

UDC 533. 6. 071. 3:

629. 7. 018. 1. 016. 55-791:

681. 3. 02

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-160

極超音速風洞計測装置について

長洲秀夫・吉沢 昭

松崎貴至

1969年7月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. ま え が き	1
2. 装 置 の 概 要	1
3. アナログ信号処理部	2
3.1 変 換 器	2
3.2 低レベルスキャナ	7
3.3 直 流 増 幅 器	8
3.4 高速度スキャナ	9
4. デジタル信号処理部	11
4.1 アナログデジタル変換器	11
4.2 アナログデジタルチャンネル制御器	14
4.3 中央演算処理装置	15
5. 実験データの収集とその処理	15
5.1 風洞運転方式	15
5.2 実験データの種類と記録	16
5.3 修正データの計算	19
6. 総 合 精 度	22
7. む す び	22

# 極超音速風洞計測装置について\*

長洲秀夫\*\*・吉沢 昭\*\*・松崎貴至\*\*

## Data Processing System for Hypersonic Wind Tunnel at NAL

By

Hideo NAGASU, Akira YOSHIKAWA, Takashi MATSUZAKI

A new high speed digital data processing system has been in operation for experiments in the 50 cm intermittent hypersonic wind tunnel at National Aerospace Laboratory.

The principal features of this system are:

- 1) adoption of on on-line recording method by which digital data are recorded on a magnetic tape recorder of the auxiliary memory of a digital computer,
- 2) adoption of a dual scanning system consisting of low speed electromechanical and high speed electronic scanners.

The functional characteristics, mechanical and electrical noise induced in the system from inside and outside sources, and accuracies of the components are investigated, and satisfactory results are obtained.

This report describes the results of this investigation together with the method of data reduction used in the experiments in the hypersonic wind tunnel.

### 1. ま え が き

飛しょう体の極超音速領域における空気力学の研究のために間欠吹出し吸込み方式による極超音速風洞が空気力学第一部に建設され、多くの試験運転を経て実用化されているが、本風洞のように間欠方式によるものでは気流の接続時間が短く、この間に数多くのデータをすみやかに測定し、正確に処理しなければならない。このために電子計算機による計測の自動化が必要であり、この風洞では、OKITAC-5090C を中心としたデジタル式高速データ処理装置を設計製作した。この方式によるものは、動的な測定に対しては限界があるが、数多くのデータを正確に記録し、記録後の処理をすみやかに、かつ自動化して行なうことが可能であ

り、また精度もよい。本報告ではこのデータ処理装置の構成機能およびデータ処理方法について述べるとともに、その校正データをもとにして、おもにアナログ信号処理部における精度について種々測定を行なった結果について述べる。

### 2. 装 置 の 概 要

この風洞は、合計 18m<sup>3</sup> の高圧中型容器に貯えられた最高 200 kg/cm<sup>2</sup>G の乾燥圧縮空気を調圧して、大気中または 1150 m<sup>3</sup> の真空槽中へ 40~120 s の持続時間で断面 50 cmφ の測定部を通して吹き出し、測定部に極超音速気流を得るものであり、ノズルを交換することにより、マッハ数 5, 7, 9 および 11 の気流を得ることができる<sup>1)</sup>。

風洞試験は測定部に設けられた模型支持装置に天秤を内挿した飛しょう体の縮尺模型をとりつけ、迎角を変化させたとき、模型のうける力、迎角、各部の圧力

\* 昭和44年5月28日受付

\*\* 空気力学第一部

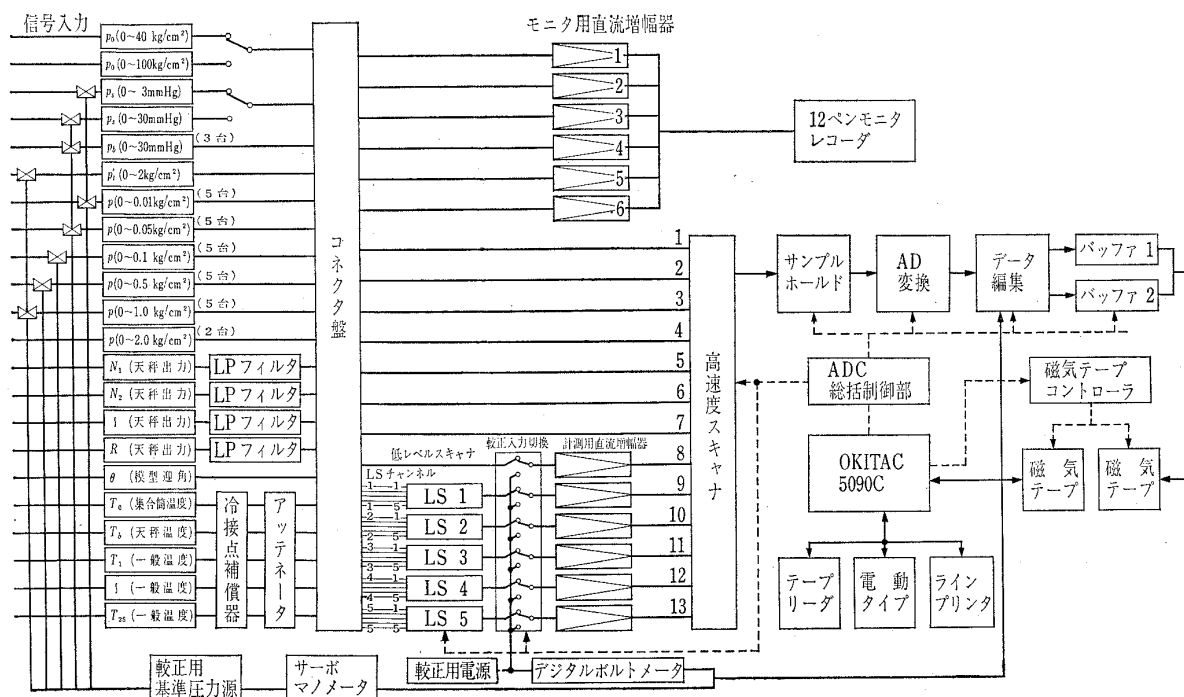


図1 データ処理装置の系統

分布、温度分布等を電圧に変換してデジタル化し磁気テープに記録するものである。図1にこの計測装置のブロック図を示す。

測定データは実験条件の基準値となる基準データ、すなわち

- $p_0$  (集合筒圧力)
- $p_s$  (測定部静圧)
- $p_b$  (模型底面圧力)  $\times 3$
- $p_t'$  (ピトー圧力)
- $T_0$  (集合筒気流温度)
- $\theta$  (模型迎角)

の8チャンネルの他に一般計測データとして

六分力 (三分力天秤測定の場合は  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $X$ )

$N_1$  : 第一垂直力,  $N_2$  : 第二垂直力

$Y_1$  : 第一横力,  $Y_2$  : 第二横力

$X$  : 軸力,  $R$  : 横ゆれモーメント

$p$  (圧力分布)

$T$  (温度分布)

等任意のものを最高25チャンネルまで、同時測定することができる。これらのデータはスキャナにより時分割され、低レベルのものは適当に増幅して、符号+2進化10進数3桁にAD変換されたのち、信号源との対応をつけるためのチャンネル番号が付加され磁気テープに記録される。データの計算処理は実験終了後、各

種の処理プログラムにより行なわれ、必要な空力係数等の作表またはデータテープのパンチ等が行なわれる。また、この風洞では模型のロール角  $\phi$  は実験前手動で設定する。したがって  $\phi$  は一種のコンスタントデータとして記録される。

### 3. アナログ信号処理部

#### 3.1 変換器

極超音速風洞における試験データは力、圧力、温度および迎角データであり、これらは風洞測定部より約50mはなれたデータ処理室までケーブルにより導かれている。これらの信号源のうち迎角データおよび圧力データの一部をのぞいては、すべて数 mV 以下のレベルであるため誘導ノイズ等による S/N への影響が問題となる。このため低レベル信号はすべて入力を平衡型とし、完全に接地された鋼管中にシールドケーブルを配線して、風洞制御用の他の機器より及ぼされるノイズをできるだけ軽減せしめた。この結果通常の使用状態で信号に及ぼされるノイズは、たとえばストレインゲージ型圧力変換器による圧力測定の場合、図2に示す程度軽減することができた。図2の実線は実際に圧力変換器を接続した場合で、点線は変換器への配線はせず、増幅器入力を短絡した場合である。この両者にあまり差のないことはほとんどのノイズは増幅器

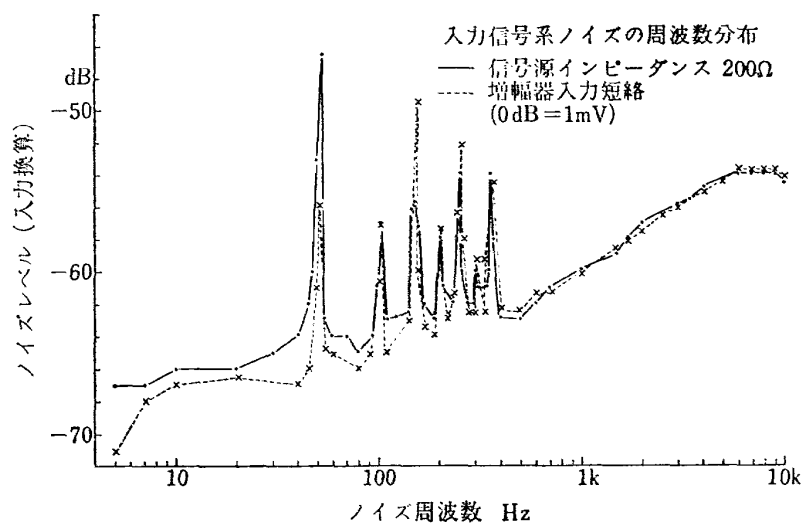


図 2 入力信号システムのノイズの周波数分布

表 1 天秤のおもな仕様

		1.00 MK 1X	0.75 KXVB	1.25 IN. A	1.25 IN. B
外	径 (mm)	25.40	19.05	31.75	31.75
全	長 (mm)	124.460	97.282	140.3	140.1
第 一	垂 直 力 (kg)	362.90	90.72	140.0	80.0
第 二	垂 直 力 (kg)	362.90	90.72	80.0	40.0
第 一	横 力 (kg)	181.44	45.36		
第 二	横 力 (kg)	181.44	45.36		
横揺れモーメント (kg-m)		1.15	0.6913		
軸	力 (kg)	18.14	18.14	20.0	12.0
Sting たわみ 係数 (°/kg)	$\frac{\partial \theta}{\partial N_1}$	0.01021	0.00612	0.00933	0.00913
	$\frac{\partial \theta}{\partial N_2}$	0.00328	0.00175	0.00180	0.00224

表 2 1.0 インチ六分力天秤の特性（上段の数値は正の荷重，下段の数値は負の荷重に対する値）

1.0 MK 1X		干 渉 係 数						
分 力	感 度		$N_1$	$N_2$	$Y_1$	$Y_2$	$X$	$R$
$N_1$	$\frac{25649.48}{25432.35}$	$\frac{\partial}{\partial N_1}$		$\frac{-0.0156}{-0.0136}$	$\frac{0.0089}{0.0046}$	$\frac{0.0027}{0.0006}$	$\frac{-0.0029}{-0.0041}$	$\frac{-0.0044}{0.0083}$
$N_2$	$\frac{25600.76}{25382.86}$	$\frac{\partial}{\partial N_2}$	$\frac{-0.0036}{-0.0021}$		$\frac{0.0012}{0.0005}$	$\frac{-0.0008}{0.0040}$	$\frac{0.0031}{-0.0040}$	$\frac{0.0}{0.0024}$
$Y_1$	$\frac{13788.35}{13538.34}$	$\frac{\partial}{\partial Y_1}$	$\frac{0.0020}{0.0015}$	$\frac{0.0017}{0.0018}$		$\frac{0.0055}{0.0048}$	$\frac{0.0022}{0.0018}$	$\frac{-0.0009}{-0.0005}$
$Y_2$	$\frac{13662.60}{11714.69}$	$\frac{\partial}{\partial Y_2}$	$\frac{0.0}{0.0}$	$\frac{0.0}{-0.0035}$	$\frac{0.0016}{0.0017}$		$\frac{0.0}{0.0}$	$\frac{0.0030}{0.0005}$
$X$	$\frac{18184.57}{18315.02}$	$\frac{\partial}{\partial X}$	$\frac{-0.0023}{0.0}$	$\frac{0.0017}{0.0029}$	$\frac{-0.0033}{-0.0145}$	$\frac{0.0232}{0.0166}$		$\frac{-0.0054}{0.0162}$
$R$	$\frac{1220.70}{1220.35}$	$\frac{\partial}{\partial R}$	$\frac{-0.0008}{0.0015}$	$\frac{0.0}{0.0}$	$\frac{0.0030}{-0.0023}$	$\frac{0.0059}{-0.0059}$	$\frac{0.0158}{-0.0143}$	

入力以降に誘導される 50 Hz およびその高調波成分によるものである。通常の風洞試験においては，測定信号の最大周波数は数 10 Hz と考えられるのでこれらのノイズのうち電源誘導による 50 Hz 成分の影響が問題となるが，これは約 1.6  $\mu\text{V rms}$  程度であり信号レベルに対して十分小さい。

### 3.1.1 天 秤

現在使用されている内挿式天秤は 4 本あり，いずれも冷却水外筒つき force type のもので，TASK 社製六分力天秤，外径 1.0 インチおよび 0.75 インチのものと，園池社製三分力天秤で外径 1.25 インチのもの 2 本とからなっている。表 1 にそれぞれの天秤の寸法秤量およびスティングたわみ係数の校正例を示す。また表 2 にはこれら天秤の感度係数，各分力間の干渉係数の一例を示す。当風洞では後述する天秤校正装置を備え随時校正を行ない，測定時には計算による天秤素子間の干渉の補正，スティングたわみ補正等を行なっているで，これらの固定的な誤差は原理的には補正可能である。ここでは信号源に含まれるランダムなノイズによる誤差について考えてみる。これらの重要なものは

(1) 模型支持装置の機械的振動にもとづくもの

(2) 測定部より計測室までに信号に重畳するノイズ  
および増幅器の内部で発生する熱じょう乱ノイズ  
(3) ストレンゲージ励起電源に含まれるリップル等によるもの

である。(1)の原因にもとづくノイズの周波数分布は当風洞のように，比較的小エネルギーで剛性が高いものでは数 10 Hz より高い周波数のものが主で，時定数 0.5 s, 1.0 s および 2.0 s の可変設定式ローパスフィルタを通すことによりこれらの振動成分を除去している。図 3 には無通風時模型迎角を階段状に変化させて，過渡振動およびフィルタを通した場合の出力を示す。 $X$ ,  $N_2$  には迎角変化の場合非常に大きな振動出力を生じているがフィルタを通した  $N_1$  にはほとんど振動成分はなくなっている。また迎角変化をとともう測定の場合測定は迎角が安定した時刻におこなえるように迎角変化と連動した遅延回路をもっている。

(2)の誘導ノイズは 50 Hz 成分およびその高周波成分がほとんどである(図 2 参照)。これらはフィルタにより減衰させることができるが，増幅器入力以降に生ずるものに対してはフィルタの効果がないため総合で入力換算 1.5~3.0  $\mu\text{V rms}$  見積る必要がある(図 8 参照)。

