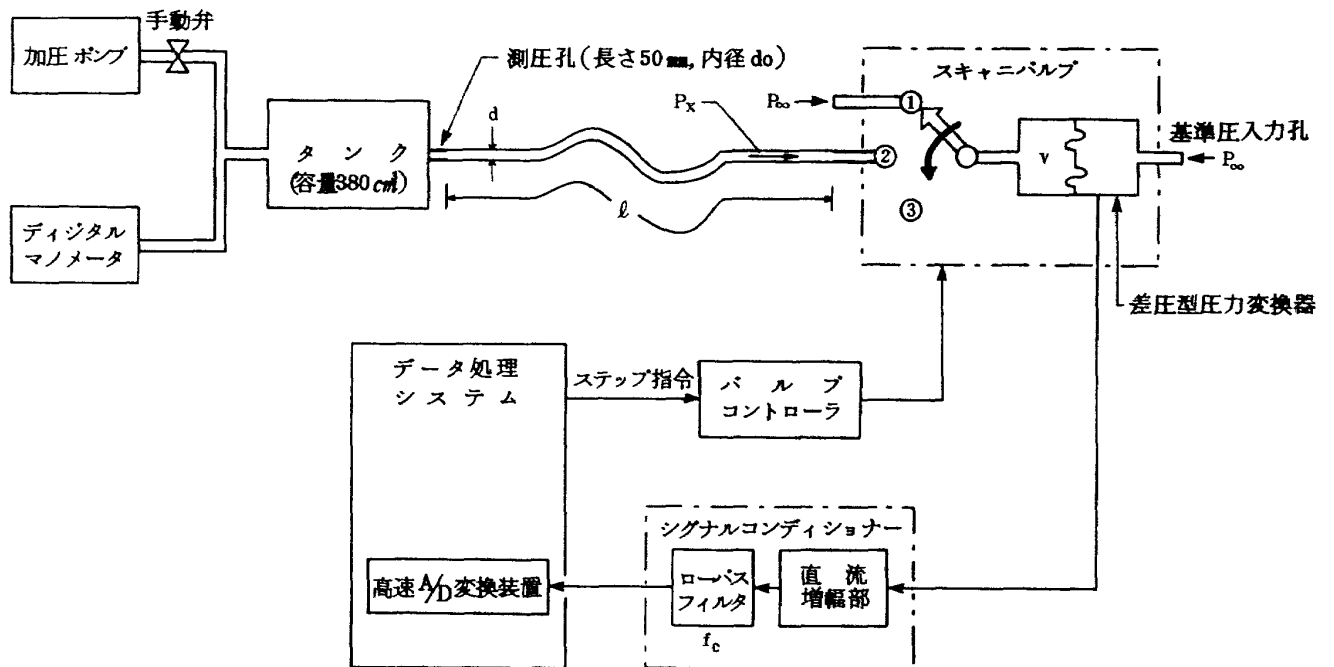


図10. 応答特性試験系統図

なり、精度の高いデータの採取、効率の良い試験を行うためには、測定系の応答特性を明らかにして系に最適な測定方法を決定する必要がある。

ここでは圧力配管系を含めたスキヤニバルブおよび雑音除去を行うローパス・フィルタの応答特性試験を行い、その結果を基に本測定系に最適なデータ収集方法、スキヤニバルブの走査速度を決定するための資料を求めた。

### 3.1 試験方法

スキヤニバルブおよびローパス・フィルタの応答特性試験は図10に示す系統により行った。測圧孔からスキヤニバルブに至る圧力配管系をはじめ、測定系の各機器は実用試験で使用される測定条件に近い状態とし、実用的な特性データが得られるよう心掛けた。

スキヤニバルブの応答特性の試験パラメータには、応答特性に影響を与えると考えられる次のものを選んだ。

パラメータ名	数 値	単 位
測 定 圧 ; $P_x$	- 1800 ~ 1800	mm H <sub>2</sub> O
測 圧 孔 の 内 径 ; $d_o$	0.5, 0.6, 0.8, 1.4	mm
配 管 の 内 径 ; $d$	0.7, 1.4	mm
配 管 の 長 さ ; $l$	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0	m
圧力変換器取付容積 ; $v$	0.046, 0.158, 0.269, 0.381	cm <sup>3</sup>

上記のパラメータの中で、配管の内径  $d=1.4$  mm が J 型スキヤニバルブの標準である。圧力変換器取付容積は、スキヤニバルブの導通管（図5参照）から導かれた測定圧力を忠実に圧力変換器の受圧面に伝えさせるために零にすることはできない。本特性試験では、PM131 TC型圧力変換器（表2参照）を使用した。その取付容積は専用のアダプタを用いて最小値を  $0.046$  cm<sup>3</sup> にしている。なお、スキヤニバルブ自身の内容積は、約  $0.32 \times 10^{-4}$  cm<sup>3</sup> と圧力変換器取付容積に比べ非常に小さく無視することができる。

スキヤニバルブの特性試験は、始めに圧力変換器の基準圧入力孔およびスキヤニバルブのポート番号1に大気圧  $P_{\infty}$  を与える。ポート番号2には、加圧ポンプで発生させた所定の測定圧  $P_x$  をデジタル・マノメータ（±2000 mm H<sub>2</sub>O, 精度 0.2 % FS）で測定し、タンク、配管を通して加える。次にバルブ・コントローラにステップ指令を与えると同時（実際には 0.5 ms 程度の遅れが存在するが無視できる）に、高速 A/D 変換装置をサンプリング周期 100 μs で動作させて、スキヤニバルブのポート番号が No.1 から No.2 に切換わる間、スキヤニバルブ

内の圧力変換器出力の時間的变化を測定する。この時、シグナル・コンディショナーのローパス・フィルタをオフ（セッティング・タイムは 100 μs 以下）にして、その応答遅れを無視できるようにした。

ローパス・フィルタの応答特性試験は、原則的には入力信号にステップ状波形を用いて行うべきであるが、ここでは実用上、高速 A/D 変換装置までの総合的な応答時間を求めるためにローパス・フィルタの遮断周波数を試験パラメータ（10 Hz, 100 Hz, 1 KHz）に採り、前述の特性試験パラメータを用いた試験と同様の手順により行った。

### 3.2 特性試験結果

本特性試験で得られたスキヤニバルブの圧力応答特性の結果を図11に示す。図11-(1), (5)の縦軸は圧力変換器の過渡出力を応答最終値の百分率で表わしている。図11

-(1)で応答曲線が立上るまでに約 21 ms の時間が経過しているが、この時間はスキヤニバルブの駆動部へステップ指令が与えられた後、ポートの切換えが開始されて圧力変換器の受圧面に測定圧力が伝播するまでに要した値である。このポート切換時間は駆動部のソレノイドを励起する条件、連結される切換部の台数によって異なるわけであるが、本特性試験で使用のもの（ソレノイド電圧 24 V, 切換部 4 台）は、ポート切換時間のばらつきが  $21$  ms ± 5 % 以下と安定した動作をしている。

応答曲線の立上りは、測定圧が常時スキヤニバルブの導入口（図5参照）まで加わっており（導入口から圧力変換器までの流路長は約 20 mm）急激なポートの切換え動作を行うため非常に急峻となっている。しかし出力が 80 ~ 90 % に達する付近からは、応答曲線はなだらかな勾配を示している。このようなスキヤニバルブの応答特性の評価は、可能な限り最終値付近での応答時間で行う必要があり、ここでは出力が立上り始めてから 99.5 % に達するまでの時間（99.5 % 応答時間）で特性試験結果の整理を行った。また応答の立上り部分の評価については 63.2 % 応答時間を用いた。各特性試験パラメータに対する応答特性について以下に述べる。

