

航空宇宙技術研究所資料

TM-60

吹出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)

原 亘利・高島一明・関根英夫
中 正夫・戸川保子

1965 年 9 月

航空宇宙技術研究所

既 刊 資 料

TM- 1	高マッハ数風洞について (I)	1961年11月	平橋 本一, 清水 福寿
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 雄一, 戸川 隼人 三好 甫, 高橋 利之 能美 良三, 板垣 芳雄 島海 秀夫, 佐藤 幸雄 洲川 巖, 田 幸雄 細川 本登, 井上 政一 橋本 和之, 山根 皓三 竹内 為治, 坂元 思無邪
TM- 4	18cm×20cm超音速風洞について	1962年 5 月	
TM- 5	遷音速流の線型理論	1962年 8 月	
TM- 6	18cm×18cm遷音速風洞整備試験	1962年 8 月	
TM- 7	慣性力形疲労試験	1962年 8 月	
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	
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編模様	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 英 井 一三, 藤 泰勝 海良 三, 安 宏 中井 暎一, 橋 爪 高木 俊朗, 橋 本 鳥崎 忠雄, 松 正 山 竜夫, 井 昭一 小野 幸一
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	
TM-16	フラッタ試験設備測定部交換ノズルの 予備試験	1963年 4 月	
TM-17	VTOL 機用 Jet Lift Engine に関す る一考察	1963年 5 月	
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	
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	1m×1m 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 竹内 和之, 飯田 宗四郎 北谷 虔勇, 中井 治夫
TM-21	国産中型輸送機 YS-11 主翼疲労試験 (第 I 報)	1963年 9 月	
TM-24	円輪と薄肉円筒の回転強度の関係	1963年11月	
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 柳 盛三, 外 立政 中井 暎一, 橋 爪 安藤 泰勝, 高木 俊朗 小橋 安次郎, 宮 沢 政文
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	
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	
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	遷音速風洞の防音	1964年 4 月	牛田 健二, 高橋 宏 榎 並敬之, 山本 稀義
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	
TM-34	極超音速風洞ノズルの境界層補正につ いて	1964年 5 月	長洲 秀夫
TM-37	気体の不完全性を考慮した極超音速風 洞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 実次, 田寺 木一 古閑 昌次
TM-42	実在着氷条件の測定について	1964年10月	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 国雅 竹内 和之, 藤 枝 郭俊 幸尾 治朗, 岡 遠一
TM-46	翼洞結合金具の疲労特性	1964年12月	
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	
TM-48	極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実 験	1965年 2 月	平林 二識, 橋 本 登 木 一, 吉 永 崇

吹出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)*

原 亘利** ・ 高島一明** ・ 関根英夫**

中 正夫*** ・ 戸川保子***

1. ま え が き

当研究所の 1m×1m 吹出式超音速風洞は昭和36年7月完成以来各種の試験を行なってきた。本風洞の構造についてはすでに文献²⁾に述べられており、また特に計測装置のデータ処理における雑音と精度については文献²⁾で第I報として報告した。しかし第I報にはその研究の前提となる装置の説明やその実的な取り扱いについてあまり述べられておらず、これは文献³⁾にも記載されていない。

そこで今回は本風洞で最も多く用いられている六分力計測を中心として、装置とその具体的な処理方式について報告することとした。のちに述べるように現在の計測法は種々の制約によってまだ必ずしも十分なものではなく将来改良の余地も多いが、第I報の補遺の意味もあってあえて取りまとめたしだいである。

2. 計 測 装 置

図1は吹出式超音速風洞の計測およびデータ処理方式を示す系統図である。この全行程のうち風洞データの磁気テープ記録までは風洞に付属した計測装置により行なわれるが、データの再生およびデータ処理の部分は当所計測部のデータ処理室において行なわれる。

現在当風洞で行なっている試験の大部分は、供試模型の静的な特性を調べることを目的としている。

試験の方法としては、あるマッハ数に設定された気流の中に模型を置き、気流に対する角度（迎角または横すべり角）を変化させながら、任意の角度のとき模型に働く空気力を測定する。

模型に働く空気力の測定には内装式六分力天秤を使用する。現在われわれが使用しているTASK社製の天秤では、模型に働く3軸方向の空気力とモーメントを求める方法として、二つの垂直力成