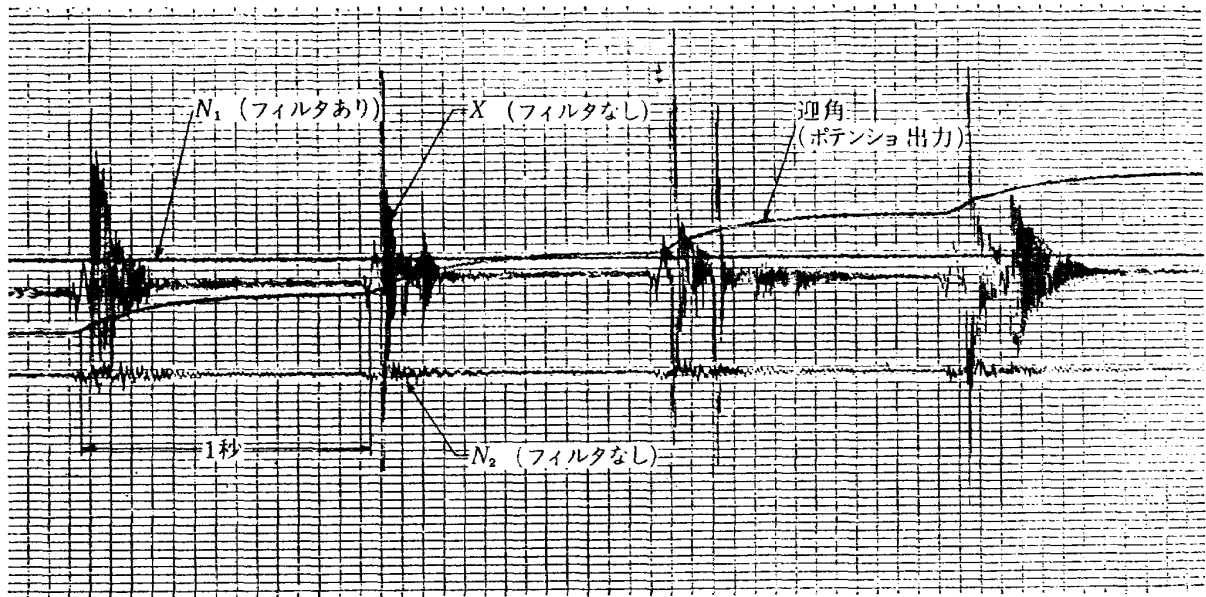


図 3 機械的な過渡振動による天秤出力ノイズ

(3)の励起電原に含まれるリップル成分は励起電圧 3.0~10.0Vにおいて0.5~1.0 mVPPであり、計測データに及ぼすものは1  $\mu$ V以下となるのであまり問題とならない。

### 3.1.2 圧力変換器

極超音速気流における圧力測定の範囲は下に示すように非常に広いので<sup>1)</sup>、測定精度をあげるためには測定範囲の異なった変換器を多数用意しなければならない。また気流の基準となる

$p_0$  (集合筒圧力, 101 kg/cm<sup>2</sup>~11 kg/cm<sup>2</sup>)

$p_s$  (測定部気流静圧, 0.06 kg/cm<sup>2</sup>~0.001 kg/cm<sup>2</sup>)

$p_b$  (模型底面圧力)

$p_{t'}$  (ピトー圧力, 2 kg/cm<sup>2</sup>~0.16 kg/cm<sup>2</sup>)

等の精度は特に重要である。このための基準データ用圧力変換器には誘導ノイズ等に強い高レベル出力のフォースバランス型のものを使用し、専用のチャンネルを設けた。その他一般圧力測定用にはストレンゲージ型の低レベル出力変換器を使用し、後述する低レベル部での走査混合を行ない設備の経済化をはかった。これらの型式および通常の使用状態における性能の測定例を表3に示す。

これらの変換器はすべて差圧型とし、基準圧力側は常に基準真空槽に接続されている。基準圧力槽の到達真空度は5~15  $\mu$ Hg程度で、この変動にもとづく誤差は0.01 kg/cm<sup>2</sup>フルスケールの変換器でも0.02%程度であり一般に問題とならない。

圧力測定において最も重要なものは配管系の過渡応答である。これらの変換器では単独のレスポンスは0.1~0.5秒(99%立上がり)であるが、配管系を含む場合、特に低レンジのものでは変換器の設置位置および配管の太さ、長さ等を適切にしなければならない。変換器を小型にして、できるだけ測定位置の近くに設置することが必要であるが他方気流の持続時間を長くすることも有効であり、このため真空槽の増設を予定している。マッハ7におけるノズル圧力分布をフルスケール0.05 kg/cm<sup>2</sup>の変換器により測定した場合(配管系長さ10m, 内径3 mm銅パイプ, 直角ベンド数ヶ所あり)を図4に示す。0.01 kg/cm<sup>2</sup>より大きい圧力に対しては圧力は約10 s以内で一定値に達しているが、0.01 kg/cm<sup>2</sup>程度の圧力のときには立上がり時間は30 sにも達する。このことから考えると、力の測定は1回の実験で種々の迎角に対して何回も測定できるが、圧力の測定は1回の測定に全持続時間を必要とするように思われる。

### 3.1.3 温度変換器

集合筒温度、測定部総温度、天秤温度および模型の温度分布の測定には熱電対を使用する。熱電対の種類は測定温度に応じて、白金・白金ロジウム、クロメル・アルメル、銅・コンスタンタン等が使用される。これらの出力は測定部付近に設けられた恒温槽により基準温度の補償がされて、データ処理室までシールドケーブルにより導かれている。これらの過程で入りうる

表 3 各種圧力変換器の仕様

	$p_0$ (集合筒圧力)	$p_s$ (測定部圧力)	$p_b$ (模型底部圧力)	$p_{t'}$ (ピトー圧)	$p$ (一般圧)
方 式	フォースバランス	フォースバランス	フォースバランス	フォースバランス	ストレンゲージ
最大出力	5 V DC	5 V DC	5 V DC	5 V DC	10 mV DC
直 線 性	100 kg/cm <sup>2</sup> 0.05% 40 kg/cm <sup>2</sup> 0.05%	0.1 %	0.05~0.1 %	0.1 %	0.1~0.5%
ノ イ ズ	2~4 mV <sub>rms</sub>	2~4 mV <sub>rms</sub>	2~4 mV <sub>rms</sub>	10~15 mV <sub>rms</sub>	2~4 $\mu$ V <sub>rms</sub>
単独応答	0.1 s	0.3 s	0.3 s	0.3 s	0.3~数 s
測定範囲	0~40 kg/cm <sup>2</sup> 0~110 kg/cm <sup>2</sup>	0~3 mm Hg 0~30 mm Hg	0~30 mm Hg	0~2 kg/cm <sup>2</sup>	0~0.01 0~0.05 0~0.1 0~0.5 0~1.0 0~2.0 kg/cm <sup>2</sup>

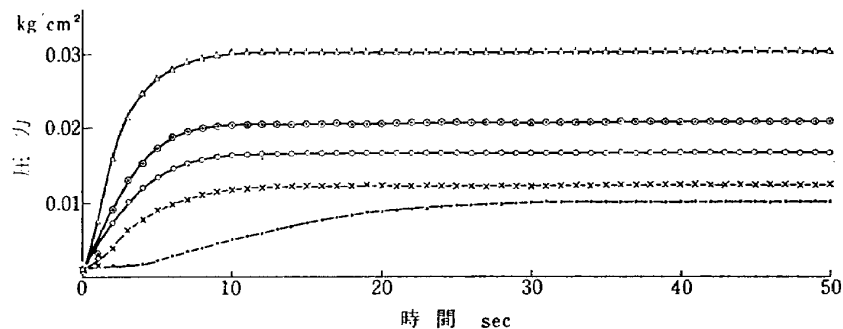


図 4 圧力測定系の過渡応答

誤差としては

- (a) 恒温槽の基準温度設定誤差
- (b) 導線の誘導ノイズ
- (c) アッテネータ(後述)の減衰精度

にもとづくものが考えられる。(a)の基準温度用恒温槽として、サーモジュールエレメントによる高精度電子式恒温槽を備え、基準温度は常に $20.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ に保つことができる。この恒温槽は水温を接点付精密温度計により検出し、エレメントに加える電流を制御する方式のもので、これによって $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の誤差内で設定することができる。(b)の誘導によるノイズおよび増幅器内のノイズは入力換算で $1.8 \sim 2.0 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ であり、

白金・白金ロジウムでは約 $0.2^\circ\text{C}$ 、クロメル・アルメルおよび銅コンスタンタンでは $0.05^\circ\text{C}$ 程度で、ほとんど問題とならない。

本風洞には、低い温度測定時の精度をあげ、かつこの装置では1台の増幅器で5チャンネルのデータを処理しているため、各チャンネルの入力レベルをほぼ一定( $0 \sim 10 \text{ mV}$ )とするため、増幅器入力部にアッテネータを備えている。

白金・白金ロジウムの場合は約 $900^\circ\text{C}$ 、クロメル・アルメルおよび銅・コンスタンタンの場合には約 $200^\circ\text{C}$ をこえると思われる計測にはあらかじめ1/5の減衰比をもつアッテネータを通すようにした。この場合図



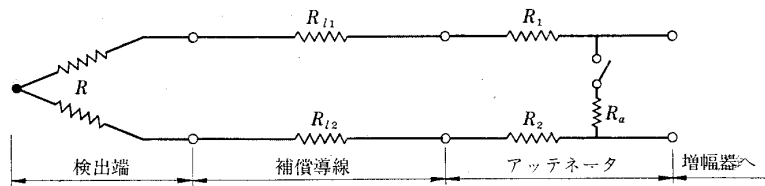


図 5 熱電対アッテネータの等価回路

5に示すごとく検出端の抵抗値が変わると減衰比が変化し、これにもとづく誤差を生ずることになる。これは個々の測定するとき熱電対素線の抵抗を測定しておくことにより次式で較正することができる。

$$\text{減衰比} = R_a / (R_{l1} + R_{l2} + R_1 + R_2 + R + R_a)$$

$R_a, R_1, R_2$  アッテネータ抵抗

$R_{l1}, R_{l2}$  補償導線の抵抗

$R$  測定用熱電対の素線抵抗

白金・白金ロジウムの場合

$$R_{l1} = 1.15 \Omega$$

$$R_a = 250 \Omega$$

$$R_{l2} = 1.75 \Omega$$

$$R_1 = R_2 = 500 \Omega$$

であるから測定用熱電対の抵抗を  $R$  とすると

$$\text{減衰比} = 250 / (R + 1252.9)$$

と表わセクロメル・アルメルの場合と同様に

$$R_{l1} = 11.7 \Omega$$

$$R_a = 250 \Omega$$

$$R_{l2} = 5.7 \Omega$$

$$R_1 = R_2 = 462 \Omega$$

であり

$$\text{減衰比} = 250 / (R + 1191.4)$$

と表わすことができる。

### 3.1.4 迎角変換器

精密巻線型ポテンシオメータを模型支持用ジンバルリングの回転中心軸に、バックラッシュ防止型歯車により増速結合し迎角の検出をしている。ポテンシオメータの励起電源には  $\pm 5.0\text{V}$  安定化直流電源を用い  $\pm 25^\circ$  までの角度を検出することができる。このデータはスティングの根本での迎角であるから、空気力により天秤およびスティングにたわみを生じた場合の迎角については、後述するスティングたわみ補正を行なったのち、各種計算の基準データとして使われる。迎

角検出器の仕様は次のとおりである。

励起電圧	+5.0 ~ -5.0 VDC
定格負荷にてリップル	1 mVrms 以下
温度変化率	0.1 mV/°C 以下
ポテンシオメータ	巻線型 5 k $\Omega$ (1080°)
直線性	0.1% 以下
回転数	1:27

### 3.2 低レベルスキャナ (LS)

天秤出力、ストレンゲージ形式の圧力変換器、熱電対の出力等は 0 ~ 10 mV 程度であり、このままでは AD 変換できない。したがってこれを AD 変換器の入力レベルまで増幅する必要があるが、各入力にそれぞれ増幅器を備えたのでは不経済であるため、低レベル信号合計 25 チャンネルを 5 つのグループに分け、それぞれリレー式スキャナを設け 5 チャンネルの低レベルデータに 1 台の増幅器の割合で、合計 5 台の直流増幅器を備え、低レベル入力信号を時分割処理するようにした(図 1 および 26 参照)。

この場合 S/N を高くとるためにはチャタリングによるノイズがきわめて小さくなければならない。本装置では低ノイズで動作が安定かつ確実である水銀接点リレーを使用した。このリレーはまた接点部が静電シールドされており、また熱起電力による誤差の補正もなされている。図 6 に接点部の温度特性を示す。また低レベルスキャナでは駆動信号より実際の作動までの遅れもチャタリングノイズをさけるために設計に

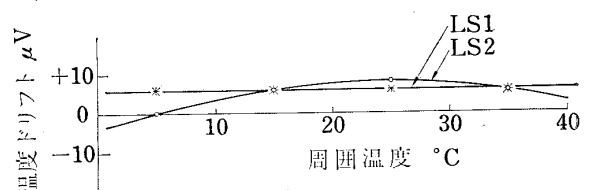


図 6 低レベルスキャナの温度ドリフト

際して考慮しなくてはならない。図7に動作特性を示す。駆動信号から接点を作動するまで 8 ms の遅延時間があり、その後平均 4 ms 程度の間、特に大きな過渡ノイズを発生している。実際のサンプリングはこの間をさけて、駆動信号より 12.5~15.0 ms までの間に 500  $\mu$ s/channel の速度で5チャンネルサンプリングするようにした。この場合サンプル時におけるチャタリングノイズは約 10~30  $\mu$ Vrms 程度あり、これは入力信号に対して0.2~0.6%程度の誤差の原因となる。

### 3.3 直流増幅器

リレー式スキャナで時分割された低レベル信号をAD変換器の入力レベルに増幅するために使用するもので、特に

- (a) 内部雑音が小さいこと
- (b) 同相除去比 (common mode rejection) が高いこと
- (c) ドリフトが少ないこと
- (d) 広帯域であること
- (e) 直線性が良いこと
- (f) ゲイン設定精度が高いこと
- (g) 高入力インピーダンス、低出力インピーダンスであること

などが要求される。この装置では Electro Instruments 社製A-20B型直流増幅器を使用することにした。表4におもな仕様を示す。増幅器の内部で発生する雑音による誤差を推測するために平衡型負荷に接続した場合の内部雑音について測定した。図8に測定値を示す。入力抵抗 1 k $\Omega$  をそれぞれの入力側に接続した場合および短絡時の測定値であり5台の計測用増幅器ともほ

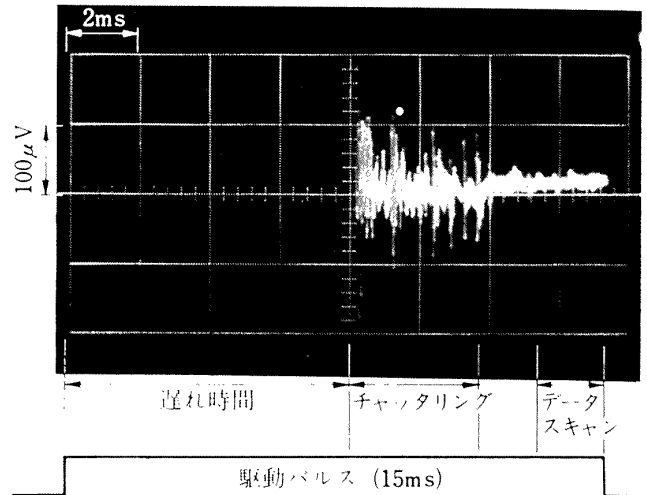


図7 低レベルスキャナのチャタリング

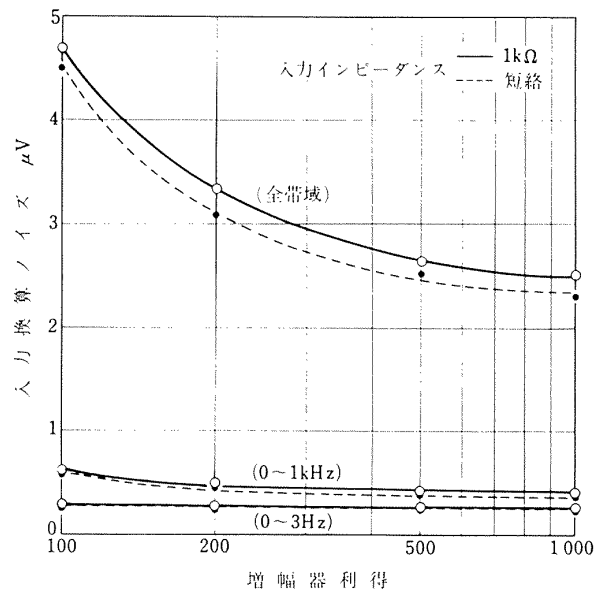


図8 直流増幅器の内部雑音

表4 直流増幅器のおもな仕様

入力抵抗	10 M $\Omega$
出力抵抗	0.2 $\Omega$ 0.33 $\mu$ F
周波数	DC ~2 kHz $\pm 1\%$
応答	—50 kHz    -3 dB
利得	10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000
ドリフト	2.5 $\mu$ V/200h    1.0 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C (入力換算)
直線性	$\pm 0.01\%$ (DC)
同相除去比	130 dB (平衡入力, 利得 1000)
内部雑音	DC-3 Hz    2.0 $\mu$ V p-p.
	—1 kHz    0.8 $\mu$ V rms.
	全帯域    3.5 $\mu$ V rms.