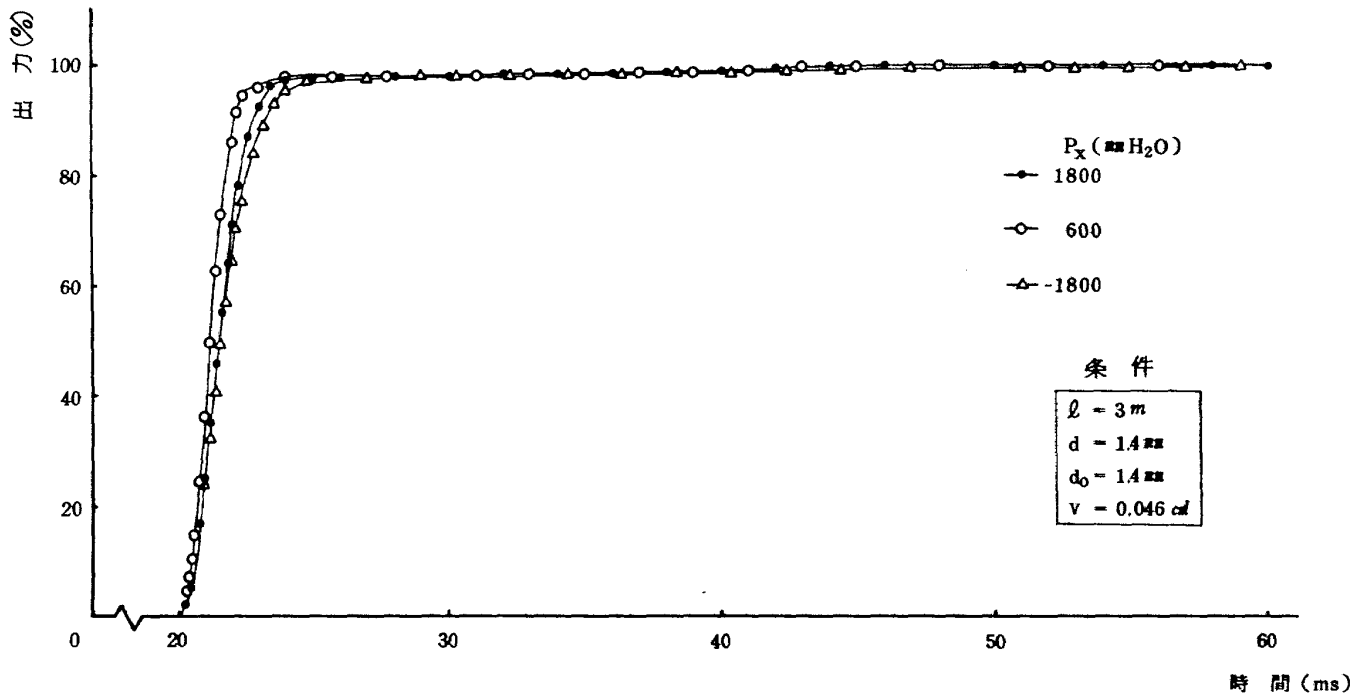


図 11 - (1) 測定圧の違いによる応答履歴

(1) 圧力応答における測定圧の影響

測定圧を変化させた場合の圧力応答履歴を図 11-(1) に示す。試験は圧力変換器取付容積の初期圧を大気圧として行ったが、応答の立上りの傾斜は、文献 3 にも示されている様に測定圧が大きくなるに従って幾分小さくなる傾向がある。これは、測定圧が大きくなると配管およびスキヤニバルブ内の流路でレイノルズ数が増大し、乱流現象などが生じはじめるためではないかと思われる。なお、立上り部分の応答はスキヤニバルブの切換動作（ポートと導入口の導通開始から完了する過程）のばらつきによる影響も大きいと思われ、切換動作の再現性について確認を行ったが問題はないようである。測定圧を±1800 mm H<sub>2</sub>O の範囲に渡って変化させた場合、図 11-(2) に見られるように 99.5% 応答時間は圧力値によってあまり変わらないようである。し

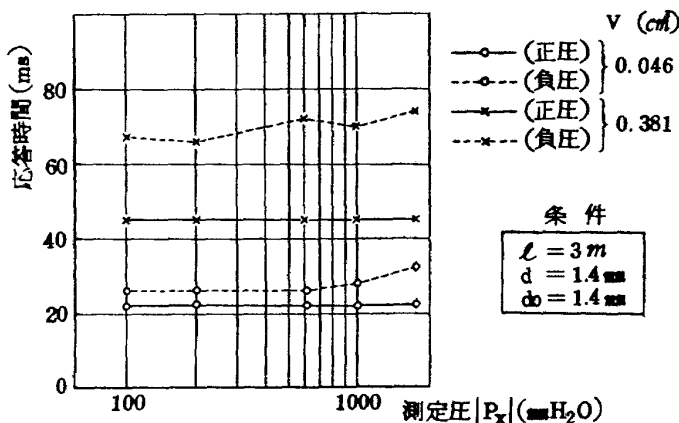


図 11 - (2) 圧力応答 (99.5%) における測定圧の影響

かし、正圧と負圧とを比較すると、負圧の場合は正圧よりも応答時間が大きくなっており、圧力変換器取付容積を大きくすると、その傾向が一層大きくあらわれてきている。

(2) 圧力応答における測圧孔内径の影響

測圧孔の内径を変化させた場合、圧力応答の違いは図 11-(3), (4) に示すように、立上り部分には見られず、

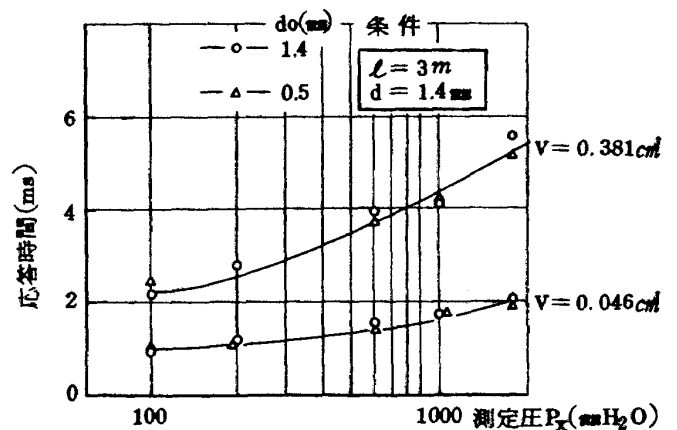


図 11 - (3) 圧力応答 (63.2%) における測圧孔内の影響

立上り以降にあらわれている。測圧孔が 0.8 mm ( $d_o/d = 0.57$ ) 以上のとき、99.5% 応答時間は同程度の値であるが、0.8 mm 以下になると応答時間は急激に増加している。

(3) 圧力応答における配管内径の影響 (図 11-(5))

