

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-862

航技研二次元風洞の気流特性について(Ⅳ)

— 二次元風洞気流制御 —

三 輪 等 ・ 佐 藤 衛  
小 国 保 男 ・ 神 田 宏

1985年6月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. まえがき	1
2. 記 号	2
3. 制御試験方法	3
3.1 二次元風洞制御方法の概要	3
3.2 データ収集方法	5
3.3 検出精度	7
3.4 制御精度の評価	9
4. 高レイノルズ数高速試験	10
4.1 集合胴圧力制御	11
4.1.1 亜音速試験	12
4.1.2 遷音速試験	15
4.2 マッハ数制御	18
4.2.1 亜音速におけるマッハ数制御	18
4.2.2 遷音速におけるマッハ数制御	23
4.3 制御精度	27
4.4 プリチャージ起動方式と普通起動方式の比較	30
4.5 模型応力	34
4.6 シミュレーションとの比較	36
5. 低レイノルズ数高速試験	36
5.1 調圧弁流量特性	37
5.2 マッハ数制御	39
5.3 制御精度	43
6. 低速試験	48
6.1 低速試験における集合胴圧力制御モデル	48
6.2 低レイノルズ数低速試験	50
6.3 高レイノルズ数低速試験	53
6.4 限界低レイノルズ数試験	54
7. 計測時間	55
8. 試験レイノルズ数範囲	58
9. ま と め	62
10. 参考文献	62
11. APPENDIX 貯気槽圧力の推定	63

# 航技研二次元風洞の気流特性について(Ⅳ)\*

## — 二次元風洞気流制御 —

三 輪 等\*\* 佐 藤 衛\*\*

小 国 保 男\*\* 神 田 宏\*\*

### Flow Quality of NAL Two-Dimensional Transonic Wind Tunnel

#### Part IV Characteristics of Flow Control

Hitoshi MIWA, Mamoru SATO, Yasuo OGUNI  
and Hiroshi KANDA

#### ABSTRACT

The result of a flow control experiment conducted at the NAL blowdown type two-dimensional transonic wind tunnel are described in this report. This tunnel can be operated over a wide pressure range to change the test Reynolds number.

The main features of the operation and control of this tunnel are the application of the precharged starting procedure for establishing high Reynolds number flow and the adoption of the closed-loop Mach number control which acts effectively in a short running time.

It was found that high Reynolds number tests can be safely conducted and the flow duration can be increased by applying the precharged starting procedure. And also the closed-loop Mach number control showed excellent Mach number repeatability within an error of  $\pm 0.001$  at each run.

An attempt to expand the operating envelope was successful with satisfying control accuracy.

#### 1. ま え が き

航技研二次元風洞は、昭和54年6月に通風を開始して以来、現在までに通風回数3500RUNを越える試験を実施してきた。まず最初に、風洞制御機能と安全性を確認するための総合試運転、測定部気流の検定試験<sup>1)</sup>を行い、その後に翼型試験<sup>2)</sup>を開始し、この試験と平行して、現在までに気流特性試験<sup>3),4)</sup>

壁干渉試験<sup>5)</sup>、風洞制御試験などの二次元風洞気流特性を明らかにする試験が行われてきた。本報告は二次元風洞制御試験結果について述べる。風洞制御試験は、表1に示すように、総合試運転を含めて全部で6回実施した。第1回目の総合試運転に続いて、第2回目の高レイノルズ数制御試験、第3回目以後は低レイノルズ数試験、低速試験である。

本風洞の制御において、他風洞にない特徴は、(a)プリチャージ起動方式<sup>6)</sup>と(b)測定部マッハ数の自動制御<sup>7)</sup>を採用したことである。本風洞制御試験の目的は、これらの風洞制御方式の性能を確認すると共

\* 昭和60年3月1日受付

\*\* 空気力学第2部

に、風洞制御系の最適調整を行うことによって測定部気流の制御精度を高い値に確立することにある。

高レイノルズ数試験においては、風洞をできるだけすみやかに起動することによって風洞起動時の安全性を確保することと定常気流の持続時間を延長させるように努めた。低レイノルズ数試験は、本風洞で試験可能なレイノルズ数範囲を拡げるために行った。低速試験は、低速における高迎角試験、フラップなどの高揚力装置付きの翼型試験などの高揚力形態における試験をできるだけ広範なレイノルズ数で試験できるようにするために行った。