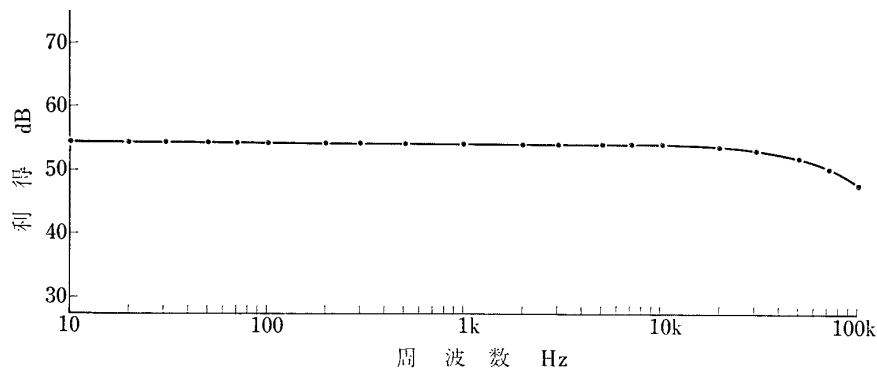


図 9 直流増幅器の周波数特性

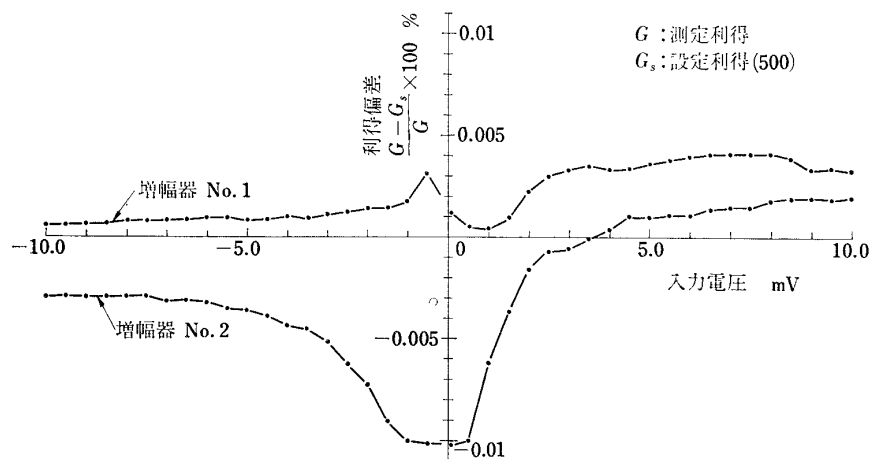


図 10 直流増幅器の直線性

ば同様な特性であり DC~3 Hz までで入力換算 0.2  $\mu$ Vrms, DC~1 kHz までで 0.4~0.5  $\mu$ Vrms, 全帯域で 2.5~3.5  $\mu$ Vrms 以内であった。通常の使用状態ではこれによる誤差は0.02%程度で問題とならない。同相除去比をよくするために入力側はすべて差動とし、同相成分を相殺するようにした。またドリフトはゲイン500で入力換算0.2~0.3  $\mu$ V/hour, 0.4~1.0  $\mu$ V/°C程度である。測定中のドリフトによる誤差についてはこの風洞のように比較的測定時間の短いものでは、回路の較正より実際の測定までの時間だけが問題となる。通常これは数時間以内と考えられるからあまり問題とならない。図9に増幅器の周波数特性を示す。計測すべきデータの周波数は比較的低いが、増幅器入力に前置スキャナをもつ場合は立上がり特性が良くなくてはならない。この増幅器はほぼ50 kHzの帯域をもっているので、増幅器の立上がり時間のサンプリングに及ぼす影響は考慮する必要がない\*。図10には直線性のずれにより生ずる誤差の測定例を示す。これはDC

において0.01%以下である。

### 3.4 高速度スキャナ (HS)

高レベルの基準データ8チャンネルおよび一般計測データ用直流増幅器出力の5チャンネル合計13チャンネルの高レベルデータ(0~5 V)は、高速度スキャナにより実験方式にしたがって、基準データと一般計測データを走査混合してAD変換器の入力とする。低レベルスキャナのチャタリングノイズを避けるため、信号は低レベルスキャナの駆動信号より、リングカウンタで12.5, 13, 13.5, 14, 14.5 ms ずつ遅延させ、フルスケール±5 Vのアナログ信号に対して、500  $\mu$ s/channel のスイッチング速度で走査している。図11に高速度スキャナに使用されているアナログスイッチの回路例を示す。特性のそろったスイッチングトランジ

\* 増幅器のパルスレスポンスを考えると帯域幅  $f_c$  と立上がり時間  $\tau_r$  の積は一定で  $f_c \tau_r \approx 0.35$  となる。 $f_c = 50$  kHz とすると  $\tau_r = 7 \mu$ s となり十分小さい。

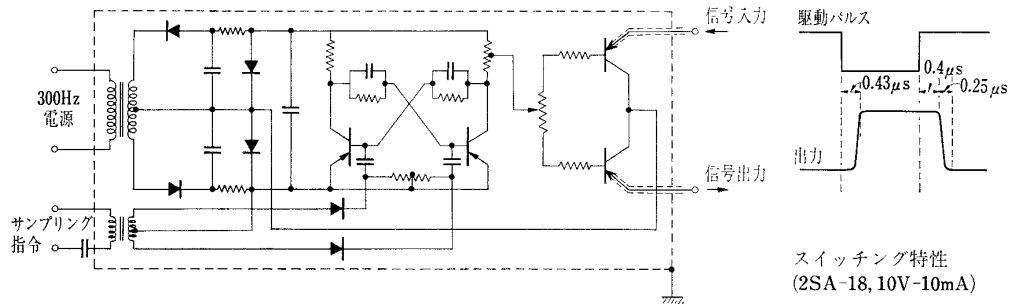


図 11 高速度スキャナの回路

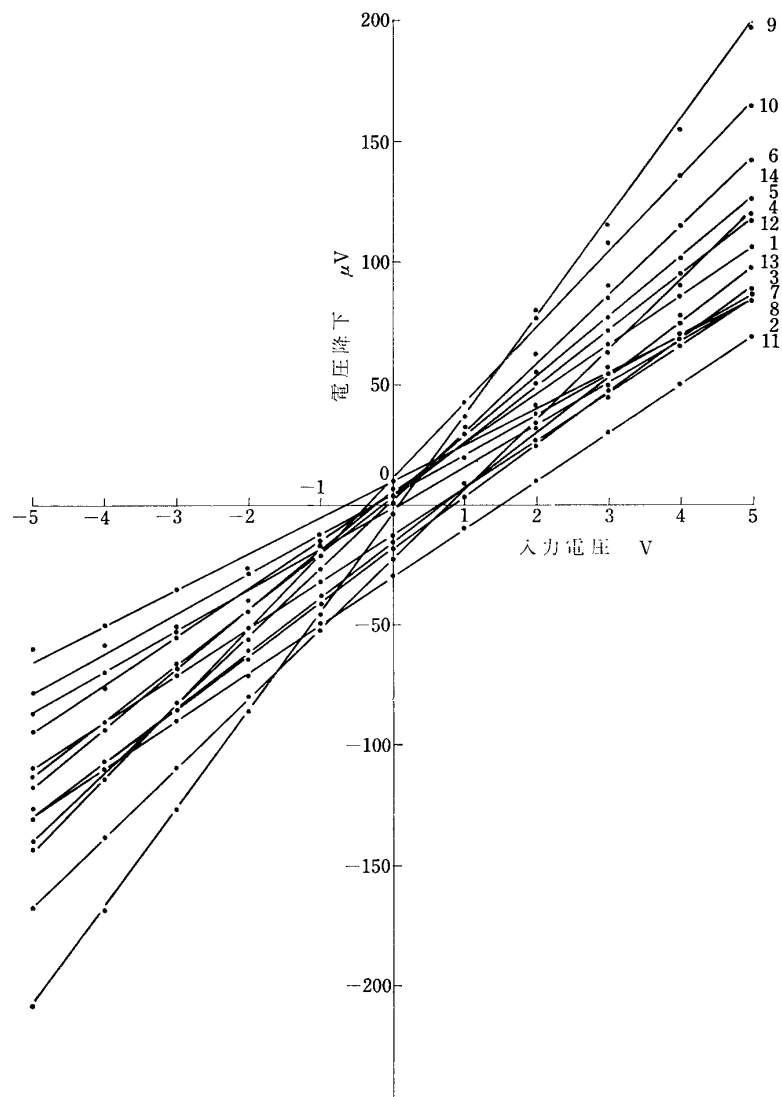


図 12 高速度スキャナの導通時電圧降下

スタを選択して逆接続ペー型とし  $V_{CE}$ ,  $I_{CB}$  を補償している。またスイッチ部は同相成分のノイズを遮断し、駆動電流が信号レベルに影響を与えないように、各スイッチごとに共通電源より浮いた直流電源を備え、駆動信号はパルスとして絶縁トランスを介し内部のフリップフロップを働かせるようにした<sup>2)</sup>。図12にスイッチ部の入力信号の電圧降下の測定値を示す。これは導通時抵抗 ( $2 \sim 20 \Omega$ ) が次段入力インピーダンス (約  $1 M\Omega$ ) と直列に加わり信号電圧の低下を生ずるためのものであるが、これによる誤差は  $0.005\%$  程度であり無視できる。またこの種の誤差は固定誤差として較正2により補正することが可能である。図13にスイッチングの transient と導通時における熱じょう乱ノイズを示す。この場合も過渡的なノイズを避けるため、サンプリング指令はスイッチの駆動より  $180 \mu s$  遅らせているので誤差としては熱じょう乱ノイズのみを考えればよく、平均  $20 \mu V_{rms}$  であり、これは信号値 ( $0 \sim 5V$ ) に比べて問題とならない。また温度ドリフトは図14に示すように室温付近 ( $20 \sim 30^\circ C$ ) で1ビット ( $5 mV$ ) に比べて十分小さい。

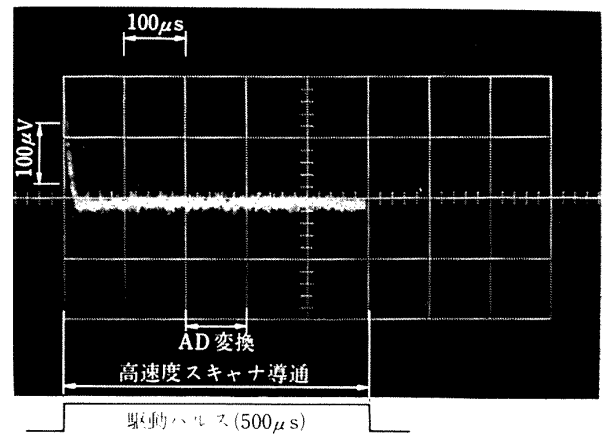


図 13 高速度スキャナのスイッチング特性

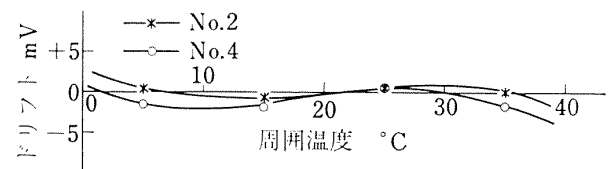


図 14 高速度スキャナの温度ドリフト

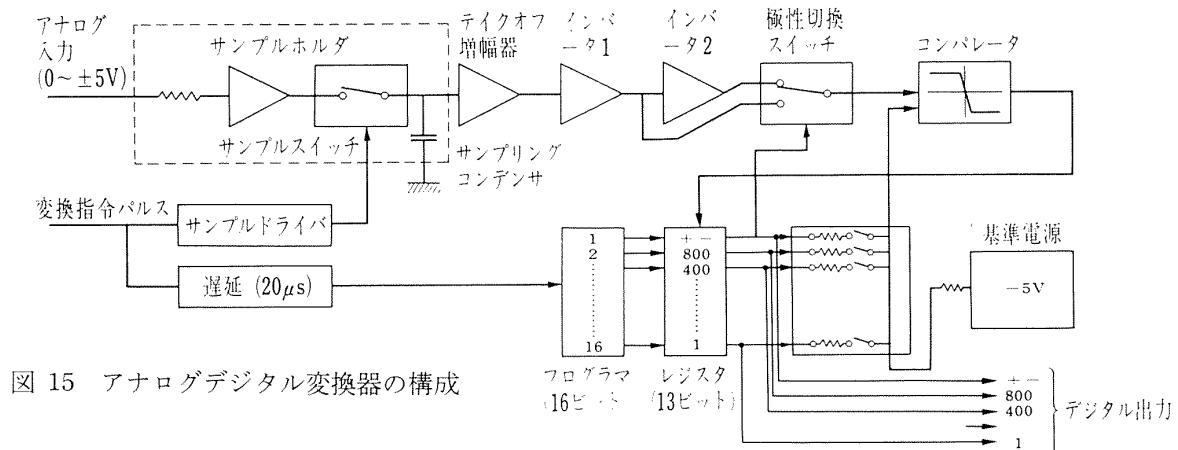


図 15 アナログデジタル変換器の構成

#### 4. デジタル信号処理部

#### 4.1 アナログデジタル変換器

図15にAD変換器の構成を示す。高速度スキャナで時分割された $\pm 5\text{ V}$ フルスケールのアナログ電圧は、高速度スキャナの導通している間に図16に示すタイムチャートにしたがって符号+2進10進3桁のデジタル値にAD変換される。AD変換中に信号にゆらぎがあると変換誤差を生ずるのでAD変換中信号レベルを一定に保つためホールド回路を要する。サンプル時間

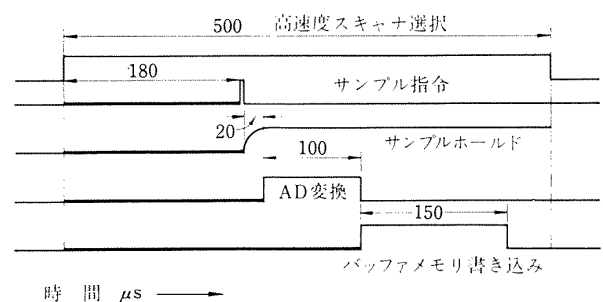


図 16 アナログデジタル変換のタイムチャート

を $\tau$ とするとサンプル誤差 $\varepsilon$ でとり扱える信号の最高周波数はほぼ $\varepsilon/2\pi\tau$ である。サンプル時間 $\tau$ はホールドコンデンサ $C$ と入力インピーダンス $R$ との時定数により制限されるので、周波数特性をよくするためには $C$ はできるだけ小さい方がよいが、一方 $C$ が小さいとホールドされた信号のAD変換中における減衰が大きくなり誤差を生ずるのであまり小さくとることができない。このため次段は入力インピーダンスがきわめて高い電界効果型トランジスタによるバッファアンプにおいてホールド時の減衰をふせいでいる。ここでは、信号源インピーダンス $R=500\Omega$ 以下でサンプル時間 $\tau$ を $20\mu\text{s}$ 程度とするため、サンプリングコンデンサは $C=4700\text{pF}$ とした。このときサンプル時の立上がりは、

$$E(t) = E_0 (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

と表わせるから上記の値を代入して $t=20\mu\text{s}$ においては誤差は $-0.02\%$ となり十分小さいことがわかる。一方ホールド時においてコンデンサの電荷はコンデンサのろうえい抵抗と次段の入力インピーダンス等により放電するが、ろうえい抵抗のきわめて高いスチロールコンデンサを使用しているため、これはほとんど次段の入力インピーダンスでまざる。次段にはMOS型FETを使用しているので入力インピーダンスとしては数百 $\text{M}\Omega$ あると考えられるから電荷の減衰の時定数としては約 $20\text{s}$ となる。一方AD変換に必要なホールド時間は $100\mu\text{s}$ であるからホールド中の電圧低下は全く問題とならない。図17は正弦波(17Hz)のサンプルホールド例を示す。図中の白点一つがそれぞれ図16に示した過程に相当するものである。

