

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-432

2m×2m遷音速風洞における内挿式天秤の
零点移動量の修正法

鈴木 弘一 ・ 中村 正剛 ・ 藤田 敏美

1981年4月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

2m×2m遷音速風洞における内挿式天秤の 零点移動量の修正法*

鈴木 弘一** 中村 正剛** 藤田 敏美**

1. 概要

電子計算機を援用し、数値計算による精緻な解析ができるようになった空気力学の理論研究の検証・評価を行なうためや、高性能な航空機・ロケット等の開発の設計資料を得るためには、従来にも増して風洞実験による高精度なデータが要求されるようになった。

風洞実験データの信頼性を決定する項目には、計測諸量の計測精度、風洞特性の正確な把握および供試模型の工作精度⁽¹⁾などがある。計測精度は検出器、変換器の精度とこれらの出力を測定、記録する計測器材の性能により決まり、これらデータに対する風洞干渉の補正を含めたデータ処理方法⁽²⁾が風洞実験データの信頼性を決める。

これらの項目に対し、精度向上を図るための研究と改善が継続的に進められている。本稿においては、静安定実験の精度に大きな影響を及ぼすスチング装着型の内挿式6分力天秤の零点移動を取り上げ、2m×2m 遷音速風洞実験時における事例を示し、その原因について考察を行なう。更に、これに対処する修正法について述べる。

2. 記号

A : 軸力素子(半模型用天秤)
 C_D : 抗力係数
 C_F : 軸力素子(モーメント検出型)

C_L : 揚力係数
 C_l : 横揺れモーメント係数
 E_x : 天秤励起電圧
 M_∞ : 一様流マッハ数
 N_1 : 第1垂直力素子(力検出型)
 N_2 : 第2垂直力素子(力検出型)
 N_F : 垂直力素子(モーメント検出型)
 P_O : 集合胴総圧
 P_M : 縦揺れモーメント係数(モーメント検出型)
 P_∞ : 一様流静圧(測定部抽気室圧)
 R : 横揺れモーメント素子(力検出型)
 R_1 : 第1横揺れモーメント素子(力検出型)
 R_2 : 第2横揺れモーメント素子(力検出型)
 R_M : 横揺れモーメント素子(モーメント検出型)
 S_1 : 第1横力素子(半模型用天秤)
 S_2 : 第2横力素子(半模型用天秤)
 S_3 : 第3横力素子(半模型用天秤)
 S_4 : 第4横力素子(半模型用天秤)
 S_F : 横力素子(モーメント検出型)
 T_O : 集合胴温度
 T_B : 天秤表面温度
 T_{FI} : 天秤内筒前部温度
 T_{FO} : 天秤外筒前部温度
 T_P : 測定部抽気室温度
 T_{RI} : 天秤内筒後部温度
 T_{RO} : 天秤外筒後部温度
 ΔV_C : 測定出力から初期出力を差引いた値
 ΔK_W : 通風後出力から通風前出力を差引いた値

* 昭和56年1月16日 受付

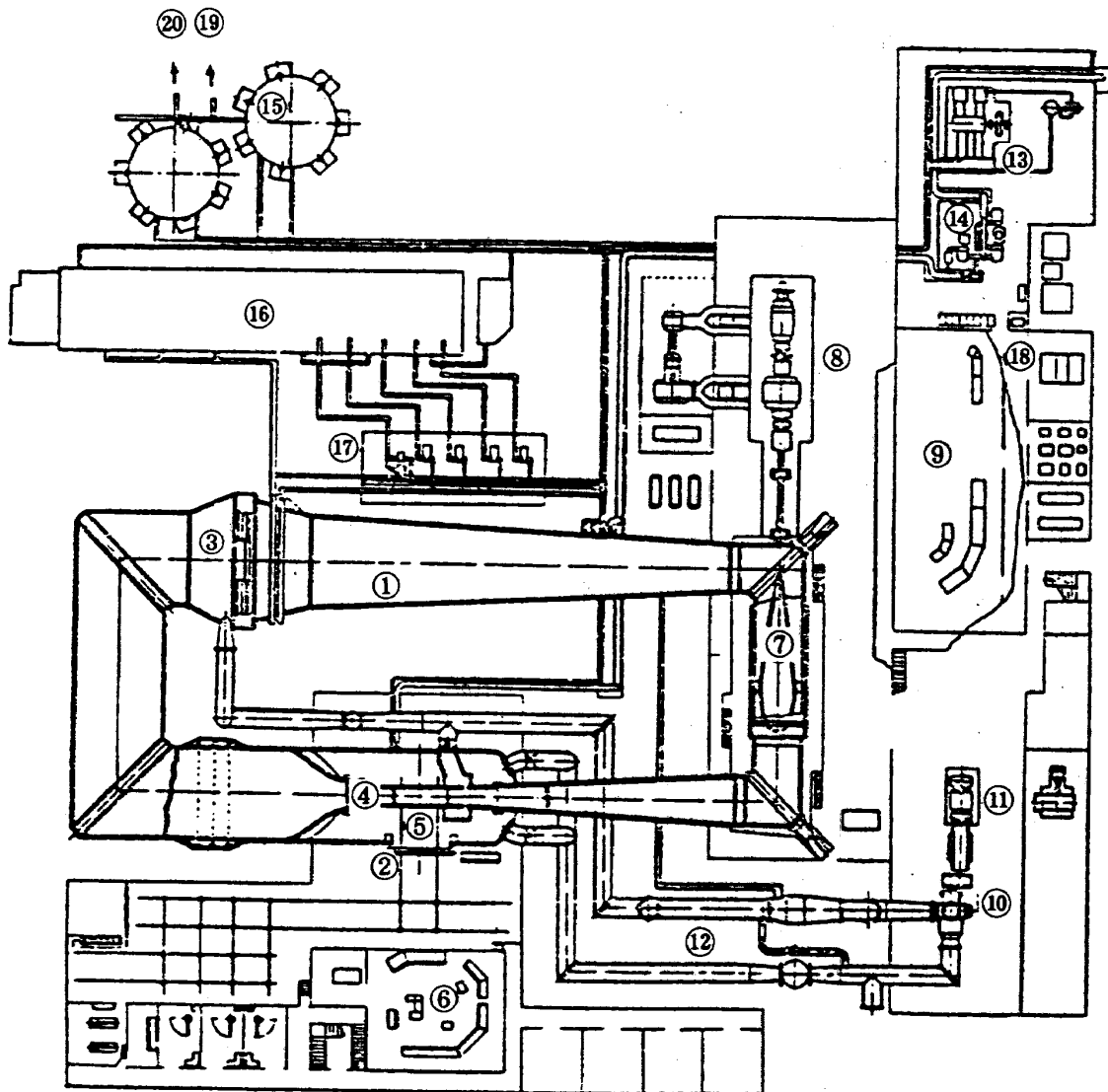
** 空気力学第2部

- $V_{C\max}$: 許容荷重まで載荷した時の出力値
- X : 軸力素子 (力検出型)
- X_1 : 第 1 軸力素子 (力検出型)
- X_2 : 第 2 軸力素子 (力検出型)
- Y_1 : 第 1 横力素子 (力検出型)
- Y_2 : 第 2 横力素子 (力検出型)
- Y_M : 偏揺れモーメント素子 (モーメント検出型)
- α : 模型迎角

3. 風洞, 天秤および計測装置

3.1 風洞

$2\text{m} \times 2\text{m}$ 遷音速風洞⁽³⁾の諸元を表 1 に示す。亜音速では主送風機のみで風速制御を行ない、遷音速では多孔壁から抽気を行なう。抽気はマッハ数 0.9 まではディフューザーフラップを用い、それ以上は補助送風機による。なおマッハ数 1 以上では、測定部上流の可変ノズルおよび下流の第 2 スロートの形状および断面積を調整する。図 1 に風洞全体図を示す。



- | | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| ① 胴 | ② 大 | ③ 主 | ④ 可 |
| ⑤ カ | ⑥ 計 | ⑦ 主 | ⑧ 主 |
| ⑨ 運 | ⑩ 補 | ⑪ 補 | ⑫ 補 |
| ⑬ 乾 | ⑭ 排 | ⑮ 貯 | ⑯ 冷 |
| ⑰ ポ | ⑱ 電 | ⑲ フ | ⑳ 吹 |
- ① 胴 ② 大 ③ 主 ④ 可
 ⑤ カ ⑥ 計 ⑦ 主 ⑧ 主
 ⑨ 運 ⑩ 補 ⑪ 補 ⑫ 補
 ⑬ 乾 ⑭ 排 ⑮ 貯 ⑯ 冷
 ⑰ ポ ⑱ 電 ⑲ フ ⑳ 吹

図 1 風洞配置図

測定部下流側にスティング・ストラット方式の模型支持装置(図2)がある。スティング先端に内挿式天秤を取付け、模型は模型の胴体後端を、天秤に嵌入して固定する。模型姿勢角は、気流に対して傾斜角を持つようにスティングを傾けたり、回転させたりして設定する。

測定部の外周は抽気室で蔽われている。抽気室内の圧力は一様流静圧に等しく、温度はほぼ集合胴総温度に回復する。風洞内には測定部高速気流中の水分が氷結するのを防ぐために乾燥空気を充填してある。風洞内圧(集合胴総圧)は約98 kpaとして実験することが多いが、35～140 kpaの任意圧力とすることもできる。また、温度は風路内に設置した冷却器によって最高60℃以下となるように制御されるが、外気温およびマッハ数により大きく変化する。

表1 遷音速風洞要目

測定部断面積	2 m × 2 m
風速範囲(マッハ数)	0.1 ~ 1.4
風洞内圧	40 ~ 140 kpa
風洞総温度	≤ 60℃
湿度	6.5×10^{-6} (絶対)
風路長	(72m × 25m) × 2
風洞胴体全容積	12,000 m ³
主送風機回転数	≤ 710 rpm
主送風機動力	誘導電動機 18,000 kW 直流電動機 4,500 kW
抽気用補助送風機	電動機 12,000 kW
測定部カート	垂直孔全機模型用 1
	斜孔 " 1
	垂直孔半模型用 1

- ① ストラット
- ② 附仰用スティングポッド
- ③ 回転用スティングスピンドル
- ④ アダプター
- ⑤ スティング
- ⑥ 模型
- ⑦ シュリーレン窓
- ⑧ 模型搬入孔蓋
- ⑨ ストラット上下用電動機
- ⑩ 附仰用電動機
- ⑪ カート車輪
- ⑫ 圧力導管
- ⑬ 天秤用電線
- ⑭ 方向変換装置

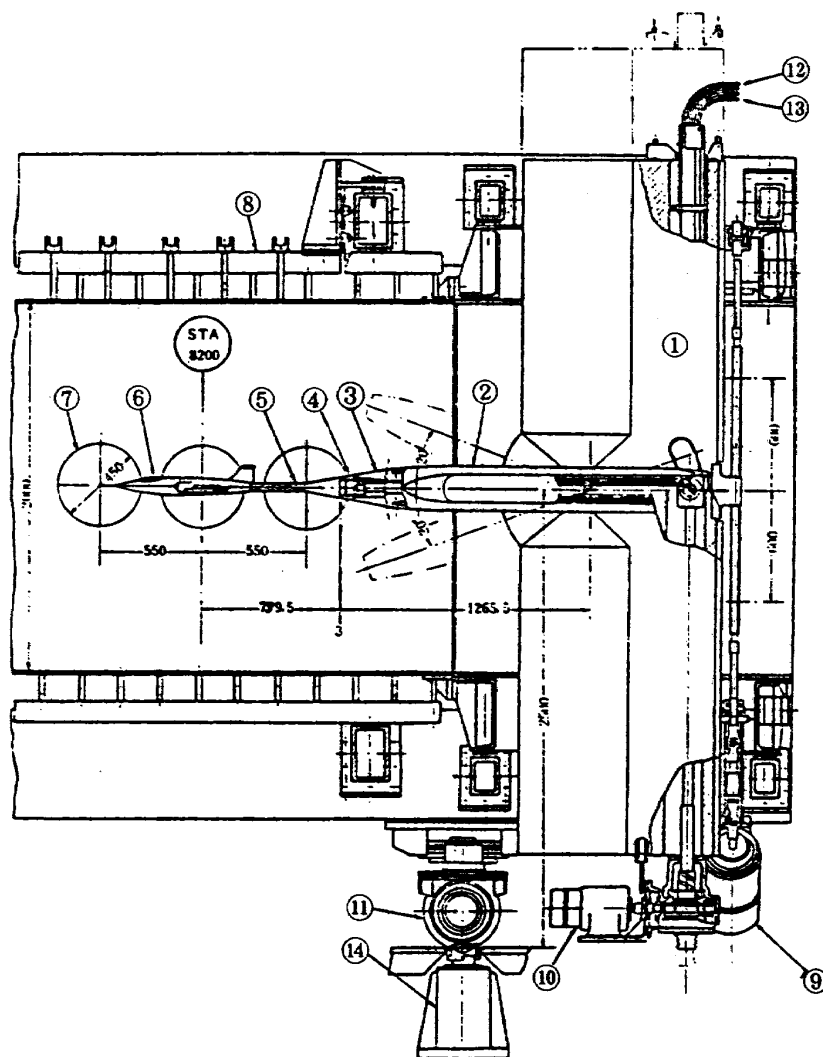


図2 模型支持装置

3.2 天 秤

天秤は実験の目的、供試模型の形状、寸法等から測定する空気力に適した天秤容量および構造のものを選択して用いる。模型内部に装着する内装天秤や、風路外から模型を支持する外装天秤は、模型全体に加わる空気力を各分力毎に測定する。この外、模型の操舵面やナセル・パイロンなど局所的な部分に作用する空気力を検出する附加天秤等がある。

表2に遷音速風洞で所有する全ての天秤の一覧表を示す。表の下から3段目の半模型用(外装)天秤を除いて、他は全て内挿天秤である。天秤の構造別の分類では、力検出型とモーメント検出型の2種類がある。個数は、力検出型が12個、モーメント

検出型が2個である。これらは、通常、区別するために、製作会社名あるいは製作者名と天秤外径および製作番号に従って、表に示すように呼ぶ。TASKとは、米国TASK社製作⁽⁴⁾のもので、天秤外径が50.8mm(2インチ)が2個と38.1mm(1.5インチ)が1個ある。この天秤は、遷音速風洞が通風を開始する昭和35年より以前に購入したものであるが数回の修理を経て、現在も実験に使用している。その後、実験内容に見合う天秤容量の必要性和、1個しかない外径38.1mmの天秤のバックアップのために園池製作所を指導して4個製作した。更に、小型模型の実験用として31.75mm(1.25インチ)のものを製作した。SONOIKEとは園池製作所のことで、

表2 遷音速風洞天秤一覧表

構造	最大径 (mm)	名 称	天 秤 容 量 (kg, kg-m)						購 入 および 製 作 (年月)
			抗 力	横 力	揚 力	横 揺 モーメント	縦 揺 モーメント	偏 揺 モーメント	
力 検 出 型	50.8	TASK 2吋MKⅢD	72.6	408.2	816.5	17.3	75.2	31.1	32.12
	"	TASK 2吋MKⅣ	"	"	"	"	"	"	34.10
	38.1	TASK 1.5吋MKⅡ	45.4	226.8	453.6	9.2	34.6	14.4	34.10
	"	SONOIKE 1.5吋 No.1	25	100	200	4	15.2	6.4	39.3
	"	" No.2	25	100	200	4	15.2	6.4	39.3
	"	" No.3	40	200	400	6	30.5	12.7	40.3
	"	" No.4	30	100	400	3	30.5	6.4	40.3
	31.75	SONOIKE 1.25吋	10	40	100	2	6.4	2.0	41.1
	34	KITADE No.1	10	/	50	/	5	/	40.4
	"	" No.2	20	/	100	/	10	/	40.4
	"	" No.3	30	/	150	/	15	/	40.4
	50.8	MHI 2吋	30	/	600	/	55.2	/	50.3
800	半模型用(外装)	100	250	1000	250	50	250	37.3	
モー メント 検 出 型	30	30φモーメント型	100	200	200	1.6	13	13	37.3
	52.6	BOEING 660H	68	408.2	816.5	23	57.6	23	55.3

天秤の構造は何れも力検出型である。航技研の金成等⁽⁵⁾は、構造を単純化して低価格の天秤を作るための研究を行ない3分力天秤を3個製作した。それがKITADE No. 1～3であり、天秤外径は何れも34mmである。MHI(三菱重工業の略)製作のものとしては、外径50.8mm(2インチ)の力検出型3分力天秤と、外径30mmのモーメント検出型6分力天秤がある。モーメント検出型には、米国ボーイング社⁽⁶⁾から購入した外径52.6mmの一体構造型のものも1個ある。

6分力天秤は、模型の軸力、横力、垂直力と、横揺れ、縦揺れおよび偏揺れモーメントの静的6分力を検出する。天秤容量は天秤に掛かる荷重の限界を示すものであり、各受感素子は、この値に基づいて設計されているので、この値を越えて天秤を使用してはならない。

力検出型天秤の内部構造を図3に示す。各検出素子は、模型を固定する天秤外筒と、天秤支持装置に固定される天秤内筒の間で力を感じるように設計されている。垂直力素子と横力素子は天秤前方と後方に1つつつ素子を配置し、垂直力および縦揺れモーメント、横力および偏揺れモーメントを検出する。

軸力素子と横揺れモーメント素子は、天秤内筒の中にあり天秤中心に対して前後対称に1組ずつある。第1素子と第2素子の出力の和をとることで、他分力からの干渉を軽減する構造となっている。天秤内部の温度検出用のセンサーは、天秤外筒と内筒の前後部に、各1個ずつある。力検出型天秤は、上述の各受感素子を天秤外筒と内筒の間に配置し、ネジおよびピンにより結合する構造となっている。

これに対し、図4に示すようなモーメント検出型天秤の構造は、棒上の鋼材から各分力用の検出部分を所要の形状に削り出して成形した、単一部材からなるものである。表2のBOEING-660H天秤は、複雑な内部切削に放電加工を施した一体構造型のモーメント検出型天秤である。しかし、モーメント検出型のものでも、加工技術が未熟であった過去に製作されたものには、図5に示すように複数の部材から構成されたものもある。

空気力によって、天秤の各受感素子に生ずる応力は、貼布した抵抗線歪ゲージにより、電気出力として取り出す。抵抗線歪ゲージは、120Ωベークライトゲージを4枚貼布してホイストブリッジを構成し、電気出力の増大と温度補償を考慮している。な