制御試験結果は、広範なレイノルズ数とマッハ数の試験範囲で満足のいく気流の制御精度が得られた。本報告ではこれらの結果を示す。

## 2. 記 号

$A$	; 測定部断面積 ( $0.3\text{m}^2$ )	$G_{V1}$	; 調圧弁流量 (kg/s)
$A_{V1}$	; 調圧弁開口面積 ( $\text{m}^2$ )	$G_{V2}$	; 第2スロート弁流量 (kg/s)
$A_{V1ST}$	; 調圧弁ストローク (%)	$G_S$	; 通風流量 (7-5式)
$A_{V2}$	; 第2スロート弁開口面積 ( $\text{m}^2$ )	$G_n$	; 測定部流量 (5-2式)
$A_{V2ST}$	; 第2スロート弁ストローク (%)	$K_{PC}$	; 集合胴圧力制御調節部ゲイン
$A_{VV}$	; 抽気弁開度 (%)	$K_{pH}$	; マッハ数制御 (亜音速) 調節部ゲイン
		$K_{pE}$	; マッハ数制御 (遷音速) 調節部ゲイン
		$M$	; 測定部マッハ数
		$M_R$	; 設定マッハ数
		$M_S$	; 貯気槽内の有効使用可能空気量
		$n_T$	; ポリトロップ指数 (貯気槽内, 1.35)
		$P$	; 測定部静圧 (Pa)
		$P_L$	; プリナム室圧力
		$P_0$	; 集合胴圧力
		$P_{0R}$	; 設定集合胴圧力
		$P_D$	; 高圧導管内静圧
		$P'_D$	; 高圧導管内全圧
		$P_T$	; 貯気槽圧力
		$P_{SC(A)}$	; 整流金網差圧 (上流側)
		$P_{SC(B)}$	; 整流金網差圧 (下流側)
		$q$	; 測定部気流の動圧
		$R$	; 空気の気体定数 (287.05 J/K/kg)

表1 二次元風洞制御試験実施内容

	試験項目	試験内容	試験範囲	通風ナンバー (通風数)
1	総合試運転	制御, 計測系の調整および機能確認, 安全性確認	$P_0 = 392\text{kpa} \sim 1177\text{kpa}$ ( $4\text{kgf/cm}^2$ )( $12\text{kgf/cm}^2$ ) $M = 0.2 \sim 1.15$	1 ~ 141(141)
2	高レイノルズ数 高速試験	高レイノルズ数における集合胴圧力およびマッハ数制御試験	$P_0 = 1177\text{kpa}(12\text{kgf/cm}^2)$ $M = 0.75, 1.0$	699 ~ 754 (56)
3	低レイノルズ数 高速試験	低レイノルズ数における集合胴圧力およびマッハ数制御試験	$P_0 = 196\text{kpa}(2\text{kgf/cm}^2)$ $M = 0.5, 0.75, 1.0$	1701 ~ 1789 (89)
4	低速試験 その1 低レイノルズ数 試験	低速, 低レイノルズ数における集合胴圧力およびマッハ数制御試験	$P_0 = 196\text{kpa}(2\text{kgf/cm}^2)$ $M = 0.2$	1902 ~ 1935 (34) 1982 ~ 2017 (36)
5	低速試験 その2 高レイノルズ数 試験	低速, 高レイノルズ数における集合胴圧力およびマッハ数制御試験	$P_0 = 1569\text{kpa}(16\text{kgf/cm}^2)$ $M = 0.2$	2215 ~ 2225 (11)
6	低速限界 低レイノルズ数 試験	低速限界, 低レイノルズ数における制御精度の確認	$P_0 = 147\text{kpa}(1.5\text{kgf/cm}^2)$ $M = 0.1$	2671 ~ 2699 (29)

$Re$	; レイノルズ数 (基準長 0.25m)
$T_D$	; 高圧導管内温度
$T_0$	; 集合胴温度
$T_{IC}$	; 集合胴圧力制御調節部積分時間
$T_{I\text{II}}$	; マッハ数制御 (亜音速) 調節部積分時間
$T_{IE}$	; マッハ数制御 (遷音速) 調節部積分時間
$T_{DE}$	; マッハ数制御 (遷音速) 調節部微分時間
$t_S$	; 計測時間
$V_0$	; 集合胴体積 ( $\text{m}^3$ )
$V_T$	; 貯気槽体積 ( $\text{m}^3$ )
$\kappa$	; 空気の比熱比
$\sigma$	; 標準偏差, 応力
添字	
0	; 集合胴
L	; プリナム室
M	; 測定部マッハ数
$P_0$	; 集合胴圧力
q	; 動圧
R	; 設定値
i	; 初期状態
f	; 最終状態
$\tau$	; 気流整定状態
-	; 平均値を表す

### 3. 制御試験方法

#### 3.1 二次元風洞制御方法の概要

航技研二次元風洞は遷音速において高レイノルズ数翼型風洞試験が可能な可変圧吹出式風洞である。この風洞の制御方法については文献8)に詳しいので、ここではその概略のみを述べる。図1は二次元風洞の制御システムの概略図である。ここで、集合胴圧力制御は通風中に時々刻々低下する貯気槽圧力に対して、調圧弁を制御し、集合胴圧力を一定に保つために行う。このことによって、測定部気流の総圧は一定に保持される。風洞起動時には、第2スロート弁を全閉し、予め通風時の設定集合胴圧力と同じ圧力の空気を風洞内に充填した後に起動する起動方式、いわゆるプリチャージ起動方式を採用した。この起動方式は、風洞内圧力が大気圧の状態から起動する従来の起動方式、ここでは普通起動方式と呼ぶ、に比べ風洞起動時において風洞内圧力の急変が少いた