この他AD変換中の誤差は主として、アナログインバータの直線性、基準電源、抵抗網の精度およびコンパレータの温度特性によりきまる。図18にアナログインバータの直線性を図19にコンパレータの位相弁別温度特性を示す。コンパレータの出力が約 $-2\text{V}$ 以上で論理出力1、 $-5\text{V}$ 以下で論理出力0である。 $-2\text{V}$ と $-5\text{V}$ の間が不感帯となるが、これに相当する入力是非常に小さく約 $0.1\text{mV}$ にすぎない。また温度によるシフトは温度が $20\sim 29^\circ\text{C}$ で約 $0.5\text{mV}$ であり、1ビット $5\text{mV}$ に比べて十分小さい。

更に図20に各部の温度特性を示す。一番ドリフトの大きいサンプルホルダでも $20\sim 30^\circ\text{C}$ でただかだか $1\text{mV}$ であるが、室温は空調装置により制御されているので、この誤差は問題とならない大きさである。コンパレー

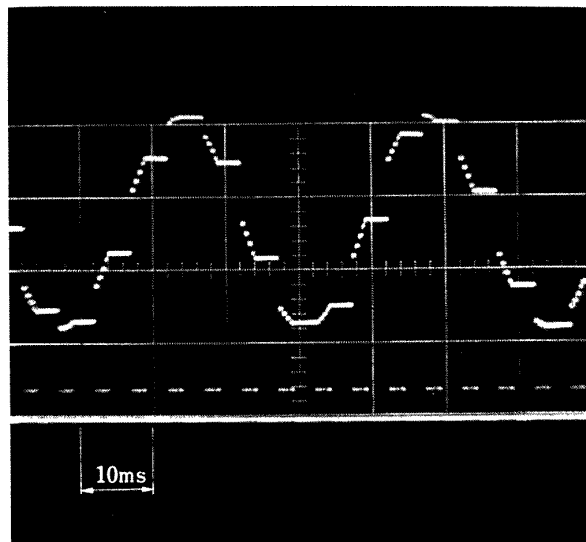


図 17 サンプリングの一例

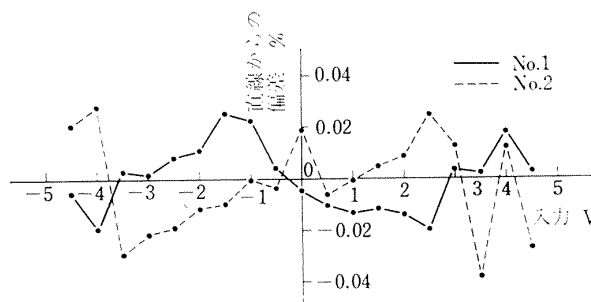


図 18 アナログインバータの直線性

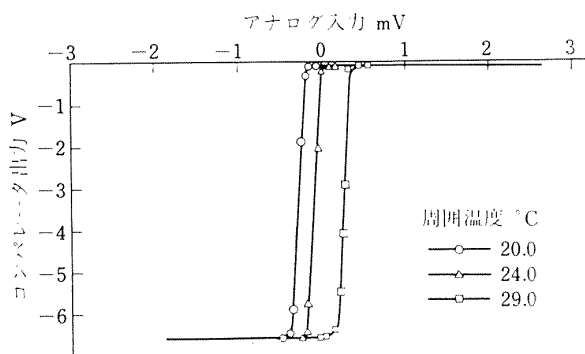


図 19 コンパレータの特性

タは約  $5\mu\text{s}$  で切りかえられて、アナログ信号とDA出力とを比較するので広帯域であることが要求される。図21には各部の周波数特性を示す。これによるとコンパレータの帯域幅は約  $90\text{ kHz}$  あり  $5\mu\text{s}$  の切りかえには十分応答ができる。

以上各要素の精度について述べたが、AD変換器全体の精度を調べるために既知の基準直流電圧をAD変換器の入力に加え、同一入力を200回AD変換し、その平均値  $E_m$  と入力値  $E$  との差のフルスケール ( $5\text{ V}$ ) に対する割合を求めた。このような測定を数  $\text{mV}$  から  $\pm 5\text{ V}$  までの各入力に対して実測した結果を図22に示す。この図から各種入力に対して平均値の誤差は  $0.1\%$  以下であることがわかる。しかしこの図からは各平

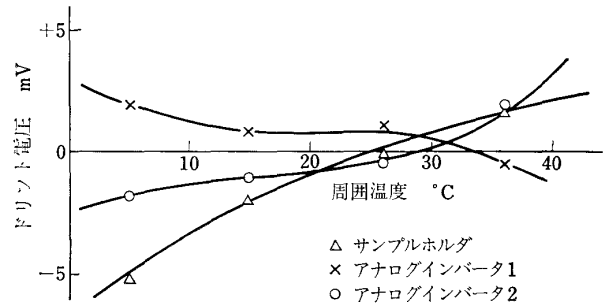


図 20 アナログデジタル変換器各部の温度特性

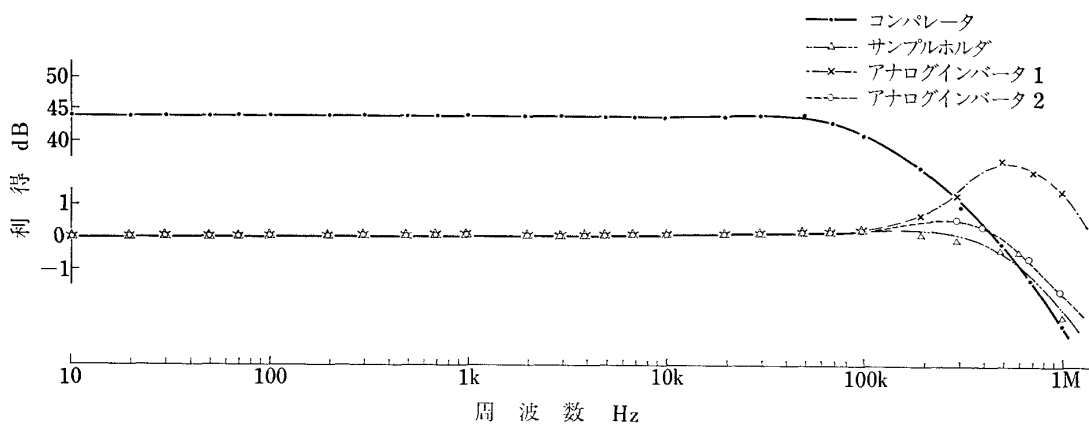


図 21 アナログデジタル変換器各部の周波数特性

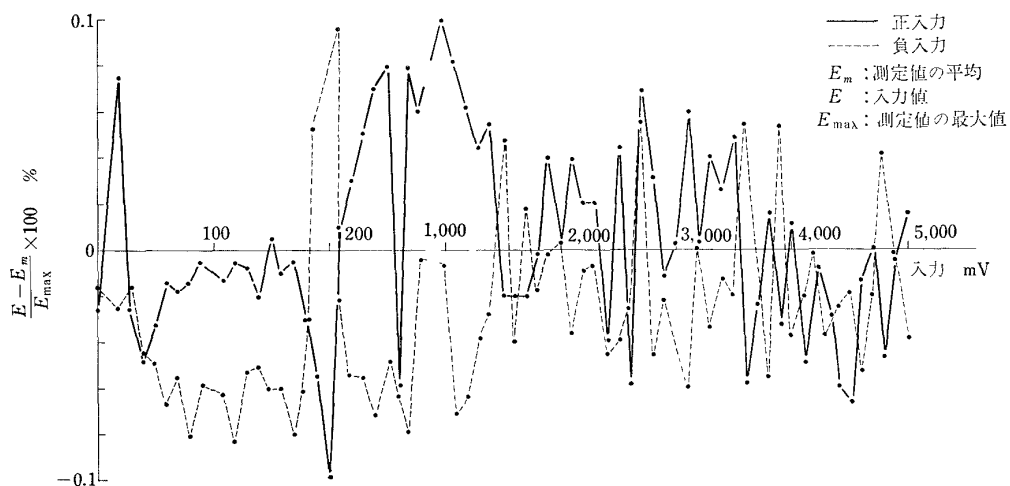


図 22 アナログデジタル変換精度

均値の母集団の200個のデータのちらばりについては知ることができない。23図は種々の大きさの入力に対する200回の測定値のちらばりを示したものである。横軸は $\epsilon = (\text{入力真値}) - (\text{デジタル出力})$ で、デジタル出力は最小単位が5mVである。この図から頻度は、 $(5 - |\epsilon|)/5$  に比例していることがわかる。すなわち入力が5mVの整数倍のときは $\epsilon = 0$ のところに200回の頻度が得られ、入力が5mVの整数倍でないとき、たとえば入力が51mVのときはデジタル出力は50mVかまたは55mVになるが、50mV( $\epsilon = 1$  mV)のところに160回、55mV( $\epsilon = -4$  mV)のところには40回の頻度が得られることがわかる。また $|\epsilon| > 5$  mV、すなわち45mVあるいは60mVのデジタル出力が得られることがほとんどないことを示しておりAD変換器として正常な動作をしているものと考えてよい。(図中で $|\epsilon| > 5$  mVのところにある点は入力が非常に大きいときに対応するものである。)

以上の結果を総合すると、このAD変換器は $25^\circ \pm 5^\circ \text{C}$ の範囲で $\pm 0.1\% \pm 1/2 \text{ LSD}$  (最小デジタル単位) 以内に入っていることがわかる。

#### 4.2 アナログデジタルチャンネル制御器(ADCC)

このような吹出し式の風胴においては、限られた短い時間内に数多くのデータを集取、処理しなければならないので

- あらかじめ計測の手順を中央演算処理装置に記憶させておき、それによって計測が行なわれること。
- サンプリングとAD変換は正確な時間間隔で行なわれること。
- 同一測定ではデータ相互間の同時性をできるだけ高めること。
- データは後のプログラム処理がしやすいように適当な判別記号等を付加して編集されること。

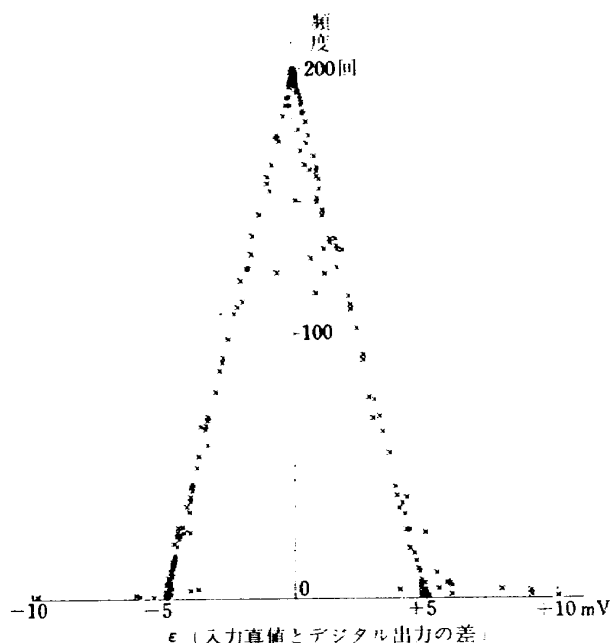


図 23 任意入力を200回AD変換したとき、その真値からの偏差と頻度

(e) 風胴運転シーケンスと連動すること。

(f) データの記録時には適当なチェックが行なえること。

等が要求される。このため中央演算処理部とアナログ処理部とを結びつけるための必要な制御を行なうものがアナログデジタルチャンネル制御器(ADCC)である。

##### 4.2.1 ADCCの構成と機能

図24にADCCの構成を示す。ADCCは大別してつぎの部分に分けられる。

##### (1) 総括制御部

ADCC各部の動作を制御する信号をつくり出す部分であり、定常実験、非定常実験、較正1、較正2等の実験方法に応じた計測指令を出すために、それぞれ

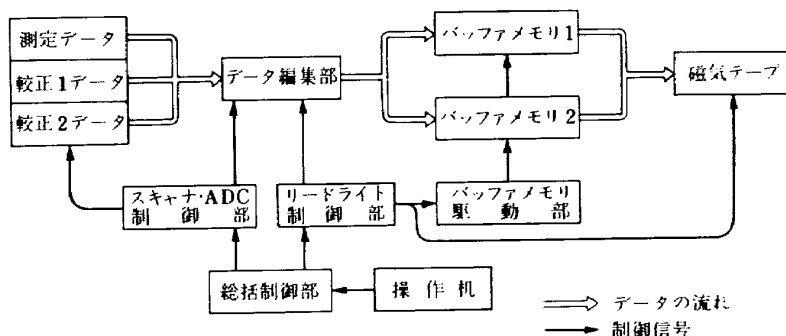


図 24 ADCCの構成



必要な時刻に必要な信号をつくり出すカウンタおよび外部との信号の受渡しを行なうスイッチ群よりなる。

#### (2) スキャナAD変換器制御部

中央演算処理装置のクロックパルス (200 kHz) と同期して、計測自動の場合には模型制御装置より送られてくる信号により、また計測手動によるときは操作卓より送られてくる計測指令により、この部分ではスキャナの動作の指令、サンプルホールドの指令、AD変換およびバッファメモリへの書込みの指令を行なう。

#### (3) データ編集部

データ編集部では、AD変換された計測データがどの計測点のものかを判別するため、そのデータに選択されているスキャナおよびチャンネルの記号を各データの頭に付加してバッファメモリに送る。また校正1では測定データ群の先頭に各変換器への印加圧力の値を、校正2では測定データ群の先頭に印加基準電圧の値をそれぞれデジタル値で書込む役目をする。

#### (4) バッファメモリ部

20ワード(40データ、240桁)のコアメモリ2台とバッファメモリ用レジスタ、アドレス用レジスタ、メモリドライバ等よりなる。1台のコアメモリにAD変換されたデータを磁気テープ1レコード分(最高40データ)になるまで、パリティビットを付加しながら記憶する。定常実験の場合には、1測定につき最高33データであるから残りのデータはゼロを書き込む。またこれと並行して他方のコアメモリではすでに記憶されたデータを磁気テープに書き込む動作を行なう。このように2台のバッファメモリを交互に使用することにより磁気テープには連続してデータを書き込むことができ、アドレス方式による磁気テープ書込みの能率化をはかっている。また書込みはバッファメモリから磁気テープに直接行なわれるように新しくオーダーコードをつかった。

### 4.3 中央演算処理装置

この計測装置には、一般科学用計算も行なうことができるように、下記の各種入出力装置を備えた小型電子計算機システムが含まれている。

#### 中央演算処理装置(OKITAC-5090C)

形式	内部プログラミング記憶方式
主演算素子	トランジスタ
内部記憶素子	フェライトコア (4024 語)
	アクセスタイム 10 $\mu$ s
数値	浮動小数点方式 符号+指数部 (2 桁)+仮数部(10桁)
命令	ペアオーダー方式

チェック方式	パリティビット
演算制御方式	直列同期方式
演算速度	加減 0.7~1.4 ms
	乗算 4.9 ms
	除算 8.9 ms
	(浮動小数点、待合わせ時間含む。)