配管内径が 1.4 mm, 0.7 mm とも、出力が 80% 付近に達するまでの立上り部分の応答は同様な結果を示して

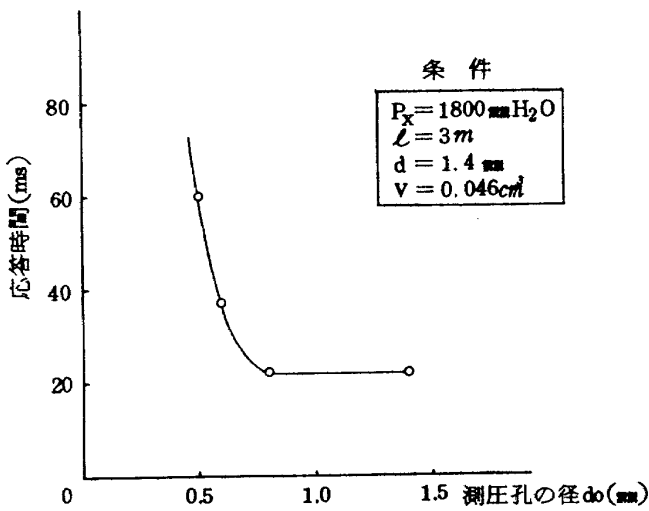


図11-(4) 圧力応答 (99.5%)における測圧孔内径の影響

いる。これは配管内径が1.4 mmと太い方では流速が大きく流れが乱流になり、摩擦抵抗が増大し本来(層流)の応答より遅れ、管内径が0.7 mmと細い方では流速が大きくなり、依然層流のままであるためではないかと思われる。一方出力が80%を過ぎる付近から内径0.7 mmの配管では応答が非常に悪くなっているが、これは配管が細いため流速がまだかなり大きく、摩擦による圧力損失があるためではないかと考えられる。99.5%応答時間は、内径1.4 mmのとき22 ms程度であるのに対し、0.7 mmでは約80 msと大幅に増えている。

(4) 圧力応答における配管長の影響

図11-(6)に示すように配管が長くなると摩擦損失が増加し応答時間も増加してくる。圧力変換器取付容積が最小値の0.046 cm³の場合、99.5%応答時間はほぼ配管長の一次関数になっている。圧力変換器取付容積を

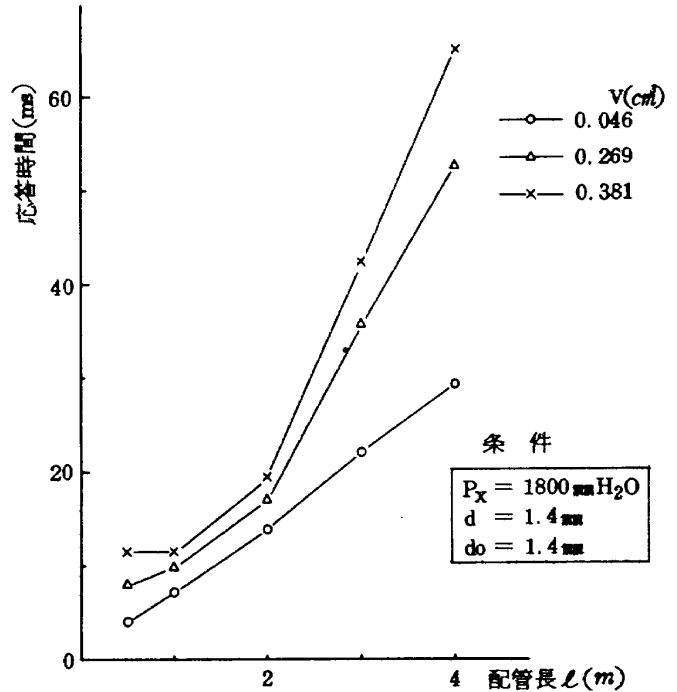


図11-(6) 圧力応答 (99.5%)における配管長の影響

さらに増加させると、配管長に対する応答時間の増加率は著しく大きくなっている。

(5) 圧力応答における圧力変換器取付容積の影響

圧力変換器取付容積の増加に伴って、そこに流入、あるいは流出する質量も増加するために応答時間は増加する。圧力変換器取付容積に対する99.5%応答時間の増加率は、図11-(7)に示すように測定圧が負圧の場合に、正圧の同値に比べて約2倍と大きい。

(6) ローパス・フィルタ付加による応答

図11-(1)で示した圧力応答出力 ( $P_x = 1800 \text{ mmHg}$  の場合) をローパス・フィルタの入力信号とした場合

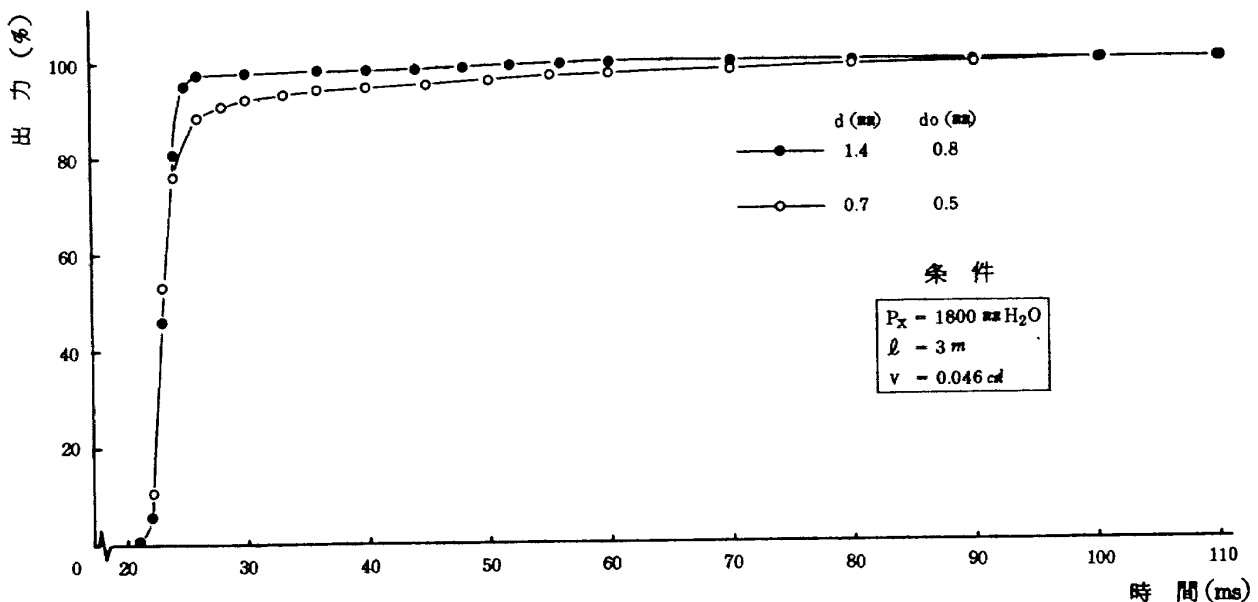


図11-(5) 配管内径の違いによる応答履歴

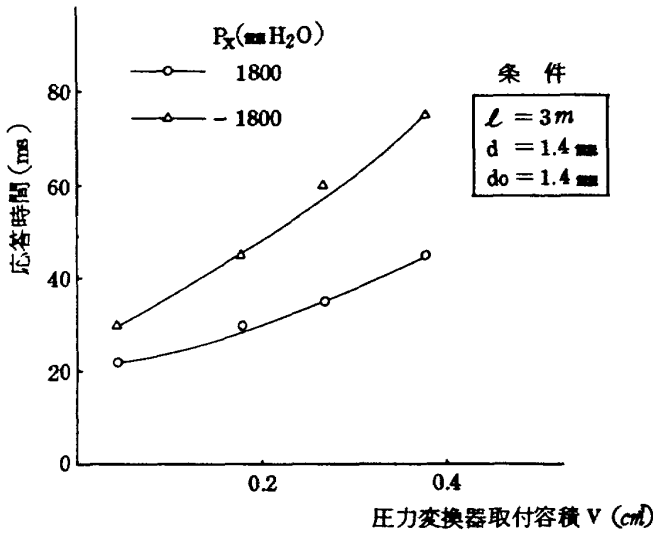


図 11-(7) 圧力応答 (99.5%) における圧力変換器取付容積の影響

の応答特性を図 12 に示す。ローパス・フィルタの遮断周波数を 100 Hz に設定した場合、1 KHz に比べて応答の立上りが幾分遅れ、圧力変換器出力波形が急峻であるため、オーバーシュートもあらわれてきている(リングング発生)。しかし 99.5% 応答時間は 30 ms 程度におさまり、1 KHz の場合(約 25 ms)とあまり変わらない。一方、遮断周波数が 10 Hz のローパス・フィルタは応答の立上りが著しく劣化し、オーバーシュートも一段と大きくなって応答時間は 200 ms 以上に及んでいる。