めに風洞を安全に起動させることができ、また、集合胴圧力、集合胴温度、測定部マッハ数などのオーバーシュートがなくなるために、風洞内気流が定常状態に達するまでの時間が短くなり、計測時間が長く確保できるなどの利点をもつ。<sup>10)</sup>

プリチャージは、調圧弁と平行に設けた小型の自動調節弁、充填弁によって行う。

測定部マッハ数の制御は次のように行う。亜音速領域  $0.2 \leq M \leq 0.75$  においては、第2スロート弁によって測定部下流の流路の最小断面積を変化させて制御し(亜音速制御)、遷音速領域  $0.75 < M \leq 1.2$  においては、抽気弁によってプリナム室内空気を大気に排気し、その結果として、測定部多溝壁から測定部気流の一部を抽気することによって制御する(遷音速制御)。集合胴圧力制御、亜音速マッハ数制御、遷音速マッハ数制御のブロック図を図2に示す。集合胴圧力制御では、調節部にPI(ゲイン・積分)演算部を持ち、調圧弁をPI制御する。起動時の集合胴圧力制御は、プリチャージ起動においては、起動と同時に集合胴圧力制御系閉ループが構成され、第2スロート弁が開くことによって低下する集合胴圧力信号とその設定圧力信号との偏差によって調圧弁は比較的緩やかに開き、その後の調圧動作を開始する。普通起動の場合は、起動と同時に制御系閉ループが構成されたときに、大きな偏差信号があるために調圧弁は油圧サーボ系の応答の最大速度で予じめ設定した弁開度制限値まで急開動作をする。集合胴圧力が設定集合胴圧力に達したとき弁開度制限は解除される。PI調節部のゲイン  $K_{PC}$  および積分時間  $T_{IC}$  は起動過渡時と集合胴圧力が整定したときとその値を変えることができる。ここでは、普通起動の場合には、集合胴圧力のオーバーシュートを避けるため制御系開ループゲインを下げて起動させるため、 $K_{PC}$ 、 $T_{IC}$  の値の切換を行ったが、プリチャージ起動の場合には、それらの値は一定値とした。風洞起動後の集合胴圧力制御において、貯気槽圧力が降下していきにしたがって調圧弁前後の差圧は小さくなり、調圧弁の効きは低下する。集合胴圧力制御系には、貯気槽圧力低下にともなう調圧弁の効きを補正する補正回路を附加してある。