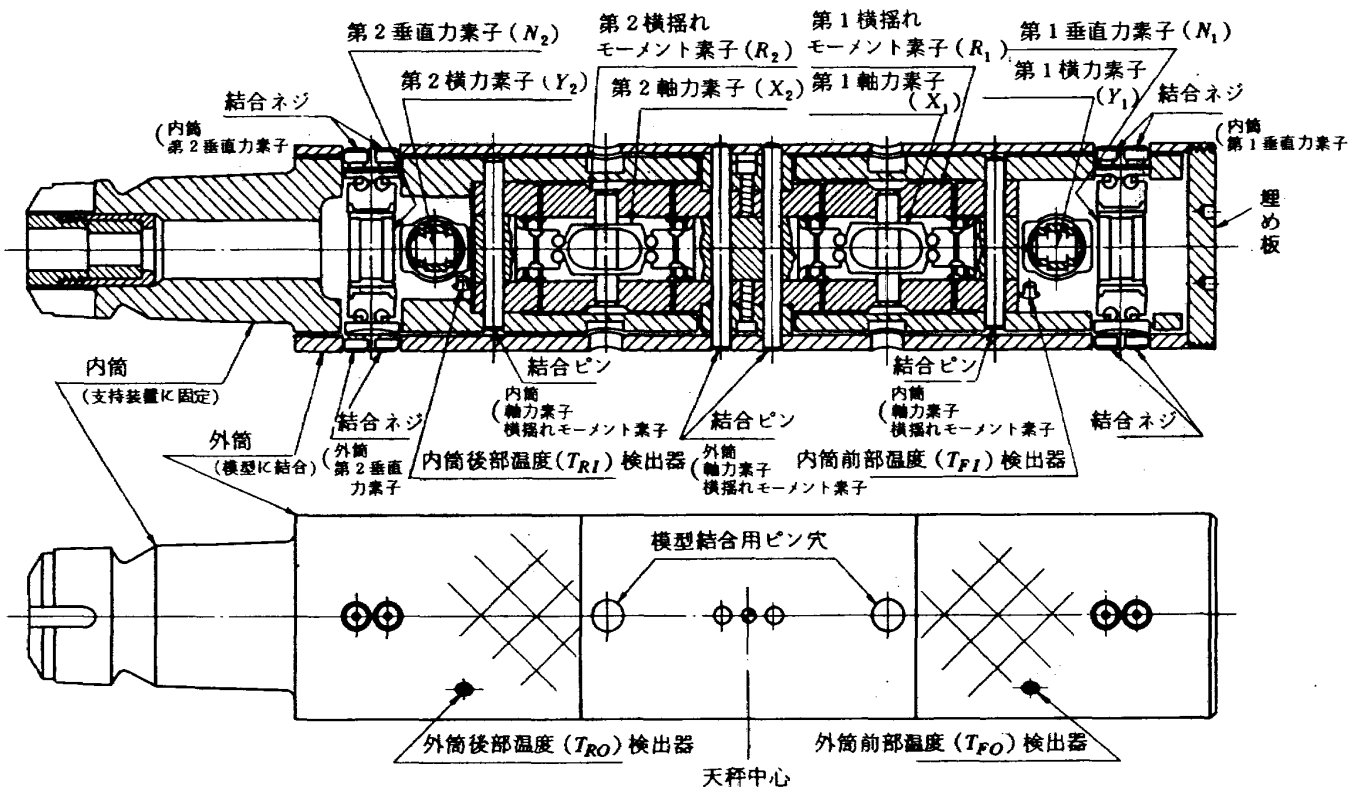


図3 力検出型天秤

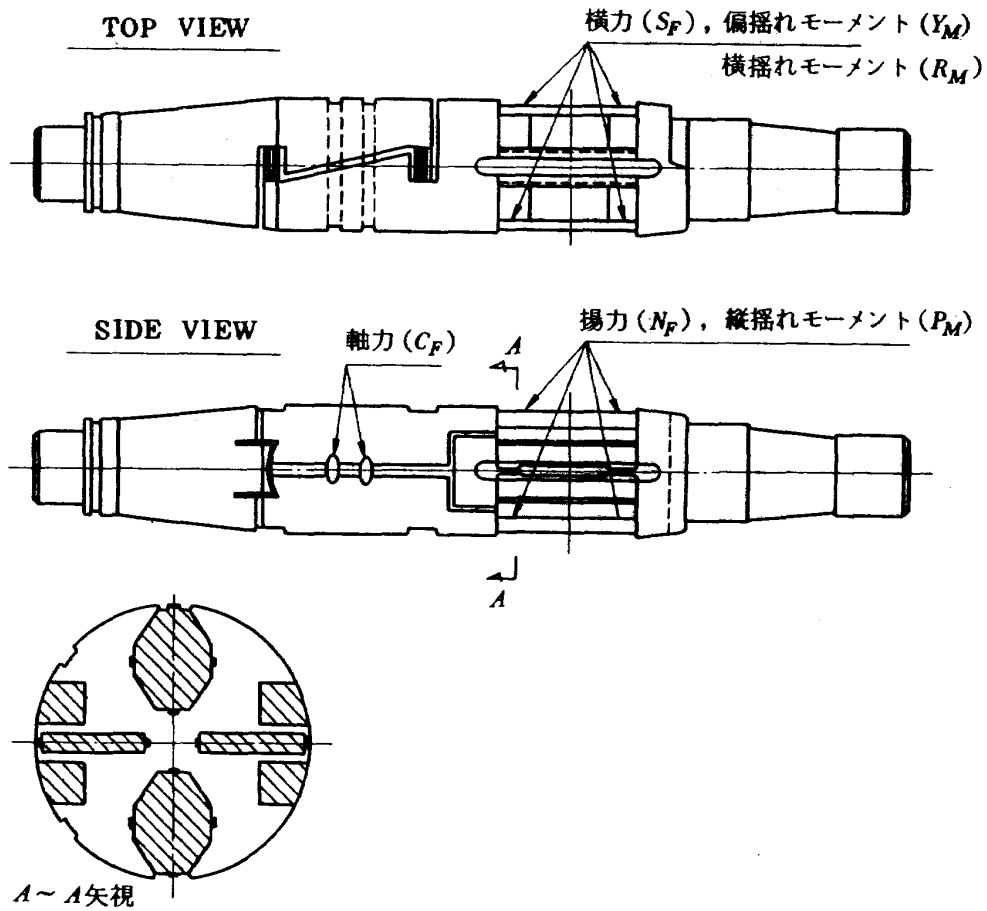


図4 モーメント検出型天秤 (一体構造型)

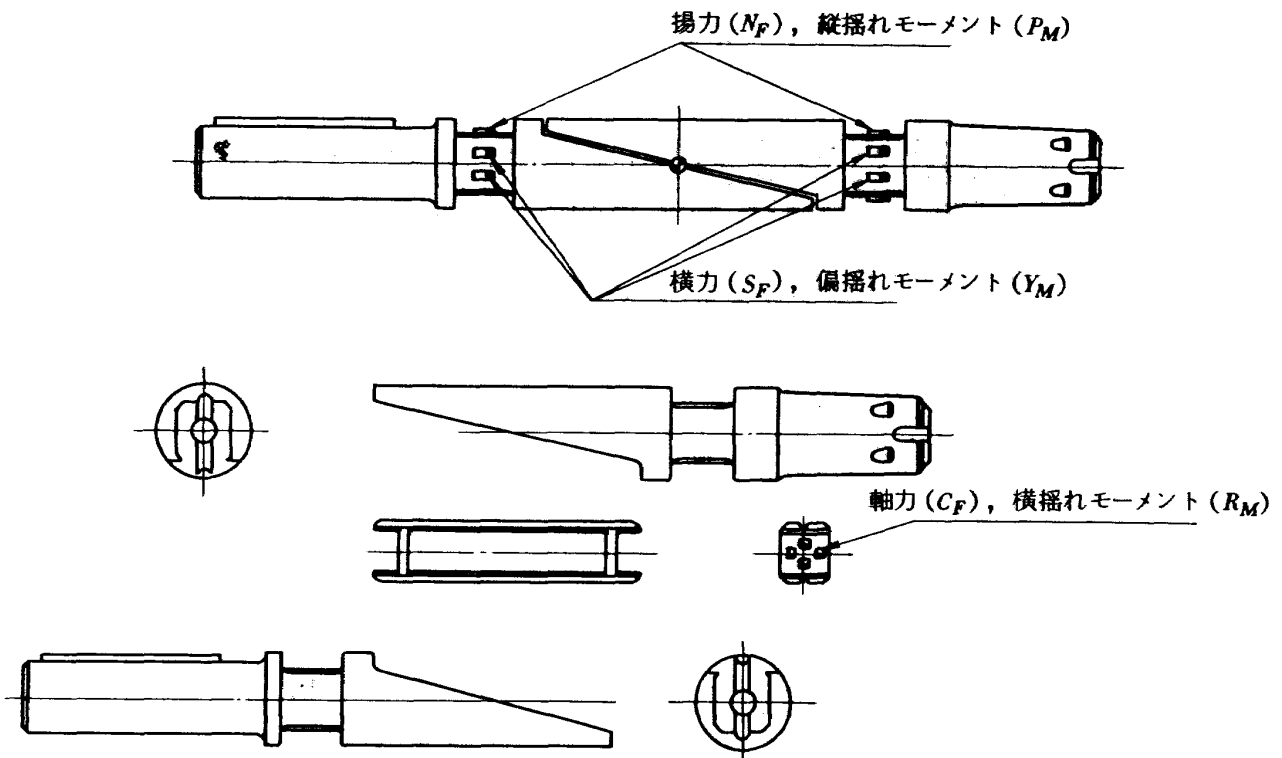


図5 モーメント検出型天秤 (組立型)

お、図4の一体構造型天秤は、350 Ω ゲージを使用しているが、この種の抵抗の大きいゲージを使用して励起電圧を高めると、電気出力が増大し分解能が向上して、測定精度が改善されるので、最近では種々試みられている。

これらの歪ゲージからの出力導線は、天秤後端部からまとめて引き出し風洞外部の計測装置へ接続する。

3.3 計測装置

天秤の歪ゲージは直流励起する。この電源の性能を表3に示す。電源は、各種検出器に使用するため全部で57台あるが、ブリッジ数に対応した台数を選び、各ブリッジ毎に独立して電圧・平衡調整を行なう。

歪ゲージ出力は、低レベルのまま100 ch まで切換可能な走査切換器を経て、表4に示す性能を持つデジタル電圧計1台により読み取る。収録データの記録、処理は図6のブロック図に示すようにミニコンピュータを含むデータ処理装置⁽⁷⁾で行なう。

これらの計測装置は、風洞測定部内の天秤より約70m 離れた風洞計測室に設置してあるので、途中の雑音信号の混入を防止するため、歪ゲージから計

測装置まではシールドケーブルを使用して接続してある。

天秤の計測精度を考察する時、検出器としての天秤性能に加えて、天秤歪ゲージの励起電源、天秤出力を測定する走査切換器を含めたデジタル電圧計の精度および雑音なども影響するが、通常の場合、これらの計測器材および配線経路はすべて正常に動作しており、一定の精度および再現性を有していると考えられる。

4. 天秤出力の零点移動

天秤性能は、相互干渉の度合、変換器としての出力感度、分解能、直線性および安定性などで判断されるが、この性能を左右する要素として、形式、寸法、受感素子の構造などの機械的構造や、選択した歪ゲージの特性などが考えられる。天秤性能のうち、安定性が良好で再現性が保たれるならば、例えば出力感度および分解能の不足は天秤出力を測定する電圧計の選択によって補え、また、多少の非直線性もコンピューターを使用した補正により克服できる。従って、安定性・再現性の良否が最も重要である。

抵抗線歪ゲージは、歪一電圧変換器として直線性

表3 歪ゲージ励起用電源性能

項目	性能・仕様
出力	定電流方式 0 ~ 120 mA 定電圧方式 1.8 ~ 12.0 V } 切換可能
負荷抵抗	20 ~ 600 Ω
リップル	定電流方式 20 μAP ~ P 以内 定電圧方式 1mVP ~ P 以内
出力安定度	120 ~ 600 Ω 負荷に対し 出力変動 ±0.01 % 以内 0 ~ 50 °C の温度変動に対し " ±0.01 % °C 以内 AC 100V ±10 % の電源電圧変動に対し " ±0.01 % 以内
時間変動	±1 mV / 8H 以内 (印加電圧 2V)
校正	定電圧方式のみ可
使用温度範囲	-10 ~ +50 °C
平衡調整	定電圧方式のみ可
個数	57 台

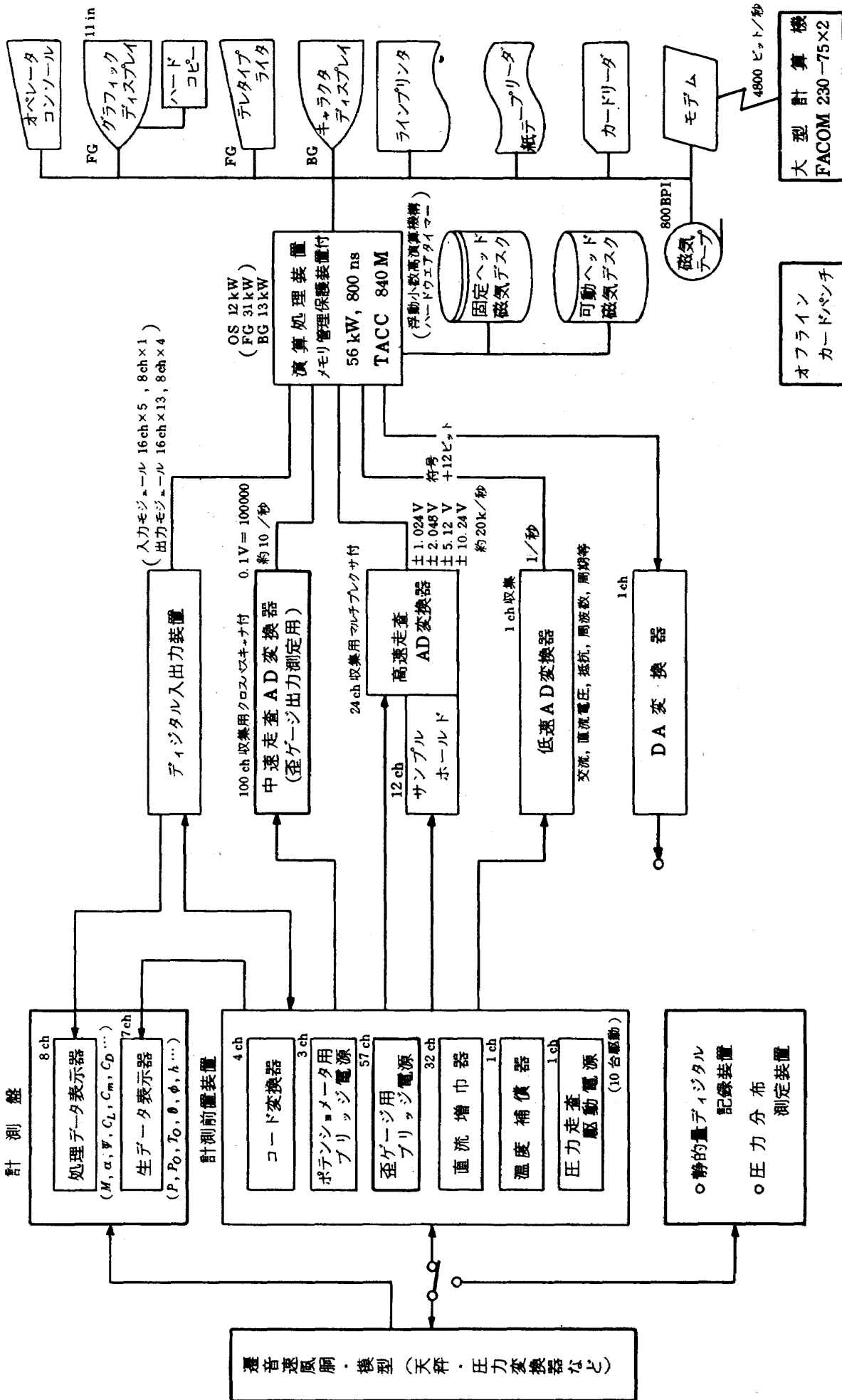


図 6 2m x 2m 遷音速風洞データ処理システム機器構成図

表4 歪ゲージ出力測定用AD変換器の性能

項目	性能・仕様
測定電圧	±0.1, ±1, ±10, ±50 [V] F.Sの4レンジ切換
変換桁数	100,000 カウント(±0.1V, ±1V, ±10Vレンジ) 50,000 カウント(±50Vレンジ)
分解能	1 μV (±0.1Vレンジ)
総合変換精度	±5 μV ±0.01% rdg ±0.005% F.S. (±0.1Vレンジ) ±5 μV ±0.01% rdg ±0.003% F.S.
入力インピーダンス	1000 MΩ 以上 10 MΩ ±0.1% (±50Vレンジ)
最大入力電圧	±50VDC
総合変換時間	111ms 以下 (±0.1Vレンジ) 79ms 以下 (±1, ±10, ±50Vレンジ)
個数	1台

に優れているから、天秤のほかにも圧力変換器⁽⁸⁾などにも多数使用されている。歪ゲージは構造が簡単で、かつ小型であるという利点を持つが、又、温度変化により抵抗値が変化するという欠点も持っている。

遷音速風洞でも、このような抵抗線歪ゲージを用いた天秤および圧力変換器等を使用した時、環境の急変による影響が測定出力の再現性に現われる。すなわち変換器の周囲の状態変化によって、天秤出力に感度変化と零点移動を生ずるためである。圧力変換器は、通風中であっても随時、感度と零点の監視が可能であるから、不安定さを有しても修正出来る。しかし、天秤の場合には、通風中は常に空気力による負荷が加わっているから、天秤出力の感度変化や、零点移動の有無を確かめることが出来ない。このため、実験終了後に初めて零点が大幅に移動している事を知る事例が多く、これは、実験中の天秤出力に誤差を含む事になる。幸い、感度の変化は、一般に出力値の0.01%/°C程度と小さく、温度変化に対しても直線性を有するので、補正も容易で精度を害する事はない。

4.1 遷音速風洞における実験

2m×2m 遷音速風洞における実験の状況につい

て略記する。実験予定は週単位ごとに区切られ、その年度の初頭に決められる。従って、風洞実験の実行に先立って、供試模型と、これに使用する天秤が定まるから、風洞外の天秤校正室や模型準備室において、つまり、室温の大気中で実荷重(重量検定済の重錘)により天秤校正を行ない、天秤出力感度、相互干渉等を求める。表5および図7に校正結果の例を示す。

実験は週単位で行なわれ、風洞測定部の模型支持装置にスティング、天秤を装着し、供試模型を取付ける準備作業に1日を要する。ある模型についての実験日程の実例を表6に示す。通風準備時には、風洞測定部は開放され、洞内の空気の温度、湿度は大気による影響を受ける。模型の整備が完了すれば風洞は密閉され、測定部内の空気は乾燥空気と置換される。通風日には、午前、午後各一度ずつ通風実験を行なう。この時、風洞内の空気温度は外気温より高くなる。この間、朝、昼および夕方の無風時に、模型の形状変更または点検のため、測定部を短時間であるが大気に開放する。従って、その都度洞外の空気が混入して温度および湿度は、その時の外気の影響を受ける。実験が2週以上継続する場合の週末休日は、風洞測定部は閉じたままである。

表 5 天秤較正結果の例

力検出型 (50mm) 天秤
 $E_x = 3.0$ [V]

OUT PUT LOAD (kg) \ (mV)	N_1	N_2	Y_1	Y_2	X	R_m
0	0	0	0	0	0	0
50	1.135	-0.013	0.002	0.038	-0.291	0.008
100	2.222	-0.081	-0.019	0.089	-0.378	0.017
150	3.410	-0.094	-0.023	0.115	-0.680	0.019
100	2.316	-0.061	-0.011	0.074	-0.447	0.015
50	1.170	-0.031	0.004	0.033	-0.201	0.010
0	-0.006	-0.004	0.001	-0.012	-0.005	-0.003
-50	-1.183	0.051	0.003	-0.040	0.104	-0.012
-100	-2.375	0.106	-0.007	-0.078	0.196	-0.026
-150	-3.572	0.155	-0.002	-0.115	0.296	-0.037
-100	-2.383	0.100	-0.009	-0.075	0.179	-0.028
-50	-1.199	0.049	-0.009	-0.030	0.077	-0.021
0	-0.011	0.004	-0.010	0.009	-0.008	-0.001

表 6 実験日程表 (例)

月	日	曜	模 型 形 態	
			午 前	午 後
6	16	月	(模型とりつけ)	(調整)
	17	火	予備通風	全機, 主翼 No.1
	18	水	全機, 主翼 No.2	全機, 方向舵 10°
	19	木	全機, エルロン 5°	全機, エルロン 10°
	20	金	全機, 主翼 No.3	尾翼なし
	21	土	(模型撤収)	
	22	日		
	23	月	(模型とりつけ)	(調整)