3.3 雑音の除去と測定時間

本測定系において、供試模型に装着したスキャニバルブから、データ処理システムの高速 A/D 変換装置に至る

測定信号のケーブルは 50 m 以上に及んでおり、その周辺には風胴送風機用の制御リレー群、動力ケーブルなどが存在している。このため測定信号には衝撃雑音や交流音が数多く誘導される。

本測定系を試作した当初、これらの雑音の除去は 10 Hz の遮断周波数を持ったローパス・フィルタにより行っていたが、前項の特性結果(図 12 参照)にみられるようにフィルタによる信号の応答遅れが生じて、スキャニバルブの良好な応答特性を失なわせる結果となり、ポート 1 点あたりの測定に 200 ms 以上の時間を要した。

そこで比較的応答遅れの少ない 100 Hz のローパス・フィルタと交流雑音周期内を一定間隔でサンプリングを行うデータ採取方法を併用させて雑音の除去を行った。

図 13 はスキャニバルブを駆動した際に、測定信号に誘

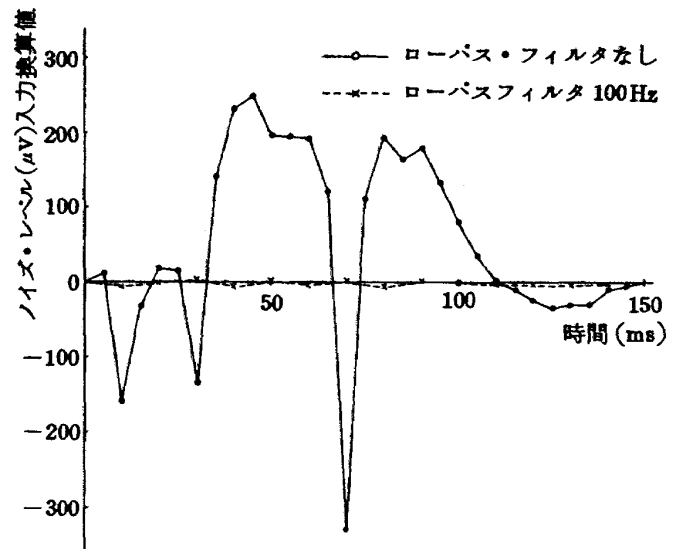


図 13 ソレノイド誘導ノイズ特性

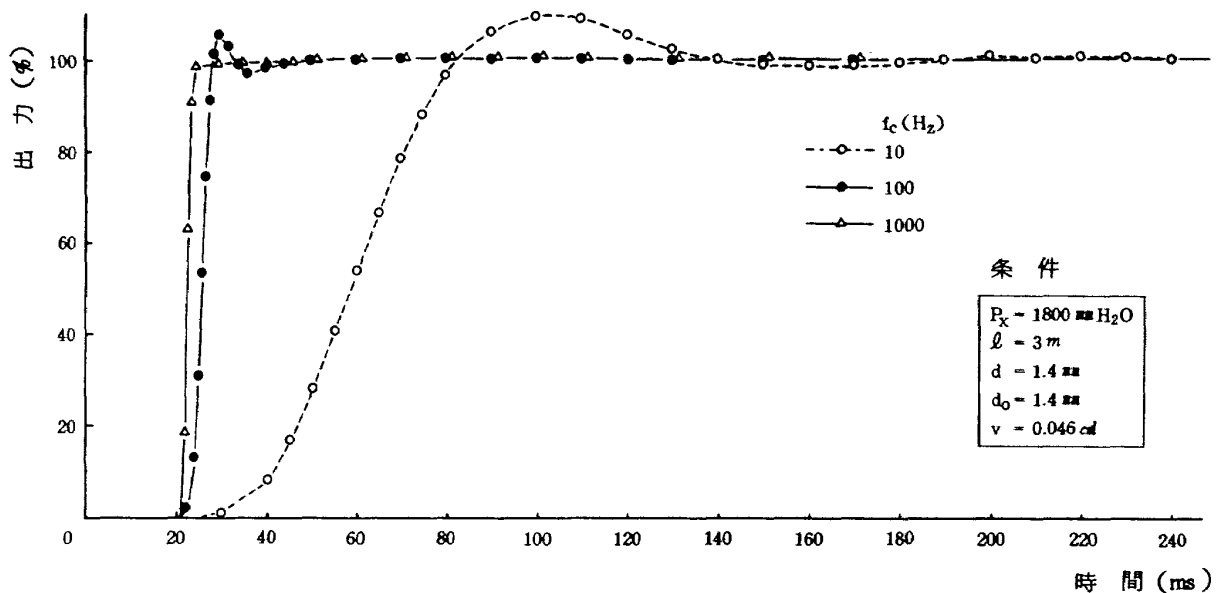


図 12 ローパスフィルタ付加による応答履歴

導される衝撃雑音(入力換算値で $5\mu\text{V}$ レベルの交流雑音を含む)をA/D変換( $0.1\text{ms}$  サンプル)した結果を図示したものである。この衝撃雑音はソレノイドの励起および停止( $60\text{ms}$  付近)時に発生し、そのピークは入力換算値で $300\mu\text{V}$ 程度であり、しかもスキヤニバルブへステップ信号を与えてから約 $150\text{ms}$ の間発生しているため、この間でデータ採取を行う場合、問題となってくる。この雑音の除去方法としてソレノイドにサージ電圧を吸収する回路を設ける。あるいは電源ライン・フィルタとローパス・フィルタの併用などが考えられる。前者の場合はサージ電圧吸収回路を設けることによって、スキヤニバルブのポート切換動作に遅れが生じ(ソレノイドの温度上昇も伴う)不適当である。電源ライン・フィルタとローパス・フィルタ( $100\text{Hz}$ )を併用した場合、図13に示すようにフィルタなしの時、衝撃雑音のピークが入力換算値で $300\mu\text{V}$ もあったものを $10\mu\text{V}$ 以下に減衰させることができる。衝撃雑音は高い周波数成分を多く含んでおり、電源ライン・フィルタとローパス・フィルタ( $100\text{Hz}$ )の併用は有効である。また、これらのフィルタによって、スキヤニバルブ以外の機器から発生する衝撃雑音も十分に減衰できると思われる。

交流雑音は商用電源基本波( $50\text{Hz}$ )とその高調波よりなっているが、これらは先に述べたデータ採取方法、すなわち高速A/D変換装置によって交流雑音周期内( $20\text{ms}$ )を一定間隔でサンプリングし、その平均値を求めることによって交流雑音成分を相殺させ除去する。この時の除去可能な交流雑音成分は $50\text{Hz}$ からサンプリング周波数の $1/2$ にあたる周波数までとなる。また積算平均によって不規則雑音の減衰も同時に行なわれ、前述のフィルタと組合せて一層効果的な雑音除去を行うことができる。