* 昭和40年8月9日受付

** 空気力学第二部

*** 計測部

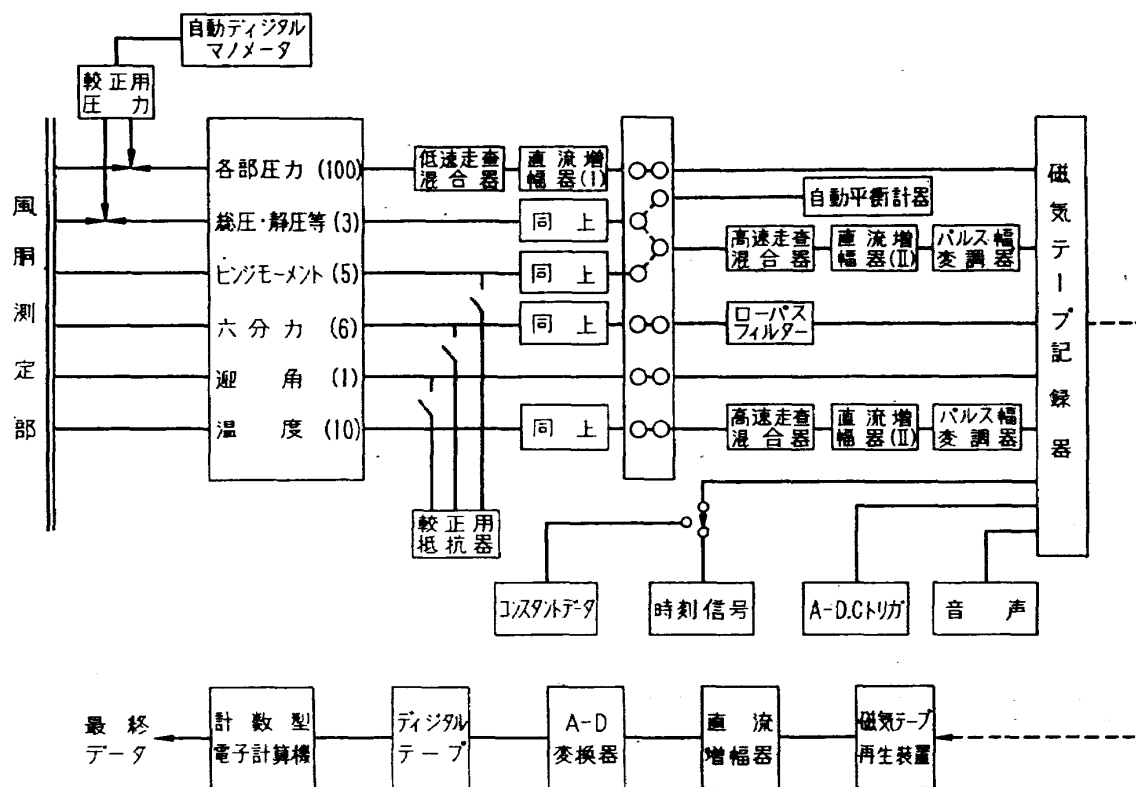


図 1 計測系統図

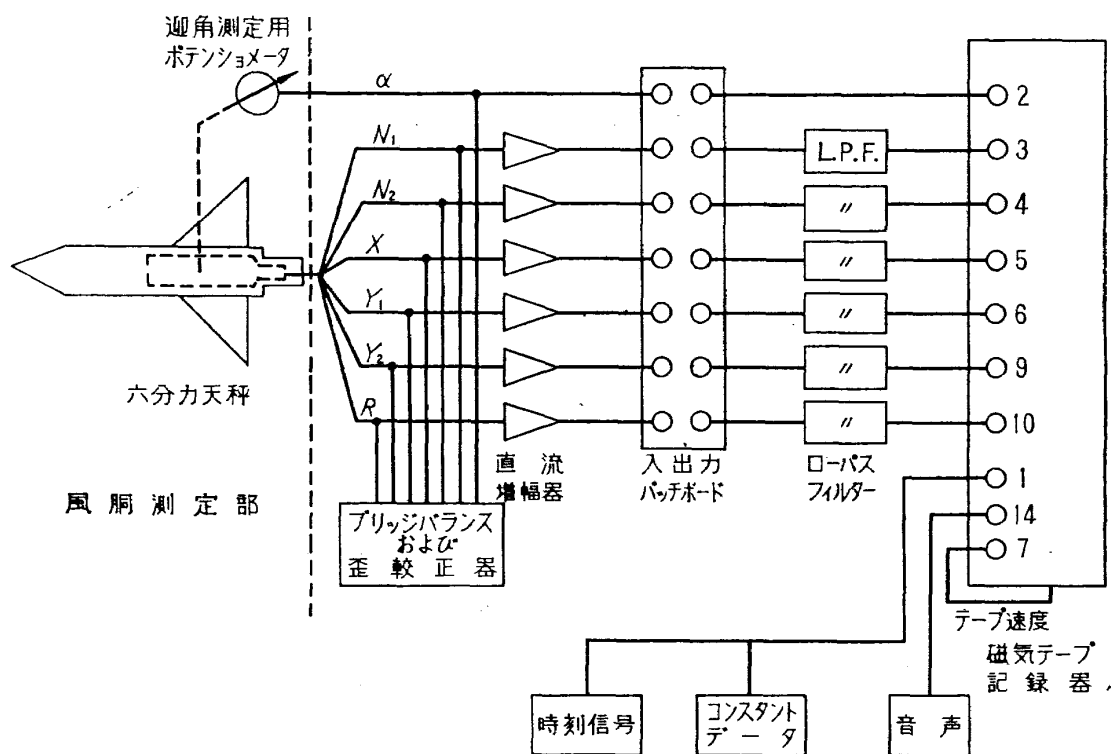


図 2 六分力データ記録系統図

分 (N_1 および N_2), 二つの横力成分 (Y_1 および Y_2), および軸方向力 (X), ローリングモーメント (R) として計測するようになっている。

図2に六分力データの記録系統図を示す。磁気テープに記録するデータは天秤の各分力6チャンネルと模型迎角 (α) の合計7チャンネルで、磁気テープ上の独立したトラックに、それぞれ周波数変調方式 (FM) で記録する。

風洞実験で必要な他のデータ (総圧 P_0 , 静圧 P_s , 模型の底面圧 P_B 等) は別の記録器で計測し、データ処理の最終過程で計算に組み入れる。

以下、順を追って六分力試験に使用する計測装置について説明する。

2.1 六分力天秤¹⁾

六分力天秤の目的は模型に働く空気力を、六つの成分に分けて測定し、垂直力、横力、軸力およびモーメントが簡単に求められることである。

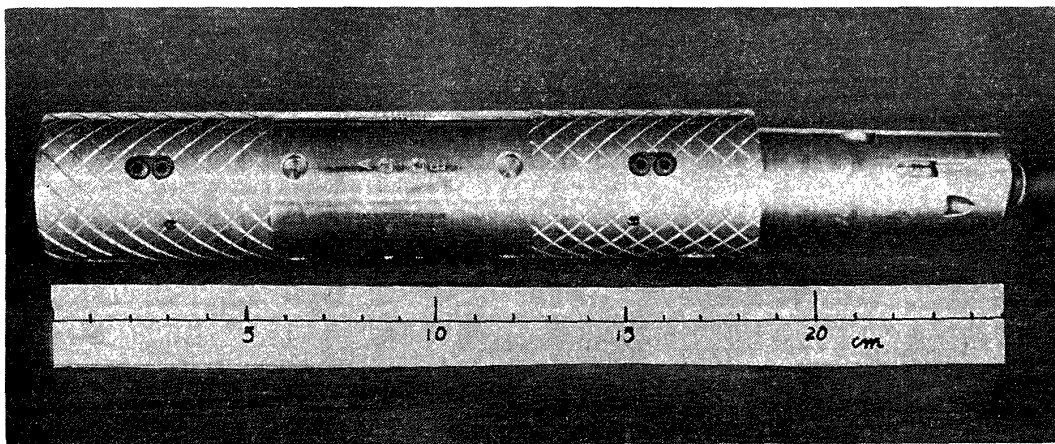


図 3

模型に働く空気力の測定方法として、当風洞では、模型支持用スティングの先端に図3のような内装型の六分力天秤を取り付け、模型はその外部に固定し、模型に作用する力はすべて天秤に伝わるようになっている。天秤内部には8組の受感素子があり、各受感子には抵抗線歪ゲージがはってあり、4辺のブリッジを形成している。模型の力が天秤に伝わると、受感子を変形させ、そこにはある歪ゲージの抵抗値が変わり、ブリッジの平衡がくずれるようになる。もし、ブリッジの電源端子に直流または交流の電圧を加えてやれば、天秤に力がかかるとときブリッジ出力端子に電圧の変化が現われる。天秤の8組の受感子はそれぞれ、第1, 第2垂直力および第1, 第2横力が各一組ずつと、ローリングモーメントおよび軸力各2組ずつに対応し、各受感子間の力学的干渉が起こらないように注意して設計し組み立てられている。

現在当風洞で使用中の内装式天秤は3種類あり1.5インチ径のもの2本と2.0インチ径のもの1本である。表1にその寸法と容量を示す。

表1 内装式六分力天秤

	TASK	TASK	TASK
	1.5 MK II H	1.5 MK VI B	2.0 MK III J
外 径	38.1 mm	38.1 mm	50.8 mm
全 長	222.25 mm	222.25 mm	285.7 mm
第 一 垂 直 力 (N_1)	453.7 kg	453.7 kg	408.2 kg
第 二 垂 直 力 (N_2)	"	"	"
第 一 横 力 (Y_1)	"	226.85 kg	204.1 kg
第 二 横 力 (Y_2)	"	"	"
横揺れモーメント (R)	13.82 kg·m	13.82 kg·m	13.82 kg·m
軸 力 (X)	68.1 kg	68.1 kg	72.75 kg

方 式：ストレーンゲージ方式

ゲージ抵抗：120 Ω 4 ゲージ式

励起電圧：6 V_{D.C.}

最大出力：10mV（定格荷重において）

精 度：0.25%

2.1.1 天秤校正

天秤出力を空気力の値に変換するために TASK 社の指示による実荷重を用いた天秤の校正を行っている。この天秤校正のとき天秤内のストレーンゲージブリッジの一边に基準になるような固定抵抗を接続して、そのときブリッジ出力端に現われる不平衡電圧を測定し、その出力電圧に相当する力の量を調べ基準抵抗の等価荷重を求めておき、データ処理時にデータの出力電圧値から力の単位に変換するために使用する。また、天秤校正の際、受感子相互間の干渉を調べておき、その干渉係数を求め、データ処理時に干渉分の補正を行なう。干渉の大きさは受感子により異なるが軸力受感子が最も影響を受けやすいようである。

2.2 迎角変換器

風洞測定部において、模型迎角を変化させる方法として、当風洞では模型支持用ストラットを上下させ、かつストラットに連結したスティングの角度を変化させることによって、模型がスティングとともに風洞測定部中央で迎角変化できるようになっている。

迎角の測定はスティング基部より風洞外部へレバーを出し、そのレバーの変化によりポテンシオメータの軸を回転させ、その抵抗値が変化することにより角度を電圧値に変換している。現在ポテンシオメータの両端に 6V の直流電圧を加え、20° の角度変化に対して 3V の電圧変化が得られるようにしてある。

迎角測定用ポテンシオメータの仕様は次のとおりである。

抵 抗 値：10k Ω 巻線型

測定範囲：-20°～+20°

直 線 性 : 0.1%

励起電圧 : 6V_{D.C.}

2.2.1 迎角測定値の補正

模型迎角は模型支持用スティングの基部で測定しているのですが、風洞通風時に模型に空気力が働いているとき、または重い模型で試験しているときは空気力または自重で模型支持用スティングがたわみ、ポテンシオメータの出力で測定した迎角と真の模型迎角との間にかなりの違いが出てくる。そのため、これらの影響により迎角補正を行なう必要がある。現在天秤較正の際、実荷重によるスティングおよび天秤のたわみによる角度変化を測定し、データ処理のときに補正計算をしている。通常使用しているスティングでは、天秤中心に 400kg の荷重を加えたときだいたい 1.2° のたわみが生じる。