本風洞におけるマッハ数制御は、集合胴-プリナ

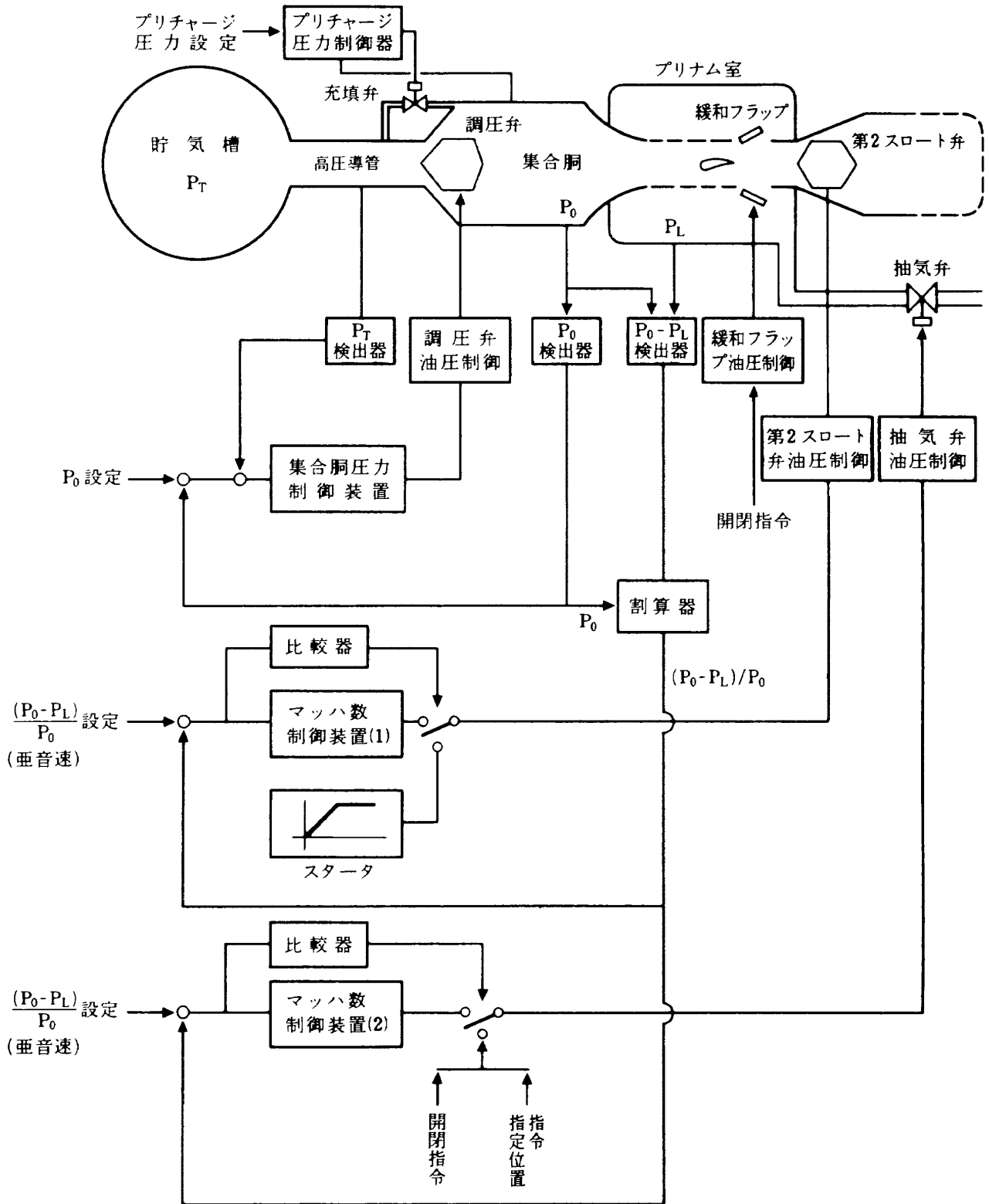


図1 二次元風洞制御系統図

ム室差圧と集合胴圧力との比  $(P_0 - P_L)/P_0$  の値を制御することによって行う。垂音速におけるマッハ数制御は、スタータを用いて第2スロート弁を指定開速度で指定位置まで開け、その後、測定部マッハ数が設定マッハ数の近くに達したとき、制御閉ループ

が構成され、開始する。この動作は、比較器を用いて自動的に行われる。マッハ数制御系の調節部はPI (ゲイン・積分) 演算機能を持つが、自動制御切替時における積分演算の初期値に、切替直前の弁開度指令の値を与えることによって切替がスムーズ