#### 磁気テープ装置 (OKITAC-5099T)

書込み読出し速度	15, 200 桁/s
テープ走行速度	1.9 m/s
ヘッド	デュアルリードライト
記録密度	8 桁/mm

#### ラインプリンタ (OKITAC-5093)

方式	フライングタイプベルト方式
印字速度	500 行/min
一行最大印字数	120 字
活字の種類	48種

#### 電動タイプライタ (OKITAC-5091)

穿孔(印字)速度	450 字/min
一行最大印字数	120 字
使用テープ	1 インチ幅 8 ビット紙テープ

#### 卓上光電式テープ読取器 (OKITAC-5095)

方式	外部パルス同期方式
読取り速度	200 字/s
テープ速度	508 mm/s

## 5. 実験データの収集とその処理

### 5.1 風洞運転方式

測定部内に取り付けられた模型は気流が確立すると模型支持装置により、あらかじめ設定された模型変化方式にしたがって姿勢変化を行なう。これにはまず模型の初期位置を測定部気流内におくものと、測定部気流外におき気流が確立したのち気流内に上昇させるものがあり、迎角変化は最大 $\pm 25^\circ$ の変化を行なうことができる。またロール角は無通風時手動により $\pm 180^\circ$ まで取ることができる。

迎角変化方式として

- (a) 連続変化
- (b) 階段変化
- (c) 一点変化

の各方式がある。これらは測定部静圧を検出して 発す

る気流確立信号と模型初期位置転向完了信号とのAND条件により、初期迎角より最終迎角まで(a)では $1 \sim 2^\circ/\text{s}$  (任意設定可能) の変化速度で連続的に変化し定位置に復帰して一連動作を終る。(b)では同様に初期迎角より最終迎角までを1ステップ $1^\circ$  の階段状に迎角を変化させる。更に(c)では約 $10^\circ/\text{s}$  の変化速度であらかじめ設定された3点までの迎角を手動信号により変化するものである。これらの場合計測は自動または手動で行なうことができ、(a)または(c)のように姿勢の変化が比較的ゆるやかな場合には手動により、(b)のように模型支持装置の過渡的な振動を伴い、かつ比較的变化の大きい場合には迎角変化と連動して計測をすることができる。この場合模型支持装置の過渡的な振動をさけるため、計測指令は迎角変化指令より0.5~2.0秒(任意設定)の遅延時間をもたせて計測を行なうことができる。

## 5.2 実験データの種類と記録

極超音速風洞における測定的方式には、天秤校正、校正1、校正2、定常実験、非定常実験がある。

各種計測器より生ずる測定誤差のうち、たとえば直流増幅器のゲイン、オフセット、高速度スキャナの導通時抵抗やペDESTAL出力にもとづく誤差、AD変換器の感度等にもとづくものは比較的固定的なものであり、実験前に校正しておけば温度制御された室内ではあまり変化しないものである。また圧力変換器等のゼロ調、校正等も実験に先立って行なわなければならない。この計測装置では前者のような電気回路の校正を行なうための基準電源と、後者の圧力変換器を校正するための基準圧力源(負圧源を含む)とサーボマンメータよりなる圧力校正装置を備えている。また天秤測定においては使用天秤の感度、干渉係数、スティングたわみ係数等を校正するために天秤校正装置を備えている。

### 5.2.1 天秤校正

天秤は使用に先立って校正を行なう必要がある。こ

の装置では重錘式六分力天秤校正装置を備えている。使用天秤は模型支持用スティングと同一に作られたスティングに装着され、励起電圧、支持装置の剛性その他通風時と同一条件として校正を行なうことができる。校正データの収集は機側または計測装置と連動して行なうことができる。機側による場合はリレー式スキャナと高感度デジタルポルトメータにより各分力の出力を $0.1 \mu\text{V}$ まで読みとることができる。連動による場合は各分力は計測装置本体の直流増幅器により増幅され、AD変換されて、各分力名を示す記号(1桁)とともにデジタルテープに記録される。このとき荷重値も同時に記録するため、荷重値発生器により天秤に加えられている荷重値を手動によりセットし、各測定データの先頭に入れる。これにより天秤感度、相互干渉係数、スティングたわみ係数が求められ、実験データ処理の際使用される。

### 5.2.2 校正1(圧力変換器の校正)

圧力変換器はすべて差圧型とし、基準側は常時基準真空槽に配管され $5 \sim 15 \mu\text{Hg}$ 程度に排気されている。このとき低レンジの圧力変換器に過大圧力がかからないように測定孔側も真空槽に接続されている。校正は校正用真空槽または圧力槽に任意の圧力を設定して、これをサーボマンメータにより5桁( $0 \sim 1.9999 \text{ kg/cm}^2$ )のデジタル値にAD変換するとともに各圧力変換器に加えて、その電気出力をAD変換し磁気テープに基準値とともに記録する。この場合圧力変換器にフルスケール以上の圧力がかからないように、サーボマンメータと連動して、低圧用変換器の加圧側電磁弁を校正圧力に応じて自動的に閉じるようにしてある。この結果は最小自乗法による一次近似を行ない感度およびオフセットを求める。図25に校正例を示す。

### 5.2.3 校正2(電気回路の校正)

低レベルスキャナ以降に既知電圧を印加して、直流増幅器のゲイン、オフセット、AD変換器の感度等を

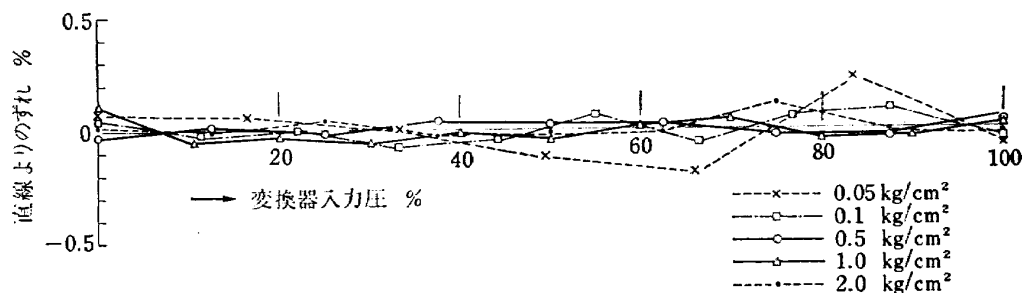


図 25 圧力変換器校正例

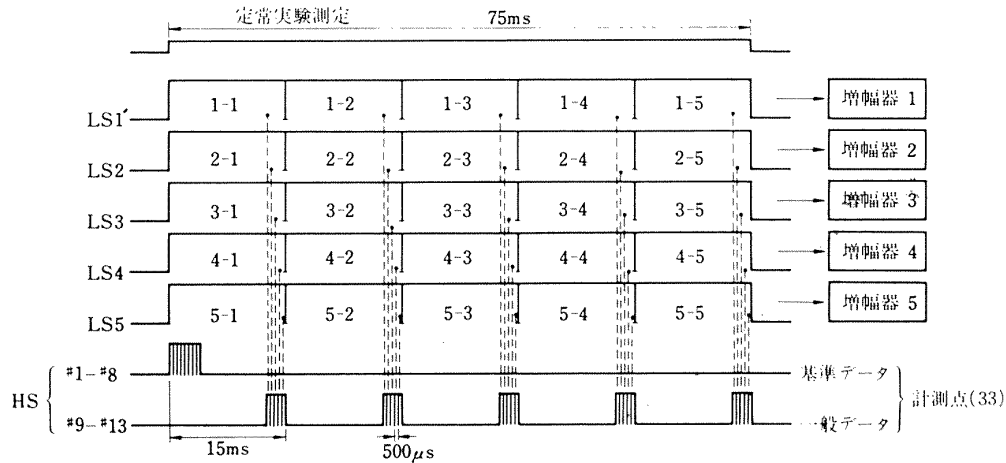


図 26 定常実験の計測方式

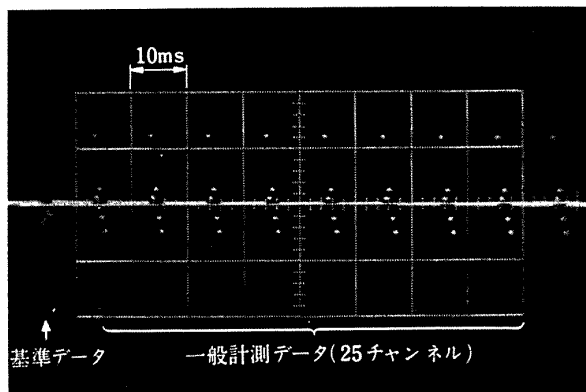


図 27 定常実験のサンプリング例

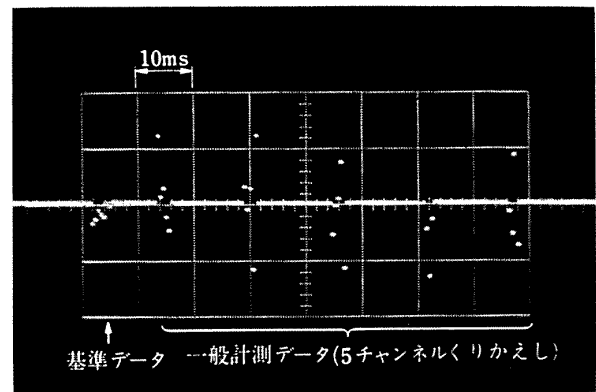


図 28 非定常実験のサンプリング例

較正するためのものである。較正時には較正用基準電圧が水銀接点リレーにより直流増幅器入力に接続される。この基準電圧は約 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ ,  $\pm 4$  mV に設定された安定化直流電源であり、デジタル電圧計により較正時の正確な値を  $1 \mu\text{V}$  まで測定し、符号 + 4 桁のデジタル値として磁気テープに記録される。この既知入力に 5 台の計測用直流増幅器および集合筒温度測定用直流増幅器に加えられ、それぞれの出力を A/D 変換して磁気テープに基準値とともに記録する。この結果を較正 2 処理プログラムにより最小自乗法によって処理し、使用チャンネルのゲインとオフセットを決定する。

#### 5.2.4 定常実験

図 26 に示すようにこの計測方式では測定指令を受けると気流の基準となるデータ ( $p_o$ ,  $p_s$ ,  $p_{b1}$ ,  $p_{b2}$ ,  $p_{b3}$ ,  $p_{t'}$ ,  $T_o$ ,  $\theta$ ) の 8 チャンネルを走査してから天秤出力、圧力、温度等任意の計測データを最高 25 チャンネル測定して磁気テープに記録して、最大 75 ms で 1 回の測定を終了する。その際、測定指令により最初の 15 ms

にはおのおのの低レベルスキャナ (LS) の第 1 チャンネルがセットされ、それぞれ直流増幅器に接続される。リレースキャナの過渡ノイズを避けるため、駆動信号より 12.5 ms 経過してから (図 7 参照) 高速度スキャナにより直流増幅器の出力を第 1 の増幅器から第 5 増幅器まで順次  $500 \mu\text{s}/\text{channel}$  の速度で走査する。次の 15 ms では各 LS の第 2 チャンネルがセットされ、直流増幅器の出力は同様に高速度スキャナにより順次走査される。このようにして各 LS の第 5 チャンネルがセットされ、それぞれに対応する増幅器出力を高速度スキャナにより走査すると 1 測定を終る。図 27 に実際の測定例を示す。

#### 5.2.5 非定常実験

非定常実験では、データの高速サンプリングが要求されるため、増幅器入力部に設けられた低レベルスキャナを使用することができない。このため計測点数は基準データ 5 チャンネル、一般計測データ 5 チャンネルに限定される。図 28 に非定常測定例を示す。計測の指令により最初基準データのうち任意の 5 チャンネル

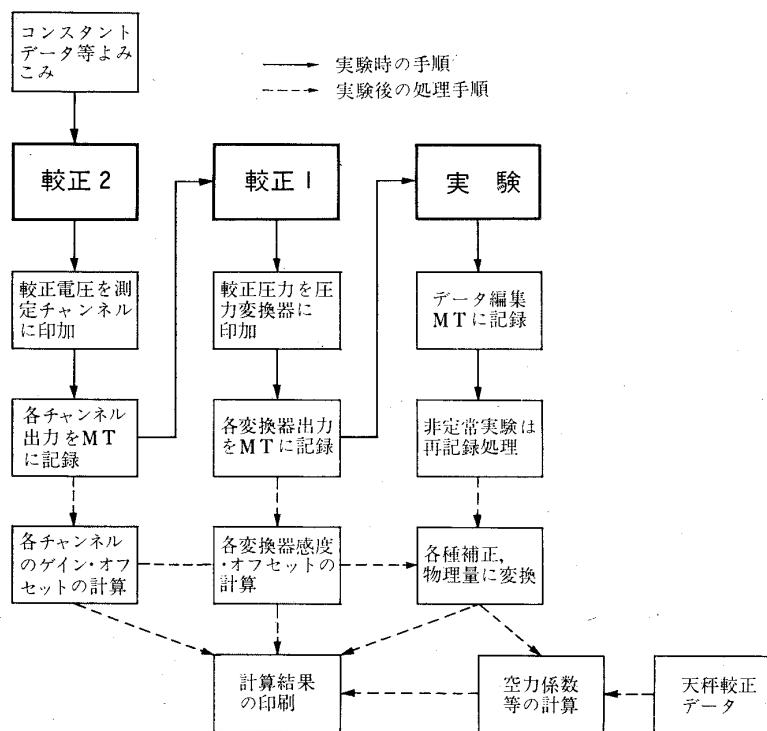


図 29 実験データ処理の手順

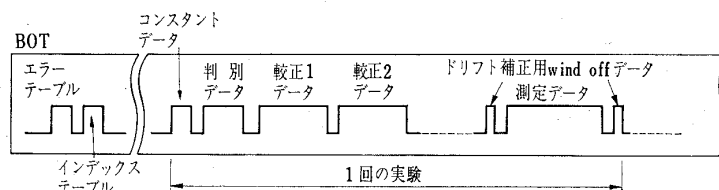


図 30 磁気テープ上のデータ配列

を  $500 \mu\text{s}/\text{channel}$  で走査したのち  $10 \text{ ms}$  ごとに  $500 \mu\text{s}/\text{channel}$  で 5 チャンネルの計測データを連続サンプリングする。したがって同一計測点の測定間隔は  $10 \text{ ms}$  であり同時測定時のデータ相互間隔は  $500 \mu\text{s}$  である。このようにして 1000 データ ( $2 \text{ s}$ ) 測定をすると、あらたに基準データを走査して同様な測定をくりかえす。

#### 5.2.6 実験データの記録

実験終了後磁気テープに記録された生データを各種の校正値により、物理量に変換し中間データの作表または各種係数を得るための計算を行なう。このために実験に先立って各種の校正を行なわなければならない。図29に風洞実験におけるデータ処理の手順、また図30には定常実験における天秤測定の場合の磁気テープ上のデータ配列を示す。

##### (a) エラーテーブル

書込み用磁気テープ上のきず（書込みまたは読出し

エラー）のあるアドレスを検出してこの部分に記憶しておく。実験データ記録の際はこのアドレスを避けて記録する。

##### (b) インデックステーブル

磁気テープ1巻には定常実験なら約 100 回分のデータの記録が可能であるため、テープの先頭部に実験日時、実験番号とそのデータの記録アドレスの索引をつくっておく。

##### (c) コンスタントデータ

実験データの先頭に年月日、実験日時、実験方式等を記録し、後日データ処理をする場合これにより該当データを磁気テープ上にさがす。

##### (d) 判別データ

A/D変換されたデータのチャンネル番号とそれに対応する変換器の種類を示すデータで、あらかじめ紙テープに記録しておき、実験に先立って磁気テープに記録する。たとえば 11N 01 とあれば、第1低レベル

スキャナ（第1直流増幅器に接続）の第1番目のチャンネルには天秤分力のうち  $N_1$  が接続されていることを示す。実験終了後のプログラムによりデータ処理をする場合にはこの判別データにより指定されたデータをさがすことができる。