2.3 直流増幅器^{2),3)}

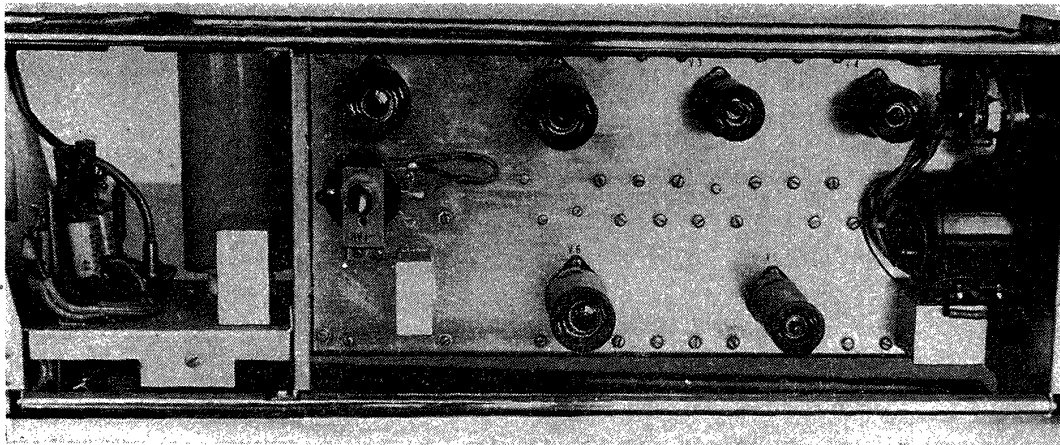


図 4

六分力天秤の低レベル出力を磁気テープ記録増幅器の最適入力レベルまで増幅するために使用する。雑音およびドリフトに対して特に敏感であるので、電源電圧の安定と初段管のバランス等に対しては十分注意する必要がある。入力配線より誘導してはいつてくる雑音に対しては、天秤出力はすべて平衡入力型に設計して、同相の誘導雑音は打ち消し合うようにしてある。また、電源電圧の変動に対しては二重の安定化を行なってその影響の軽減を計っている。現在使用中の直流増幅器の仕様は次のとおりである。

チョッパ式ドリフト補償方式

周波数特性 : 0 ~ 1kc/sec ± 0.3%

増 幅 度 : 500, 250, 100, 50 倍可変

直 線 性 : 0.1%

雑 音 : 100 μ Vp·p (入力換算)

ドリフト : 20 μ V/5 分間 (入力換算)

図4は本直流増幅器の外観である。

2.4 ローパスフィルタ

磁気テープに記録する計測データには雑音成分が混入し、計測精度を悪くする。雑音混入の原因は種々あるが、特に多いのは、低レベルの計測配線途中の誘導雑音と直流増幅器内部で発生する雑音である。これら電気回路による雑音は最大信号電圧値の2%以内であるが、信号電圧の小さいときには大きく影響する。図5はペンオシロによる風洞データの記録であるが振動成分が重畳しているのが見える。

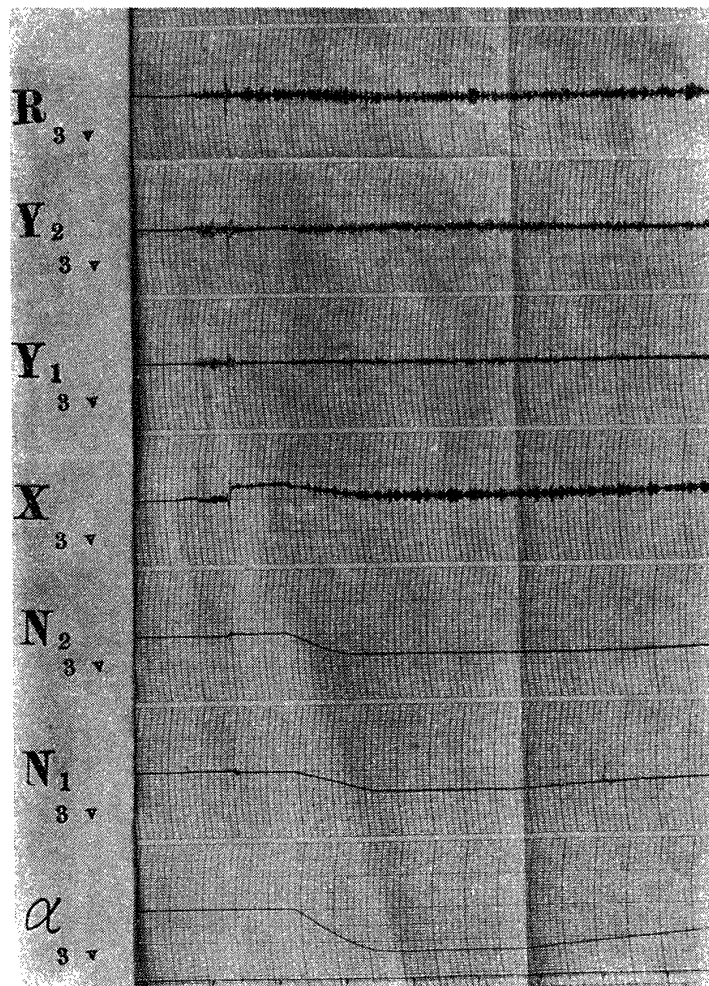


図 5

上に述べた電氣的な雑音とは性質が異なるが、風洞通風時には模型にあたる気流の乱れ等により模型を振動させ、天秤の出力電圧にかなりの振動が含まれる。この振動の大きさは気流のマッハ数に関係し、マッハ数が1.5以下ではあまり大きくないが、マッハ数が2.0を越えると前に述べた電気回路の雑音電圧よりずっと大きくなる。天秤出力の振動周波数は各分力により異なり、また模型の大きさ、模型重量および模型支持用スティングの長さによって変わる。天秤出力のうち特に軸力(X)の振動電圧が大きく定格出力の数割にまで及んでいる。

風洞運転当初はアナログ-デジタル変換した後、電子計算機で多くのデータから平均値を求めデータのばらつきを少なくしていたが、この方法では計算時間もかかり、また結果もあまり良くなかった。現在使用しているアナログ-デジタル変換器は毎秒1,000回の定周期でサンプリングしているので、8チャンネルの走査を行なってA-D変換する場合、データに125c/s またはその整数倍の振動が重畳しているときは、いくら多数のデータを取って平均しても、真の平均値とは非常に違う結果となる。そこで次の仮定のもとに、A-D変換する前にローパスフィルタを用いデータの振動成分を除去することにした。

風洞内の気流は、ある基本の定常流の上に振動流が重ね合わされたものと考え、ローパスフィルタによって振動成分を除くとき求める定常流の値が得られるものと仮定する。このためには空力的にみるとポテンシャル流を仮定しても非定常項は十分小さいことが必要である。したがって振動成分が大きい流れでは良好な結果は得られないから、フィルタを使用する場合

でも、模型の重量、重心位置、取付け方法等十分注意して振動を減らすことが重要である。以上の仮定のもとに採用するローパスフィルタは、データ中の振動成分が10c/s程度の低い周波数から200c/s以上のものまでかなり広範囲にわたっているので断周波数を5c/s前後とした。

図6は現在使用中のL, C使用のローパスフィルタの周波数特性である。なおフィルタ回路で抵抗(R)をかなり大きくし共振点でピークが出ないようにした。

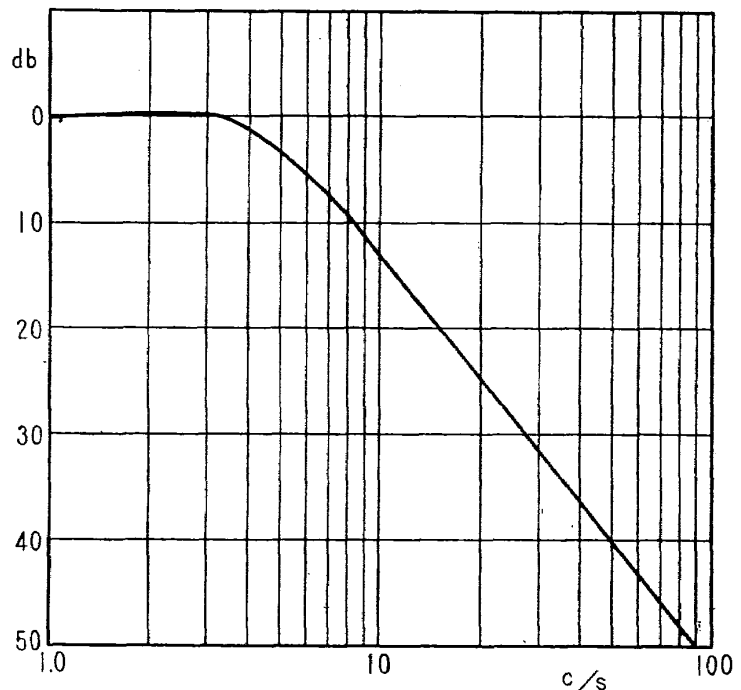


図6 ローパスフィルタの周波数特性

2.5 磁気テープデータ記録装置³⁾

AMPEX 社製 FR-100A 型

トラック数: 14

磁気テープ: 幅 1inch, 厚さ 1mil, 10½inch リール使用

テープ速度: 60, 30, 15, $7\frac{1}{2}$, $3\frac{3}{4}$, $1\frac{7}{8}$ inch/sec 中の任意選択

記録方式: 次の3方式がある。

(1) 直接記録方式

入力レベル 0.15 ~ 50 Vr. m. s

出力レベル 1 Vr. m. s

周波数特性 100c/s ~ 100kc/s $\pm 3dB$ (60inch/sec)

(2) 周波数変調方式

入力レベル $-1.4 \sim +1.4 Vp.$ 出力レベル $-1.4 \sim +1.4 Vp.$ D.C 直線性 $\pm 1.0\%$ (後述)A.C 直線性 $\pm 1.0\%$

周波数特性 0 ~ 10kc/sec (60inch/sec)

(3) パルス幅変調方式

入力レベル 2 ~ 30 Vp.