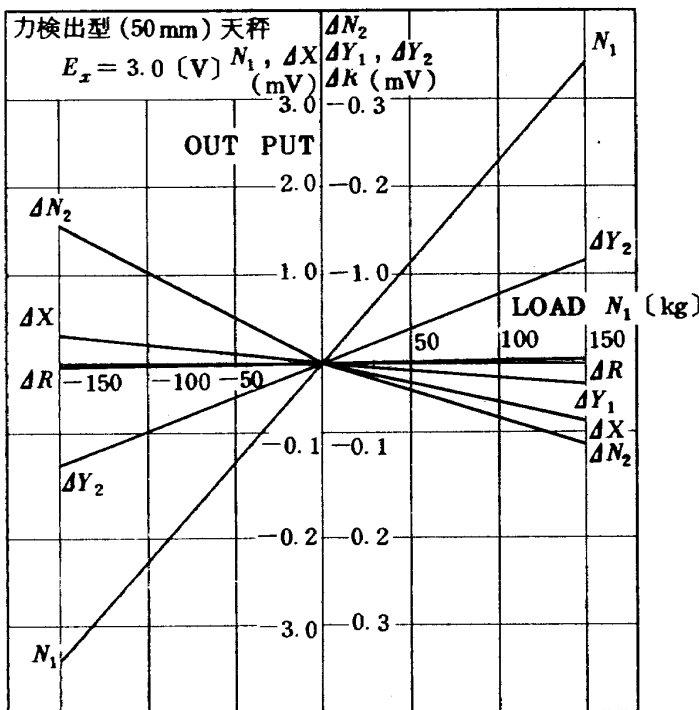


図 7 天秤較正結果の例

上述の様に、風洞測定部は週に何回か開放し、そのつど洞内の空気は外気と交流し、温度、湿度が変化するため、風洞外部で検定・校正した天秤は、実験に使用するため風洞測定部に取り付けた後に、通常の大気とは異なる温度・湿度および圧力サイクルを生ずる環境の許に置かれる。通風時には、実験時間も2~3時間継続して行なわれ、計測時間が長く、また実験マッハ数の上昇と共に、測定部周辺の温度が50℃を越えるから、外気温との差は冬期で40℃、夏期でも20℃におよぶ温度変化がある。図8.1は、通風時における実験マッハ数の変化に伴う風洞集合洞温度および圧力の変化の例を示したものである。更に、通風を繰返すと、無風時における洞内温度が上昇したまま保持されるので、通風時と通風前の温度差も変化する。図8.2は、時間の変化に伴う集合洞温度の変化の様子を示したものであるが、通風ランによっても、通風日によっても、その様子が異なることを示している。また、図8.3に示す様に、季節によっても、その様子は異なる。この場合にも、午前と午後の実験によって異なる様子が分る。

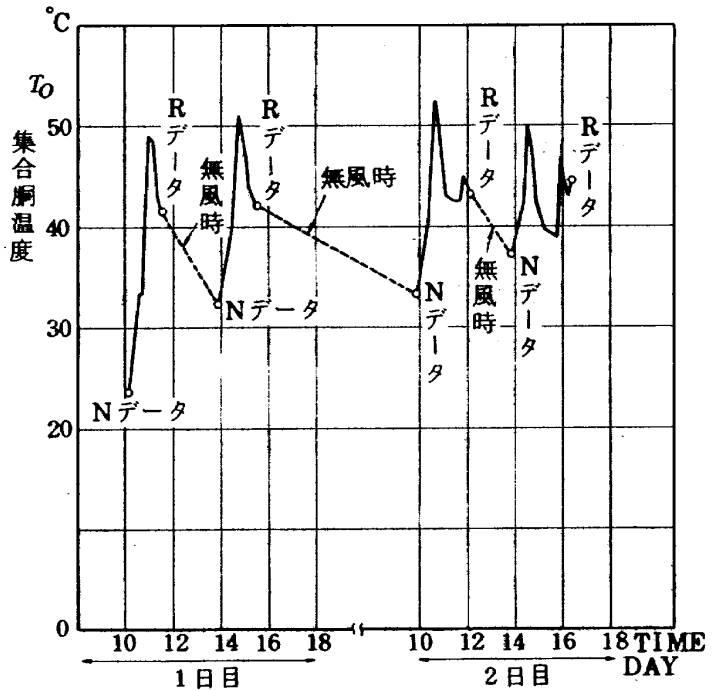


図8.2 通風時の集合洞の温度変化

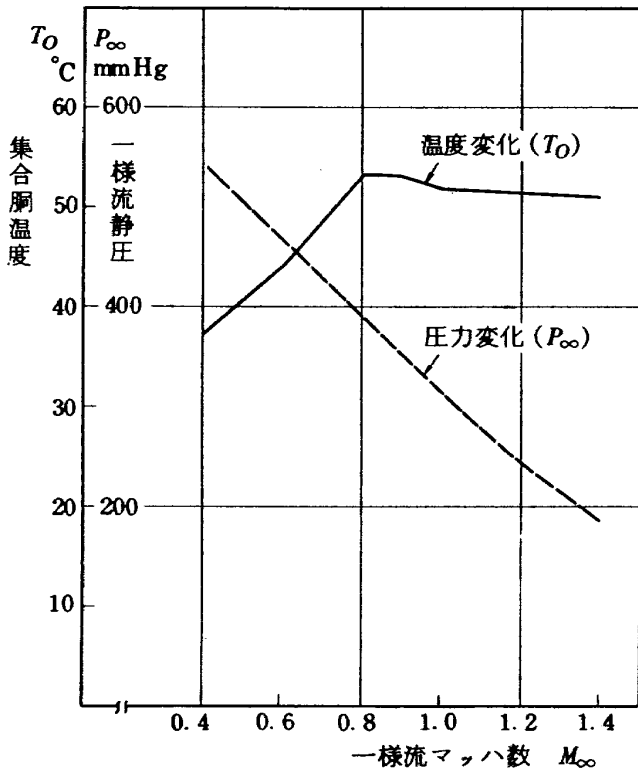


図8.1 風速と温度および圧力変化の例

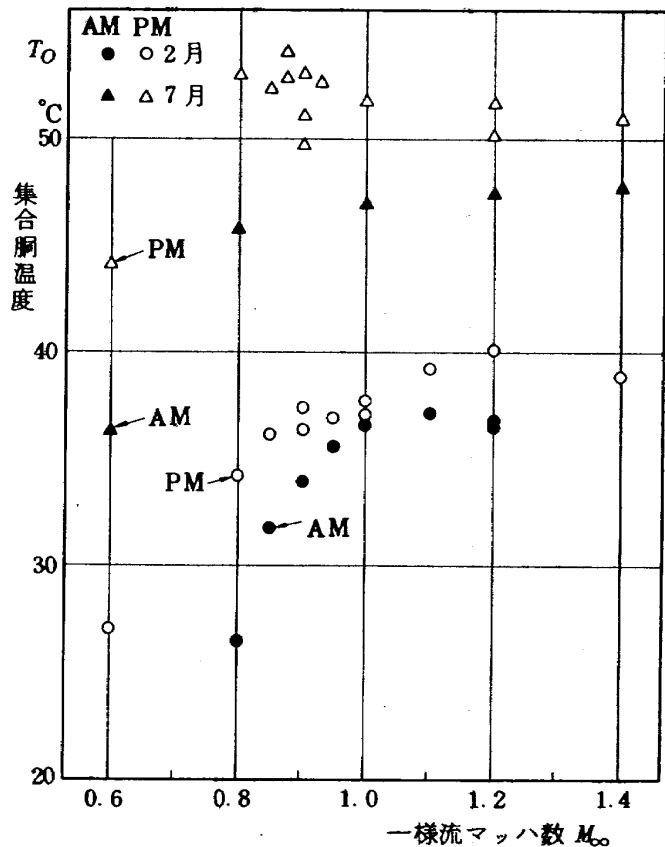


図8.3 集合洞温度の季節による違い

4.2 零点移動の具体例

通風前の無風時に供試模型を水平にした状態で天秤各分力の歪ゲージ出力を読取ったものをNデータ (NO LOAD DATA) と呼び、これを通風前の零点と定める。実験終了後の無風時に再び、通風前と同じ模型姿勢の時の歪ゲージ出力を測定したものをRデータ (RENEWED NO LOAD DATA) という。NデータとRデータの差が実験中に生じた零点移動量である。

これまでに実験に使用した内挿式6分力天秤の零点移動量の例を次に示す。図9.1と図9.2は、力検出型50mm天秤の零点移動量を示し、同時に通風前後の集合胴温度も示す。図9.1は、冬期に実験した時のもので、集合胴温度が通風前は7°Cから30°C、各通風毎の最高温度は30°Cから54°Cまで変化しており、通風中の温度差は4°Cから40°Cとなっている。

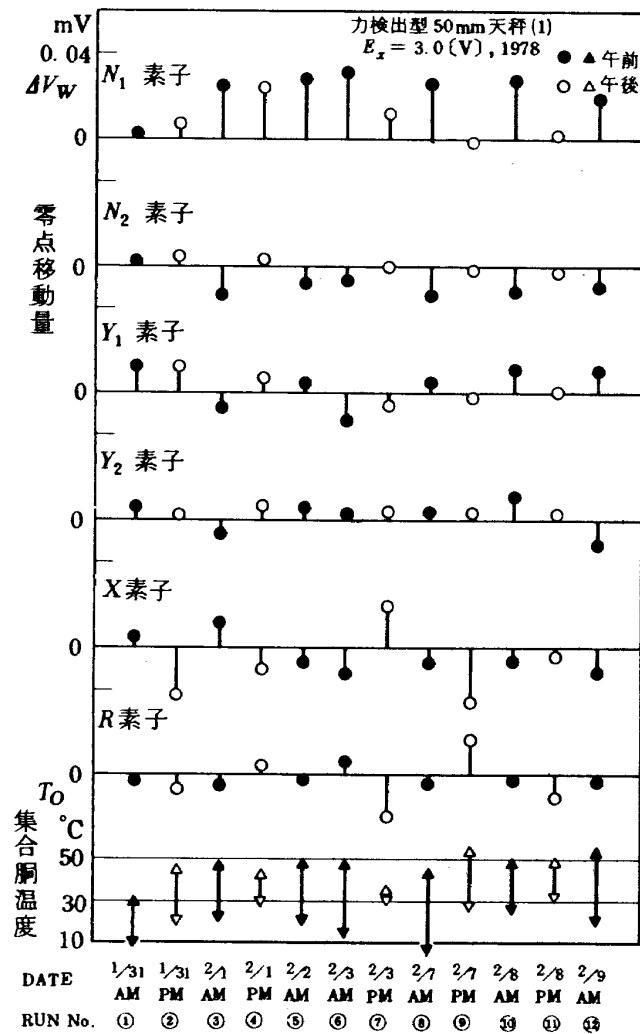


図 9.1 風試による零点移動 (1)

零点移動量は、素子毎に異なっており、全ての素子について、集合胴温度変化との関係を見付けることは難しい。

図9.2は初夏の6月に実験した結果である。この場合の集合胴の通風時の温度差は10°Cから20°Cの間である。零点移動量については、 N_1 素子、 N_2 素子が通風回数の増えるに従って減る傾向にあるが Y_1 素子は6月7日午後のデータが大きく、 Y_2 素子は6月8日午後と6月11日午前データを除き、ほぼ同程度の移動量を示す。軸力X素子の移動量は、常に大きな値を示しており、この様な場合には、模型に掛かる最小抵抗値の推定に大きな障害となる。R素子の移動量は、実験の繰返しと共に減少し、6月9日午後からは、零点移動は見られない。このように、実験の繰返しと共に零点移動量が減少してくるのは、通風によって天秤が暖められ、歪ゲージの乾燥や、受感素子の機械的ななじみ具合が良くなるのではないかと考えられる。

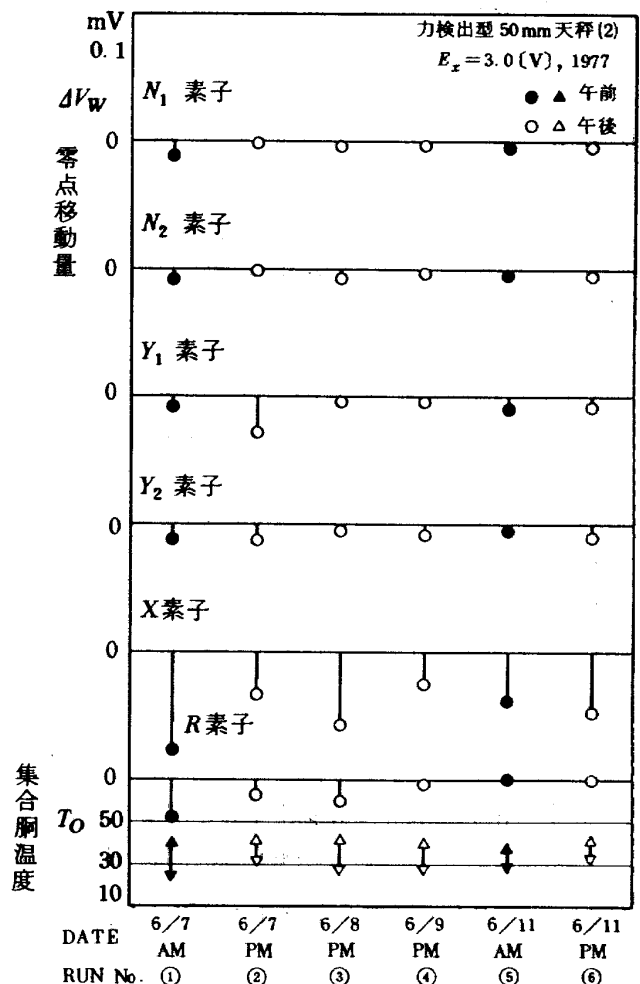


図 9.2 風試による零点移動 (2)

図 9.3 と図 9.4 は、モーメント検出型天秤の零点移動量を示す。図 9.3 では、縦揺れモーメント P_M 素子と偏揺れモーメント Y_M 素子は、何れも零点移動量は微量であり、良い傾向を示すが、他の素子については一定の傾向はない。特に横揺れモーメント R_M 素子の 1, 3, 5 ランにおける零点移動量が非常に大きく、このような場合の模型に働く空気力の評価は慎重な検討を要する。図 9.4 は、一連の実験が 18 ラン行なわれた時のもので、集合胴温度の推移を見ると、3 ランまでは初期の温度が 10°C 以下であるが、それ以後は 10°C 以上となり、風洞全体の温度が、実験の繰返しによって上昇していく様子が分り、特に午後のランでは、何れも 20°C を越えている。このような風洞の状態と、天秤各素子の零点移動量との間に一定の傾向を見出すことはできない。

ような零点移動を生ずることが分る。何れの素子も、一定方向への移動量を示しているが、 S_4 素子および A 素子は特に大きな移動量である。

零点移動量が測定空気力に及ぼす影響を考える時、力検出型とモーメント検出型には違いがある。力検出型天秤の場合には、揚力と縦揺れモーメントは第 1 垂直力と第 2 垂直力、横力と偏揺れモーメントは第 1 横力と第 2 横力から、夫々計算して求める。一方、モーメント検出型の場合には、1 素子毎に直接、空力係数に変換できる。従って、組立型の場合には、第 1 または第 2 分力の何れかが大きな零点移動をした時に、空力係数に変換した力およびモーメントの両方に影響を及ぼすが、モーメント検出型の場合には、零点移動を示した分力への影響だけにとどまる。

これまで述べた零点移動の原因と考えられる実験前後の状態の相違と、この間の状態変化についてまとめてみると、

図 9.5 に外装型の半模型用天秤の零点移動量を示すが、直接、風路に置かない天秤の場合でも、この

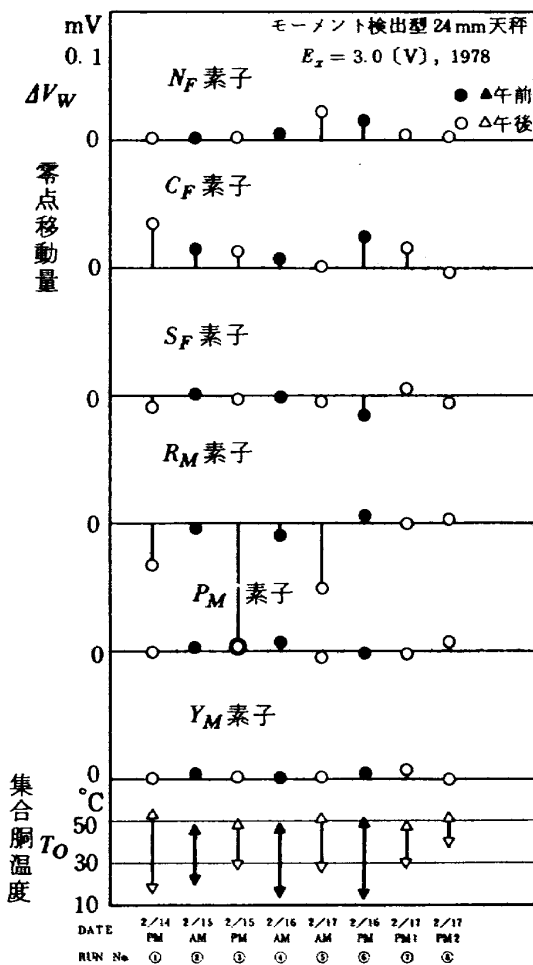


図 9.3 風試による零点移動 (3)

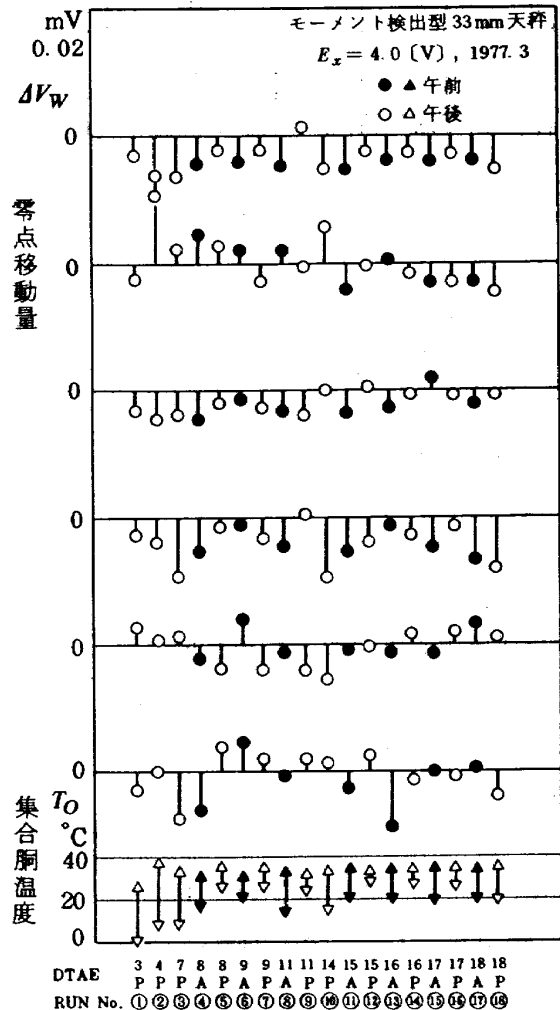


図 9.4 風試による零点移動 (4)

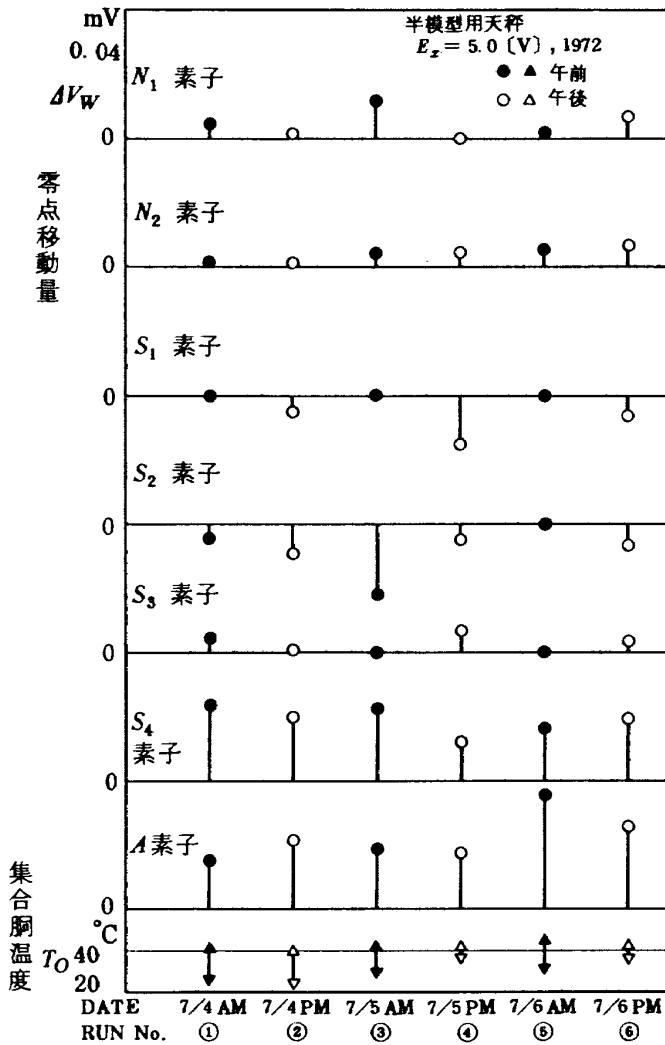


図 9.5 風試による零点移動 (5)