この雑音除去方法の採用により測定時間を大きく短縮することができた。例えば、スキヤニバルブの配管を図12と同等な条件にした場合に、 $100\text{Hz}$ のローパス・フィルタ使用時の総合応答時間は約 $70\text{ms}$ となり、この時間に高速A/D変換装置のサンプリング時間 $20\text{ms}$ を含めて、ポート1点あたりの測定時間を $90\text{ms}$ 程度とすることができる。

#### 4. 圧力データの収集処理

すでに第I報で報告したように本データ処理システムのオペレーティング・システム(MOSLAB IV)は、外部割込み処理、タスク処理、オーバレイなどリアルタイム処理を効率良く実行するための機能と同時にファイル処理機能を有している。

スキヤニバルブによる圧力測定用ソフトウェアの作成に際し、上記の処理機能を十分に活用し、次の点を配慮して実用化を行った。

(1) 本システムの処理能力やバルブ・コントローラ動作機能を考慮し、最適な計算機制御ができるように、エラー・チェックなどハードウェアで網羅できない点をソフトウェアで補うようにした。

(2) オペレータの操作性、データファイルの互換性を考え、第I報のソフトウェア(データ収集プログラム)と同一の形態を採用した。

(3) 測定系の応答特性の結果を参考にして、試験効率、データの信頼性や精度を高めるような収集処理法をとった。

(4) 5連式(切換部が現用のものに1台付加)になっても利用できるようなプログラム構造とした。

図14にソフトウェアの構成を示す。圧力データ処理プログラムの中から、条件設定およびデータ収集プログラムについて報告することにする。

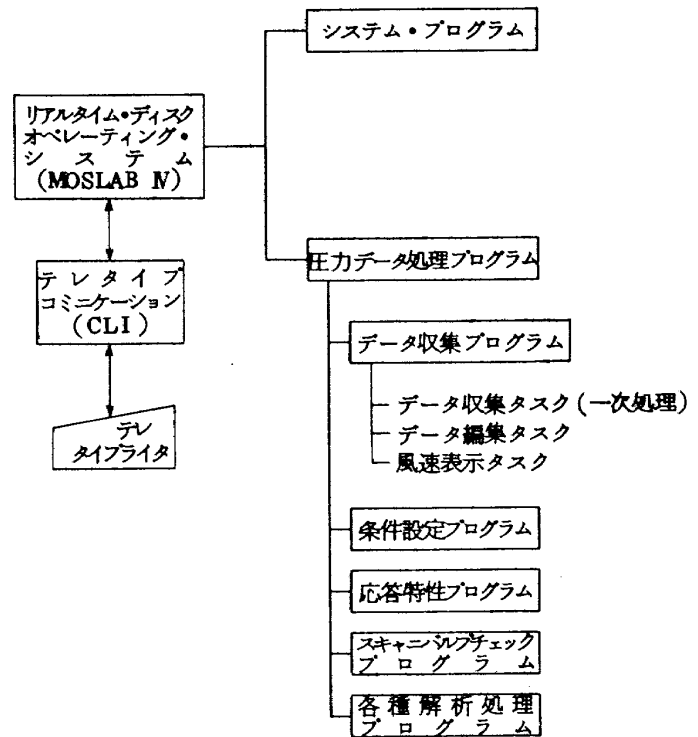


図14 ソフトウェア構成図

##### 4.1 条件設定プログラム

本プログラムは、圧力データの収集・解析で使用される各種計測条件ファイルを磁気ディスク上に作成するもので、基本的に第I報で述べたものと同じ処理形式を採用しているが、圧力分布測定条件、スキヤニバルブ・コントロール条件や高速A/D変換条件が追加されている。こ

これらの条件パラメータはテレタイプライタとの会話により設定変更が行われるが、パラメータの入力時にプログラム・チェックがなされ、設定ミス防止している。

本プログラムで設定する代表的なパラメータの内容を表3に示す。

4.2 データ収集タスク

本プログラムは、入出力機器の動作完了待ち時間を利用し、互いに独立して動作できるマルチタスク・プログラム手法を用いて作成した。本プログラムは、データ収集、風速表示、データ編集タスク群で構成され、そのゼネラル・フローを図15に示す。

(1) データ収集タスク

最も優先度の高いタスクで、下記のような実験コントロール・コマンドをテレタイプライタによりキー・インすることにより、コマンドに該当した処理を行う。

- CTRL/N ; 初期データの計測
- CTRL/S ; 圧力データの計測
- CTRL/E ; 1 ケースの計測完了
- CTRL/Z ; 1 ランの計測終了
- CTRL/P ; 実験中のパラメータ変更

実験開始処理は CTRL/N コマンドによって行われ、無風時での風洞パラメータ（動圧、迎角、横すべり角など）を収集し生データファイルに格納する。本処理後、直ちに風速表示タスクが起動し、試験風速の設定が行われる。

風速などの試験条件が確立された後、CTRL/S コマンドの入力により圧力データの計測が開始される。計測の方法は模型姿勢が自動か手動かにより異なる。

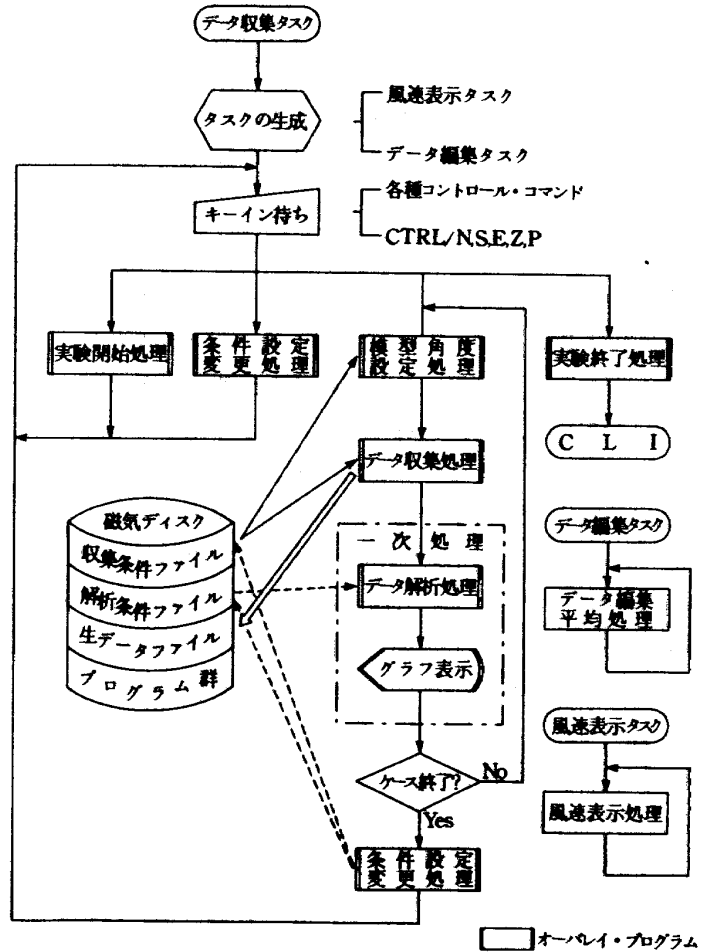


図 15 データ収集プログラムのゼネラル・フロー

自動の場合は、収集条件に従って模型の姿勢制御、スキャニバルブの制御、圧力データや基準データの収集と編集、データファイルの作成さらにモニタリングのため

表 3 条件設定パラメータの内容

項 目	パ ラ メ ー タ の 内 容
1. 解 析 処 理	配管方式, 測定圧力点数, 不良圧力点数/ 圧力孔位置 圧力孔の座標, 模型諸元, 圧力校正係数
2. 計 測 条 件	実験番号, 一次処理の有無, 測定パラメータ(ラン番号, ケース番号) 模型姿勢変更方式(自動/手動), 角度コントロール・パラメータ
3. A/D変換条件	サンプリング時間, 先頭及び最終チャンネル番号, 平均回数 クロック・モード, サンプル・モード, 入力レンジ, 内部タイマ周期
4. スキャニバルブ コントロール条件	先頭及び最終ポート番号, 測定圧の整定待ち時間