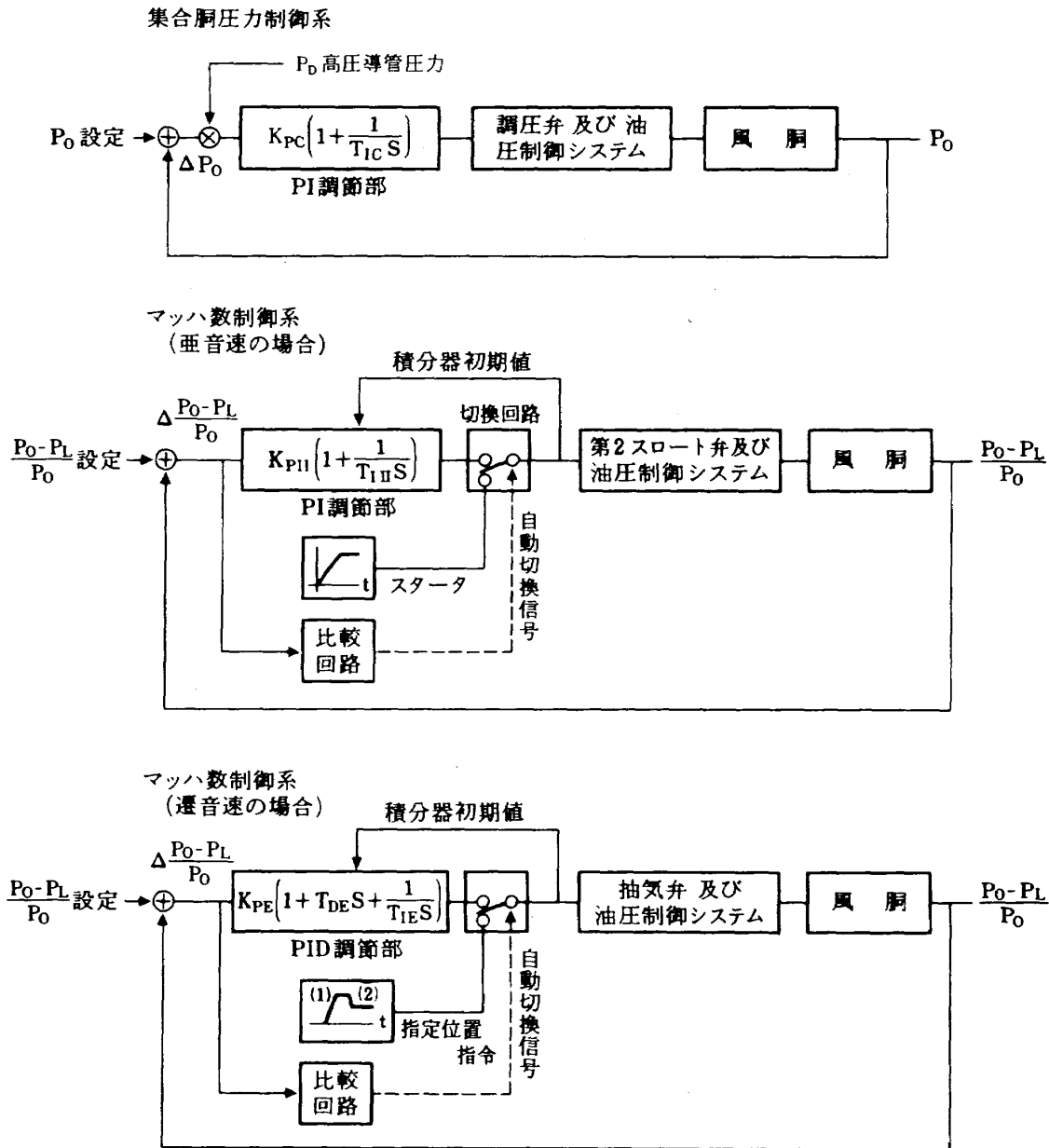


図2 二次元風洞フィードバック制御ブロック図

に行われるようにした。

遷音速におけるマッハ数制御は、第2スロート弁を開けると同時に抽気弁を指定開度まで開け、測定部気流が希望する決定マッハ数近くの遷音速流になったときに、抽気弁によって開始する。起動時において、プリナム室圧力をいち早く整定させるために、希望するマッハ数が得られる抽気弁開度よりも大きな開度を指定した時間だけ開けて抽気するいわゆる過剰抽気も可能である。抽気弁によるマッハ数制御の調節部の演算機能は、測定部多溝壁からの抽気が大きな容積をもつプリナム室を介して行われるために、この部分での時間遅れを考慮に入れて、制

御系の速応性を増すように、微分演算を加えたPID (ゲイン・積分・微分) 演算とした。自動制御開始時の抽気弁の指定位置における切替がスムーズに行われるように、調節部の積分演算部に初期値読込回路があるのは第2スロート弁による亜音速マッハ数制御の場合と同じである。

### 3.2 データ収集方法

図3は二次元風洞制御試験において収集したデータの測定個所を表し、表2はここで用いた検出器の精度を示す。特に、精度を要する集合胴圧力、および集合胴圧力・プリナム室差圧の圧力変換器は、高

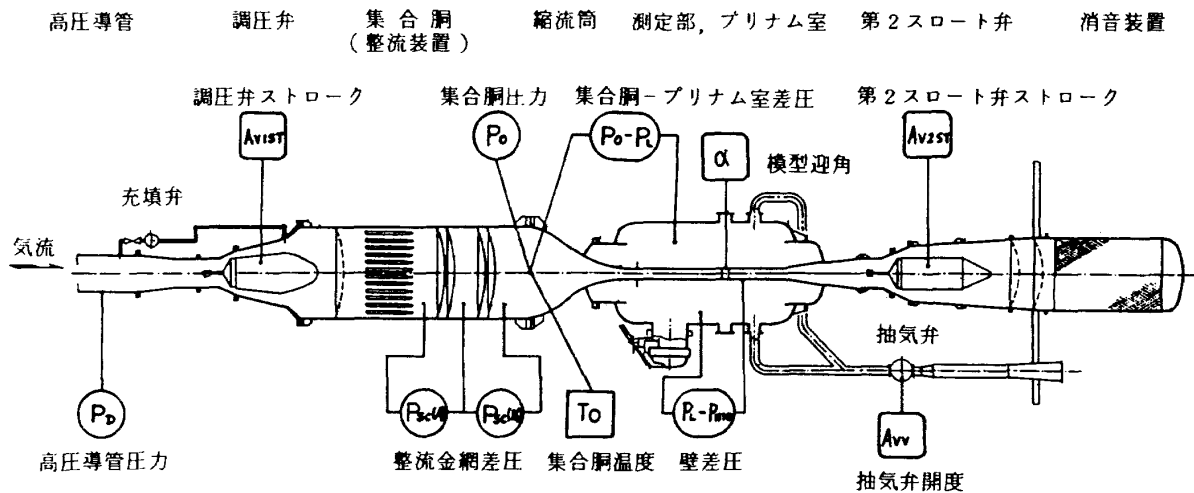


図3 収集データ個所

表2 検出器精度

検出個所	記号	検出方式	測定範囲	測定精度
高圧導管圧力	$P_D$	ダイヤフラム+ ストレインゲージ	0 ~ 2060kpa	0.1 % FS
整流金網差圧	$P_{sc}(A), P_{sc}(B)$	ダイヤフラム+ ストレインゲージ	0 ~ 5.9kpa	0.5 % FS
壁差圧	$P_L - P_{N10}$	ダイヤフラム+ ストレインゲージ	-196 ~ +196kpa	0.5 % FS
集合同圧力	$P_0$	力平衡式	147 ~ 785kpa 785 ~ 1569kpa	0.05 % FS
集合同圧力- プリナム室差圧	$P_0 - P_L$	力平衡式	5 ~ 196kpa 196 ~ 785kpa	0.05 % FS
調圧弁及び第2スロ ート弁ストローク	$A_{V1ST}, A_{V2ST}$	ポテンショメータ+ ピニオンラック	0 ~ 100 %	直線性 0.1 % FS
抽気弁開度	$A_{VV}$	ポテンショメータ	0 ~ 100 %	直線性 0.05 % FS
模型迎角	$\alpha$	光学式 シャフトエンコーダ	-15 ~ +25deg	分解能 0.01deg
集合同温度	$T_0$	熱電対(クロメル, アル メル)+リニアライザ	-20 ~ +60 °C	0.5 % of Reading