1. ある時間 (90 分~150分) 経過している。
2. 模型, 天秤および周辺の温度が異なっている。
3. 通風中に姿勢角変化があり空気力が変化した。
4. 通風中に温度変化と圧力変化があった。
5. 歪ゲージの湿度が変化した。

などである。

このうち, 図 9.1 ~ 9.5 から分る様に, 集合胴温度変化と零点移動との関係を見ると,

1. 天秤により, 平均的な移動量が異なる。
2. 各要素毎の移動量の大きさおよび方向に全く再現性がない。
3. 実験が継続的に繰返えされても, 移動量の増大や減少といった顕著な傾向はない。

この様に, 歪ゲージの零点移動は, 集合胴温度変化だけでなく, 種々の要因とも関係して複雑な様相を示していることが分る。

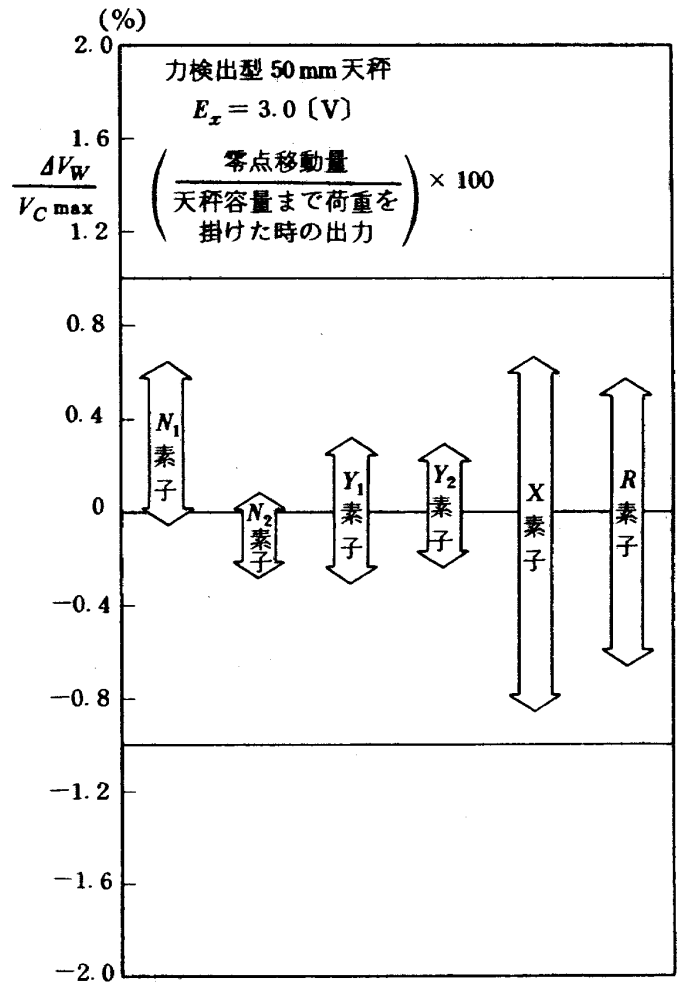


図 10 零点移動量の最大出力に占める割合

4.3 零点移動量の大きさ

これらの零点移動量について天秤容量に対応する最大出力値と比較すると図10のようになる。これは力検出型50mm天秤を用いて, 図9.1に示した12回の連続した実験の零点移動量を表わしたもので, 矢印の上と下は最大と最小を示す。

実験時の空気力が天秤素子の天秤容量近くまで加わるような場合, 例えば, 輸送機形状模型で垂直力を測定する時には, 零点移動量は要素出力に対し相対的に小さな量となり, 精度への影響は無視出来る。一方, 天秤容量に対し, 空気力が小さい場合には, 測定精度を損う事も起り得る。垂直力や横力などは, 一般に測定出力が大きく, 零点の移動は問題にならないことが多いが, 図11.1に示す様な軸力の場合には, 大迎角時の空気力に合わせた天秤容量のものを使用すると, 巡航時迎角における抵抗絶対値や機体形状の変更による微少な抵抗値の増減を吟味する時に, それらの量は天秤容量に比べて小さな値となる

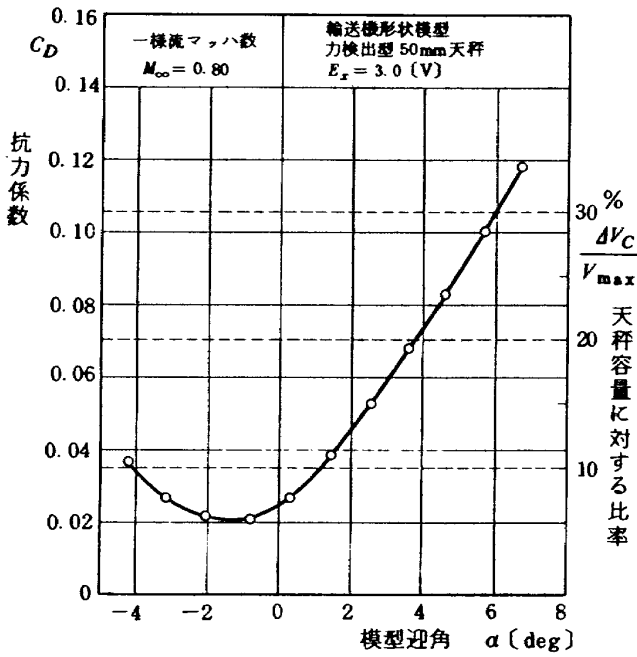


図 11.1 抗力係数と天秤容量

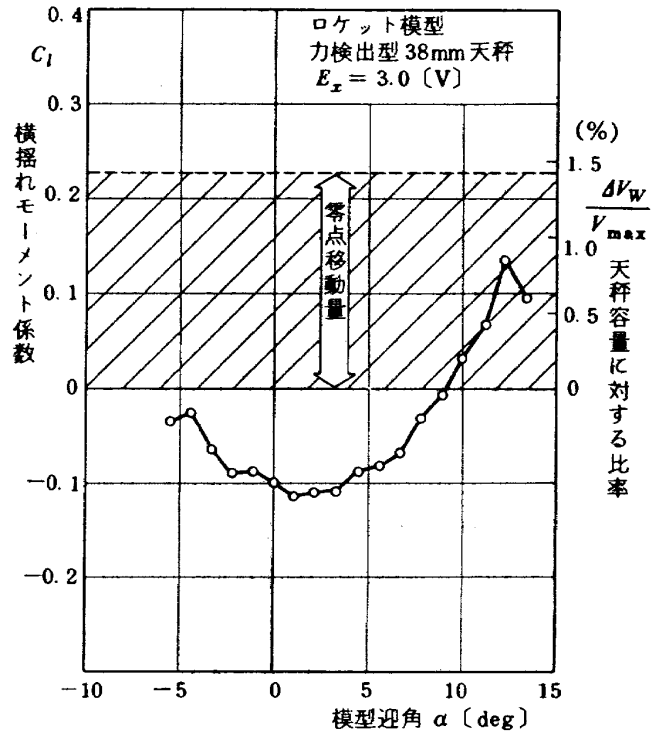


図 11.3 空力係数と零点移動量 ($C_l \sim \alpha$)

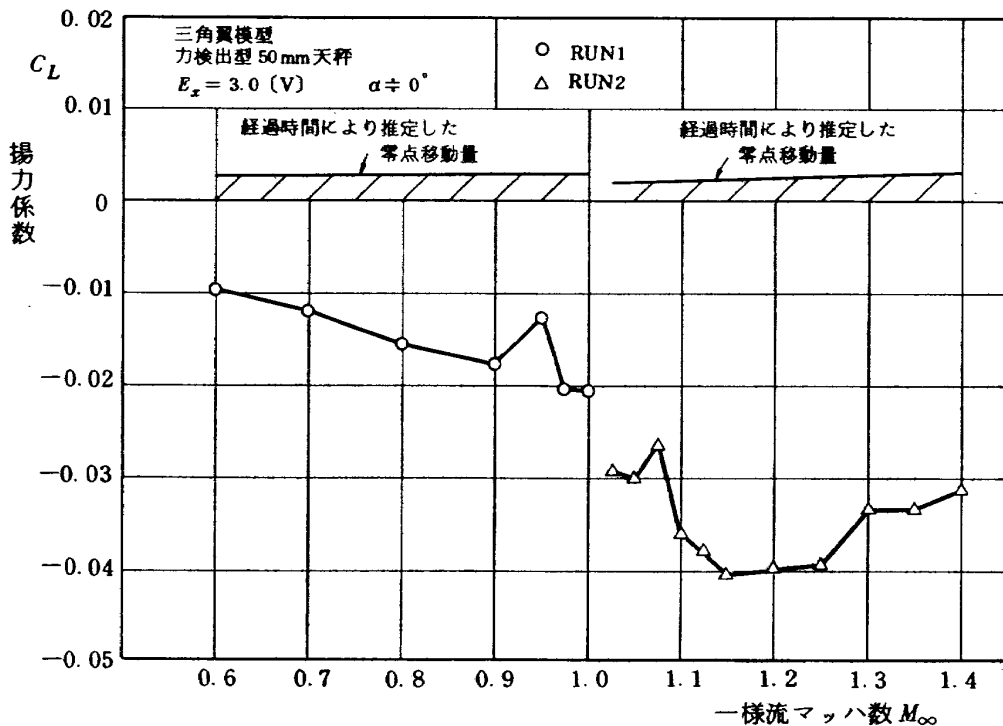


図 11.2 空力係数と零点移動量 ($C_L \sim \alpha$)

ので、零点移動の有無は測定精度に重大な影響を与える。

上下が対称な模型では、迎角零度の時に、垂直力素子の零点移動は見かけの垂直力として現われる。しかし、これが風洞気流の上下方向の偏りに基づくのか模型姿勢角の設定の誤りなのか、あるいは供試模型の形状に非対称性が存在するのか、判断に苦しむことになる。図11.2にその例を示す。この場合にも揚力係数に占める零点移動量の比率が高い事が分る。

この外、一定迎角でのマッハ数変化に伴う縦揺れモーメントの変化とか、図11.3に示す様な大迎角時におけるロケット模型の横揺れモーメントの変化など、空気力の小さい測定において、天秤歪ゲージの零点移動は好ましくない現象である。

5. 原因の考察

歪ゲージの零点移動や感度変化などの不安定性は、歪ゲージとその周辺の温度、湿度その他に依存すると云われる。そこで歪ゲージに対し、温度補償、防湿処理などの対策を十分に施すことが重要である。更に、歪ゲージの感度を高め、電気出力を大きくすれば、雑音等の誤差を相対的に小さくすることができる。十分な対策により、最大出力値に対する非直線性は0.02%以下に、また感度変化も0.0015%/°C程度で、周囲温度変化による零点移動出力は0.0025%/°C以下に抑制し得る⁽⁹⁾と云われている。遷音速風洞で使用する天秤も、このような対策を施しているのだから、温度変化があっても、その零点移動量は小さい筈である。それでも、現実にはこれまで述べてきた様な事実が存在する。

そこで、零点移動を生ずる原因として、温度および湿度の影響や、その他の要因についても考えて見る。

5.1 天秤周囲の環境の変化に基づく零点移動

天秤出力の零点移動と環境変化との関係について、歪ゲージ素線、基板となる母材、接着剤およびコーティング剤等の歪ゲージ自体の特性と関連づけて考察する。

5.1.1 温度の影響

(1) 歪ゲージについて

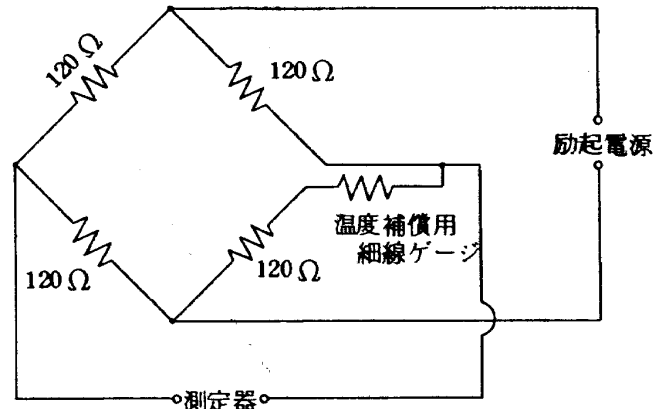


図12 温度補償の方法

天秤検出素子に貼付する抵抗線歪ゲージは、銅・ニッケル合金（アドバンス線）を用いたベークライトゲージである。熱によるゲージ素線の長さ、断面積の変化は当然、歪の変化として検出される。よって、4枚のゲージを組合わせて、この変化分を相殺するようにしてあるが、検出素子の形状や位置によって、後述(5.1.1(3))の様に、常に4枚のゲージが等温とは限らない。構造体の熱容量、熱伝導および放熱効果などから、各辺の歪ゲージ温度に差を生ずれば、温度補償効果は期待出来なくなる。温度補償は図12に示すように温度補償用ゲージを単体の歪ゲージブリッジに組込んで行なわれる。組立式天秤の場合には、各素子単体毎にこの補償がなされるので、図13.1および図13.2に示すように、単体の時とは大幅に異なることがある。この図は、異なる2種類の組立式天秤について、力検出素子に歪ゲージを貼付し、温度補償を施した後、(a)検出素子単体、(b)天秤内筒と検出素子を結合した状態および(c)外筒も結合した総組立後の状態の三段階について、恒温槽において温度変化を与え、それぞれの段階における零点移動量を調べたものである。図13.1の N_1 素子は、a, bの状態では変わらなかったものがcの状態では様相が異なっており、 N_2 素子はbの状態では零点移動したものが、cの状態では良好な結果となっている。 Y_1 素子も N_2 素子と同様な傾向を示している。 Y_2 素子は、ab状態よりもc状態が良いが、X素子はcの状態での零点移動量が極端に大きく、この様な現象が現われた時の救済方法の無い事が、組立式天秤の致命的な欠陥である。単体で温度補償

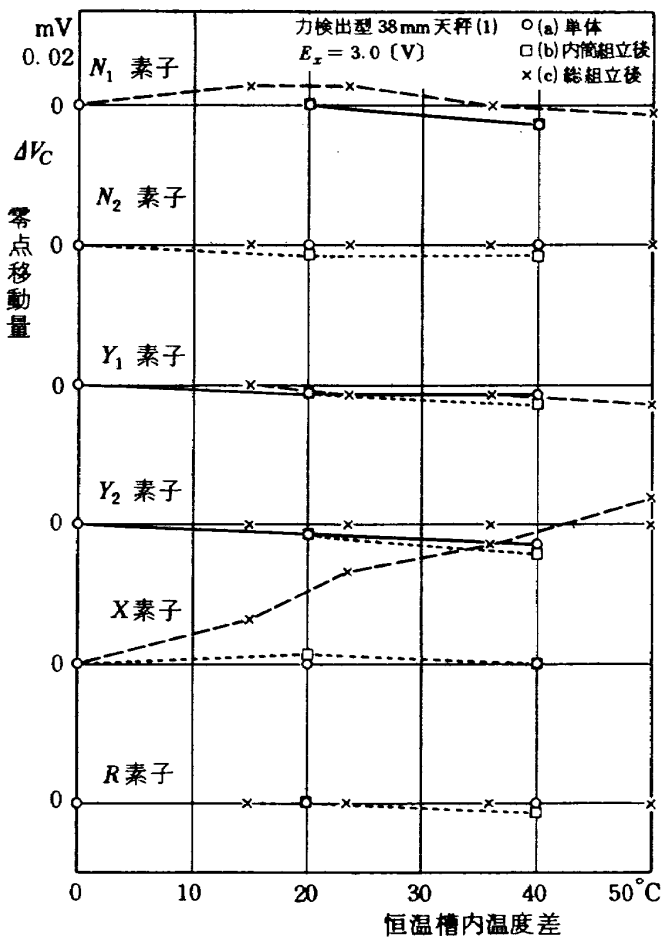


図13.1 単体および組立時の零点移動の違い(1)

の良い素子を組立てた場合に、上述の様に悪くなる例はあるが、その原因として考えられる事は、歪ゲージへの熱伝達の様子が異なる事や、機械的な結合状態が温度によって変化する事が考えられる。この様な場合には、もう一度天秤を分解して温度補償や他の原因について調べる事になるが、各検出素子は精密に結合されているので、既に貼付してある歪ゲージを損傷しないように分解する事が極めて難しく、組立後の零点移動が良好な素子まで貼換えを行うことが多い。図13.2では、R素子を除いて、他の5素子は全てcの状態での零点移動量がabの状態より大きく、あまり良い結果が得られていない。特にX素子は、aの状態の負方向への移動から、bcの状態では正方向へ徐々に大きな値となっている。X素子は図3に示した様に天秤の中心に位置し、歪ゲージ周辺の間隙が小さいので熱が発散しにくい事や、天秤外筒と内筒の温度差による膨張・収縮の影響等によって、この様な零点移動を示しているものと考

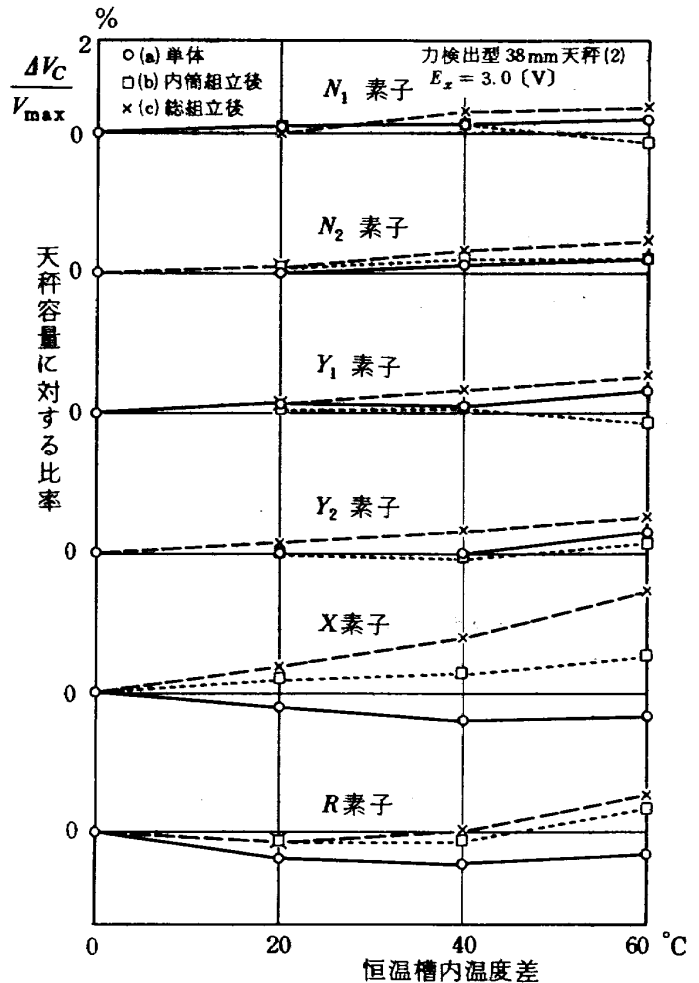


図13.2 単体および組立時の零点移動の違い(2)

えられる。

(2) 接着剤・コーティング剤

天秤に使用している歪ゲージの母材は、ベークライトであり、これを鋼材(高張力鋼4340等)を加工した天秤受感素子の表面に接着し、その表面を防湿用のコーティング剤で覆ってある。これらの接着剤やコーティング剤は合成樹脂であるから、大きな温度変化を受けると塑性変形し、クリープ現象(一定荷重を加えていても、歪が時間と共に増加する)や、リラクゼーション現象(歪が時間と共に減少する)などを呈する。これを避けるため、歪ゲージ接着時には、十分なキュアリング処理(貼付, 乾燥)を施し、塑性変形などの不安定要素を除去する対策が講じられる。