(e) 較正1データ

(f) 較正2データ

(g) 測定データ

各変換器よりの出力を符号+10進3桁にAD変換した値にその変換器の接続されている低レベルスキャナ番号、すなわち直流増幅器番号とチャンネル番号を付加して記録する。天秤による測定の場合には、測定中の温度変化等による天秤その他電気回路におけるドリフトを補正するために、通風の直前および直後に  $\theta = 0, \phi = \text{一定}$  でデータを記録する。

AD変換されたデータはスキャナ番号（直流増幅器番号）1桁、チャンネル番号1桁、極性1桁、AD変換値3桁、計6桁よりなり、OKITAC-5090における1語（符号+12桁、49ビット）に2データずつ入れることができる。

磁気テープ上の1レコードは20ワードであり40データの記録ができる。定常実験においては1測定最大33データであるから、1測定を磁気テープ上の1レコードに対応させ、1レコードいっぱいには書込まないで残りはゼロと書込んでおく。

非定常実験においては、連続して膨大なデータが書き込まれるため、1レコードに40データいっぱい記録する。計算処理の場合、アルゴリズムによるプログラミングを可能とするために、再処理ルーチンにより1レコード上のデータの数を20データに減らして記録しなおす。

### 5.3 修正データの計算

磁気テープに記録されたデータは実験終了後それぞれの処理プログラムにより計算される。

較正1, 較正2, 天秤較正では最小自乗法による多点一次近似を行ない、感度, ゲイン, オフセット, 相互干渉係数等をもとめ、これを用いてデータを物理量に補正変換して中間データおよび各種空力係数などの修正データを得る。ここでは天秤測定における計算処理過程の概要を記す。

#### 六分力天秤データ処理プログラム

- (1) コンスタントデータにより、指定された実験データを磁気テープ上にさがす。
- (2) 各種較正データをよみこむ。
- (3) ドリフト補正用 wind off データを抽出しよみこ

む。

- (4) 基準データを物理量に変換する。

天秤出力を電圧相当値 ( $V_{N1}, V_{N2}, V_{Y1}, V_{Y2}, V_X, V_R$ ) に変換する。

- (5) 励起電圧値の補正

$$EV_r = EV_c / EV_m$$

$$\dot{N}_1 = V_{N1} \cdot EV_r / G_{N1}$$

$$\dot{N}_2 = V_{N2} \cdot EV_r / G_{N2}$$

$$\dot{Y}_1 = V_{Y1} \cdot EV_r / G_{Y1}$$

$$\dot{Y}_2 = V_{Y2} \cdot EV_r / G_{Y2}$$

$$\dot{X} = V_X \cdot EV_r / G_X$$

$$\dot{R} = V_R \cdot EV_r / G_R$$

$EV_r$  励起電圧補正比

$EV_m$  測定時励起電圧

$EV_c$  較正時励起電圧

$G_{N1} \sim G_R$  各分力用直流増幅器のゲイン

$\dot{N}_1 \sim \dot{R}$  励起電圧補正後の各分力

- (6) 相互干渉の補正

線形補正により干渉補正を行ない、各分力の電圧値が求められる。

$$\begin{pmatrix} \dot{N}_1 \\ \dot{N}_2 \\ \dot{Y}_1 \\ \dot{Y}_2 \\ \dot{X} \\ \dot{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\partial N_1}{\partial N_2} & \frac{\partial N_1}{\partial Y_1} & \frac{\partial N_1}{\partial Y_2} & \frac{\partial N_1}{\partial X} & \frac{\partial N_1}{\partial R} \\ \frac{\partial N_2}{\partial N_1} & 1 & \frac{\partial N_2}{\partial Y_1} & \frac{\partial N_2}{\partial Y_2} & \frac{\partial N_2}{\partial X} & \frac{\partial N_2}{\partial R} \\ \frac{\partial Y_1}{\partial N_1} & \frac{\partial Y_1}{\partial N_2} & 1 & \frac{\partial Y_1}{\partial Y_2} & \frac{\partial Y_1}{\partial X} & \frac{\partial Y_1}{\partial R} \\ \frac{\partial Y_2}{\partial N_1} & \frac{\partial Y_2}{\partial N_2} & \frac{\partial Y_2}{\partial Y_1} & 1 & \frac{\partial Y_2}{\partial X} & \frac{\partial Y_2}{\partial R} \\ \frac{\partial X}{\partial N_1} & \frac{\partial X}{\partial N_2} & \frac{\partial X}{\partial Y_1} & \frac{\partial X}{\partial Y_2} & 1 & \frac{\partial X}{\partial R} \\ \frac{\partial R}{\partial N_1} & \frac{\partial R}{\partial N_2} & \frac{\partial R}{\partial Y_1} & \frac{\partial R}{\partial Y_2} & \frac{\partial R}{\partial X} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1' \\ N_2' \\ Y_1' \\ Y_2' \\ X' \\ R' \end{pmatrix}$$

$\frac{\partial N_1}{\partial N_2}$  etc, 干渉係数

$N_1' \sim R'$ , 干渉補正後の各分力の出力値

- (7) 天秤感度の温度補正

天秤内にあらかじめ装着されている熱電対により各エレメントの温度を推定し、較正時との温度変化による感度の補正を行なう。六分力天秤の場合は、天秤の構造から次のように仮定する。

$$T_{N1} = T_{Y1} = (T_{b1} + T_{b2}) / 2$$

$$T_{N2} = T_{Y2} = (T_{b2} + T_{b4}) / 2$$

$$T_X = T_R = (T_{b1} + T_{b3}) / 2$$

温度補正後の天秤感度は次のように表わせる。

$$n_1 = \bar{n}_1 + \beta_{N1} (T_{N1} - \bar{T}_{N1})$$

$$n_2 = \bar{n}_2 + \beta_{N2} (T_{N2} - \bar{T}_{N2})$$

$$y_1 = \bar{y}_1 + \beta_{Y1} (T_{Y1} - \bar{T}_{Y1})$$

$$y_2 = \bar{y}_2 + \beta_{Y2} (T_{Y2} - \bar{T}_{Y2})$$

$$x = \bar{x} + \beta_X (T_X - \bar{T}_X)$$

$$r = \bar{r} + \beta_R (T_R - \bar{T}_R)$$

$$\bar{n}_1 \sim \bar{r} \quad ; \quad \text{較正時の感度}$$

$$n_1 \sim r \quad ; \quad \text{測定時の感度}$$

$$\beta_{N1} \sim \beta_R \quad ; \quad \text{天秤の温度係数}$$

$$T_{N1} \sim T_R \quad ; \quad \text{測定時の温度}$$

$$\bar{T}_{N1} \sim \bar{T}_R \quad ; \quad \text{較正時の温度}$$

#### (8) ドリフトの補正

通風前  $\theta = 0$ ,  $\phi =$  一定のデータおよび通風後  $\theta = 0$ ,  $\phi =$  一定, におけるデータをとり, 測定中のドリフトを求める。測定中の変化は線形とみなし, 次の補正をする。

ドリフト係数

$$(\Delta N_1)_D = (N_{1I}(0) - N_{1F}(0)) / n$$

$$(\Delta N_2)_D = (N_{2I}(0) - N_{2F}(0)) / n$$

$$(\Delta Y_1)_D = (Y_{1I}(0) - Y_{1F}(0)) / n$$

$$(\Delta Y_2)_D = (Y_{2I}(0) - Y_{2F}(0)) / n$$

$$(\Delta X)_D = (X_I(0) - X_F(0)) / n$$

$$(\Delta R)_D = (R_I(0) - R_F(0)) / n$$

I ; 最初のデータ

F ; 最終のデータ

(0) ; 無通風時を示す。

n ; 測定回数

ドリフト補正後のデータは次のように表わされる。

$$N_1'' = N_1' + (\Delta N_1)_D \cdot n_i$$

$$N_2'' = N_2' + (\Delta N_2)_D \cdot n_i$$

$$Y_1'' = Y_1' + (\Delta Y_1)_D \cdot n_i$$

$$Y_2'' = Y_2' + (\Delta Y_2)_D \cdot n_i$$

$$X'' = X' + (\Delta X)_D \cdot n_i$$

$$R'' = R' + (\Delta R)_D \cdot n_i$$

$N_1'' \sim R''$  ; ドリフト補正後の分力の出力  
 $n_i$  ; 何番目の測定であることを示す数

#### (9) スティングたわみの補正

迎角をもった測定においては, 空気力によるスティングのたわみを補正しなくてはならない。

通常の模型では第一垂直力および第2垂直力によるたわみを考えればよい。このたわみ係数は前もって天秤較正装置により較正され, 任意の力  $N_1$ ,  $N_2$  ではたわみ角は

$$\Delta\theta_d = \frac{\partial\theta_d}{\partial N_1} \cdot N_1 + \frac{\partial\theta_d}{\partial N_2} \cdot N_2$$

と表わすことができるから, スティングの真の迎角は  $(\theta + \Delta\theta_d)$  となる。以下の計算では  $\theta + \Delta\theta_d$  を  $\theta$  とおきかえる。

#### (10) Static tare の補正(模型重量による出力の補正)

天秤出力には空気力によるものの他, 模型や天秤の重量にもとづくものが含まれているので, これを修正してやる必要がある。この修正量は実験にあたって, 模型姿勢がどのような状態のとき天秤出力をゼロに調整するかによって異なる。本風洞では, 模型を天秤と共にスティングにとりつけ,  $\theta = 0$ ,  $\phi =$  一定 (ロール角  $\phi$  は通風前手動で設定し, 測定中は変化しない) のとき天秤出力をゼロに調整する。したがって任意の  $\theta$  をとったとき, 天秤各分力に対する修正量は次のように表わされる。

$$(\Delta N_1)_{st} = W_{N1} \cos \phi (1 - \cos \theta)$$

$$(\Delta N_2)_{st} = W_{N2} \cos \phi (1 - \cos \theta)$$

$$(\Delta Y_1)_{st} = W_{Y1} \sin \phi (1 - \cos \theta)$$

$$(\Delta Y_2)_{st} = W_{Y2} \sin \phi (1 - \cos \theta)$$

$$(\Delta X)_{st} = W_X \sin \theta$$

$$(\Delta R)_{st} = W_R (\cos \phi - k \sin \phi) (1 - \cos \theta)$$

$W_{N1}$ ,  $W_{N2}$  :  $\phi = 0^\circ$   $\theta = 0^\circ$  のとき模型重量にもとづく  $N_1$ ,  $N_2$  の出力。

$W_{Y1}$ ,  $W_{Y2}$  :  $\theta = 0^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$  のとき模型重量にもとづく  $Y_1$ ,  $Y_2$  の出力。

$W_X$  : 模型重量に相当する  $X$  の出力。

$W_R$ ,  $k$  : 模型重心と天秤軸とのオフセットにより生ずる横揺れモーメントの大きさをきめる常数。

これらの常数は各模型につき無通風時に校正により求める。ここで

$$W_{N1}, W_{N2} < 0,$$

$$W_{Y1}, W_{Y2} > 0,$$

$$W_X < 0,$$

$$W_R, k \leq 0, \text{ (模型により異なる。)}$$

static tare 補正後の各分力は

$$N_1''' = N_1'' + (\Delta N_1)_{st}$$

$$N_2''' = N_2'' + (\Delta N_2)_{st}$$

$$Y_1''' = Y_1'' + (\Delta Y_1)_{st}$$

$$Y_2''' = Y_2'' + (\Delta Y_2)_{st}$$

$$X''' = X'' + (\Delta X)_{st}$$

$$R''' = R'' + (\Delta R)_{st}$$

一般に航空機や飛しょう体は左右対称であるから、 $(\Delta R)_{st}$  はほとんど問題にならない。

(ii) 物理量に変換

$$N_1 = N_1''' \cdot n_1$$

$$N_2 = N_2''' \cdot n_2$$

$$Y_1 = Y_1''' \cdot y_1$$

$$Y_2 = Y_2''' \cdot y_2$$

$$X = X''' \cdot x$$

$$R = R''' \cdot r$$

(i2) 各種係数の計算

(a) 垂直力

$$N = N_1 + N_2$$

(b) 横 力

$$Y = Y_1 + Y_2$$

(c) 垂直力による圧力中心

$$C_{pN} = -a - \left( \frac{b}{1+N_1/N_2} - c \right) \quad [\text{cm}]$$

$a$  ; 天秤中心とモーメント基準点の距離  
天秤中心より上流が+, 下流が- [cm]

$b$  ; 第一垂直力, 第二垂直力エレメント間距離 [cm]

$c$  ; 第一垂直力エレメントと天秤中心の距離 [cm]

(d) 横力による圧力中心

$$C_{pY} = -a - \left( \frac{b'}{1+Y_1/Y_2} - c' \right) \quad [\text{cm}]$$

$b'$  ; 第一横力, 第二横力エレメント間距離 [cm]

$c'$  ; 第一横力エレメントと天秤中心との距離 [cm]

(e) 機体軸縦揺れモーメント

$$M_Y = N \cdot C_{pN} \quad [\text{kg-cm}]$$

(f) 機体軸偏揺れモーメント

$$M_Z = Y \cdot C_{pN} \quad [\text{kg-cm}]$$

(g) 気流マッハ数の計算

一般にマッハ数は測定部気流静圧と集合筒圧力よりもとめるが, 極超音速流では気流の静圧が低く, 測定上の誤差が大きいのので, 特にピトー圧プローベを挿入してこれによりもとめることとした。

$$\frac{p_t'}{p_0} = \left[ \frac{(\gamma+1)M^2}{2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left[ \frac{\gamma+1}{2\gamma M^2 - (\gamma-1)} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

(h) 測定部動圧

$$q = \frac{\gamma}{2} M^2 p_0 \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}} \quad [\text{kg/cm}^2]$$

(i) 集合筒温度

白金・白金ロジウム熱電対の出力特性は次式で近似される。

$$T_0 = 39930 \cdot V^{0.8085} + 293 \quad [^\circ\text{K}] \text{ (基準温度 } 20^\circ\text{C)}$$

$$V; \text{ 白金・白金ロジウム熱電対出力 } [V]$$

(j) Reynolds 数

$$RN = \rho UL / \mu$$

$$U = a \cdot M = 20.0 \sqrt{T} \cdot M; \quad \text{気流速度} \quad [\text{m/s}]$$

$a$  : 音速

$L$  ; 模型の代表長 [m]

$$\rho = \frac{1}{R} \cdot \frac{p_s}{T}; \quad \text{空気密度 } [\text{kg-s}^2/\text{m}^4]$$

$R$  ; 空気のガス常数

$$\mu = 1.487 \frac{T^{1.5}}{T+110.3} \times 10^{-7} \quad ;$$

空気の粘性係数 [kg-s/m<sup>2</sup>]

$$T = T_0 / \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right); \quad \text{気流温度} \quad [^\circ\text{K}]$$

(k) 機体軸揚力係数

$$C_{NB} = N/q \cdot s$$

(l) 機体軸横力係数

$$C_{YB} = Y/q \cdot s$$

(m) 測定軸力係数

$$C_A = X/q \cdot s \quad s; \text{ 模型の基準断面積 } [\text{cm}^2]$$

(n) 機体軸縦揺れモーメント係数

$$C_m = M_Y / q \cdot s \cdot \bar{c} \quad \bar{c}; \text{モーメント基準長} \\ [\text{cm}]$$

(o) 機体軸横揺れモーメント係数

$$C_l = M_X / q \cdot s \cdot \bar{c}$$

(p) 機体軸偏揺れモーメント係数

$$C_n = M_Z / q \cdot s \cdot \bar{c}$$

(q) 機体軸底面軸力係数

$$C_{Ab} = A_b \{ p_s - (p_{b1} + p_{b2} + p_{b3}) / 3 \} / q \cdot s \\ A_b; \text{模型底面積} [\text{cm}^2]$$