FS : Full Scale の略

精度のものを用い(0.05 % FS, CEC4-332型およびCEC4-336型), 広範な試験レイノルズ数およびマッハ数の値によって, 適切な圧力範囲を切換えて用いる(切換圧力範囲については次節参照)。

集合同圧力  $P_0$  は, 集合同内の円周方向に等間隔(90°間隔)に取り付けた4本の全圧管の圧力を平均

して検出する。測定部マッハ数は, 測定部静圧をプリナム室圧力  $P_L$  で代表し, この値より算出する<sup>1)</sup>(プリナムマッハ数)。高圧導管圧力  $P_D$  は, 調圧弁上流の高圧導管の管径1m部分の静圧である。貯気槽圧力は  $P_D$  より推算する(APPENDIX参照)。整流金網差圧は, 全部で4枚ある整流金網の前後2枚づ



つの圧力差,  $P_{SC}(A)$  (上流側) および  $P_{SC}(B)$  (下流側) を検出する。壁差圧は, プリナム室  $P_L$  と, 測定部上流から順番に設けられた側壁静圧孔の 10 番目の位置の側壁静圧との差圧である  $P_{M10}$  を用いる。この静圧孔の位置は模型中心部から下流 583mm のところにある。

測定データは, 図 4 のデータ収集系統図に示すように, 二次元風洞計測装置<sup>8)</sup>を用いデジタル量に変換して収集した。圧力, 温度, 弁開度のアナログ信号は, A/D変換器の入力電圧範囲に適合するように, シグナルコンディショナで増巾された後にデジタル量に変換する。高精度を必要とする集合胴圧力  $P_0$  および集合胴-プリナム室差圧 ( $P_0 - P_L$ ), および集合胴温度  $T_0$  は, 12bit の分解能をもつそれぞれ専用の A/D変換器で, その他の圧力信号の値および弁開度信号の値は 11bit の分解能をもつ A/D変換器でそれぞれデジタル量に変換される。模型迎角の値は, 光学式シャフトエンコーダにより直接デジタル量が得られるので, 計算機入出力部のデジタル入力部に接続した。

計算機によるデータの収集は, 風洞通風開始 (弁開指令時刻) と同時に始まり, 通風終了 (弁閉指令) で終了する。データサンプリング周期は 10ms である。

風洞制御過程を同時モニタするために, 計算機によるデジタルデータ収集とは別に, 8チャンネルペン書きレコーダにアナログ信号を記録した。

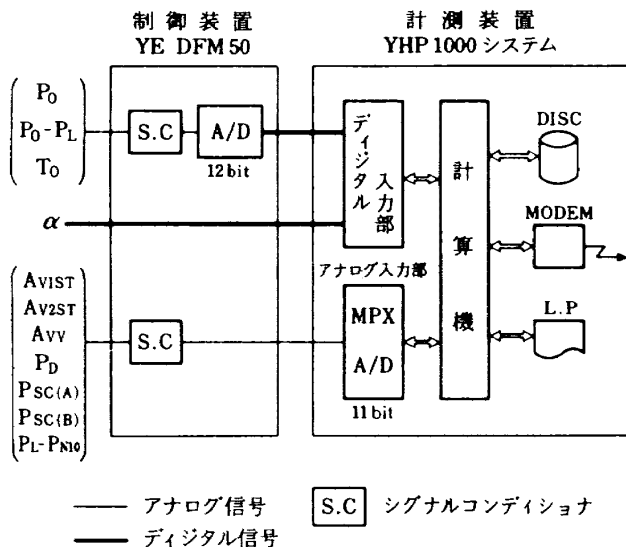


図 4 データ収集系統図

### 3.3 検出精度

風洞試験の際の気流の相似パラメータである測定部マッハ数, レイノルズ数および翼型特性を表す圧力係数, 抗力係数, ピッチングモーメント係数などの諸量の基準となる動圧は, 集合胴圧力  $P_0$ , 集合胴・プリナム室差圧 ( $P_0 - P_L$ ), および集合胴温度などの直接測定量より得る。誤差伝播の法則により, マッハ数検出誤差, 動圧検出精度, およびレイノルズ検出精度は, それぞれ

$$|\Delta M| = K(M) \left[ \left| \frac{\Delta P_0}{P_0} \right| + \left| \frac{\Delta(P_0 - P_L)}{(P_0 - P_L)} \right| \right] \quad (3-1)$$

$$K(M) = \frac{5}{7} M^{-1} (1 + 0.2 M^2) \times [(1 + 0.2 M^2)^{3.5} - 1] \quad (3-1')$$