図14は、天秤を一定温度で放置した時の零点移動である。同図には、励起電圧が3.5Vと5.0Vの時の零点移動量を示すが、励起電圧を変えると、歪ゲージの励起電流による自己加熱の影響を受けて、零

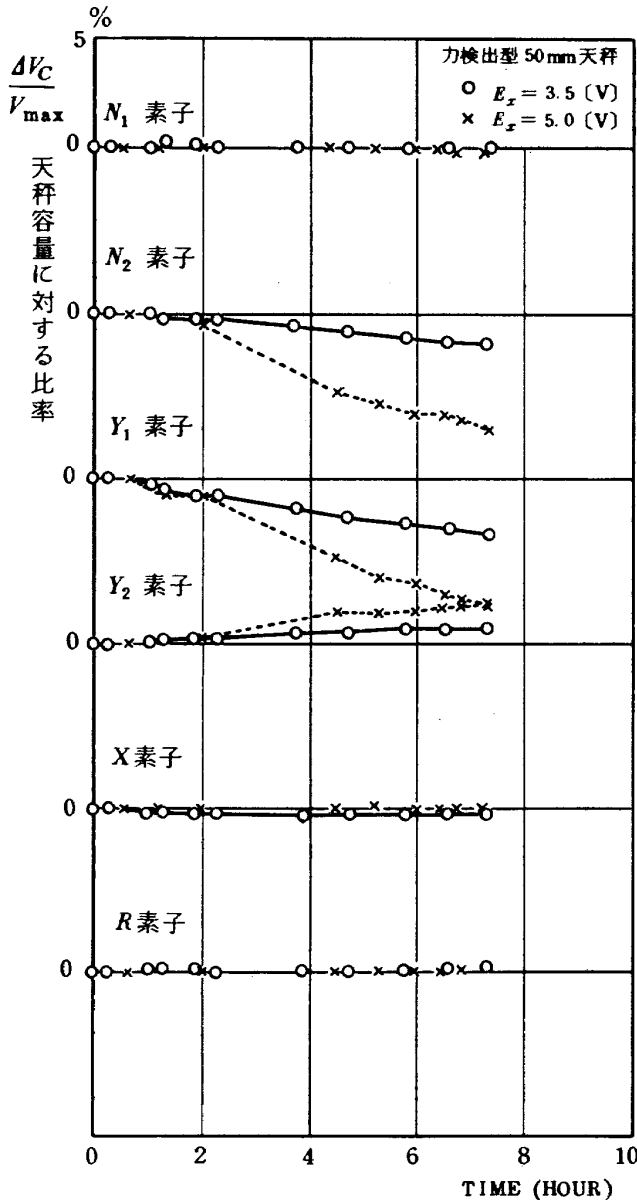


図14 室内に放置した場合の零点移動

点移動が異なる様子が分り、更に、影響を受け易い素子 (N_2 , Y_1 , Y_2) とそうでない素子のある事も分る。影響を受け易い素子は、励起電圧が低い場合にも零点移動を生ずる傾向がある。この様な現象は、歪ゲージ接着層と金属部分の線膨張係数の違いによる内部応力の発生や、歪ゲージ素線の抵抗値が変わるなどの影響によるものと考えられる。

風洞実験時の図 8.2 に示した様な急激な温度変動は、歪ゲージの接着層やコーティング層に前述の様な影響を与え、これが零点移動を生ずる一因と考えられる。しかし、測定部での温度変化の様相が類似した実験であっても、それらの実験前後に生じた天秤各分力の歪ゲージ出力の零点移動の様相や量は異なり、温度変化と零点移動を接着剤・コーティング

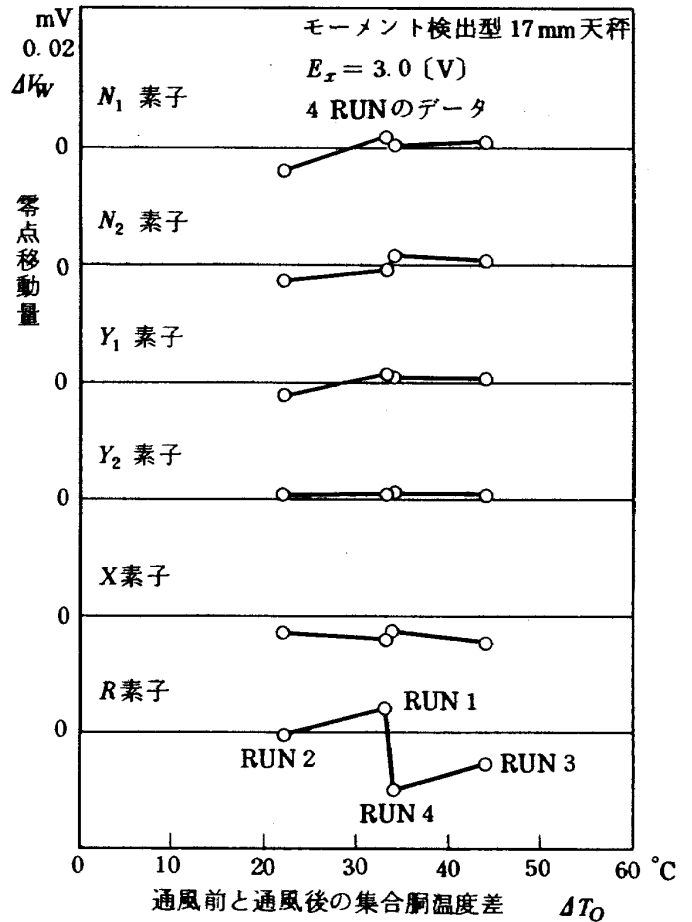


図15 通風による胴内温度差と零点移動量

剤のみによるものと直接関連付けることはできない。

(3) 雰囲気温度変化と零点移動

図15は通風中の温度変化と零点移動量について、4ラン分のデータをプロットしたものであるが、一定の傾向を判別することは難しい。雰囲気温度による影響を調べるために、天秤を恒温槽に置いて温度変化を加えた時の零点移動は、図16.1に示すように温度上昇に追随するが、恒温槽の電源を切ってから室温に復帰する迄の零点移動の変化は、必ずしも定常的ではない。この間の変化を天秤内温度と対比させると図16.2の様になり、温度上昇と下降が一致する素子 (X , R) もあるが、一致せず平行移動している素子がある。しかも、この傾向は温度上昇と下降の状況によっても異なる。また図16.3に示す様に、天秤加熱を繰り返しても、 N_2 素子や R_2 素子に見られるように、零点移動の経過や移動量には再現性のない事が分る。これらの結果は、無風時の温度変化による零点移動量と、通風中に同程度の温度変化を受けた時の零点移動量との比較が容易でない

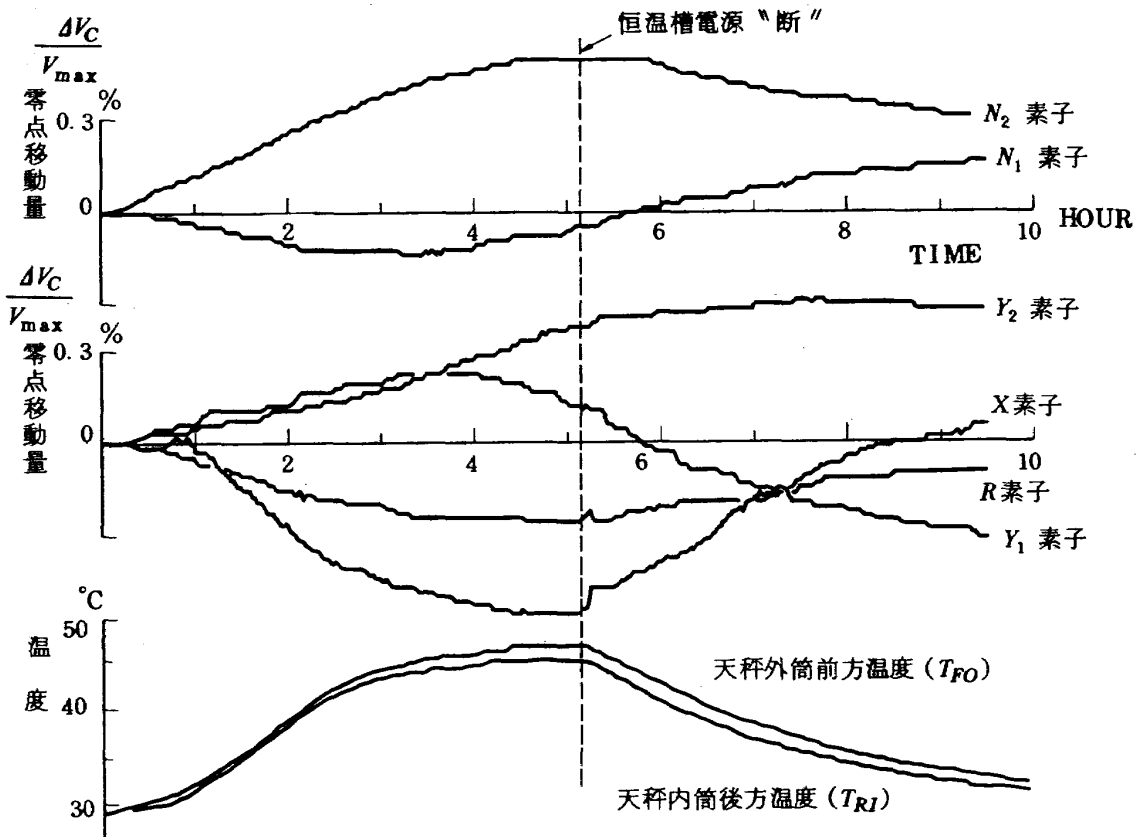


図 16.1 胴外温度較正 (力検出型 50 mm 天秤, $E_x = 3.0$ V)

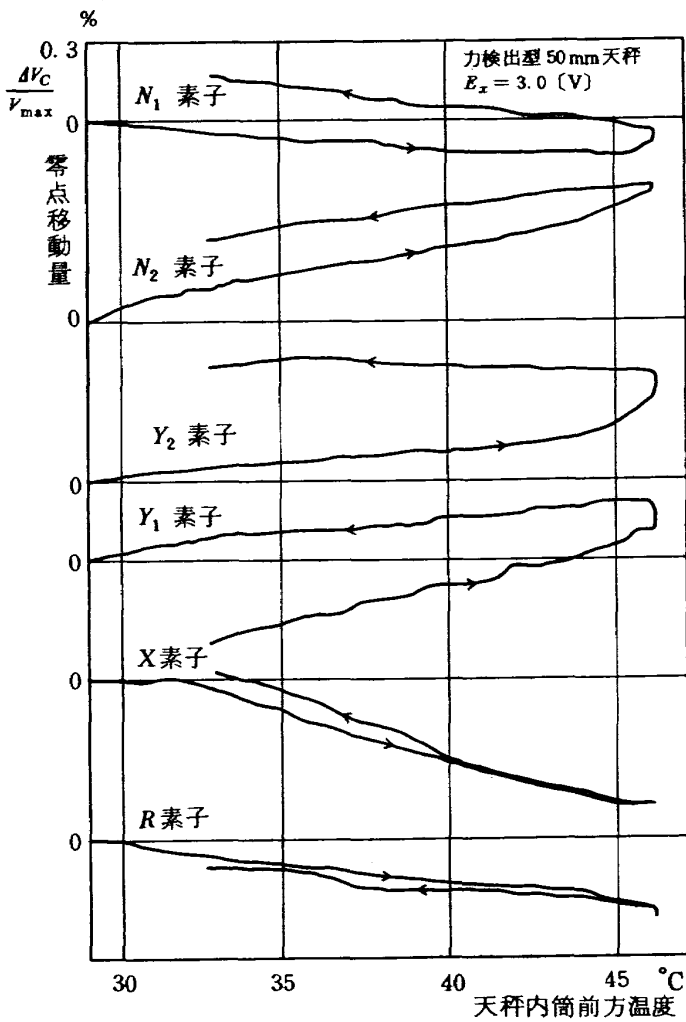


図 16.2 胴外温度較正 (2)

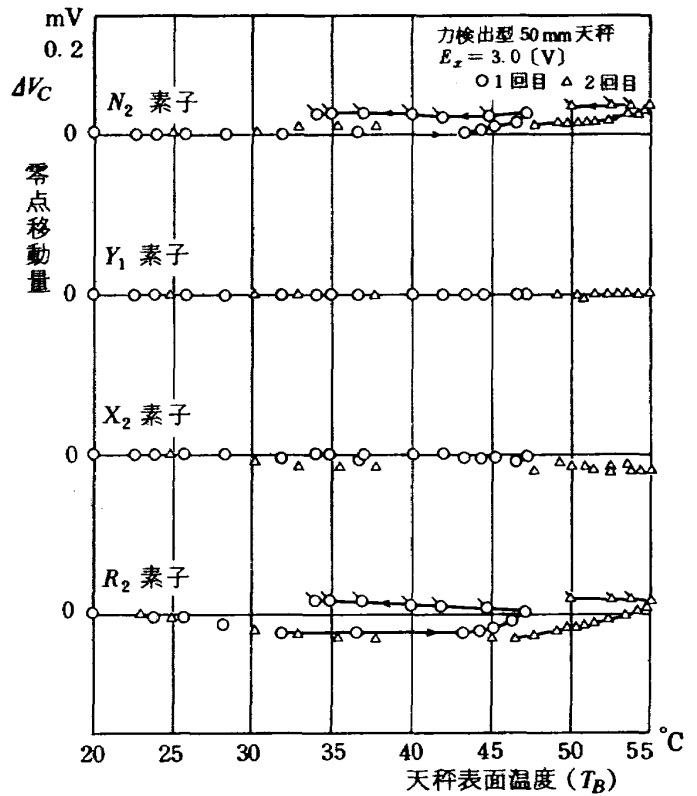


図 16.3 天秤加熱による零点移動 (3)

ことを示している。即ち風胴外において温度差を与え零点移動量を求める温度校正実験をしても、温度変化と零点移動の関係が一義的に定まらないこと、更に、恒温槽と測定部における天秤周辺の温度変化が似ていても、天秤を測定部に取付けた状態では、模型や支持スティングと熱の授受があるため、歪ゲージ部分の温度が異なっていると思われること等により通風時の温度変化による零点移動の正確な予測は難しい。

(3) 通風時の天秤の温度変化

風胴集合総温度は、実験毎に図 8 2 および図 8. 3 に示した様に大きく変化し、季節によっても、午前と午後とでも異なる。従って、模型を取り付けた風胴中の天秤も、この影響を受ける。歪ゲージの温度変化は、天秤とその周辺の熱が天秤の検出金具部を伝わったり、あるいは模型表面からの熱が天秤に伝わることから起きる。図 17. 1 および図 17. 2 に通風中の組立式天秤の温度変化の様子を示す。この場合の温度の測定は、集合胴温度 T_O 、天秤外筒前部温度 T_{FO} 、天秤外筒後部温度 T_{RO} 、天秤内筒 後部温度 T_{RI} について行なった。天秤温度の測定位置は図 3 に示した通りである。各温度素子の示す温度は図 3

に示す位置の空間の温度である。図 17. 1 および図 17. 2 の右下は、それぞれの通風時における零点移動量である。

天秤内の温度変化は、これらの図から分る様に集合胴温度変化に対して時間遅れがある。また、図に示す様に、天秤内部においても天秤外筒よりも内筒の、天秤前方よりも後方の、温度変化に遅れのあることが分る。従って、歪ゲージの温度変化も、天秤温度が示す変化と異なると思われる。また、測定された天秤内温度も、組立式天秤では歪ゲージを貼付した検出素子に近接した空間の温度であり、一体構造式天秤では天秤自身の温度ではあるが、歪ゲージ位置とは離れているから、何れも歪ゲージの温度を表わすものではなく、更に、各素子で歪ゲージブリッジを構成する 4 枚の歪ゲージ位置は、離れた場所に貼られているからそれぞれの歪ゲージの温度は当然異なっており、歪ゲージブリッジの温度という概念そのものも定義できなくなる。また、歪ゲージの温度を知るために、温度センサーを歪ゲージに近接した場所に貼付するには、温度センサーの形状が小さく、しかもリード線の剛性が弱いものでなければならない。しかし、今のところ、余り良い温度セン

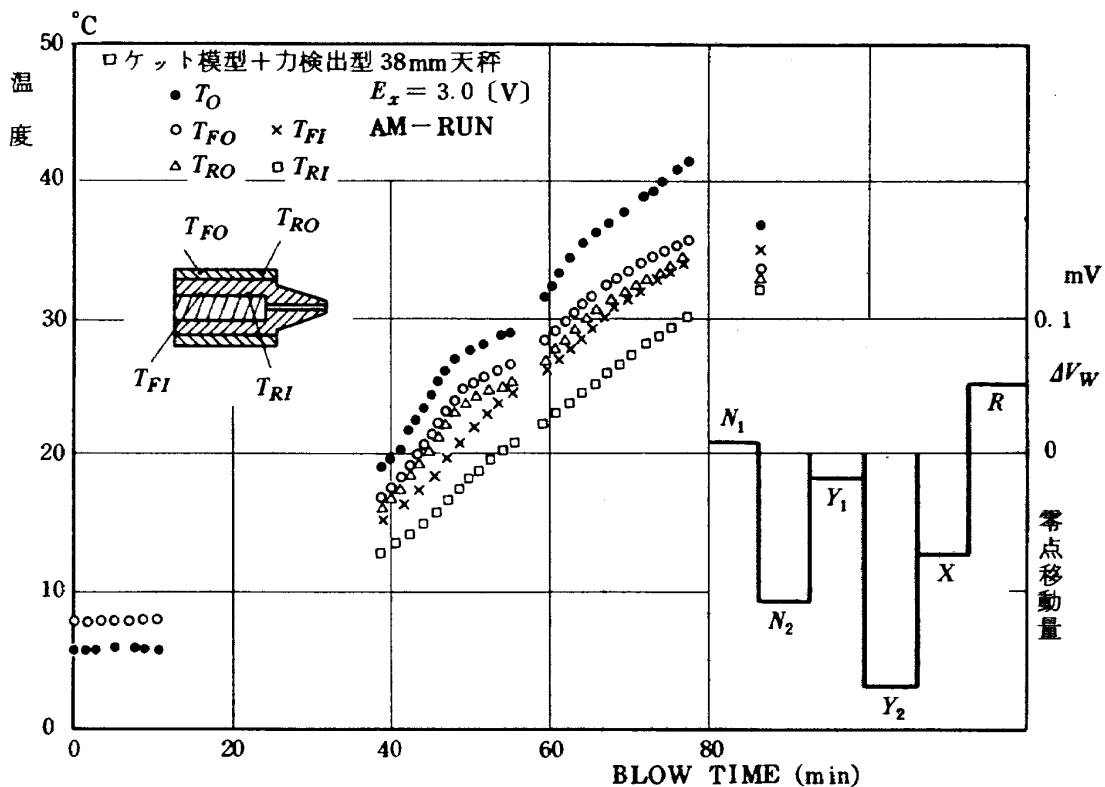


図 17. 1 通風中の天秤内部温度変化 (1)