出力レベル 10 Vp. min.

パルス幅 60 μ ·sec·min (60inch/sec)

磁気テープデータ記録装置の記録方式には以上の3方式があるが、直流から数 kc/sec の交流成分を含むアナログ量のデータを記録するにはパルス幅変調方式か周波数変調方式を使用しなければならない。また上の2方式のうち周波数特性では周波数変調方式のほうがすぐれている。パルス幅変調方式は多種類のデータを走査混合し、磁気テープの一つのトラックに記録するときたいへん有利である。

以上の機能のほか、この記録装置ではデータ記録時に、水晶発振器で発生した基準信号を、直接記録方式または周波数変調方式で記録しておき、データ再生時においてテープ速度のずれや変動を自動的に補償するサーボスピードコントロールの装置が付けてある。

2.5.1 FM記録増幅器の静特性

(1) 直線性

データ計測装置全体を通じて非直線性の最も大きいものはFM記録増幅器である。そこで計測精度を確認するために7台の記録増幅器の入力電圧一周波数偏移の特性を常用テープ速度である 15"/sec において調べてみることにした。図8(a)~(g)はその直線からの偏差を示す。縦軸は直線からの偏差 $\varepsilon(\%)$ で横軸は中心周波数に対する、正規の周波数偏移の割合 (%) である。次の定義のもとに計算してある。

$$\varepsilon = \frac{f_m - f_l}{f_{40} - f_0} \times 100\%$$

ただし、テープ速度：15"/sec

f_0 : 13.500kc/s (入力電圧 = 0V)

f_{40} : 18.900kc/s (入力電圧 = +1.4V)

f_m : 測定した周波数 (kc/s)

f_i : 正規の周波数 (kc/s)

試験の結果現在使用中の7台の記録増幅器はすべて1%以内にある。図7はその試験装置の結線図である。

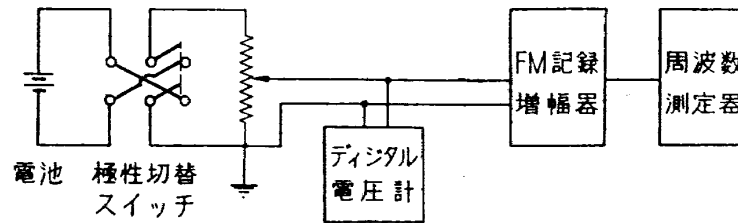


図7 周波数変調式記録増幅器の試験回路

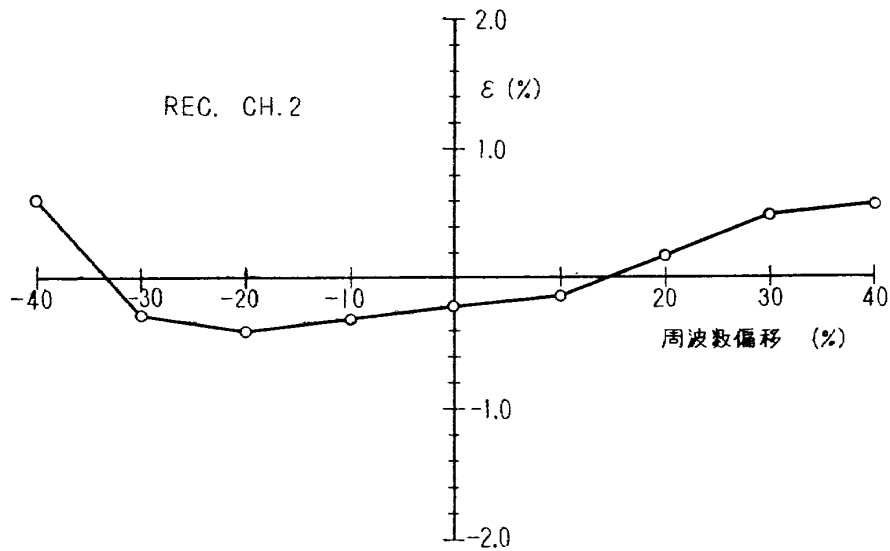


図 8 (a)

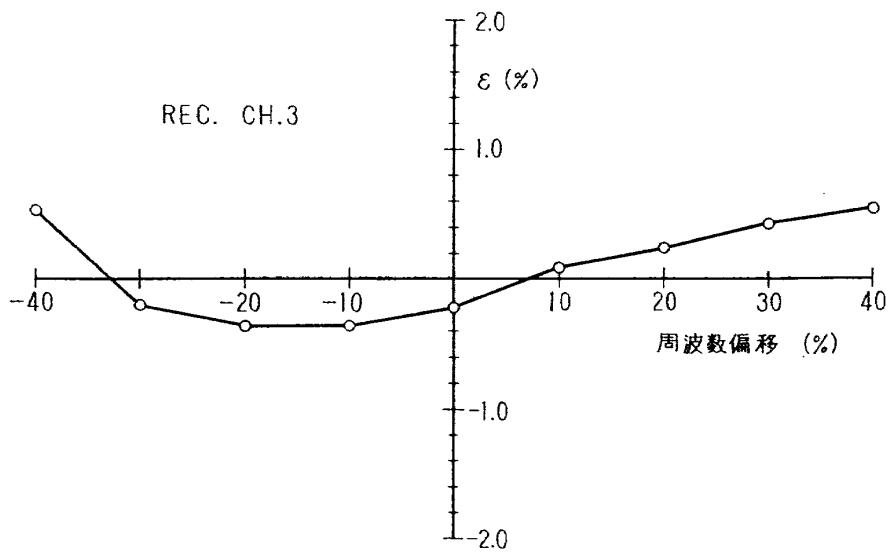


図 8 (b)

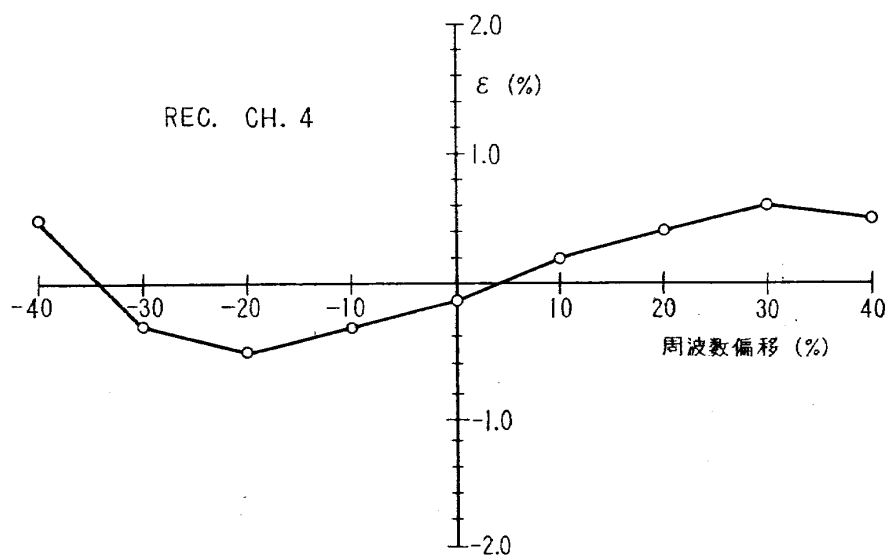


図 8 (c)

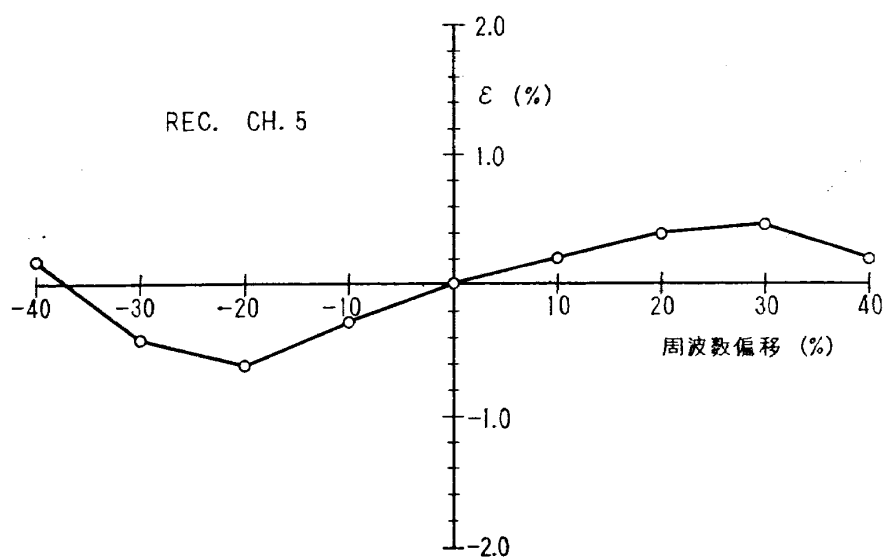


図 8 (d)