(r) 迎角

$$\alpha = \tan^{-1}(\tan \theta \cos \phi)$$

(s) 横すべり角

$$\beta = \sin^{-1}(\sin \theta \sin \phi)$$

(t) 安定軸揚力係数

$$C_L = C_N \cos \alpha - C_A \sin \alpha$$

(u) 安定軸抗力係数

$$C_D = C_A \cos \alpha + C_N \sin \alpha$$

(v) 安定軸横力係数

$$C_Y = C_{YB}$$

(w) 安定軸縦揺れモーメント係数

$$C_{m,s} = C_m$$

(x) 安定軸偏揺れモーメント係数

$$C_{n,s} = C_n \cos \alpha - C_l \sin \alpha$$

(y) 安定軸横揺れモーメント係数

$$C_{l,s} = C_l \cos \alpha + C_n \sin \alpha$$

(z) 安定軸底面抗力係数

$$C_{Db} = C_{Ab} \cos \alpha$$

以上の計算結果は次のプリント方式によりラインプリンタで印刷される。

$\theta$	$p_0$	$p_s$	$p_t'$	$N_1$	$N_2$	$Y_1$	$Y_2$	$X$	$R$	$p_b$
$T_0$	$q$	$RN$	$C_{pN}$	$C_{NB}$	$C_{YB}$	$C_A$	$C_m$	$C_n$	$C_l$	$C_{Ab}$
$\alpha$	$\beta$	$M$	$C_{pY}$	$C_L$	$C_Y$	$C_D$	$C_{m,s}$	$C_{n,s}$	$C_{l,s}$	$C_{Db}$

## 6. 総 合 精 度

以上の較正データをもとにして、この計算システムの計測誤差範囲をどの程度見積ればよいか考えてみる。これらのおもなものは

- (1) 信号の配線系統での誘導ノイズ等は0.05%以下
- (2) 低レベルスキャナにおける接点のチャタリングによるものが最も大きく、過渡振動をさけて約

0.2~0.4%, 温度ドリフト平均 $\pm 0.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  以下

(3) 直流増幅器では内部雑音として入力換算  $1 \mu\text{V}$  (0~3 Hz),  $3 \mu\text{V}$  (全帯域), 温度ドリフトは出力にて  $0.3 \text{mV}/^\circ\text{C}$ , ゲイン精度, 直線性は較正2を行なった場合 0.01%

(4) 高速度スキャナでは過渡誤差  $20 \mu\text{V}$ , 固定誤差 0.005%, 温度ドリフト  $70 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  である。

(5) AD変換器ではサンプルホルダを含めて  $\pm 0.1\% \pm 1/2 \text{LSB}$ 。

(6) 天秤測定の場合, 信号系のノイズはフィルタを使用した場合, 励起電圧のリプル等と合わせて 0.1% の静的誤差を生ずる。

(7) 温度測定の場合, 基準温度の設定精度  $0.1^\circ\text{C}$  および恒温槽, 素線抵抗の誘導ノイズ  $2 \sim 5 \mu\text{V}$  相当を加えなければならない。

一般にランダムなノイズによる誤差は互に打消し合うようなものも多く, 使用状態ではこれらの総和となる確率は低い。また温度ドリフトは電源投入後十分時間をおいて熱的平衡に達すれば温度制御された室内ではあまり問題ではない。特にこの風洞のように間欠式のものでは測定時間が短いのでなおさらである。これらのデータより本データ処理装置全体としての精度を正確に推測することはむずかしいが, 定常実験においては0.4~0.7%程度の静的誤差を生ずるものと考えられる。また, 非定常実験では低速度リレースキャナより誤差を生ずることがないから, 静的には0.2~0.4%以下の誤差とすることができるが, この場合にはむしろサンプリングによる動的誤差が問題となるであろう。

最後に実験データの一例として, AGARD 標準模型 HB-1 について  $M=7$  で実験を行なったときの生データモニタの記録を図31に示す。 $p_0 = 80 \text{ kg/cm}^2$ ,  $T_0 = 530^\circ\text{C}$ ,  $\theta$  は  $-16^\circ$  から  $+16^\circ$  まで連続変化させている。軸力  $X$  は  $\theta$  の符号にはよらず絶対値に対して同じになるべきものであるが, (HB-1 は軸対称模型であるから) 生データでは  $\theta$  の負のときの  $X$  は  $\theta$  が正のときより小さい。これは模型による static tare によるものである。実験結果の詳細については別の機会に報告されるであろう。

## 7. む す び

本設備は昭和41年9月に完成以来, 数多くの運転を通して, 極超音速風洞におけるデータ収集の高速化, 再現性のよさには予期した性能が得られ, 特にデータ処理の際の時間や労力の大幅な節約になった。しかし, 他面高マッハにおける圧力測定においては, 圧力測定



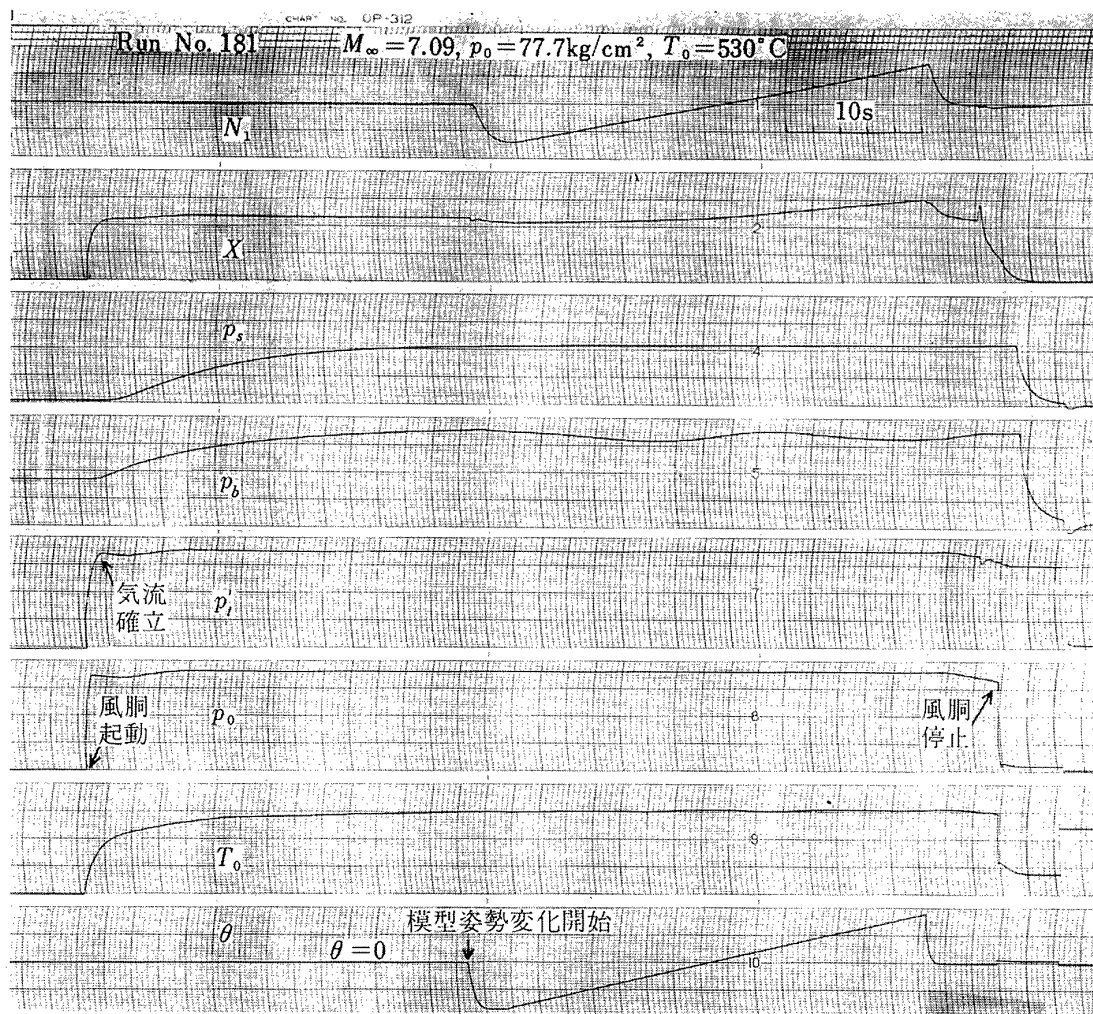


図 31 AGARD HB-1 の測定例

法を中心とした改良が必要であり、非定常空力特性の研究のためには、より一層のデータ収集の高速化が要求される。

この装置の計画から試験まで空気力学第一部平木部長に終始有益なご助言をいただいた。実験全般にわたって橋爪室長をはじめ極超音速風洞制御研究室の方々に種々ご援助いただいた。データ処理ソフトウェアの整備、計算機の運転に田村和(旧姓後藤)、武田アサ子の諸氏にご援助をいただいた。

また六分力のデータ処理方法については空気力学第二部竹内技官、高梨技官、桑野技官、原技官の方々に有益なご助言をいただいた。

なお、三分力天秤、天秤較正装置の設計、製作は穂積技官、橋本技官がそれぞれ担当した。

本装置のうち圧力変換器部分をのぞき、すべて沖電気工業株式会社に製作をお願いした。同社間瀬課長、斉藤勝久技師をはじめ多くの方々にご努力をいただき、また種々の資料もいただいた。ここに厚くお礼を申し上げる次第である。

## 文 献

- 1) 極超音速風洞建設グループ；50 cm 極超音速風洞の計画と構造 航技研報告TR-116(昭和41)
- 2) 田畑浄治，中 正夫，山本芳樹，三浦雅男；磁気テープ・データ処理設備とその特性 航技研報告TR-59(昭和39)
- 3) 新井 忠，原 亘利；吹出し式超音速風洞における実験データの処理方式について(I)，航技研資料 TM-19 (昭和38)
- 4) 斉藤勝久，穴戸 武，白神正昭，黒崎悦朗，永井悦夫，大迫昭和；高速アナログデータ処理装置，沖電気技報 No. 63 (昭和40)
- 5) 原 亘利，高島一明，関根英夫，中 正夫，戸川保子；吹出し式超音速風洞における実験データの処理方式について(II)，航技研資料TM-60 (昭和40)
- 6) Equations, Tables, and Charts for Compressible Flow, NACA Rep. 1135, (1953)

# 既 刊 資 料

TM- 1	高マッハ数風洞について (I)	1961年11月	平 木 一, 清 水 福 寿 橋 本 登
TM- 2	航空技術研究所計数型電子計算機設備 プログラムライブラリー (I)	1962年 2 月	樋 口 一 雄, 戸 川 隼 人 三 好 甫, 高 橋 利 之 能 美 力, 板 垣 芳 雄 鳥 海 良 三, 佐 藤 保 子
*TM- 3	Y S 水平尾翼後桁取付部静荷重試験・ 疲労試験報告書	1962年 2 月	斉 藤 浩 一, 多 田 保 夫
TM- 4	18cm×20cm 超音速風洞について	1962年 5 月	長 洲 秀 夫, 伝 田 幸 雄
TM- 5	遷音速流の線型理論	1962年 8 月	細 川 巖
TM- 6	18cm×18cm 遷音速風整洞備試験	1962年 8 月	橋 本 登, 井 上 政 一
TM- 7	慣性力形疲労試験機	1962年 8 月	竹 内 和 之, 山 根 皓 三 郎
TM- 8	アルミ合金の前歴が疲れ寿命におよぼ す実験的研究	1962年 9 月	池 田 為 治, 坂 元 思 無 邪
TM- 9	方向性次元解析と相似解に関する覚書	1963年 2 月	甲 藤 好 郎, 小 出 勉
TM-10	DATATRON 205 用 ALGOL 58 使用 法について	1963年 2 月	高 橋 利 之
TM-11	光弾性による高速車盤の縞模様	1963年 2 月	永 井 文 雄
TM-12	コーティングの断熱効果に関する実験	1963年 3 月	竹 中 幸 彦, 小 川 鉦 一 林 洋 一
TM-13	遷音速における 45° 後退角翼の予備的 フラッタ実験	1963年 3 月	中 井 暎 一, 小 原 瑛
TM-14	変断面片持梁固有振動数の一計算方法 について	1963年 3 月	中 井 暎 一, 小 原 瑛 鳥 海 良 三, 安 藤 泰 勝
TM-16	フラッタ試験設備測定部変換ノズルの 予備試験	1963年 4 月	中 井 暎 一, 橋 爪 宏 高 木 俊 朗, 橋 本 登
TM-17	VTOL 機用 Jet Lift Engine に関す る一考察	1963年 6 月	鳥 崎 忠 雄, 松 本 正 勝 山 中 龍 夫, 藤 井 昭 一
TM-18	ヘリコプター振動のパワースペクトル 解析	1963年 6 月	小 野 幸 一
TM-19	吹出式超音速風洞による実験データの 処理方式について (I)	1963年 6 月	新 井 忠, 原 亘 利
TM-20	1 m × 1 m 吹出式超音速風洞における AGARD 標準模型Bの三分力試験	1963年 7 月	高 木 廣 治, 谷 喬 斎 藤 秀 夫, 新 井 忠
TM-21	国産中型輸送機 YS-11 主翼疲労試験 (第 I 報)	1963年 9 月	竹 内 和 之, 飯 田 宗 四 郎 北 谷 虔 勇, 中 井 治 夫
*TM-23	人工衛星用多段ロケットの初期計画	1963年12月	五 代 富 文, 山 中 龍 夫 清 水 英 範
TM-24	円輪と薄肉円筒の回転強度の関係	1963年11月	永 井 文 雄
TM-25	DATATRON 205 用 ALGOL 58 の Procedures ライブラリー	1964年 1 月	高 橋 利 之
TM-26	吹出式風洞の圧力制御 (フラッタ試験 設備の場合)	1964年 1 月	橋 爪 宏, 中 井 暎 一
TM-28	一段式観測ロケットの超音速風洞試験	1964年 1 月	谷 喬, 原 亘 利 神 原 盛 三, 外 立 政 隆
TM-29	遷音速フラッタ試験設備の改造および 整備試験	1964年 2 月	中 井 暎 一, 橋 爪 宏 安 藤 泰 勝, 高 木 俊 朗
TM-30	二段式ロケット飛しょう体の揚力およ び圧力中心推定法	1964年 3 月	小 橋 安 次 郎, 宮 沢 政 文
TM-31	亜音速ジェット輸送機の遷音速風洞に おける試験	1964年 3 月	河 崎 俊 夫, 竹 内 理