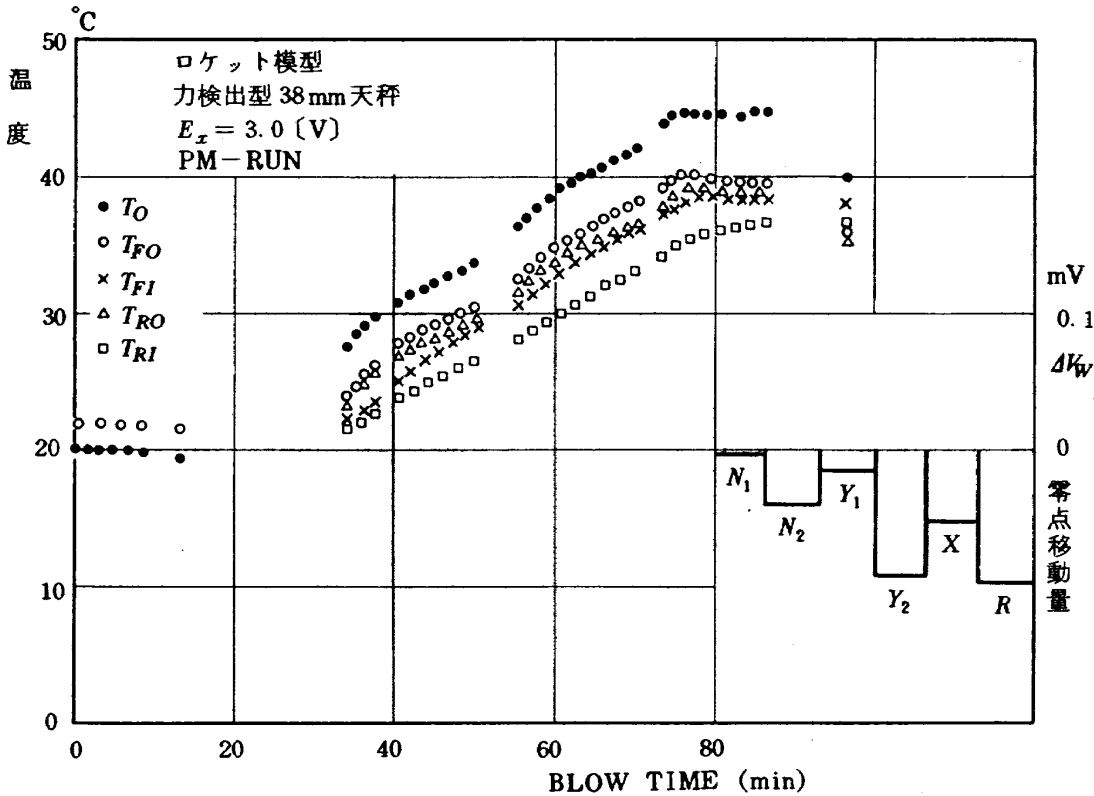


図17.2 通風中の天秤内部温度変化(2)

サーが見付からない。上述の条件に合わない温度センサーを歪ゲージ近傍に貼付すると、天秤出力の感度低下や直線性を損なったり、相互干渉量の再現性に悪影響を及ぼすことが考えられる。

この様に、歪ゲージの零点移動と温度変化を一義的に関連付けようとするのは難しい。

5.1.2 湿度の影響

歪ゲージ周辺の湿度変化も零点移動に関係する。歪ゲージ素線を支える母材と、これを受感素子に貼付するために用いた接着剤などが吸湿により膨潤する時、逆に乾燥により収縮する時には、ゲージ素線に影響を与える。また、著しい湿気により接着剤の強度、弾性係数の低下はクリープ現象の原因となる。これらの材料力学的な原因に加えて、電気的にも母材や接着層の吸湿は、その絶縁抵抗を低下させ、ゲージ抵抗と並列に抵抗体が存在することとなるから、見かけの歪出力となって現われる。

定温、無歪状態で純粋に湿度変化のみを与えて零点移動量を調べたことはないが、極めて零点移動量の少ない天秤について、夏期の高湿度期をはさんだ前後の6月と9月に試験した零点移動量の比較を図18に示す。9月の移動量が大きい、6月と9月で

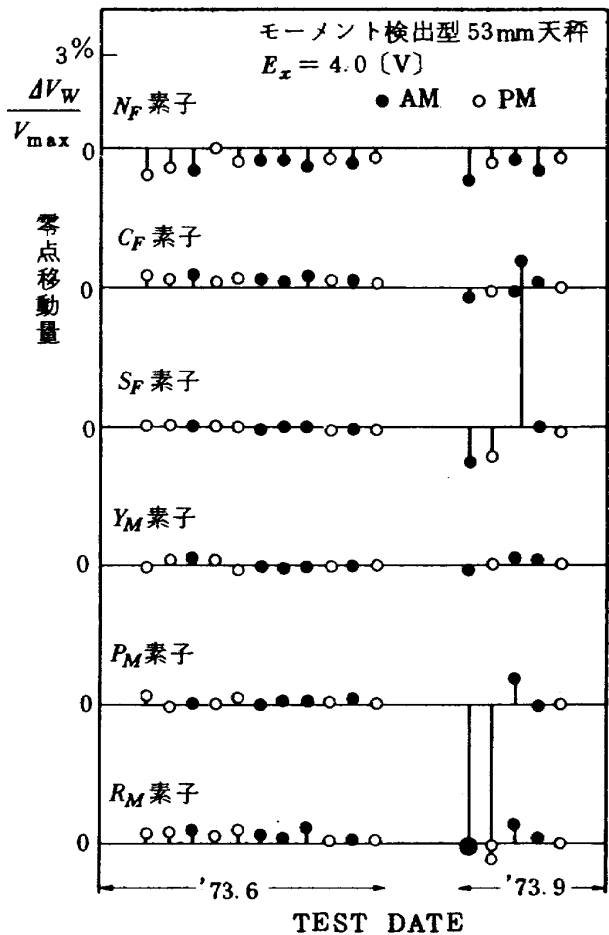


図18 6月風試と9月風試の零点移動の違い

は風胴内集合胴の温度変化は、ほぼ同程度なので7月と8月の間の保存期間中での湿度の影響を受けて、データに明らかな差を生じたものと思われる。このように不安定な9月の零点移動の現象は、天秤の保管がデシケータ等の乾燥容器内でなされていれば、6月の零点移動量の結果から見て、避けられたのではないかと考えられる。

受感素子に接着した歪ゲージの上面は、機械的な保護と防湿を兼ねて、合成樹脂又はゴム系接着剤などでコーティングしてある。接着ゲージの水分や、溶剤の乾燥除去が不完全の状態でもコーティングすると、内部に残留した水分の影響により不具合が生じる。また、コーティング層にヒビ割れを生じたり、リード線部分に細隙が残る時は、外部からの湿気により上記の場合と同じように絶縁抵抗を低下させる。

遷音速風胴内は露点温度が -60°C (98 kpa abs) 程度と非常に湿度の低い乾燥空気で満たしてある。通常の大気中で長期間保管していた天秤を風胴内で使用する時、歪ゲージのコーティングに欠陥があると、時間の経過と風胴内の温度上昇、圧力低下などの変化も加わって、歪ゲージの被覆面だけでなく、母材や接着層にも影響を与えるものと思われる。逆に、天秤が風胴内に保管されていても、週に何回かは模型整備のために測定部は開かれるから、湿気が多い大気に曝されて、その都度、吸湿・乾燥を繰り返す。

このような湿度の影響は、通常の通風試験の結果にも含まれていると思われるが、図9に示した零点移動の例からは、明確な傾向を知ることは難しい。しかし、零点移動量の中に湿度による影響が含まれている事は、これまで述べた理由から明らかである。

5.1.3 圧力の影響

歪ゲージの零点移動に関係のある要因として、温度や湿度の他に圧力変化も考えられる。遷音速風胴の測定部圧力は、無風時の大気圧からマッハ数の上昇と共に低下する。圧力の変化範囲は、10~140kpa程度である。一般に、歪ゲージは圧力変化による影響を受けると云われるが、上記の様な圧力変化範囲では微少である事が知られている。従って、圧力変化を受けた時、歪ゲージ素線が伸び縮みして、零点移動する量は少ないと考えられる。但し、接着ゲ-

ジ内部に微細な空隙があったり、水分・溶剤などが残留していると、封入された形の気体が外部圧力変化に応じて膨張・収縮を繰り返し、見かけ歪を起すことは考えられる。

図19は、天秤に圧力変化を与えた時の零点移動を調べたものである。天秤を測定部抽気室に置き、抽気室全体を徐々に減圧し、その後、再び加圧を行ったもので、1サイクルの所要時間は3回共、約40分位である。減圧時間が $\frac{3}{4}$ で、加圧時間は $\frac{1}{4}$ である。この間の温度変化は、約 10°C 位である。図に示す出力は、軸力X素子のものである。1回目の零点移動が大きく、2、3回目はほぼ同じである。これらの零点移動中には、温度変化による移動分もあると思われるが、図16.2に示した様なヒステリシス現象は、この図19では小さい。

従って、この場合の零点移動は圧力変化による影響と考えても良いと思われる。この様な現象が起こると、通風中の風速変更に伴う圧力変化によって、零点移動を生ずることになり、模型に掛かる真の空気力の測定に大きな障害となる。この天秤は、歪ゲージの接着部に不具合があったと思われるその後分解

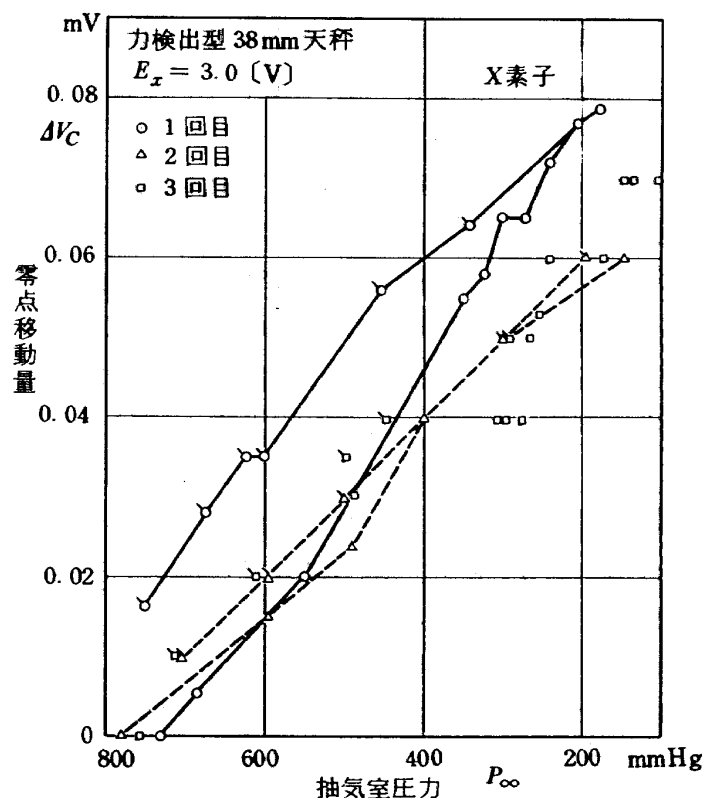


図19 抽気室圧力変化による軸力の零点移動

し、ゲージの貼換え修理を施した結果、上述の様な現象は解消した。

図19に示した場合は、極端な例であったが、程度の違いはあっても、この種の障害が全く無いとは限らない。従って、天秤の性能を検討する時、荷重と出力の関係、温度・湿度の影響と共に、圧力の影響も考慮する必要がある。

5.2 機械的な原因による零点移動

歪ゲージの見かけの出力が歪ゲージ自体に起因する零点移動以外に機械的な変形、ズレ等による履歴現象や非直線的現象による誤差を含むことが考えられる。

5.2.1 模型と天秤、天秤と支持装置

空気力を受ける模型は、図20に示す様に支持装置に取付けられた天秤に固定される。

従って、模型と天秤、天秤と支持部分の結合部にガタがあったり、模型の重量、空気力などの外力によって結合部がズレたりすれば、通風実験時の天秤の取付状態が変わり、天秤出力も最初の値と異なることとなる。

風洞実験時はもとより、天秤較正時に、これらの構造部材に対して弾性限界を越えるような外力を加えることはなく、また、天秤を取付ける箇所の形状および構造は入念に設計・加工されており、通風実験前の荷重試験や実験中の通風前後の点検結果からも、こうした天秤取付部の機械的不備により、零点移動を生ずることは、通常の場合起こりにくい。但

し、極くまれに実験中の模型の一部が天秤取付部以外の箇所でも、支持固定部と僅かに接触する事例もある。この時は、天秤の零点移動と類似した現象を呈するので見誤ることもあるが、詳細にその様相を眺める時、空気力の大小や、その正負の方向と関連することから、模型の不備を見出すことが出来る。

5.2.2 天秤の構造によるもの

天秤の構造・形状は、測定対象と取付場所により様々なものがあるが、内挿天秤の場合には一体構造の削り出し天秤と、組立式の天秤があることは前述の通りである。これら天秤構成部材が実験中に比較的大きな（勿論、天秤容量以内であっても）繰返し応力を受けて、加工歪や組立時の残留歪が緩和したり、組立部相互のスベリやズレを生ずることも考えられる。更に外力による影響だけでなく、天秤の温度変化から天秤構造部材が熱膨張・収縮を繰り返す事により、実験前に存在した歪が変化して、零点移動をするということもありうる。天秤の構造が複雑な力検出型天秤の方が構造が簡単なモーメント検出型に比べて、上述の不安定な現象に対して不利である。図21に力検出型天秤の垂直力および横力の受感素子の詳細を示す。受感素子は、図の様に内筒と外筒の間に面で接触し、ネジで結合する構造である。模型に掛かった空気力は外筒に働き、受感素子の外筒との接触面や外筒と結合したネジによって、スティングに固定された内筒との間で、受感素子は引張り、圧縮の力を感知する。他の受感素子も、同じ様な力

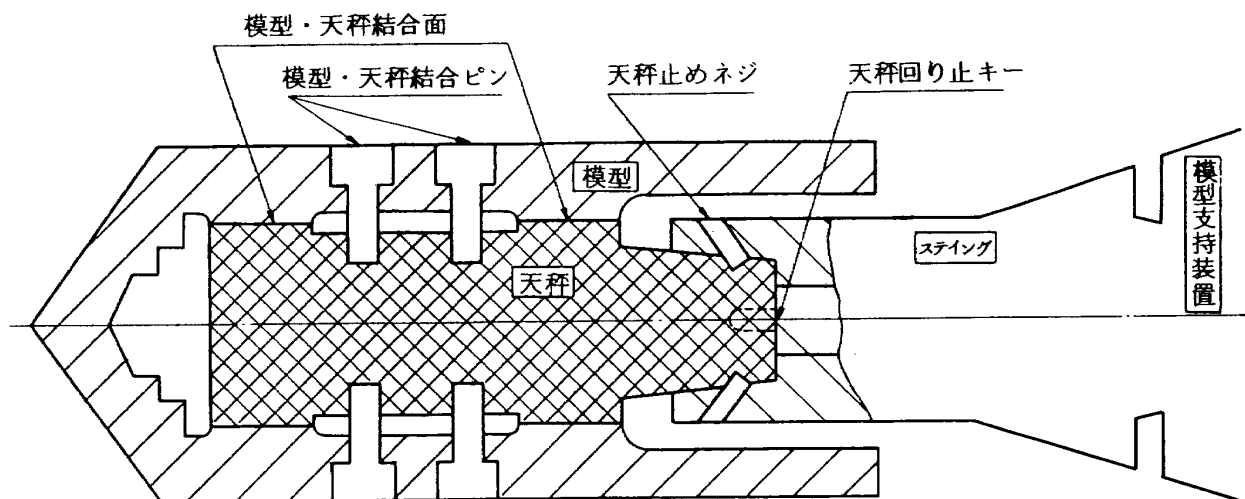


図20 模型とりつけ詳細

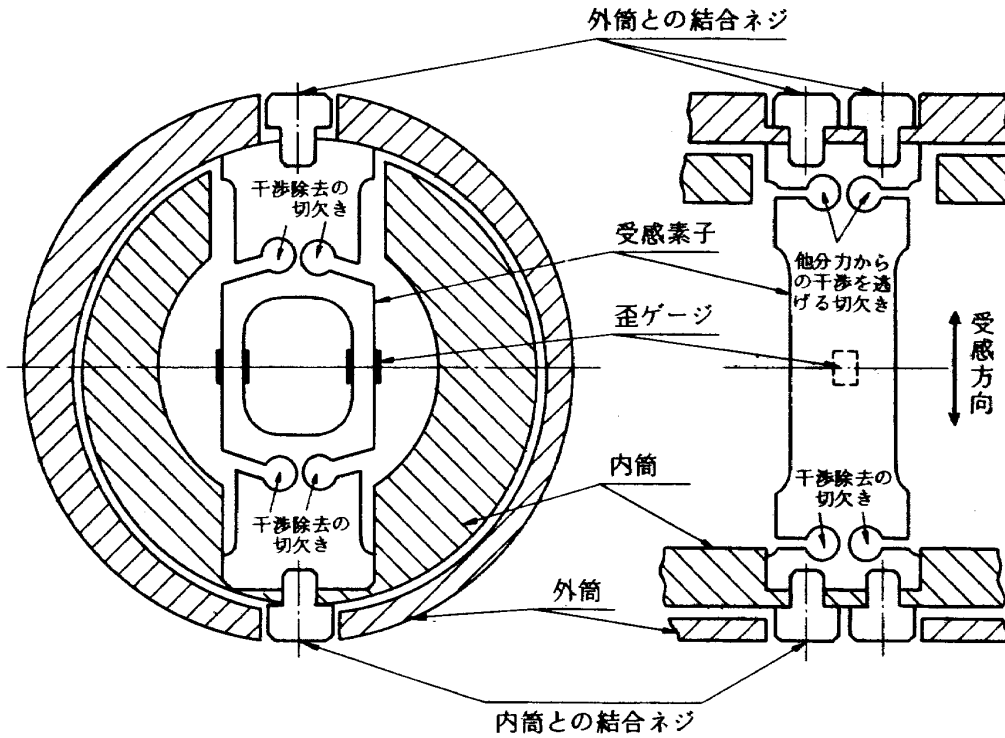


図21 力検出型天秤内部詳細

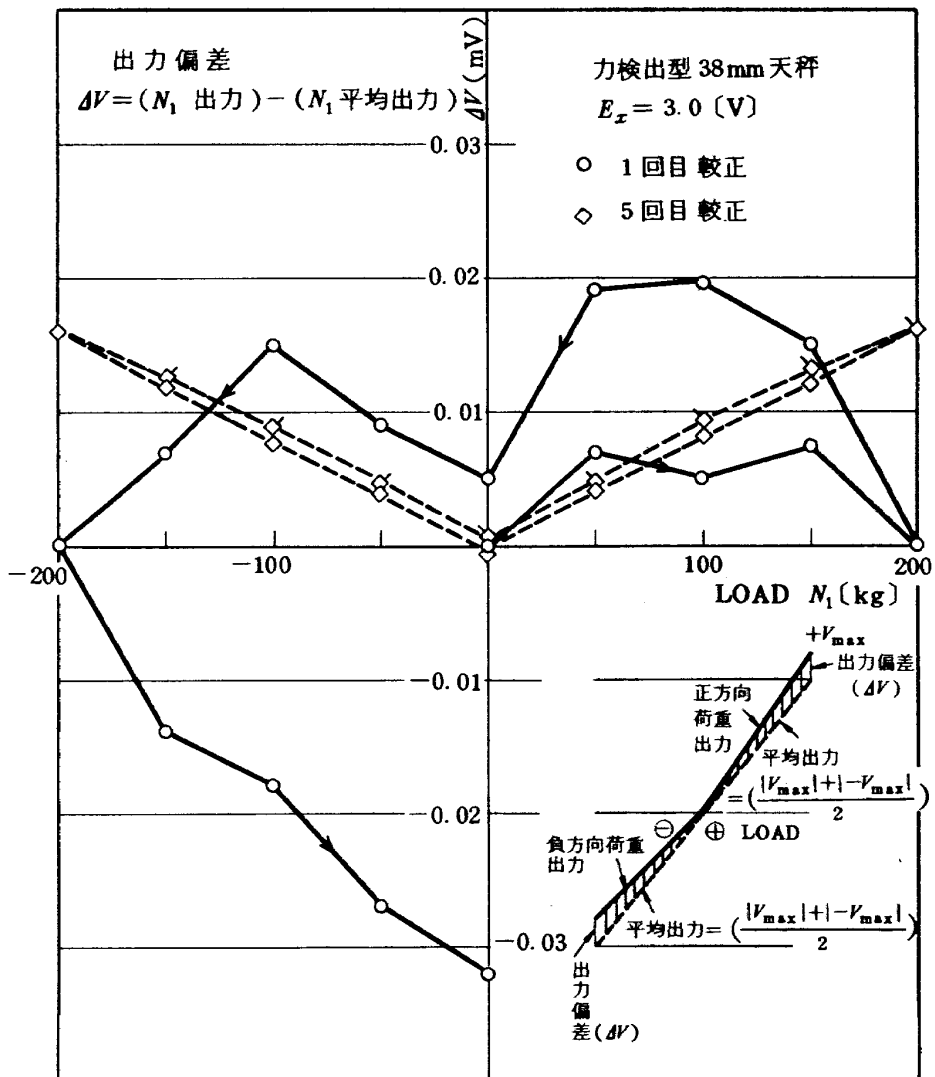


図22 天秤出力の再現性

の伝達方法である。

製造直後または分解修理後の組立式天秤の荷重較正試験をすると、天秤出力のヒステリシス現象が大きいことがあり、これが零点移動となって現われる事がある。図22に天秤較正結果の例を示す。これは、 N_1 素子に荷重を掛けた時の N_1 素子の出力を表わしたもので、横軸は荷重kg、縦軸は出力偏差mVである。出力偏差は、右下に示す様に出力から、正、負方向荷重時の最大出力を平均し、各荷重に比例配分した値を差引いたものである。分解修理後の出力偏差は、図の実線の様に再現性が良くない。その後、天秤容量までの負荷を繰り返し加えると、往復の出力間の一貫性が良くなり、図の破線に示す様に再現性が得られ零点移動もなくなり、天秤の出力特性は安定する。また、数ヶ月以上経過した後も、その特性は変わらない。繰り返し負荷を掛けることで、図21に示した様な天秤受感素子の結合部が徐々に矯正されて、出力特性が安定し、再現性も良くなる。