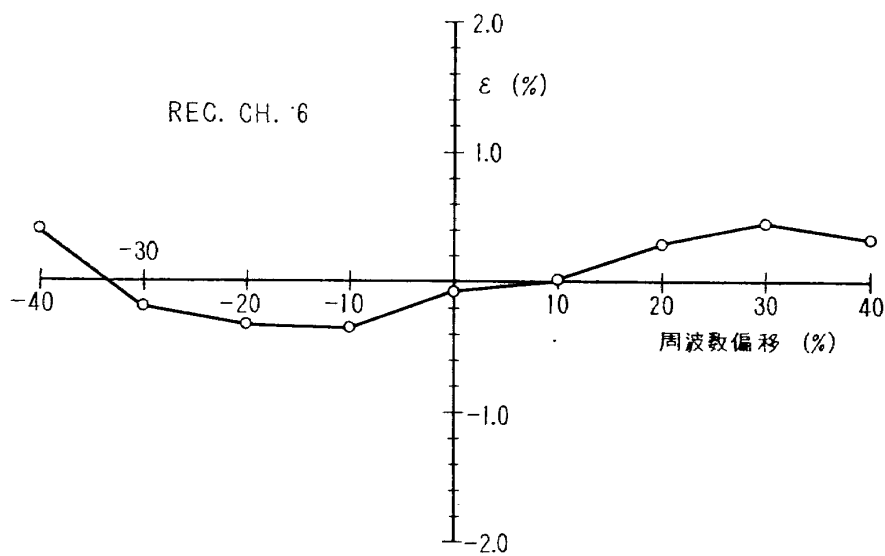


図 8 (e)

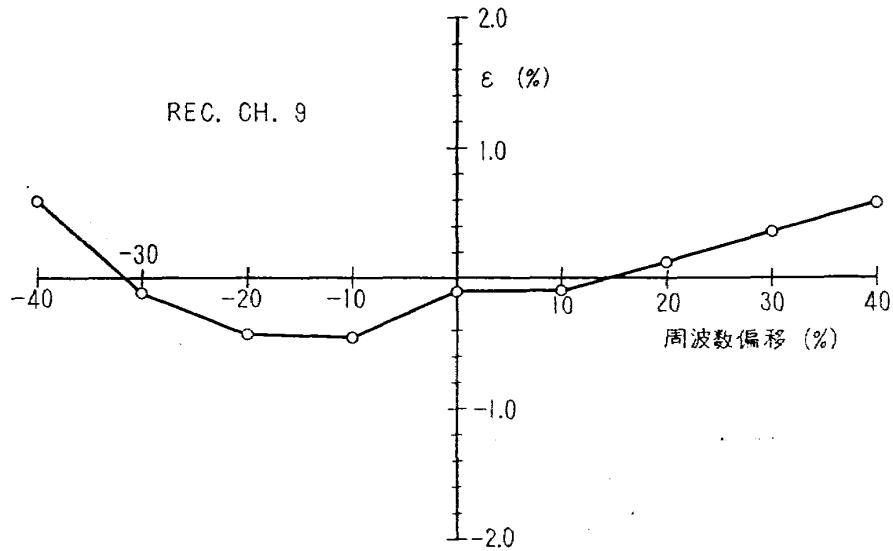


図 8 (f)

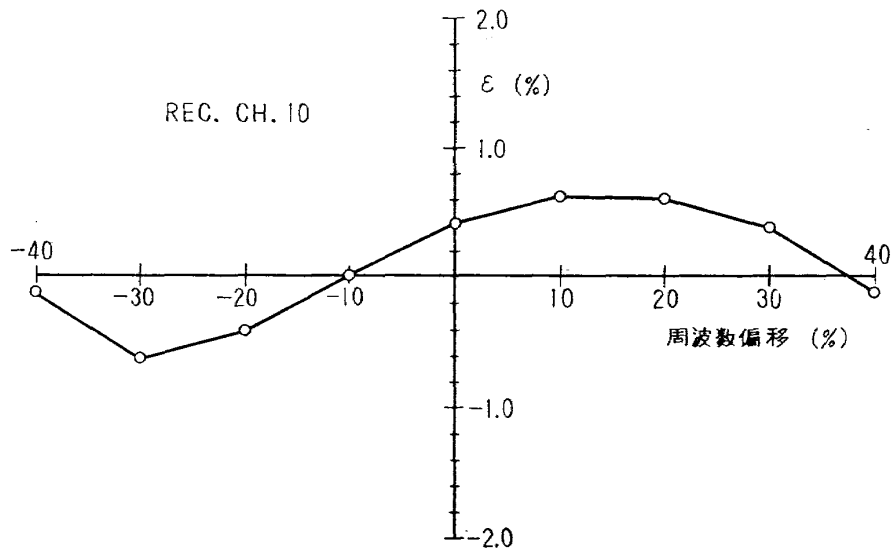


図 8 (g)

2.5.2 ドリフト

前項の直線性と並んでドリフトも直接計測精度に影響する。ドリフトの原因としては、増幅器内の各素子および真空管の温度変化による特性の変化と電源電圧の変動によるものと思われる。

試験方法は前項と同じ回路を使い入力電圧0Vのときの出力周波数の移動をデジタル周波数計で測定した。周波数変動の最も激しいのは電源投入後30分以内で、それ以後は落ち着いてくる。

電源投入1時間後において、10分間で1.5%(40%偏移に対して)の周波数の変動があるものがあった。この変動の割合は前項の非直線性より大きくかなり重要な問題であるがこの影響は記録時間が短いときは少なくなり当風洞のように、30秒前後の通風試験で1回の記録が終わるような場合は、あまり気にしなくても良い。

データ記録前に十分予熱しておき記録方法にも十分注意し、長時間にデータ記録がわたるときはときどき基準値を記録し補正しながら使う必要がある。

2.6 コンスタントデータ発生装置

この装置の目的は1巻の磁気テープに記録する何回かの実験データの区分のためと、データ処理に必要な定数を一時記憶し、押ボタン操作で2進10進のデジタル信号を磁気テープに記録する一時的な記憶装置である。

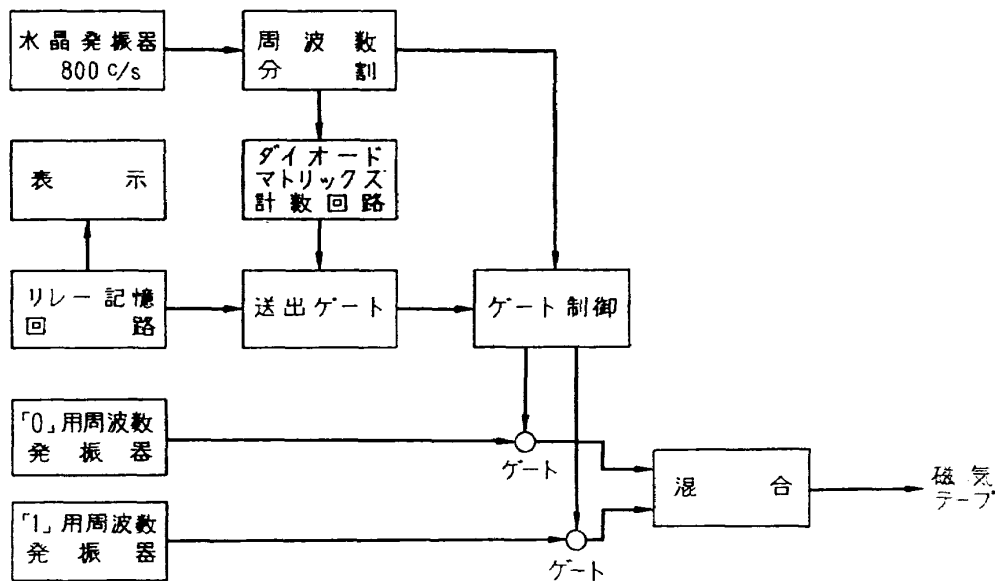


図9 コンスタントデータ発生装置系統図

コンスタントデータ発生方式は図9のブロック図のようになっている。

水晶発振器で発生する 800c/s の基準信号を1~4 段のフリップフロップ回路を通して 400, 200, 100, 50c/s の矩形波を得、磁気テープ速度によってこの4 周波数のうち一つを選びゲート開閉等の制御として使う。この矩形波信号はダイオードマトリックス回路とフリップフロップ回路を経て送出ゲートへ送られる。