TM-32	遷音速風胴の防音	1964年4月	牛田健二, 高橋 宏
TM-33	非定常境界層の遷移の研究に使用された定温度型熱線風速計について	1964年4月	榎並敬之, 山本稀義
TM-34	極超音速風胴ノズルの境界層補正について	1964年5月	長洲秀夫
*TM-36	遷音速タービン翼列二次元試験 (第I報)	1964年5月	近藤博, 山崎紀雄, 蓑田光弘
TM-37	気体の不完全性を考慮した極超音速風胴ノズルの設計計算法	1964年5月	毛利 浩
TM-38	AGARD-A 標準模型の超音速三分力試験	1964年6月	高木廣治, 斎藤秀夫, 石原久蔵
TM-39	相似極超音速流におかれた半球面上の境界層の遷移に及ぼす粗さと冷却の結合影響	1964年7月	石井孝雄
TM-40	国産中型輸送機 YS-11 胴体疲労試験 (I)	1964年9月	竹内和之, 川島矩郎
TM-41	抵抗線歪ゲージのゲージ率測定	1964年10月	田畑浄治, 大坪孔治, 滝沢 実
TM-42	実在着氷条件の測定について	1964年10月	古関昌次, 田寺木一, 泉 日出夫
TM-44	高負荷燃焼器 (アニュラ模型) の実験結果	1964年12月	大塚貞吉, 鈴木邦男, 松本 宏, 石井浅五郎, 広木 強, 山中国雍
*TM-45	国産中型輸送機 YS-11 主翼疲労試験 (第II報) —機体の被害状況—	1964年12月	竹内和之, 飯田宗四郎, 塩原竹治, 中井治夫
TM-46	翼胴結合金具の疲労特性	1964年12月	竹内和之, 藤枝郭俊
TM-47	ローター後流中のヘリコプター胴体の抵抗について	1965年1月	幸尾治朗, 岡 遠一
TM-48	極超音速風胴用ペブル加熱器の予備実験	1965年2月	平木 一, 橋本 登崇, 林 二識, 吉永 崇, 山口富夫
TM-49	Queen-Air 機の失速特性について	1965年2月	幸尾治朗, 岡 遠一, 照井祐之, 鎌田幸男
TM-50	LS-A 型ロケットの曲げ剛性および振動試験について	1965年5月	中井暎一, 塙 武敏, 泉 日出夫
TM-51	超音速風胴空力データ表示記録装置	1965年5月	谷 喬, 高島一明, 原 亘利, 近藤洋史
TM-53	ベクトルのノルムと行列のノルム —数値解法の収束条件その他への応用—	1965年5月	板垣芳雄
TM-54	熱衝撃試験用風胴整備試験	1965年5月	武藤洋治郎, 池田為治, 坂元思無邪, 光山敏雄
TM-55	ロケット模型風胴試験における超音速相似則の応用	1965年5月	河崎俊夫, 谷 喬
TM-56	2024-T4アルミニウム合金平滑丸棒の常温回転曲げ疲労試験	1965年7月	石田 誠, 河野哲雄
TM-57	極超音速における軸対称物体の前面抵抗	1965年7月	曾 我国 男
TM-58	試験用飛しょう体の超音速風胴試験	1965年8月	斎藤秀夫, 木村友昭
TM-59	ジェットリフトエンジン空気取入口の実験 (I)	1965年9月	近藤 博, 増田惣平
TM-60	吹出式超音速風胴における実験データの処理方式について (II)	1965年9月	原 亘利, 高島一明, 関根英夫, 中 正夫, 戸川保子
TM-61	クインエア機の風胴試験	1965年9月	広末健一, 矢沢健司, 佐野雄四郎, 田能村 実, 別府 信宏

TM-62	高温歪ゲージの温度特性試験	1965年10月	江川 幸一
TM-63	2024-T3アルミニウム合金の有孔補強平板の軸荷重による疲労特性	1965年10月	飯田宗四郎
TM-64	応力集中による材料の疲れ強さに関する一実験 (I)	1965年10月	池田 為治, 坂元思無邪 光山 敏雄
TM-65	ジェットエンジンの翼の固有振動に関する実験	1965年11月	武内 澄夫, 宮地 敏雄 星谷 昌二
*TM-66	国産中型輸送機 YS-11 胴体疲労試験 (II) 一機体の被害状況一	1965年11月	竹内 和之, 川島 矩郎 塩原 竹治
*TM-67	国産中型輸送機 YS-11 部分胴体疲労試験 一乗降口および前方荷物口部付近の部分胴体一	1965年11月	竹内 和之, 野原 利雄 松岡 陽一
*TM-68	超軽量ジェットエンジン試作1号機 (JR 100) の燃焼器 (I)	1965年11月	大塚 貞吉, 鈴木 邦男 石井 浅五郎, 山 中国 雍
TM-69	質量分析計による水蒸気を含む試料のガス分析	1965年12月	斎藤 隆, 堀内 正司 中村 浩子
*TM-70	ジェットエンジン用燃料噴射弁の特性試験	1965年12月	福田 広, 相波 哲朗 松本 宏, 畑山 金彌
TM-71	可動アイアンバードの構造および機能	1965年12月	機体第一部, 計測部 原動機部
TM-72	地上付近の風の影響による小型ロケットの姿勢角変化	1965年12月	戸川 隼人, 石黒登美子
TM-73	固定端を有する薄肉円筒殻の自由振動について	1966年1月	田寺 木一, 泉 日出夫
TM-74	回転振動試験装置の計画, 構造および特性	1965年2月	武内 澄夫, 宮地 敏雄 星谷 昌二
TM-75	高マッハ数風洞の消音装置について	1966年2月	牛田 健二, 清水 福寿 吉永 崇
TM-76	コーティングの断熱効果のアナログシミュレーション	1966年2月	小川 鉰一
TM-77	テレメータ電波の偏波面の回転を利用したロケットのスピン測定について	1966年3月	田畑 浄治, 桜井 善雄 三浦 雅男
TM-78	昇降舵の操舵力特性に関するシミュレータ解析	1966年3月	堀川 勇壮, 森 幹彦 中野 佳直
TM-79	テレメータ機上装置の小型化の研究	1966年3月	新田 慶治
TM-80	安定制御のための一計算法	1966年3月	檜崎 哲二
TM-81	吹出式超音速風洞の超動時および停止時における過負荷防止装置	1966年3月	石原 久蔵, 斎藤 秀夫 外立 政隆, 榊原 盛三 宗美 均
TM-82	ピトー管による境界層速度分布測定について	1966年4月	長洲 秀夫, 柏原登喜子
TM-83	ジェットリフトエンジン空気取入口の実験 (II)	1966年4月	近藤 博, 増田 惣平
TM-84	二段ロケットの低速風洞試験	1966年7月	毛利 浩, 田村 敦宏 佐野 四郎, 能村 実
TM-85	航空機の滑走路走行時の振動に関する実験的研究	1966年8月	小野 幸一
TM-87	極小型超音速機用姿勢制御装置の特性解析	1966年8月	池谷 光栄, 畑山 茂樹
TM-88	プロペラ後流偏向型 STOL 機の風洞試験 (I)	1966年9月	犬丸 矩夫, 岡部 祐二郎 北村 清美, 川幡 長勝 木村 友昭
TM-89	有孔板の振動について	1966年9月	川井 忠彦, 泉 日出夫
TM-90	地上付近の横風の影響による小型ロケットの方位角変化	1966年9月	戸川 隼人, 石黒登美子

TM- 91	高速タービン翼列二次元試験	1966年10月	近藤 博, 山崎 紀雄, 蓑田 光弘
TM- 92	リフトジェットエンジン試験設備(I) —台上運転設備—	1966年10月	大山 耕一, 中山 晋, 五味 光男, 吉田 晃昇, 菅原 昇
*TM- 93	軽量ジェットエンジン研究試作2号機 (JR 200) の燃焼器 (I) —アニュ ラ型模型による実験—	1966年10月	鈴木 邦男, 石井 浅五郎, 広瀬 建樹, 大塚 貞吉, 山中国 雍
TM- 94	J-3ジェットエンジン用タービン動翼 の固有振動特性	1966年11月	武内 澄夫, 宮地 敏夫, 星谷 昌二
TM- 95	超軽量軸流圧縮機動翼の固有振動特性	1966年11月	武内 澄夫, 宮地 敏雄, 星谷 昌二
TM- 96	2024-T4および7075-T6有孔平板の曲 げ疲労試験と2024-T4平滑丸棒の軸 荷重疲労試験	1966年11月	佐野 政明, 菰岡 一洋
TM- 97	高マッハ数風洞について (II)	1967年 1月	吉永 崇, 井上 建二, 広田 正行, 楯 篤志
TM- 98	40kW プラズマ発生装置の諸特性	1967年 1月	野村 茂昭, 相原 康彦
TM- 99	搭載機器用環境試験装置の特性	1967年 2月	大月 正男, 鈴木 孝雄, 田畑 浄治, 円居 繁治
TM-100	二連型リフトエンジンの吸込み抵抗	1967年 3月	近藤 博, 大城 章一郎
TM-101	低圧環境下における固体ロケットモ ータの性能	1967年 3月	望月 昌, 斎藤 信, 五代 富文, 伊藤 克弥, 湯沢 克宜
TM-102	弾性支持片持板の振動	1967年 3月	堀 武敏, 築地 恒夫, 越出 慎一, 林 洋一
TM-103	結合梁の振動について	1967年 3月	築地 恒夫, 林 洋一
TM-104	平板翼模型の固有振動モードの測定	1967年 4月	中井 暎一, 森田 甫之
TM-105	非定常境界層方程式を含む放物型微積 分方程式の数値解法	1967年 4月	関口 清子
TM-106	動安定微係数測定用風洞天秤について	1967年 5月	高島 一明, 榊原 盛三, 原 亘利, 北出 大三, 金 成正好
TM-107	プロペラ後流偏向型 STOL 機の風洞 試験 (II)	1967年 6月	犬丸 矩夫, 岡部 祐二郎, 北村 清美, 川幡 長勝, 高橋 侔, 木村 友昭
TM-108	インダクタンス型小型圧力変換器の試 作とその応用	1967年 7月	長洲 秀夫, 柳沢 三憲
TM-109	ロケットの飛しょう径路計算のための プログラム	1967年 7月	戸川 隼人, 石黒 登美子
TM-110	二次元スラットおよびスロテッドフ ラップの実験的研究 (I)	1967年 8月	犬丸 矩夫, 北村 清美, 川幡 長勝
TM-111	リフトジェット VTOL 機の離陸径路 に関する近似解	1967年 8月	西村 博史
TM-112	極超音速風洞ペブル加熱器の特性	1967年 8月	橋爪 宏, 橋本 登
TM-113	リフトジェットエンジン試験設備(II) —計測設備—	1967年 9月	森田 光男, 岩部 柱相, 関根 静雄, 武田 克巳
TM-114	五段遷音速軸流圧縮機の空力設計	1967年 9月	藤井 昭一, 松木 正勝, 五味 光男
TM-115	燃料蒸発管に関する研究 (I)	1967年 9月	大塚 貞吉, 鈴木 邦男, 田丸 卓, 乙幡 安雄
TM-116	高負荷燃焼器の空気孔からの流れにつ いて	1967年 9月	鈴木 邦男, 相波 哲朗
TM-117	ロケット用テレメータ機上装置の集積 回路化	1967年 9月	新田 慶治

TM-118	操縦桿レート信号によるアイアンバー ド制御の安定効果とパイロットのモ デルについて	1967年 9 月	村 上 力, 真柳光美
TM-119	ベーン型気流方向検出器の特性	1967年11月	田畑浄治, 松島弘一 成田健一, 塚本憲男
TM-120	円錐管レンズの設計とその応用	1967年11月	山中龍夫, 奥 岨 澄男
TM-121	大きなマトリックスの逆行列計算および 連立一次方程式の計算のためのプロ グラミング技術	1967年11月	戸川隼人, 戸川保子
TM-122	NAL-7-P ロケットの強度および燃焼 試験結果	1967年11月	竹中幸彦, 古田敏康 小川欽一, 朝田洋雄 豊原恒彦, 五代富文 湯沢克宜, 伊藤 克弥 西村 久男
TM-123	“NAL-16・31” および “NAL-25・31” 二段ロケットの振動試験	1967年11月	中井暎一, 古関昌次 田寺木一, 高木俊朗 安藤泰勝, 森田地孝 峯岸正勝, 森田 雄
TM-124	吹出式超音速風洞の集合胴圧力制御に ついて	1967年12月	外立政隆, 近藤洋史 原 亘利
TM-125	航技研 1 m×1 m吹出式超音速風洞に おけるハーフモデル試験について	1968年 2 月	石原久蔵, 原 亘利 榊原盛三, 関根英夫
TM-127	2024-T 3 アルミニウム合金の 3-bay 有孔補強平板の軸荷重による疲労特 性	1968年 4 月	飯田宗四郎, 猿本光明 斉藤信一郎
TM-130	リフトエンジンの自然吸込みについて	1968年 4 月	近藤 博, 大城章一郎
TM-131	遷音速タービン翼列二次元試験 (Ⅲ)	1968年 5 月	近藤 博, 養田光弘 山崎紀雄, 古川 昇
TM-132	行列の最小固有値の一計算法	1968年 5 月	戸川隼人, 戸川保子
TM-133	フィラメント・ワインディング円筒の 強度特性に関する研究	1968年 5 月	竹中幸彦, 斎藤浩一 古田敏康, 川島矩郎 三本木茂夫, 小川欽一 越出慎一, 朝田洋雄 熊倉郁夫, 大竹 邦彦
TM-134	AGARD 標準模型 HB-1, HB-2 の 超音速風洞試験	1968年 5 月	斎藤秀夫, 石原久蔵 原 亘利, 野田 順一 関根英夫
TM-135	歪ゲージの自己加熱による歪ドリフト	1968年 5 月	小川 欽一, 遠藤修司
TM-136	“NAL-16・31” および “NAL-25・31” 二段ロケット結合部の曲げ剛性試験	1968年 5 月	中井暎一, 飯田宗四郎 高木俊朗, 安藤泰勝 菊地 孝男
TM-137	ロケットの三次元の運動の方程式およ び HITAC 5020 による軌道計算の ためのプログラム	1968年 5 月	毛利 浩
TM-138	片持板の振動解析に関する考察	1968年 6 月	堀 武敏, 越出慎一 林 洋一
TM-139	薄板構造の疲れき裂伝ば実験	1968年 6 月	竹内和之, 野原利雄 飯田宗四郎
TM-140	二次元スラットおよびスロツテッドフ ラップの実験的研究	1968年 7 月	犬丸矩夫, 北村清美
TM-141	超音速二次元翼列予備実験風洞につ いて	1968年 7 月	近藤 博, 坂口 一 八 山 優, 高 森 晋
TM-142	二次元スラットおよびスロツテッドフ ラップの実験的研究 (Ⅲ)	1968年 7 月	犬丸矩夫, 高橋 俣
TM-143	端面一体巻きフィラメント・ワインデ ィング容器の静圧強度および疲れ強 度	1968年 8 月	竹中幸彦, 朝田洋雄 野口義男

TM-144	真ひずみ計の試作	1968年 8 月	竹 中 幸 彦, 朝 田 洋 雄 野 口 義 男
TM-145	スピンを伴うロケットの運動を計算するプログラム	1968年 8 月	戸 川 隼 人, 石 黒 登 美 子 山 本 浩 通
TM-146	双発 STOL 機の飛行試験 (実用運用包囲線および離着陸特性)	1968年 8 月	幸 尾 治 朗, 岡 遠 一 塚 野 雄 吉, 鎌 田 幸 男 小 野 孝 次
TM-147	浮動振子型加速度計の試作	1968年 9 月	大 月 正 男, 鈴 木 孝 雄 円 居 繁 治
TM-148	吹出しフラップ翼の高揚力特性	1968年 9 月	小 橋 安 次 郎, 宮 沢 政 文 西 武 徳
TM-149	NAL-16-TR ロケットの研究	1968年10月	ロケット性能研究室
TM-150	リフトジェット VTOL 機の着陸における水平方向の減速について	1968年11月	西 村 博 史
TM-151	フラッタ解析法の再検討 (フラッタ解析法の研究 その1)	1968年12月	市 川 輝 雄
TM-152	ノズル内の突起物によるロケットエンジンの側分力	1969年 1 月	檜 崎 哲 二, 中 野 富 雄
TM-153	FA-200改機の風洞試験(I) プロペラ付き	1969年 2 月	広 末 健 一, 坂 井 紀 穂 高 橋 宏, 綿 貫 忠 晴
TM-154	FA-200改機の風洞試験(II) 高揚力装置付き	1969年 2 月	広 末 健 一, 木 村 友 昭 高 橋 宏, 綿 貫 忠 晴
TM-155	極超音速風洞 M7 ノズル較正試験	1969年 2 月	橋 本 登, 吉 沢 昭 穂 積 弘 一
TM-156	自動制御系の動特性を計数型電子計算機により模擬するための汎用プログラム	1969年 3 月	戸 川 隼 人, 丸 山 治 雄
TM-157	機上用超小形エンコーダの研究	1969年 3 月	中 正 夫, 山 本 芳 樹 大 石 晃
TM-159	可動アイアンバードによる姿勢制御の実験	1969年 5 月	西 村 博 史, 藤 枝 郭 俊

注：欠番は配布先を限定したもの

\* 印は配布先限定を解除したもの (昭和44年 7 月 1 日付)

---

## 航空宇宙技術研究所資料160号

昭和44年7月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)44-9171 (代表) 182  
印刷所 一誠社綜合印刷株式会社  
東京都武蔵野市御殿山1-6-10

---