この様に組立式天秤においては、組立初期の機械的不安定が存在することは事実であり、結合部のなじみ具合が若干変化することは避けられない。更に、新たに貼付した歪ゲージ自体の電気的な特性変化もありこれらが競合して、不安定性が表面化するものと思われる。

上述の天秤構造による不安定性を解消するためには、組立部品のない形式を考えることが必要である。そのため、天秤自体の構造は、鋼材から一体削り出し加工を行ない、組立および結合部分を排除する。この様な一体構造型の天秤は、軸力素子に対する干渉を避けるため、製作上は内部切削箇所があるなどして複雑にはなるが、風洞試験で使用する場合の再現性は非常に優れており、又、分解能も非常に良い。図23.1は、この一体構造天秤を用いて行なった実験結果の例である。輸送機形状模型の主翼にエンジンナセルを結合するパイロンの形状を変えて、パイロンの特性を比較するための実験である。図に示すように、この2種類のパイロンの断面形状の違いによる抗力係数 C_D の差は、0.0005以下であるが、この差は再現性試験や、そのデータに基づき統計的検討によって、有意差であると結論された。⁽¹⁰⁾この模型全体が受ける抗力は、一様流マッハ数0.8の時に揚力

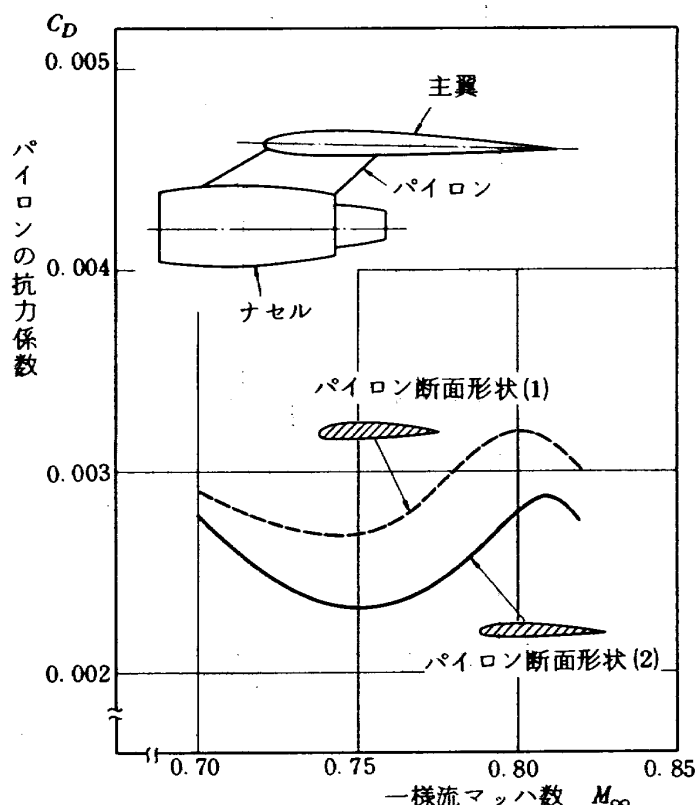


図23.1 一体構造天秤による測定結果の例

係数が零となる模型姿勢において、抗力係数にして0.0178である。これは、天秤容量に対する比率に換算すると16.2%となる。パイロンの抗力は、天秤容量の3%であり、図の断面形状の違いによる抗力係数の差は、天秤容量の0.4%である。このように、模型の微少な形状変更に伴う実験結果の検討を行なう時、その検出器としての天秤性能には、厳しい精度要求がある。そのためには、零点移動が少く、再現性に優れていなければならない。これを、組立式天秤で追求することは、構造的に見ても不利であり、従って、一体構造天秤の形式とすることが望ましい。

図23.2に、一体構造天秤の干渉量を示す。縦軸は、他分力からの干渉量を各素子の最大出力の割合に換算したものである。 C_F 素子、 R_M 素子、 Y_M 素子への他分力からの干渉が大きく、例えば、 C_F 素子への横力 S_F からの干渉は14%にも及んでいる。この一体構造天秤は、組立式天秤と比べると、他素子からの干渉量は大きく、干渉の性質も直線的でなく、2次曲線であったり、複合荷重の影響も考慮しなければならない場合もある。例えば、BOEING 天秤

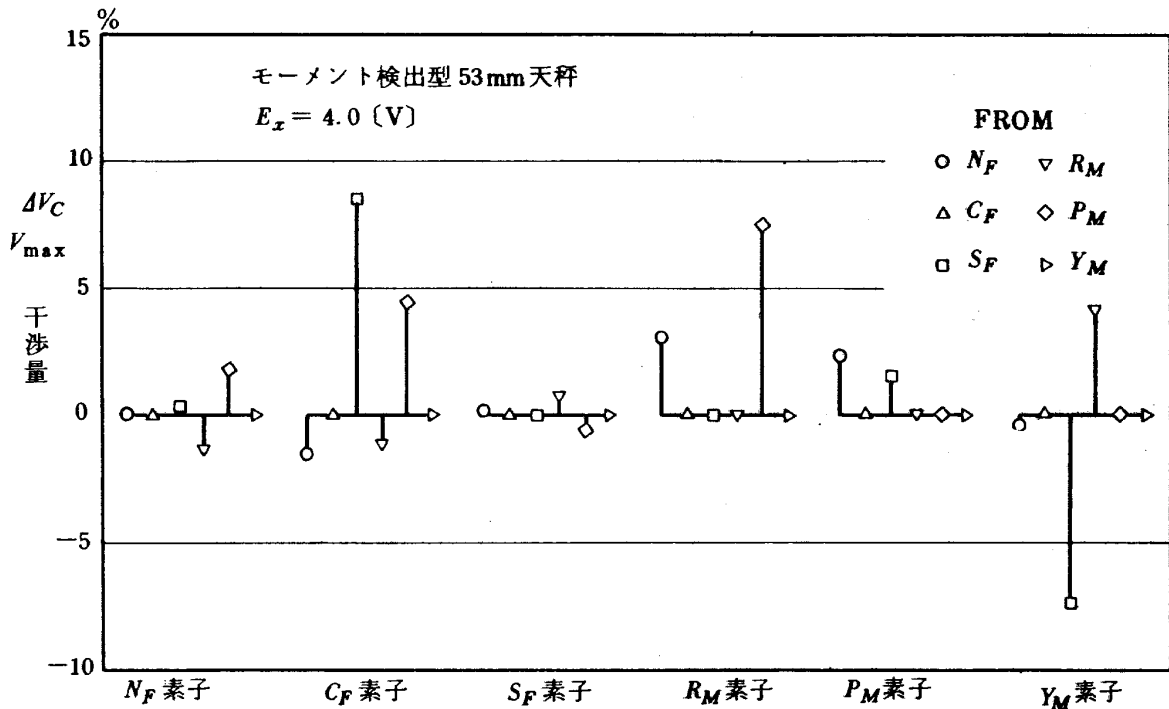


図 23.2 一体構造天秤の干渉量

では、1 素子に対する干渉補正項は27項にも及ぶ。これらは、コンピュータの発達で容易に補正できるようになったので、構造的に再現性が優れている性質、温度補償の容易なこと、歪ゲージの貼換えの容易なこと等の保守の点からも一体構造天秤が有利であると云える。

6. 天秤歪ゲージの零点移動 変化量の修正法

遷音速風洞実験では、天秤出力は前章までに述べた様に、実験に伴う温度、湿度およびその他の影響を受け、零点移動を生じる。

通風中の真の空気力を知るためには、見かけの出力から、この零点移動量を差引かなければならない。しかし、通風中は常に天秤には空気力が作用して天秤を無負荷状態にして、零点移動量を調べることは出来ない。又、零点移動は前述の様に規則性および再現性に乏しいが、遷音速風洞においては次の様な方法を採用し、通風データの修正を行なっている。

通風中に測定した天秤出力は、Nデータ測定時刻からRデータ測定時刻までの経過時間、またはNデータ測定時とRデータ測定時の間の集合胴や天秤周辺の温度変化と零点移動量を関連づけて、以下に述

べる様な方法で修正を行なっている。

6.1 経過時間による修正

NデータからRデータまでの零点移動は、この間の経過時間に比例すると仮定する。従って、一実験において生じた零点移動量と実験の所要時間（NデータからRデータ収録時までの経過時間）から、単位時間当りの零点移動量を求め、計測データはすべてNデータ収録時からの経過時間に対する零点移動量を推定し補正する。図24.1にその方法を示す。実線が生データで破線が修正後のデータである。斜線部分が実験中に生じた零点移動量とみなし、経過時間に対応して生データから差引く。

零点移動が時間に依存するというのは、不合理のようであるが、歪ゲージの励起電流による自己加熱であるとか、集合胴温度の上昇が模型に内蔵した天秤歪ゲージまで達するには長時間かかり、また、これらの歪ゲージに対する影響が漸進的に及ぶものとすれば、それなりの理由付けとなる。

図24.2は零点修正前の生データの例を示す。横軸に一樣流マッハ数を取り、縦軸には軸力の出力を天秤容量に対する比率で示してある。模型の形状は同一形状で3回（3 RUN）通風した時のデータであるが、本来一致すべき出力に最大4%位の差が生じている。この生データに対して、上述の様な零点移動

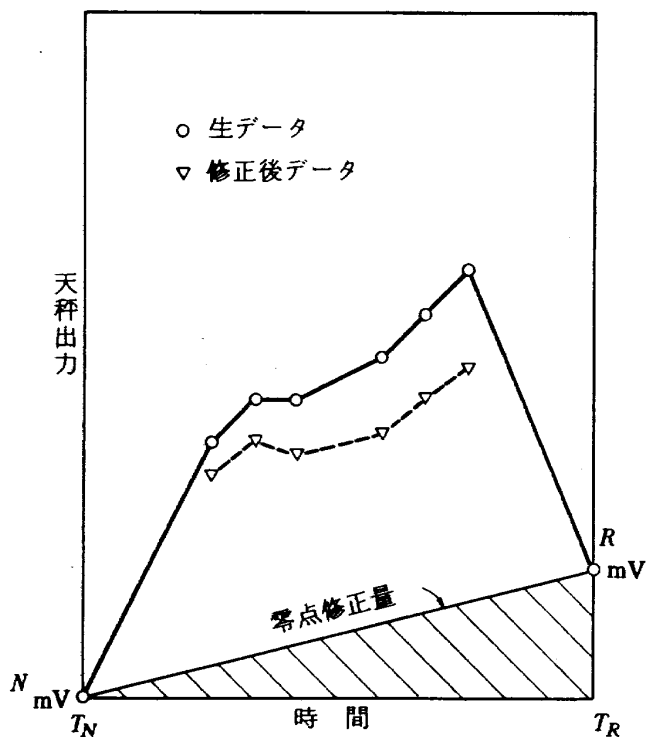


図24.1 経過時間による修正法

量の修正をした風洞試験データを図24.3に示す。修正後のデータを見ると、3 RUN の出力は1%以下の範囲内にあり、ほぼ良い一致を示し、実用上差支えない程度まで零点移動量は除去されていると云える。

単純な修正法であるので、多くの風洞実験データの零点修正に利用している。しかし、詳細に検討すると RUN-1 のデータが、風速の増加と共に、RUN-3 のデータからズレていく傾向がある。零点移動量の小さい RUN-3 のデータが正しい値を示しているとする、RUN-1 の零点移動量の修正がまだ不足している。これは、零点移動を経過時間で修正する方法の限界を示し、他にも支配的要因が存在することが分る。

6.2 温度変化による修正

天秤歪ゲージの零点移動が温度変化と関連することは、既に述べた通りである。従って、天秤内部の

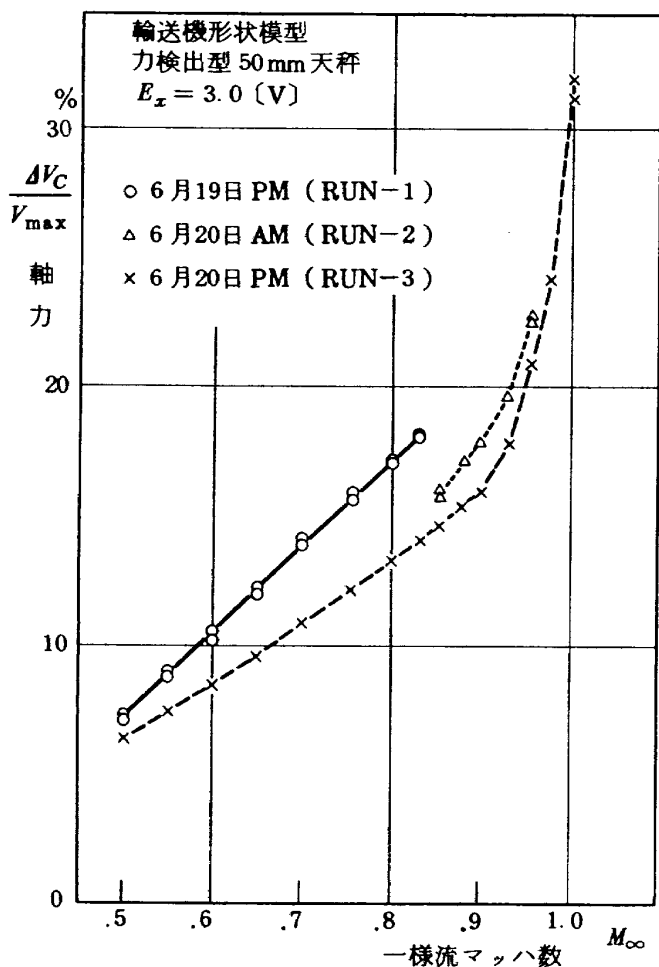


図24.2 風試時の軸力の生データ

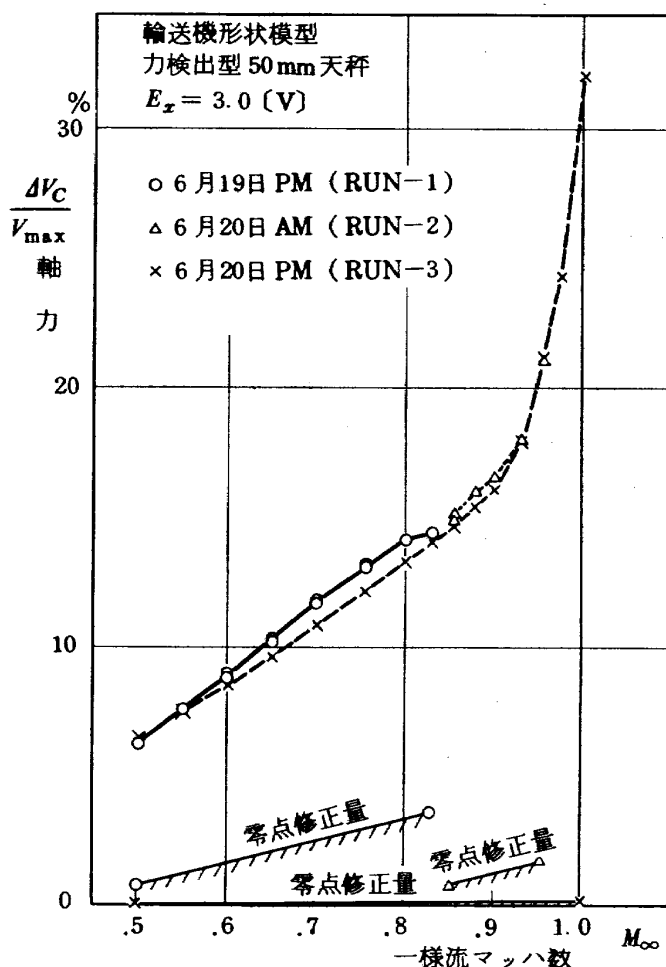


図24.3 時間補正により軸力データを修正

温度または集合胴気流温度を手掛りとして修正する方法が考えられる。その方法は図25.1に示すが前述の経過時間による方法と同様に、NデータからRデータまでの零点移動量と、この間の温度差から温度変化に対する零点移動量を定め、通風中の零点移動量を推定する。この場合、指標とする温度の選択は、図17に示した様に時間遅れがあるので難しいが、天秤内温度の平均値を用いたり、零点移動量の大きい素子に近い場所で測定した温度を用いたりする。

図25.2は、図24.2に示した生データに対して、温度による方法で零点移動量を修正した結果を示す。天秤周辺の温度は、通風時の経過時間と共に上昇し、同じ日の実験でも1ラン目の方が変化が大きい。図に示した実験では、風速の低い領域から実験を行なったので、1ラン目の実験データはこの領域での修正が過大となり、他データとの一致が良くない。図24.3に示した経過時間により推定した結果の方が、より妥当とも見られる。

6.3 基準データの変更

通風開始後、集合胴温度の上昇が緩やかになった時点から測定を始めれば、測定中の零点移動は僅かであろうとの考えから、Nデータを無視し、Rデータを零点の基準に変更して、零点移動量を修正する方法もある。

一実験の内容は、一定マッハ数を保持した状態で、模型姿勢を段階的に変えてデータ収録を行なう。これを低マッハ数からいくつか繰り返す。最終マッハ数の測定が済めば、通常は通風を停止してRデータを測定するが、この場合には、標準的な模型姿勢（例えば迎角0度）に設定したまま、それ以前の各測定マッハ数におけるデータを再度収録する。これをマッハ数スイープデータと呼ぶ。そして、同一迎角、同一マッハ数のデータを比較して、両者に差があれば、その差を零点の修正量として、同一マッハ数のデータ全てに修正を施す。Rデータを基準として、この方法で零点移動量を修正する処理方法を図26に示す。この方法では、通風時に測定したデータの全てからRデータの零点を差引き、更に、同一迎角、同一マッハ数のデータを比較して両者の差を求め、その差を同一マッハ数のデータの全てに適用して、修正を行なうものである。更に徹底して、