一方コンスタントデータ記録ボタンによってセットした数字は表示ランプにより10進表示すると同時に内部リレー回路では2進10進表示として記憶し送出ゲートにその出力を出す。送出ゲートはそのリレー接点の ON, OFF を判別してその出力をゲート制御回路に出し、同時にもう一方の入口からはいつてくる周波数分割された矩形波信号とで「0」用発振器と「1」用発振器のゲートを制御し、2進10進法で記憶したリレー記憶回路の「0」,「1」を表示する。出力は、周波数の異なった「0」用正弦波と「1」用正弦波の組合せにより一連のパルス列として磁気テープに一度だけ記録する。現在本風洞で用いられているコンスタントデータは日、実験番号、模型番号、設定横揺れ角、基準圧力等で10進32桁である。

3. 実験方式

3.1 模型の迎角変化

現在の模型支持制御方式ではスティング基部は鉛直面内で $\pm 20^\circ$ の範囲で角度を変えうるようになっている。変角方式は、①連続変化 ②階段状変化 ③一点迎角 ④手動制御 がある。

①では風洞起動後指定の時刻に水平状態から負の最大迎角に移り、その後 $2^\circ/\text{sec}$ の速さで正の方向に向う角度スイープを起こし、正の最大迎角に達した後水平に復帰する。

実験は非定常状態で行なわれるわけであるが、風速、模型の大きさからしてこの程度の変化は準定常的状态とみなしうるので通常の試験はこの方法によっている。

②は1ステップ/秒の早さで階段状に迎角を変化させる方式であるが、現在の計算プログラムでデータ処理をすると $\frac{1}{2}$ 秒おきにデータを拾っているので迎角変化とのタイミングが悪いと、模型が迎角変化しているときのデータを拾ってしまうことがある。

また1ステップごとにおきる過渡現象も見のがすことができない。

③は前もって設定した迎角二三箇所、模型を静止させ、データが任意の時間とりうる方式で主として①の方法で得たデータのチェックに用いたり圧力分布の測定等のような測定時間の長いとき用いる。

④は熟練した人が行なえば任意の制御が可能であって、特に①よりゆるやかな連続変化を与えたいときなどに用いる。

他の模型姿勢変更として、模型にバンク角を与えて試験したいときがあるが、当風洞では実験中にバンク角を変化することができないので、風洞停止時にあらかじめロールを与えてセットしておく。横すべり角を変化させるような試験は模型を 90° ロールさせてセットすれば良い。

迎角および横すべり角がともにある場合は基部と模型取付け部が、ある角度を持った曲りスティングを用いて行なう。

3.2 模型底面圧の測定

模型の底面圧および天秤室内圧は実験中計測し、実験データの最終結果にこの値を組み入れる必要がある。しかし測定すべき圧力が風洞静圧と同じ程度であり、測定に時間遅れがあることと、圧力変換器およびその記録装置の信頼度が力関係に比べて十分でないので現在では圧力関係のデータだけ別に記録して、データ処理後補正している。

4. 実験データの記録

当風洞において磁気テープに記録するデータは前に述べた天秤出力の6チャンネルと模型迎角(α)の合計7チャンネルである。圧力関係の計測は別の記録器を使用して行ない、六分力データの

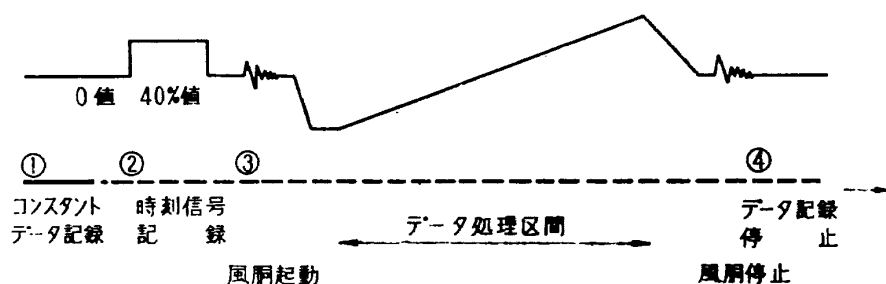


図10 データ記録順序

計算処理を行なうときに定数として与える。

図10に実験データの記録順序を示す。

- ① コンスタントデータの記録。直接記録方式でテープトラック番号1に記録。コンスタントデータの信号が1回はいるとあとは常時時刻信号に切替わる。
- ② 0および40%較正值の記録。データの7チャンネルを同時に周波数変調方式で記録する。これはあとに続く風胴データの基準値となるから、通風直前に行ない、ドリフト等により0点がずれないようにする。
- ③ 風胴起動と同時にデータ記録開始。
- ④ 風胴停止でデータ記録終了。

以上で1回の実験データの記録は終了するが、風胴の通風時間が短かく、やり直しができないのでデータ記録前には各計測器のチェックを十分しておかなければならない。

磁気テープ記録増幅器の入力が $\pm 1.4V$ を越えると A-D 変換の際オーバフローするから、模型の大きさおよび迎角変化範囲等に注意し、前もって直流増幅器の倍率を調整しておくことが大切である。

5. 実験データの処理

この過程は計測部データ処理研究室によって行なわれるものであり、装置、その他については文献⁴⁾に述べられているが以下には本稿に直接関係ある事項を記すこととする。磁気テープに記録したデータは、記録時に使用したものと同型式の磁気テープ再生装置により、アナログ電圧に再生された後 A-D 変換器により3桁の数字に変換される。A-D 変換はテープ出力電圧の $0 \sim \pm 1.4V$ が数字の $0 \sim \pm 999$ で表わされ、計算機用のデジタルテープに再記録する。

A-D 変換の速度は毎秒1,000回で、最高10チャンネルまでのデータを走査してA-D変換をすることができる。当風胴のデータは予備の1チャンネルを含めて8チャンネルであるので1チャンネルのデータは1/125秒おきに得ることができる。

5.1 データ記録様式

データ処理に使用している電子計算機、データترون 205 においては、1 語は、符号と10桁の数字で表わすようになっているので、A-D 変換されたデータはこの方式に準じて下記のように表示される。(ただし左端の符号部は使用していない。)

S	MSD	9	8	7	6	5	4	3	2	LSD
S	±	H	T	U	±	H	T	U	N ₁	N ₂
左データ					右データ			コンスタントデータ		

上記のように1語は符号と3桁のデータ2個と2桁のコンスタントデータで構成される。このような語が20個集まったものを1ブロックといい、デジタルテープ上の番地はこれが基準になっている。

計算機から磁気テープに書き込むときも、またこの反対に磁気テープから計算機内にデータを読み込むときも1ブロック(20語)を単位にして行なわれる。表2は当風洞のデータの各チャンネルがはいっている相対的な番地で、5語ごとに同じチャンネルのデータが現われる。

表2 1 ブロックのデータ配列

1 α	N ₁	T ₁ T ₂	2 N ₂	X	T ₃ T ₄	3 Y ₁	Y ₂	T ₅ T ₆	4 R	—	T ₇ C
5 "	"	K K	6 "	"	K K	7 "	"	K K	8 "	—	K K
9 "	"	K K	10 "	"	K K	11 "	"	K K	12 "	—	K K
13 "	"	K K	14 "	"	K K	15 "	"	K K	16 "	—	K K
17 "	"	K K	18 "	"	K K	19 "	"	K K	20 "	—	K K

この表でコンスタントデータ部にある T₁~T₇ は実験時の時刻を7桁の数字で表示している。時刻の記録間隔はアナログデータ記録時のテープ送り速度によって異なり、15 インチ/秒の送り速度で記録したときは0.5秒おきに記録する。デジタルテープ上では13ブロックごとに0.5秒変化している。

第4語の最下位のCは A-D 変換したときのチャンネル数で、第5語から第20語までの末位Kは32桁のコンスタントデータで、風洞データを記録する前にアナログ磁気テープに記録したコンスタントデータと同一のものである。

5.2 最終データの計算⁵⁾

デジタルテープに再記録された風洞試験のデータは計数型電子計算機(パローズ社データترون205)により計算され、最終結果は係数の形でラインプリンタ(IBM-407型)で作表印字される。また必要なときは同じ計算結果を紙テープにさん孔しておき計算終了後直ちにデータプロッタ(E・A・I社3033型)で方眼紙にデータをプロットすることができる。

計算は計算機内のドラム記憶装置に計算手順を指示するプログラムを記憶させておきそれによって、すべて自動的に行なわれる。また計算に必要な定数は計算開始前に紙テープにより読み込ませ記憶しておく。この計算に必要な定数は2種類あり、一つは各実験番号ごとに変わる定数ともう一つは供試模型および実験に使用した天秤の種類によって与える定数である。実験ごとに変わる定数は6語で①磁気テープのデータ格納番地、②計算停止時刻、③実験時の総圧 (P_o)、④静圧 (P_s)、⑤模型をバンクさせたときのバンク角 (ϕ)、⑥曲りスティング使用のときはスティングの角度 (δ)、である。この実験ごとに与える定数をかりにプリセットパラメータと呼ぶことにする。