項目1は解析条件ファイルに、項目2～4は収集条件ファイルに格納される。

の一次処理までの一連の動作を自動的に行い、角度コントロール・パラメータが最終値になると自動計測が終了（以下1ケースという）され、追加計測およびパラメータ変更処理に移る。

手動及び追加計測の場合は、計測点毎に CTRL/S コマンドを入力し1ケース終了時に CTRL/E コマンドを入力する。

パラメータ変更処理は、CTRL/P コマンドにより行われる。このコマンドは、本タスクがコマンド待ちであればどの時点でも入力可能である。

実験終了処理は、CTRL/Z コマンドにより生データファイルをクローズして CLI (Command Line Interpreter) にもどし以後バッチ処理に移行する。

(2) データ編集タスク

データ収集タスクの次の優先度をもち、収集された圧力データの平均や編集処理を行うタスクで、本タスクの実行は収集タスクにより完全に制御される。

(3) 風速表示タスク

本タスクは、第I報で作成されたプログラムと同一のものを使用した。データ収集タスクで収集された風洞パラメータ（動圧、静圧、気流温度）から風速計算を行い、その結果を風速表示器に出力するもので、優先度は最下位である。

(4) タスク間の動作概要

タスク間の動作は次に示す順序で行われ、そのタイム・チャートを図16に示す。

a) 模型姿勢の設定後、CTRL/S コマンドの入力により演算処理装置に割込みがかかる。

b) それを受けてデータ収集タスクは、スキャニバルブにホームングを指令し、ホーム動作完了後ホーム位置をチェックする。正常でない場合はエラー処理に移る。

c) ポートの切換えを行うため、ステッピングを指令し、あらかじめ指定されている圧力整定時間経過後、ポート位置のチェックを行う。

d) 正常であれば、高速A/D変換装置を動作させ、圧力データの収集処理をする。

e) 次のポートの切換時及び圧力整定時は、演算処理装置が入出力待ちとなり、この空き時間を利用して、データ編集タスクが動作し、すでに収集された圧力データの平均及び編集処理をする。

(c)~(e)の動作を繰返しなが最終ポートまで行う。また、データ収集及び編集タスクの実行の空き時間を利用して風速表示タスクが動作する。

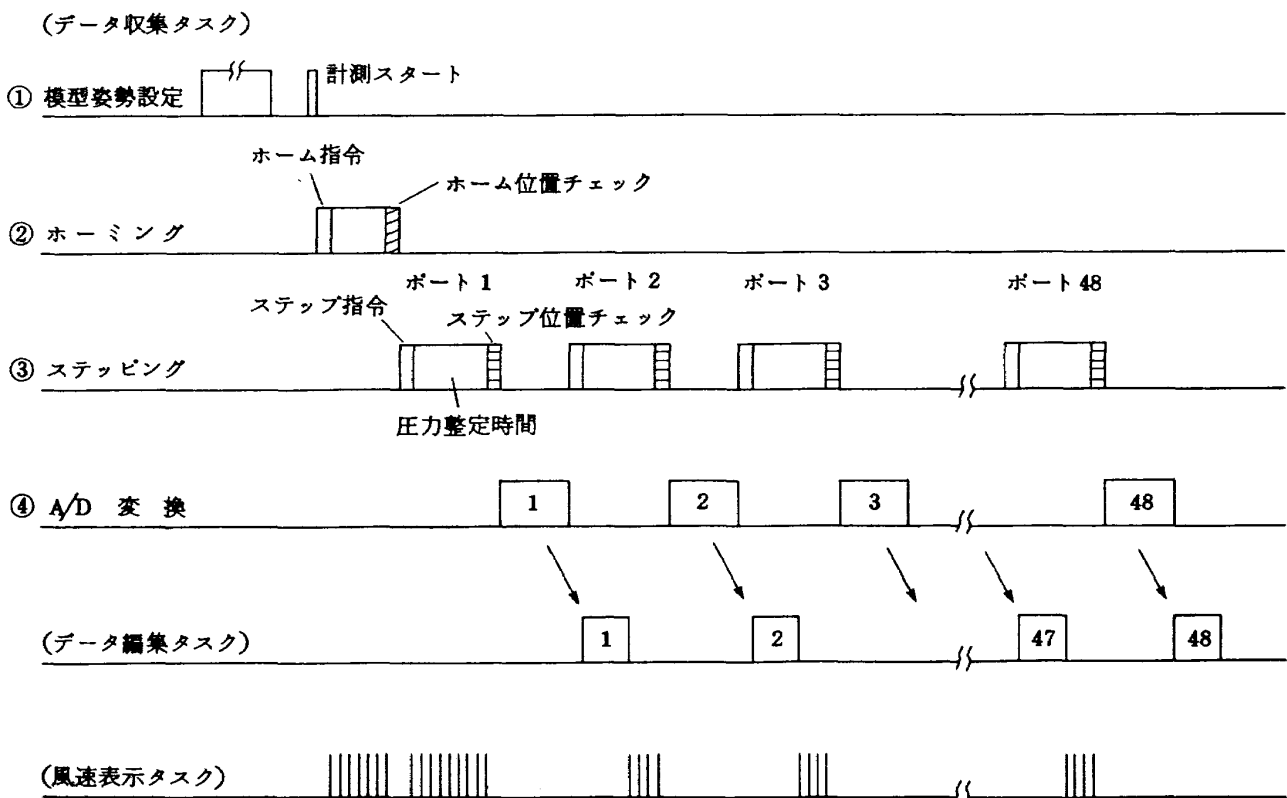


図 16 データ収集プログラムのタイム・チャート



4.3 生データファイルの構造

本ファイルは、データ収集プログラムの実行により測定された圧力データ、基準データや各種の実験条件を格納するディスク・ファイルである。データ数が試験内容によって異なるため、レコード単位(128バイト)で格納場所が増加できるランダム・ファイル形式をとった。

本ファイルの構成は、通信回線による大型電子計算機システムの利用及び第I報で作成されたデータファイルとの互換性を考慮して、次のようなブロックに分類した。

- (1) 実験開始ブロック : 1レコード
- (2) プリセットデータ・ブロック : 13 "
- (3) 計測データ・ブロック : 4 "
- (4) ケース終了ブロック : 1 "
- (5) 実験終了ブロック : 1 "

初期値データは、基準データだけのために、(1)のブロックに格納することにした。又(2)のブロックには解析条件ファイルの内容が格納されており、両ブロックは、CTRL/Nコマンドにより作成される。なお各ブロックのデータは全て単精度実数、整数で扱っている。