$$\left| \frac{\Delta q}{q} \right| = \left| K_1 \frac{\Delta P_0}{P_0} \right| + \left| (K_1 - 1) \frac{\Delta(P_0 - P_L)}{(P_0 - P_L)} \right| + 2 \left| \frac{\Delta M}{M} \right| \quad (3-2)$$

$$K_1 = \frac{1}{1 - \frac{(P_0 - P_L)}{P_0}} \quad (3-2')$$

$$\left| \frac{\Delta Re}{Re} \right| = \left| \frac{\Delta P_0}{P_0} \right| + \left| K_{ReM} \frac{\Delta M}{M} \right| + \left| K_{ReT_0} \frac{\Delta T_0}{T_0} \right| \quad (3-3)$$

$$K_{ReM} = 1 - \frac{0.6}{1 + 0.2 M^2} \times \left[ 1 - \frac{2}{3} \frac{T_0}{T_0 + 117(1 + 0.2 M^2)} \right] \quad (3-3')$$

$$K_{ReT_0} = \frac{T_0}{T_0 + 117(1 + 0.2 M^2)} - 2 \quad (3-3'')$$

で表わされる。

図 5(a), (b)に, 集合胴圧力検出精度  $|\Delta P_0 / P_0|$ , および集合胴・プリナム室差圧検出精度  $|\Delta(P_0 - P_L) / (P_0 - P_L)|$  の保証精度 (圧力変換器メーカーで保証する精度) を示す。広い範囲の試験レイノルズ数, 試験マッハ数に対して, 圧力を精度良く検出するために, 集合胴圧力  $P_0$  については, フルスケール 1570kpa (16kgf/cm<sup>2</sup>) と 785kpa (8kgf/cm<sup>2</sup>) の 2 台の圧力変換器を, 集合胴-プリナム室差圧 ( $P_0 - P_L$ ) については, フルスケール 785kpa (8kgf/cm<sup>2</sup>), 196

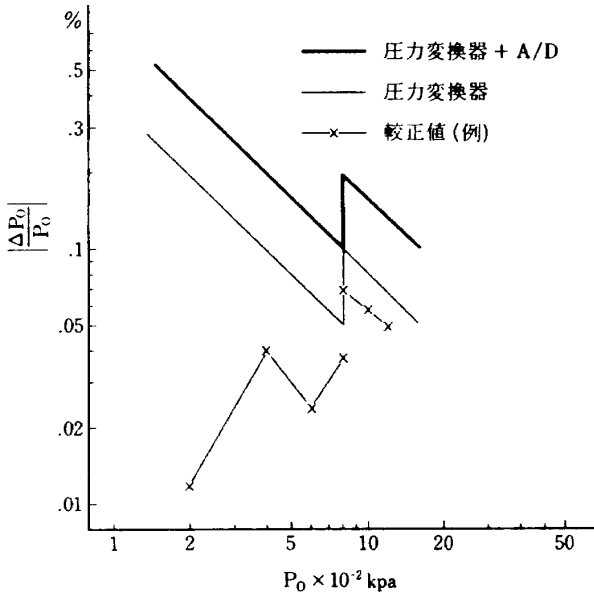


図 5(a) 集合胴圧力検出精度

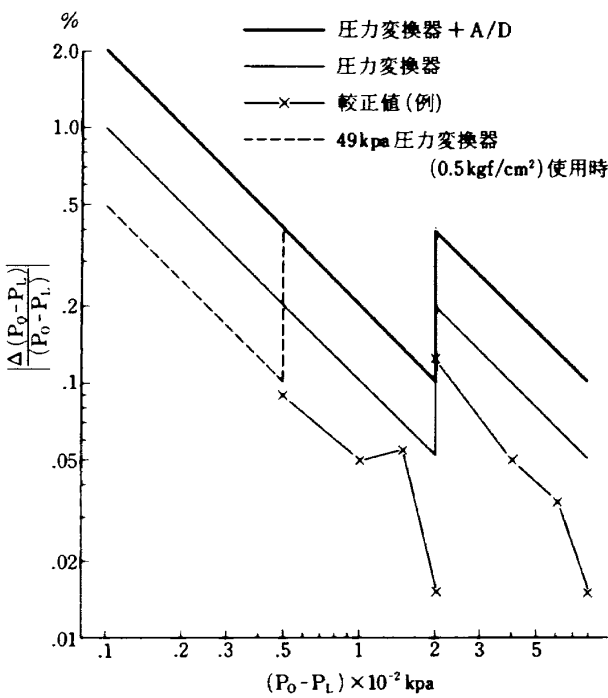


図 5(b) (P₀ - Pₗ) 検出精度

kPa(2kgf/cm<sup>2</sup>) および 49kPa(0.5kgf/cm<sup>2</sup>) の 3 台の圧力変換器を、それぞれ通風試験時の設定集合胴圧力、および設定マッハ数に応じて、切換えて使用する。ただし、集合胴-プリナム室差圧の 49kPa(0.5 kgf/cm<sup>2</sup>) の圧力変換器については、圧力較正の結果、精度不良のため用いなかった。そのため、本来は図 5(b)の破線で示される精度がここでは太い実線で示されるような精度になった。使用する圧力変換器は力平衡式圧力変換器で、その精度は、恒温槽内