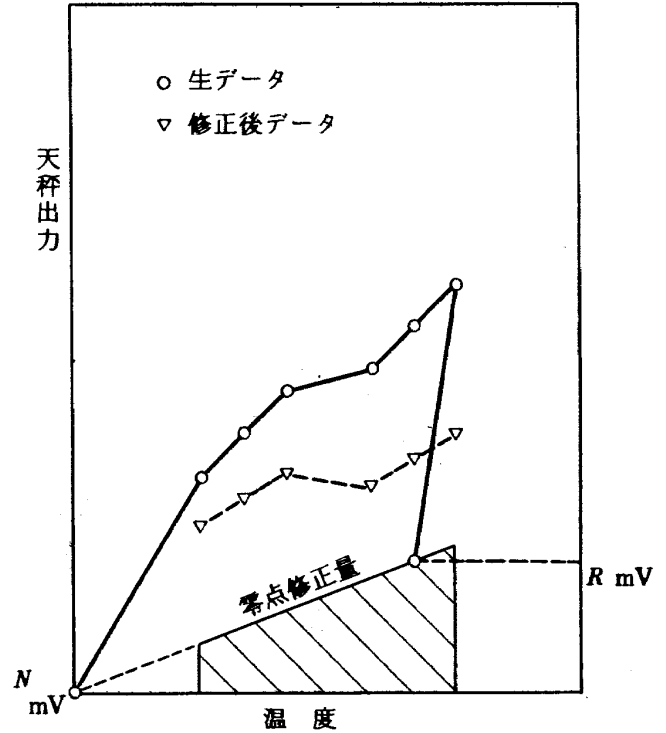


図25.1 温度による修正法

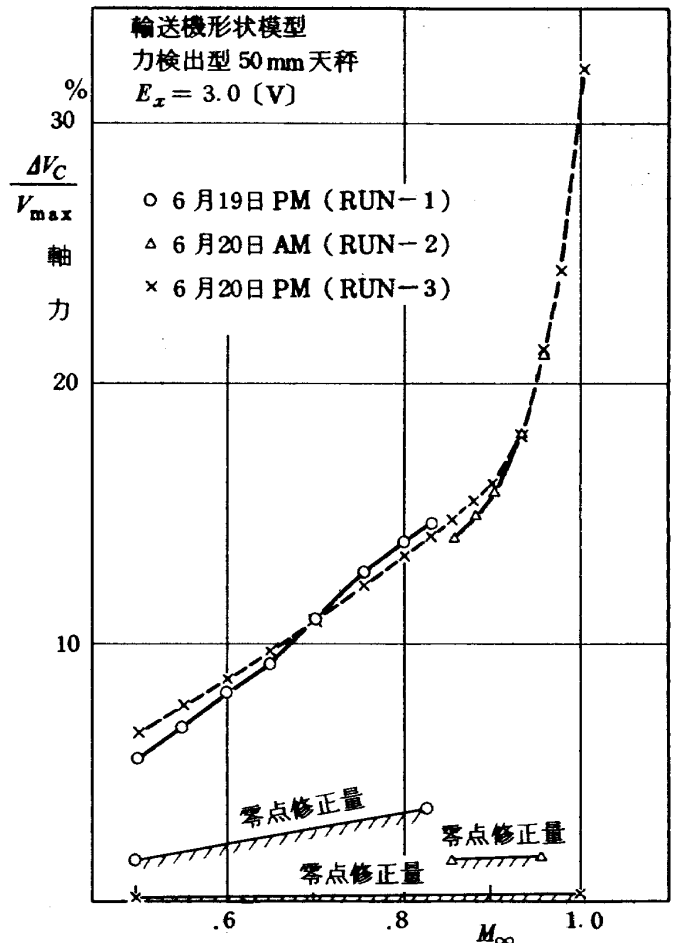


図25.2 温度補正により軸力データを修正

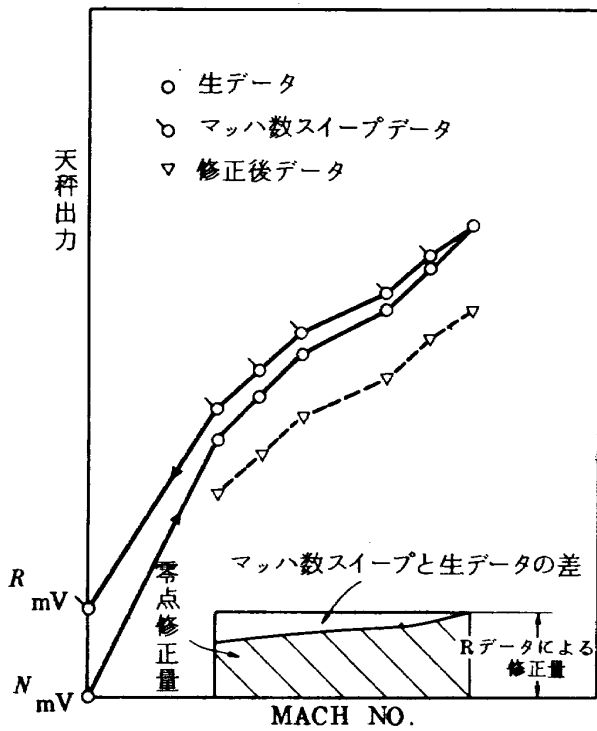


図26 マッハ数スイープ補正の方法 (Rデータ基準)

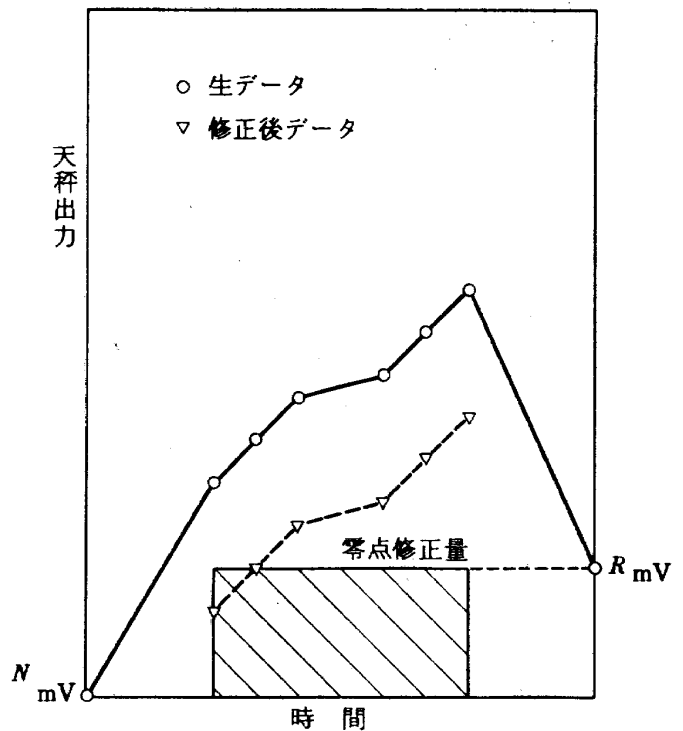


図27 Rデータ基準の補正方法

通風時の時々刻々の零点移動を全く考慮せず、Rデータ基準による修正だけを行なう方法もあり、この方法を図27に示す。これは、図26の方法の省略形である。

また、経過時間による修正を全てのデータに施

した後、上述のマッハ数スイープデータとの差を求め、各マッハ数毎に再修正を行なう方法もある。図28.1は経過時間による修正だけを施したものである。RUN-1とRUN-2の模型形状は同一であるが、2RUNの間的一致は良くない。この場合にも、上述

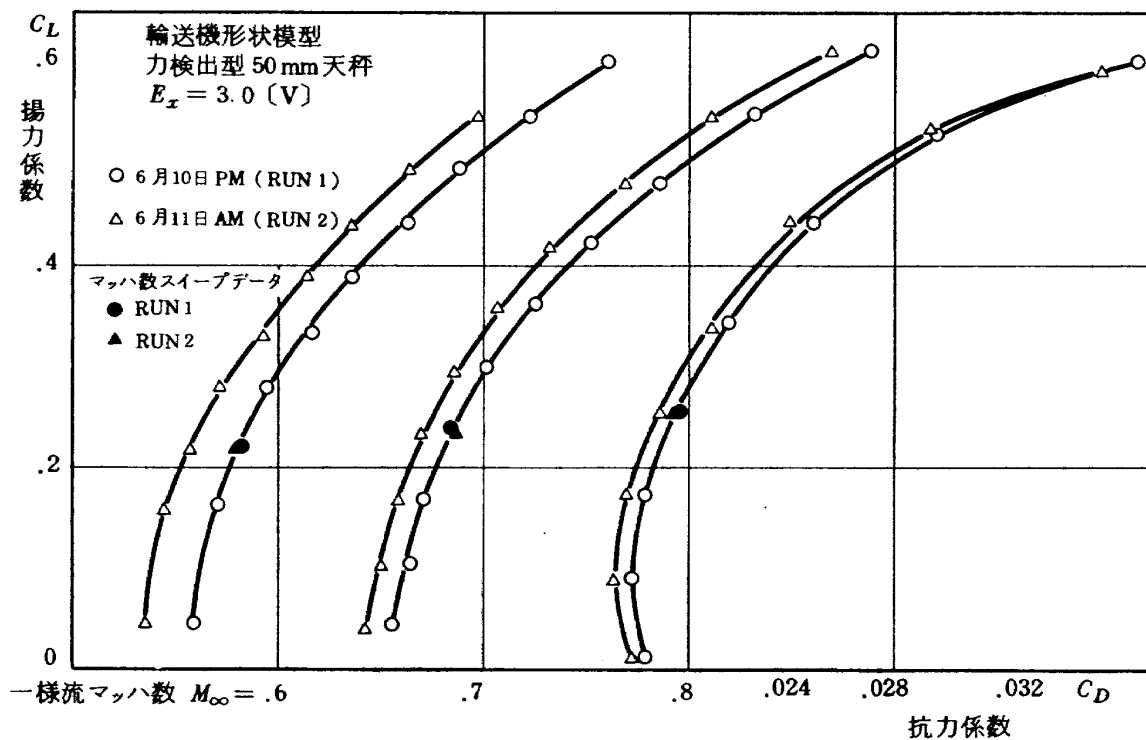


図28.1 時間補正だけの場合

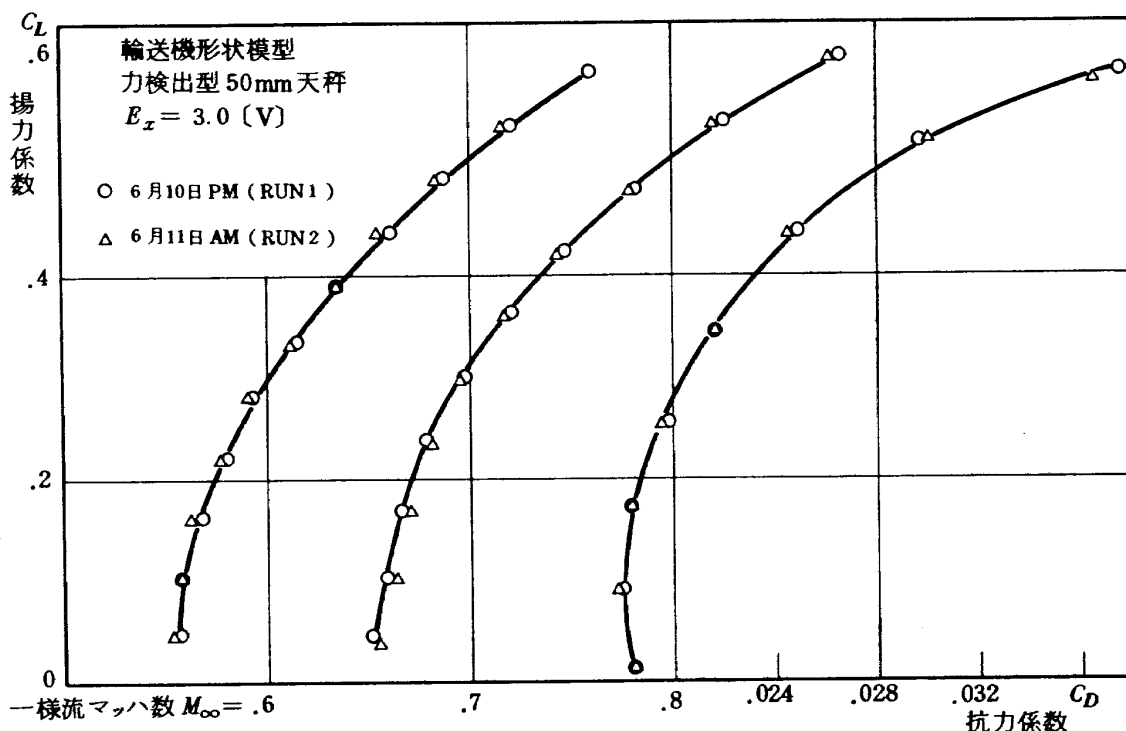


図 28.2 時間補正にマッハ数スイープ補正をした場合

のマッハ数スイープデータを測定したが、同図の●と▲に示されるように、2 RUN の間の一致は良い。そこで、各マッハ数毎に抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L について、模型迎角 α を変化させて測定したデータの α が 0° における値と、マッハ数スイープによるデータ間の差を求め、その差を修正した。図 28.2 に修正した結果を示す。2 RUN のデータの一致は良好であり、このようなマッハ数スイープを使用した方法の有効性を示す。図 28.1 に示したような、2 RUN の実験値の不一致は、時間だけによる修正法ではこの場合には不十分であったことを示している。

亜音速での実験データは、動圧が低く、空気力も小さいから天秤歪ゲージ出力も小さい。従って、零点移動量の多少が処理結果に大きく影響する。そこで実験を高マッハ数から始めて、低マッハ数の測定を最後に行ない、なるべく R データの測定との時間差を縮める方法もある。こうすると、推定した零点移動量の過不足に基づく相対的誤差を少なくすることができ、望ましい実験の進め方である。ただし、通風時間が長くなり、常時実施することは出来ない。米国の或風洞では、模型の整備が終ると、その実験で計測する最大マッハ数までの予備通風を行ない、風洞、模型および天秤などを予熱した後、停止させ、

N データを計測してから、改めて通風時の測定を行っている。こうすれば、歪ゲージの零点移動量を抑えることが出来よう。この予備通風の所要時間は、約 3 分程度といわれるが、当所の遷音速風洞で同様な予備通風を行なうと、遷音速領域 ($M < 1$) までとしても約 40 分程度の通風時間を要するので実行出来ない。

天秤歪ゲージの零点移動を修正する方法として、N データを基準として、経過時間または温度差によるものと、R データを基準として処理したものを比較すると、実験の終期、つまり高マッハ数のデータはほぼ一致する値となる。しかし、低マッハ数のデータには、零点移動の修正量によって、若干の差異を生ずる。

零点移動量が測定する空気力に比べて小さければ、測定誤差は減少する。天秤の零点移動が避けられないとすれば、測定空気力による出力を増加する事が望ましい。ところが、天秤の汎用性を考えて、天秤容量が大きくなっているため現実には図 29 に示す様に、測定空気力は天秤容量の 20% 以下となる様な事が多く、このような現状では修正法の良否が重要である。

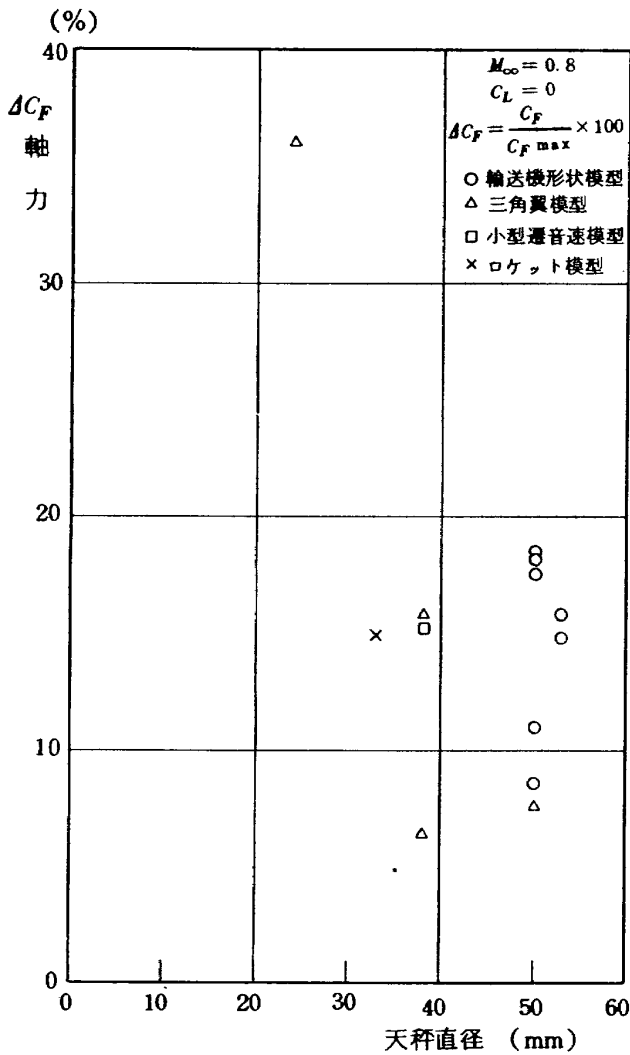


図29 天秤容量に占める空気力の大きさ

7. まとめ

2 m × 2 m 遷音速風洞に使用する内挿式天秤の歪ゲージ出力の零点移動について考察した。

(1) 零点移動はすべての天秤に見られる。同一の天秤であっても、零点移動に再現性がない。

(2) この天秤出力に含まれる零点移動による見かけの出力は、実験精度に対して

- i) 空気力が天秤容量に近い場合は無視できる。
- ii) 空気力が天秤容量に対して少ない場合は、データの信頼性に関係する。

(3) 零点移動の発生する原因を考えると、機械的なものと、歪ゲージ自身の特性によるものが複雑に影響を与えている。

- i) 歪ゲージの特性として、零点移動は温度変化に大きく依存する。風洞内の温度は、実験の都度大きく変動し、零点移動の主要な原因となっ

ている。

- ii) 歪ゲージの零点移動は湿度変化も関係する。風洞実験の通風・停止のサイクルに伴い、天秤が乾燥空気と湿気の高い大気に交互に曝されることも零点移動の原因である。
- iii) 歪ゲージの零点移動は圧力変化も関係する。通風中の風速変化に伴う圧力変化も、零点移動の原因となることがある。
- iv) 供試模型、天秤および支持装置などの機械系によるガタ・ズレなども零点移動の原因となる。
- v) 天秤構造により零点移動に差がある。一体構造天秤は少く、組立式天秤は大きく、また、極めて不安定である。

(4) 現用天秤に見られる零点移動を除去するために 2 m × 2 m 遷音速風洞での実験値は、便宜的な代表値と関連させて、零点移動量の修正を行っている。その方法には、次の3つがあり、又、それらの組み合わせによっても行なう。

- i) 一実験で発生した零点移動量を経過時間に比例すると仮定する。
- ii) 実験中の零点移動量を代表点の温度変化と関連させて修正する。
- iii) 実験終了後を零点と定め、実験終了間際に実験中のデータを同一条件（模型姿勢、マッハ数）でポイントチェックし、両者に差があれば、その差を再修正する。

これらの方法による零点移動の修正量は、iii)の場合が一番良いが、運転時間の制約もあり、測定精度について特に厳しい要求がない場合には、経過時間による方法を多用している。

(5) 従来の組立式天秤は、当所の遷音速風洞で使用するには難点が多い。従って、特性の優れている一体構造型の天秤とし、歪ゲージやコーティング剤および接着剤等、技術と材質の向上を図ることが必要である。

(6) 精度向上の実験上の手段としては、実験目的に則して、測定する空気力に適した天秤容量のものを使用する。そのため、同一形状で異なった天秤容量の天秤を多数、保有する必要がある。

参 考 文 献

- (1) 鈴木弘一, 竹内理: 風洞模型の精度と試験結果について, 航空宇宙技術研究所報告 TR-518 (1977)。
- (2) T.D. Reed etc ; Calibration of Transonic and Supersonic Wind Tunnels, NASA CR 2920 (1977)。
- (3) 航空技術研究所; 航空技術研究所 2 m × 2 m 遷音速風洞の計画と構造, 航空技術研究所報告 TR-25 (1962)。
- (4) TASK CORP; Supplementary Instruction manual, TASK CORP. M-237 (1957)。
- (5) 金成正好, 北出大三; 風洞天秤の試作, 航空宇宙技術研究所資料, TM-179 (1970)。
- (6) J.M. Curry ; Unified data reduction methods for experimental Force measurements, Boeing D6-22341 (1970)。
- (7) 竹内理, 鈴木弘一, 小国保男; 遷音速風洞のデータ処理システム, 航空宇宙技術研究所ニュース No.198 (1975)。
- (8) Statham Instruments ; Differential Pressure Transducer, Bulletin DD2008(1968)。
- (9) 渡辺理; 歪ゲージとその応用, 日刊工業新聞社 (1978)。
- (10) CTDC ; Nacelle Location Parameter TEST, CTDC CTA-9068 (1976)。

航空宇宙技術研究所資料432号

昭和56年4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 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17