図17に本ファイルの構造を示す。

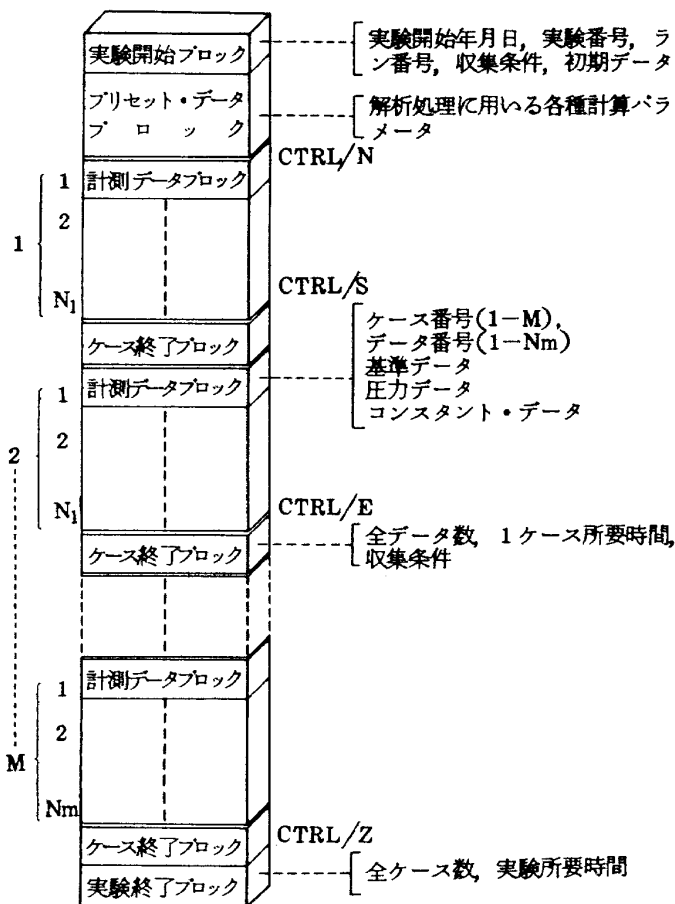


図17 生データ・ファイルの構造

4.4 一時処理

一次処理は多点圧力のデータ収集後、直ちに解析処理し、その結果をグラフィック・ディスプレイ上に表示させ、収集データの良否の判断に用いるもので、通常、模型表面の圧力係数の形でモニタリングをしている。

一般に模型表面の圧力係数  $C_{Pk}$  は次式で示される。

$$C_{Pk} = (P_k - P_0) / q$$

但し、 $P_0, q$  ; 一様流の静圧と動圧  
 $P_k$  ; 模型の測圧孔の圧力  
 添字  $k$  ; 測圧孔の位置

測定データから  $C_{Pk}$  を求めるためには、物理量への変換や圧力変換器のドリフト補正などいくつかの計算ステップが必要となるが、スキヤニバルブを使用した場合は、図2に示すような圧力配管方法と差圧型圧力変換器の使用によって、次式により生データから直接求められる。

$$C_{Pk} = (XP_{i,j} - XP_{i,1}) / (XP_{i,2} - XP_{i,1})$$

$$k = 48(i - 1) + j - 2$$

但し  $XP_{i,j}$  ; 圧力データ出力値(生データ配列)  
 $XP_{i,1}$  ; 静圧データ出力値  
 $XP_{i,2}$  ; 総圧データ出力値  
 添字  $i$  ; 変換器のチャンネル番号 (1~5)  
 "  $j$  ; スキヤニバルブのポート番号 (3~48)

一様流の静圧を圧力ポート1と圧力変換器の基準圧入力孔に配管することによって、圧力変換器を含めた測定系のドリフト補正を行っている。又、総圧を圧力ポート2に配管することにより、総圧と圧力変換器の基準圧入力孔に入れた静圧との差圧、すなわち動圧に相当した電氣量が得られる。

一次処理は、実時間でのモニタリングを主目的としているので、圧力分布からの力、モーメントの計算などは、全て二次処理で行っている。

5. 総合精度

風洞試験より得られた測定データには、計測系を構成している機器固有の誤差のほか、誘導雑音、測圧孔の形状、圧力配管系のもれ、および伝達遅れに起因する誤差があるが、それらは定量的に把握することは非常に困難である。

そこで、本計測系の圧力変換器からA/D変換装置までの精度を推定し、図18に示した回転楕円体模型による風洞試験の結果およびその理論値から測定データの総合精度を検討した。

精度の良い圧力測定を行うためには、試験に使用する

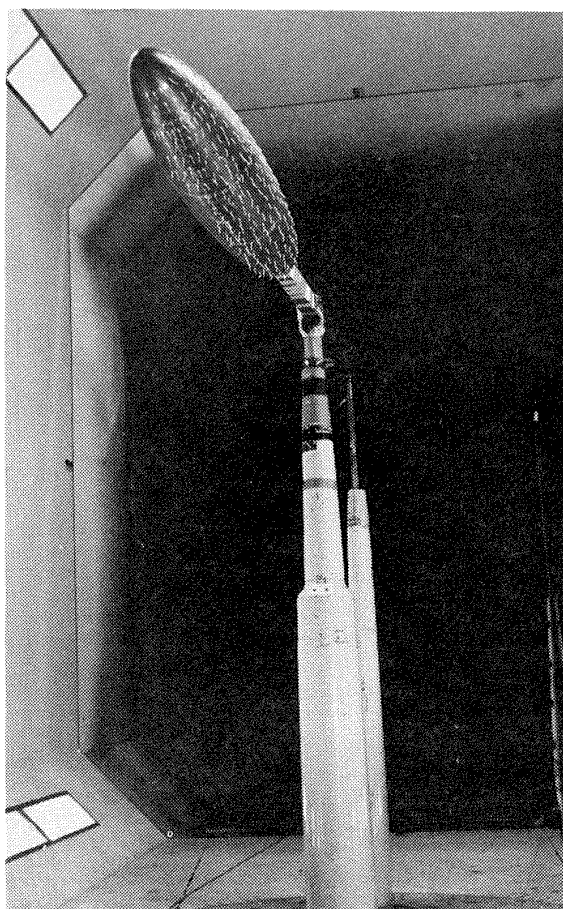


図18 回転楕円体の風洞試験  
(前後2本支持方式)

圧力変換器のレンジは測定する圧力の範囲に応じて決める必要がある。回転楕円体表面上の圧力は圧力係数で±1以下の範囲（風速60 m/sにおける一様流動圧は約200 mm H<sub>2</sub>O）になることから、試験には表2で示した圧力変換器の内、レンジが±360 mm H<sub>2</sub>OのPDCR 22を使用した。

まず実際の試験に先だち一次圧力計であるオートマノメータ<sup>2)</sup>（±300 mm H<sub>2</sub>O，精度0.1 mm H<sub>2</sub>O）によってPDCR 22の較正を行い直線性を確認する。感度係数は4・4項で述べた較正方法により求める。この方法ではスキヤニバルブを1回走査する毎に基準圧（風洞静圧）および較正圧（風洞動圧）を計測し、オートマノメータで同時に測定した風洞動圧をもとに圧力変換器を含めた計測系全体のオフセット量と感度係数を求めている。スキヤニバルブの1回の走査は数秒であるから、この較正方法によって、圧力変換器をはじめ本計測系の各機器が十分に熱平衡に達した状態であれば、風洞の気流温度の急激な変化のないことから、圧力変換器などの温度効果による零点および感度の変化、いわゆる温度ドリフトは無視することができる。

そこで、温度ドリフトに起因する誤差を除いて計測系の各機器の精度を推定すると、PDCR 22では直線性、励起電圧の安定度から測定圧力レンジの±0.1%程度の精度となる。シグナル・コンディショナーでは、利得精