プリセットパラメータの紙テープを光電式読取り機により読み込ませれば計算が直ちに開始される。計算プログラムはおおよそ1,500語でなっている。

以下にそのおもな計算内容を示す。

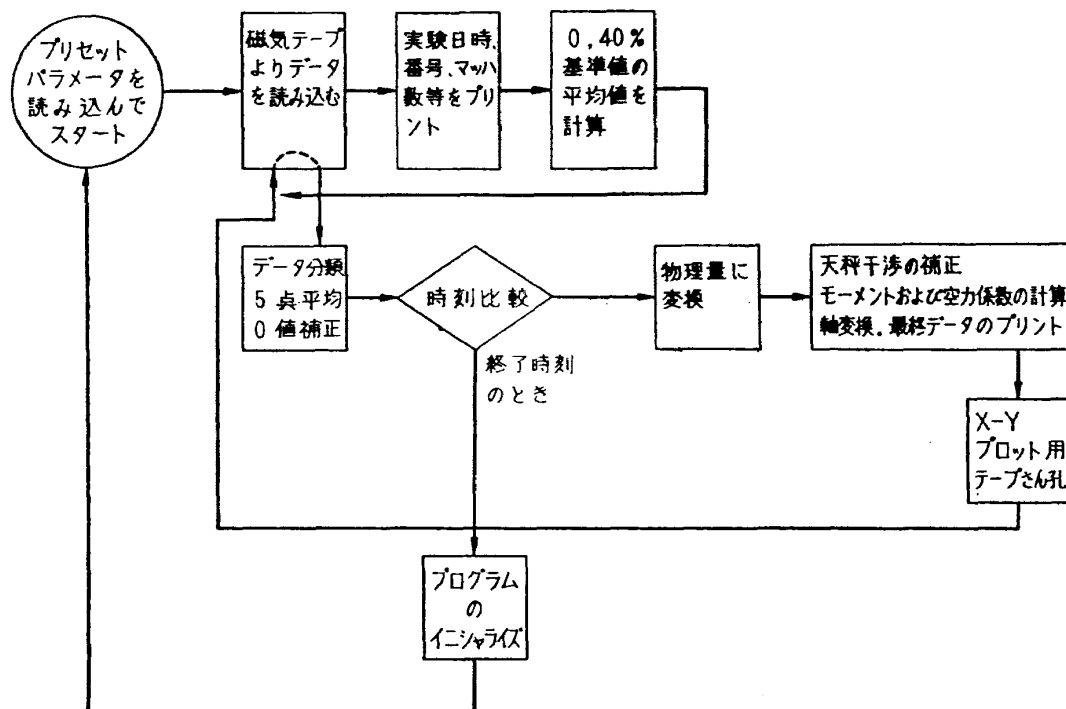


図11 計算プログラムのフローチャート

(1) マッハ数の計算

$$M = 5 \left[\left(\frac{P_o}{P_s} \right)^{\frac{1}{3.5}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{ただし}$$

P_o = 総圧 (kg/cm²)

P_s = 静圧 (kg/cm²)

(2) 動圧 (q) の計算

$$q = \gamma/2 \cdot P_s \cdot M^2 \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \text{ただし}$$

$$\gamma = 1.4$$

- (3) 磁気テープのデータを物理量に変換する。

$$A = \frac{V_{\text{data}} \cdot C_{40\%}}{V_{40\%}}$$

ただし

A = 物理量に変換された、補正されていないデータで単位は (kg), (kg-m), ($^{\circ}$) 等

V_{data} = データをデジタル変換した値。

$V_{40\%}$ = 40% 基準値をデジタル変換した値。

$C_{40\%}$ = 40% 基準値に相当する物理量の大きさ。

- (4) 天秤干渉の補正とスティングたわみに対する迎角補正。

特に重要な項のみについて行ない、小さな干渉の項は省略する。以下は現在使用中のものであるが、天秤特性等が変わったときには追加、変更が可能である。

$$\text{第 1 揚力 } Z_1 = N_1 + \begin{cases} a_1 N_2 & N_2 > 0 \\ a_2 N_2 & N_2 < 0 \end{cases}$$

$$\text{第 2 揚力 } Z_2 = N_2 + \begin{cases} b_1 N_1 & N_1 > 0 \\ b_2 N_1 & N_1 < 0 \end{cases}$$

$$\text{軸 力 } X^* = X + \begin{cases} c_1 N_1 \\ c_2 N_1 \end{cases} + \begin{cases} d_1 Y_1 \\ d_2 Y_1 \end{cases} + \begin{cases} f_1 N_2 \\ f_2 N_2 \end{cases} + \begin{cases} g_1 Y_2 & N_1, Y_1, N_2, Y_2 > 0 \\ g_2 Y_2 & N_1, Y_1, N_2, Y_2 < 0 \end{cases}$$

$$\text{第 1 横力 } Y_1^* = Y_1$$

$$\text{第 2 横力 } Y_2^* = Y_2 + \begin{cases} e_1 & N_1 > 0 \\ e_2 & N_1 < 0 \end{cases}$$

横揺れモーメント

$$R^* = R$$

$$\text{迎 角 } \alpha^* = \alpha + n_1 N_1 + n_2 N_2 + w(1 - \cos \alpha) W$$

$$\text{横すべり角 } \beta^* = y_1 Y_1 + y_2 Y_2$$

ただし、 $N_1, N_2, X, Y_1, Y_2, R, \alpha$ は見かけのデータで $Z_1, Z_2, X^*, Y_1^*, Y_2^*, R^*, \alpha^*$ が補正されたデータである。また、 $a_1 \sim e_2$ および w などは天秤較正およびスティング実荷重試験で求めた補正の係数である。 W は模型重量。

- (5) 軸力の模型重量に対する補正。(前項で天秤干渉に関する補正は行なっているが軸力 (X) は模型が迎角をとったとき模型重量の影響が加算される。)

空気力により生じる軸力 X' は次の式で求められる。

$$X' = X^* - W \sin \alpha^*$$

ただし、 W は模型重量

- (6) 合力の計算

$$\text{法 線 力 } Z = Z_1 + Z_2$$

$$\text{横 力 } Y = Y_1^* + Y_2^*$$

軸 力 $X' = X'$

縦揺れモーメント $M = l_1 Z_1 + l_2 Z_2$

偏揺れモーメント $N = s_1 Y_1^* + s_2 Y_2^*$

横揺れモーメント $L = R^*$

ただし、 l_1, l_2, s_1, s_2 はモーメント基準点から天秤の N_1, N_2, Y_1, Y_2 の各受感素子までの距離。

(7) 係数の計算 (機体軸)。

$$C_Z = Z/q \cdot S_Z$$

$$C_Y = Y/q \cdot S_Y$$

$$C_X = X/q \cdot S_X$$

$$C_{mB} = M/q \cdot S_M \cdot l_M$$

$$C_{nB} = N/q \cdot S_N \cdot l_N$$

$$C_{lB} = L/q \cdot S_L \cdot l_L$$

ただし、 q は動圧 (kg/cm^2)、 $S_Z, S_Y, S_X, S_M, S_N, S_L$ は基準面積、 l_M, l_N, l_L は基準長。

(8) 軸変換 (安定軸)

$$C_L = C_Z \cos \alpha^* - C_X \sin \alpha^*$$

$$C_D = C_Z \sin \alpha^* + C_X \cos \alpha^*$$

$$C_Y = C_Y$$

$$C_m = C_{mB}$$

$$C_n = C_{nB} \cos \alpha^* - C_{lB} \sin \alpha^*$$

$$C_l = C_{nB} \sin \alpha^* + C_{lB} \cos \alpha^*$$

$$\text{圧 力 中 心 } x_{cP} = x_B + (x_A)(Z_2 - Z_1)/Z \quad (\text{m})$$

ただし、 x_{cP} は模型先端から圧力中心までの距離 x_B は模型先端から天秤中心までの距離 (m)。
 x_A は天秤の N_2 素子から天秤中心までの距離。(0.0762m)

以上に述べた計算内容は模型および天秤を正規に取り付けた場合で、これを基本型とする。これをかりに Type-I と呼ぶことにする。模型取り付けにおいて廻転させたり、曲りスティングを用いて迎角と横すべり角を同時に取るようにしたときの計算は Type-I のプログラムを少し修正しておけばよい。