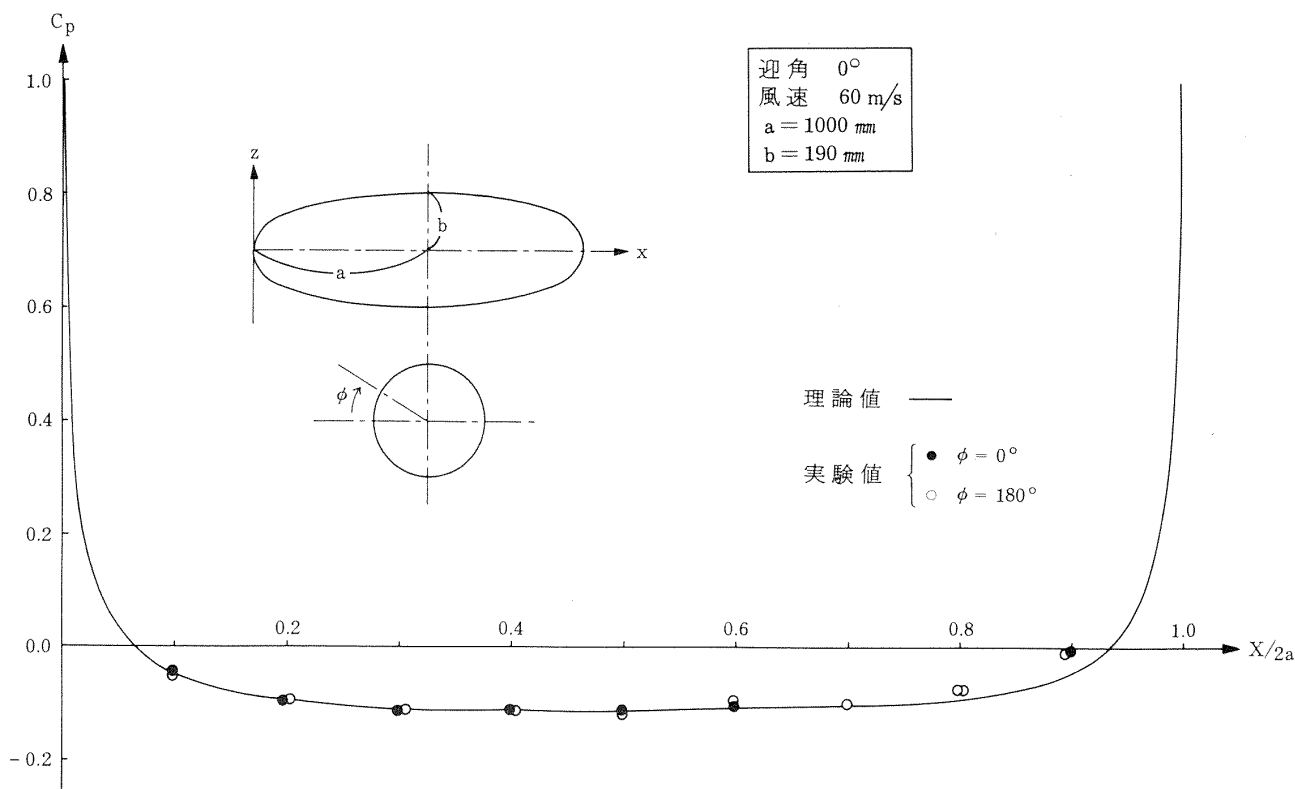


図19 回転楕円体の圧力分布測定結果

度、安定度、直線性、内部雑音などから、その精度は出力電圧10Vフル・スケールに対して±0.12%となる。また高速A/D変換装置では入力電圧のフル・スケールを10.24Vとした場合、その精度は±0.13%である。

一方、測定信号に誘導してくる雑音は、前述の除去方法によって入力換算値で10 $\mu$ V程度とすることができる。これら各機器の精度、雑音レベルより、圧力変換器から高速A/D変換装置までの総合精度を見積ると、測定圧力レンジに対して±0.6%程度になると考えられる。

図19は本計測系を使用して得た風洞試験結果の一例で、グラフは迎角零度、風速60m/sにおける回転楕円体表面上の圧力分布を圧力係数で表示したものである。実線は非粘性を仮定した理論値<sup>10)</sup>で、実験値と比較してみると、模型の後縁部(弦長80%付近)では、模型支持部の影響を受けて両者の差は大きくなっている。その他の部分では圧力係数の差は±0.014以下(測定圧力・レンジの±0.77%)となっている。この偏差量と推定した計測系の総合精度を比較した場合、理論値は非粘性を仮定していることや、推定した計測系の誤差以外に、測圧孔の形状や風洞パラメータ、模型の精度などに起因する誤差を考慮すれば、この両者の差は妥当な値であると考えられる。

なお、PM131TC型圧力変換器を使用した場合の計測系の総合精度は測定レンジ(±1800mmH<sub>2</sub>O)の±1.1%以下と推定される。

## 6. あとがき

本データ処理システムの自動圧力計測系が完成して以来、多くの風洞試験に実用され、本スキヤニバルブ方式による自動圧力計測には予期した通りの良い成果が得られた。特に、従来の計測系に比べてデータ収集に要する時間が1/20以下に短縮され、飛躍的な試験効率の改善がなされた。

しかし、高圧空気とエンジン・シミュレータを用いた高揚力装置付模型のエンジン・インテーク試験などでは、測定する圧力が非常に広範囲に渡っており、より高精度な試験を行うためには圧力変換器の整備とともに、従来

の測圧孔位置の順序に従った配管方式に変えて、測定圧力の大きさに応じて配管をより分け、最適なレンジの圧力変換器に接続する方法などの採用が必要となってきた。

また、圧力分布測定をより高速に行うための圧力配管系の応答改善、雑音の影響を軽減するセンサー・サイドでの測定信号のデジタル化、光ファイバーによる伝送方式の採用なども、合せて今後行う必要がある。

最後に、本報告をまとめるにあたって、空気力学第二部遠藤部長に御指導をいただき、ここに深く感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 重見 孝, 広岡貫一; 航空宇宙技術研究所大型低速風洞について, 日本航空学会誌, 第15巻第167号 (1967年)
- 2) 桑野尚明ほか; 大型低速風洞データ処理システムについて I, 航技研資料, TM-345 (1978年3月)
- 3) 酒井春雄ほか; 自動圧力計測について, 日本航空学会誌, 第19巻第209号, (1971年)
- 4) 榊原盛三ほか; 超小型圧力切換弁による高速自動圧力計測, 航技研ニュース, №135 (1970年8月)
- 5) 坂田公夫ほか; 空冷タービン翼列試験における自動計測, 航技研ニュース, №174 (1973年11月)
- 6) 竹内 理; 風洞試験と小型計算機の利用, 電子計測 (1976年4月)
- 7) 吉沢 昭; 極超音速風洞計測装置について, 航技研資料, TM-317 (1976年10月)
- 8) 桑野尚明; 大型低速風洞動的量データ処理設備, 航技研資料, TM-236, P.10 ~ P.12 (1972年10月)
- 9) Scanivalve General Catalog (1974年)
- 10) E.G. Atraghji; Surface Flow Visualization, Surface Pressure and Surface Preston Tube Pitot Pressure Measurement Over a 6:1 Ellipsoid at Incidence at M = 0.3 and 0.74, N.R.C M49-10-3 (1968年)

---

## 航空宇宙技術研究所資料392号

昭和54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 三興印刷  
東京都新宿区信濃町12

---