Type-II 模型、天秤とも固定して 90° バンクしたとき。

$$\alpha^* = z_1 Z_1 + z_2 Z_2$$

$$\beta^* = \alpha + y_1 Y_1 + y_2 Y_2 + w(1 - \cos \alpha) W$$

$$X' = X - W \sin \alpha \quad (\beta^* \text{ としなくてもよい。})$$

これは Type-I のプログラムで④の部分を上式のように置き替えればよい。

Type-III 模型, 天秤とも固定して任意の角度 ϕ だけバンクさせたとき。(Type-II はこの特殊な場合)

$$\alpha^* = \tan^{-1} (\tan \alpha \cdot \cos \phi) + z_1 Z_1 + z_2 Z_2$$

$$\beta^* = \sin^{-1} (\sin \alpha \cdot \sin \phi) + y_1 Y_1 + y_2 Y_2$$

$$X' = X - W \sin \alpha$$

Type-IV 曲りスティングを使用して, その曲り角 (δ) だけ大きな迎角試験をしたいとき。 $\alpha=0$ で模型迎角 α^* は δ だけある。

$$\alpha^* = \delta + \alpha + z_1 Z_1 + z_2 Z_2$$

$$\beta^* = y_1 Y_1 + y_2 Y_2$$

$$X' = X - W \sin \alpha^* \quad (\text{このときは } \alpha^* \text{ を使う。})$$

Type-V 曲りスティングを使用し横すべり角 (β) と迎角 (α) をともにとる場合。ただし β はほぼ一定にし, α だけ変化する。

$$\alpha^* = \tan^{-1} (\tan \alpha \cdot \sec \delta) + z_1 Z_1 + z_2 Z_2$$

$$\beta^* = \sin^{-1} (\sin \delta \cdot \cos \alpha) + y_1 Y_1 + y_2 Y_2$$

$$X' = X - W \sin \alpha^*$$

以上のほかに種々の組合せが考えられるが, 風洞試験で行なったものについて述べた。

表3 計算結果のプリント形式

出力	α	N_1	N_2	X	Y_1	Y_2	R	時刻
物理量	α°	$Z(\text{kg})$	$M(\text{kg}\cdot\text{m})$	$X(\text{kg})$	$Y(\text{kg})$	$N(\text{kg}\cdot\text{m})$	$L(\text{kg}\cdot\text{m})$	β°
係数 (機体軸)		C_Z	C_{mB}	C_X	C_Y	C_{nB}	C_{lB}	C_l
係数 (安定軸)	α°	C_L	C_m	C_D	C_Y	C_n	C_l	x_{cp}

風洞試験の計算結果は表3の型式で配列してある。

以上の計算プログラムでデータ処理が完了するわけであるが, 迎角一点につき以上の計算処理に要する時間はだいたい12秒ほどである。いま40秒間の風洞試験データを処理するとすれば, 1回の実験データの処理に15分程度の時間を要する。

7. 総 合 精 度

以上のデータ処理全体にわたっての総合的な計測精度について考えてみる。

天秤および迎角測定変換器の精度はそれぞれ0.25%以内。

直流増幅器の直線性は0.1%以内。

磁気テープ記録および再生増幅器の精度2%以内。

A-D 変換器の変換精度0.24%以内。

圧力計測関係が 0.5%。

以上が計測およびデータ処理で誤差として入りうる値で、電子計算機による演算過程ではほとんど誤差を含まないと考えられる。また実験によっては天秤出力の非常に少ないものもあり、このような場合には信号対雑音比が悪くなりデータのばらつきの原因となる。

8. あ と が き

以上当所吹出式超音速風洞において最も多く用いられている六分力計測装置とその処理方式について報告した。この報告自体は特に新しい研究を含むものではなく、また、ここに述べた方式には改良すべき点も多いが一応現状を記録し、これを今後行なわれるべき研究、改良の前提としたいと思う。先に筆者の一人が新井忠技官（当時空気力学第二部，現防衛庁技術研究本部）と連名で報告した文献²⁾はこの線に沿ったものであり、また、本稿準備中に発行されたデータ表示記録装置に関する文献⁶⁾もこれらと一連をなすものである。

本風洞の計測方式は最初当時の計測室長河崎俊夫技官によって計画され、以後本風洞制御計測研究室全員の協力によって完成されたものである。この間、重見空気力学第二部長はじめ空気力学第二部の多くの方々のご指導をいただいたことを付記します。

最後にこのデータ処理方式が効果的に活用されているのはひとえに当所計測部データ処理研究室および計算機研究室の非常な努力によるものであり、桶口部長，田畑前室長，奥石室長はじめ多くの方の全面的協力をいただいていることを特記いたします。

なお本資料に述べられている各装置または処理方式の業務分担は次のとおりである。

全 般 計 画：河崎俊夫，高木廣治，谷 喬，高島一明

天 秤：榑原盛三，関根英夫

迎 角 計 測：外立政隆

計 測 盤：新井 忠，原 亘利，関根英夫，近藤洋史

磁 気 テ ー プ：原 亘利

圧 力 計 測：榑原盛三，宗美 均

デ ー タ 処 理：計測部 田畑浄治，中 正夫

計算プログラム：原 亘利，計測部 戸川保子

文 献

- 1) Preliminary Calibration of the 1.5MK VIB Internal Balance. TASK CORPORATION
- 2) 新井 忠, 原 亘利: 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）, 航技研資料 TM-19 (昭和38)
- 3) 空気力学第二部: 1m×1m 吹出式超音速風洞の計画と構造, 航技研報告 TR-29 (昭和37)
- 4) 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)
- 5) 計算研究室: 電子計算機使用法, 航空技術研究所 (昭和36)
- 6) 谷 喬, 高島一明, 原 亘利, 近藤洋史: 吹出式超音速風洞空力データ表示記録装置について, 航技研資料 TM-51 (昭和40)

<p>NAL TM-60 航空宇宙技術研究所 吹出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)</p> <p>1965年9月 21ページ</p> <p>航空宇宙技術研究所の 1m×1m 吹出式超音速風洞の六分力データの処理方法についてまとめた。</p> <p>このデータ処理の方法により, 従来非常に多くの人手を必要としたこの種の作業が短時間, かつ正確に行なうことができるようになった。</p>	<p>I. 原 亘 利 高 島 一 明 関 根 英 夫 中 正 夫 戸 川 保 子 II. NAL TM-60 III. 533.6.013 : 08</p>	<p>NAL TM-60 航空宇宙技術研究所 吹出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)</p> <p>1965年9月 21ページ</p> <p>航空宇宙技術研究所の 1m×1m 吹出式超音速風洞の六分力データの処理方法についてまとめた。</p> <p>このデータ処理の方法により, 従来非常に多くの人手を必要としたこの種の作業が短時間, かつ正確に行なうことができるようになった。</p>	<p>I. 原 亘 利 高 島 一 明 関 根 英 夫 中 正 夫 戸 川 保 子 II. NAL TM-60 III. 533.6.013 : 08</p>
<p>NAL TM-60 航空宇宙技術研究所 吹出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)</p> <p>1965年9月 21ページ</p> <p>航空宇宙技術研究所の 1m×1m 吹出式超音速風洞の六分力データの処理方法についてまとめた。</p> <p>このデータ処理の方法により, 従来非常に多くの人手を必要としたこの種の作業が短時間, かつ正確に行なうことができるようになった。</p>	<p>I. 原 亘 利 高 島 一 明 関 根 英 夫 中 正 夫 戸 川 保 子 II. NAL TM-60 III. 533.6.013 : 08</p>	<p>NAL TM-60 航空宇宙技術研究所 吹出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)</p> <p>1965年9月 21ページ</p> <p>航空宇宙技術研究所の 1m×1m 吹出式超音速風洞の六分力データの処理方法についてまとめた。</p> <p>このデータ処理の方法により, 従来非常に多くの人手を必要としたこの種の作業が短時間, かつ正確に行なうことができるようになった。</p>	<p>I. 原 亘 利 高 島 一 明 関 根 英 夫 中 正 夫 戸 川 保 子 II. NAL TM-60 III. 533.6.013 : 08</p>

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 中井 映一, 堀 武敏
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	泉 日出夫, 高 島 一 谷 喬, 近 藤 明 原 亘利, 史
TM-51	超音速風洞空力データ表示記録装置	1965年 5月	板 垣 芳雄
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	
TM-54	熱衝撃試験用風洞整備試験	1965年 5月	武藤洋治郎, 池田 為治 坂元思無邪, 光山 敏雄 河崎 俊夫, 谷 喬
TM-55	ロケット模型風洞試験における超音速相似則の応用	1965年 5月	
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洞実験	1965年 8月	斎 藤 秀 夫, 木 村 友 昭 近 藤 博, 増 田 惣 平
TM-59	ジェットリフトエンジン空気取入口の実実験	1965年 9月	

注：欠番は配布先を限定したもの

航空宇宙技術研究所資料60号

昭和40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(0422)(4)9171(代表)

印刷所 奥村印刷株式会社
東京都千代田区西神田1~10