で用いることによって、直線性、ヒステリシス、温度ドリフトなど全て含めて 0.05% FS 以内である。圧力変換器の実際使用時の精度の例として、図 5(a), (b)に較正時の精度を示してある。この較正結果によると、保証精度よりかなり精度が良いことが分る。集合胴-プリナム室差圧を検出する差圧型圧力変換器で問題になるのは基準圧力 (Line pressure) による零点移動であるが、ここで用いている力平衡式圧力変換器においては、その変化は無視できる程度に小さい。

A/D変換器の精度は、分解能 (12bit 純 2 進で 1/2 LSB)、直線性 (0.02% 以内)、温度ドリフト (± 5℃で 0.005% 以内) を含め 0.05% FS 以内である。

温度検出誤差  $|\Delta T_0/T_0|$  は、検出端 (クロメル・アルメル) および温度変換器 (リニアライザ) を含め -20℃~+60℃ の検出範囲で読取値の 0.5% 以内である。

その他、マッハ数、動圧、レイノルズ数などの計算における演算誤差があるが、計算機演算の有効桁数 6.8 桁 (32bit 浮動小数点演算で仮数部 23bit) あるため、その誤差は十分に小さい。

図 5(a), (b)の太い実線で示した集合胴圧力検出精度  $|\Delta P_0/P_0|$ 、集合胴-プリナム室差圧検出精度  $|\Delta(P_0 - P_L)/(P_0 - P_L)|$ 、および温度検出精度より、(3-1)~(3-3)式を用いて求めたマッハ数検出誤差  $|\Delta M|$ 、動圧検出精度  $|\Delta q/q|$ 、およびレイノルズ数検出精度  $|\Delta Re/Re|$  を図 6(a), (b), (c) に示す。図 6 のそれぞれの図は、集合胴圧力  $P_0 = 1177\text{kPa}(12\text{kgf/cm}^2)$ 、 $392\text{kPa}(4\text{kgf/cm}^2)$ 、および  $196\text{kPa}(2\text{kgf/cm}^2)$  と、マッハ数範囲 0.2~1.2 についてのマッハ数検出誤差、および動圧とレイノルズ数の検出精度を表す。  $|\Delta M|$ 、 $|\Delta q/q|$ 、 $|\Delta Re/Re|$  のそれぞれの値が、マッハ数 0.3 以下において精度が悪いのは、49kPa(0.5kgf/cm<sup>2</sup>) のレンジの (P₀ - Pₗ) 圧力変換器を使用しなかったことが原因である。また、試験レイノルズ数を低い範囲まで拡張するために行った集合胴圧力  $P_0 = 196\text{kPa}(2\text{kgf/cm}^2)$  の場合の検出精度についても悪い。これは、初期の仕様では風洞作動範囲の最低集合胴圧力が 392kPa(4kgf/cm<sup>2</sup>) であったために、現在の圧力変換器の検出範囲がそれに合わせて決められているた

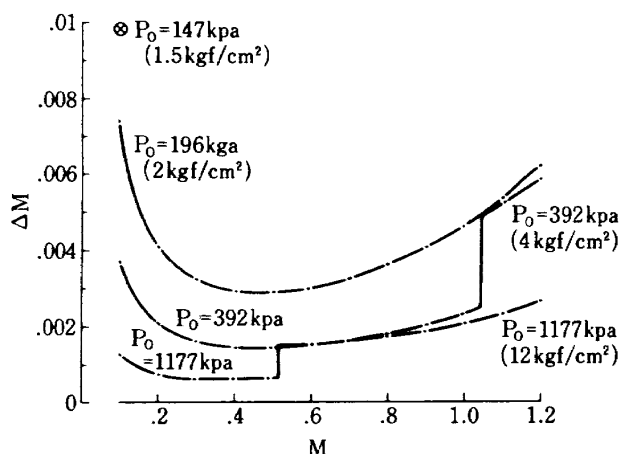


図 6 (a) マッハ数検出誤差

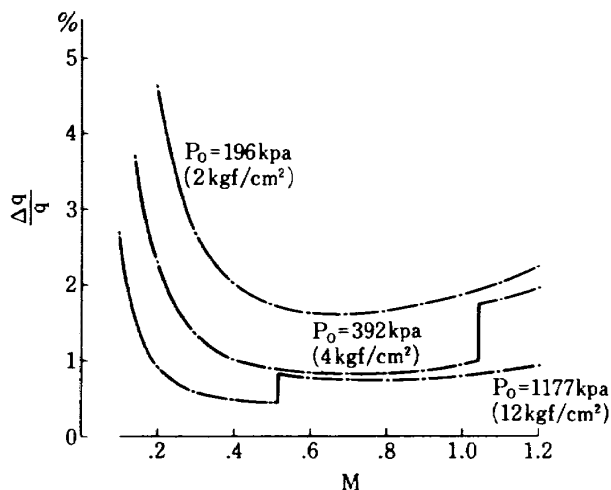


図 6 (b) 動圧検出精度

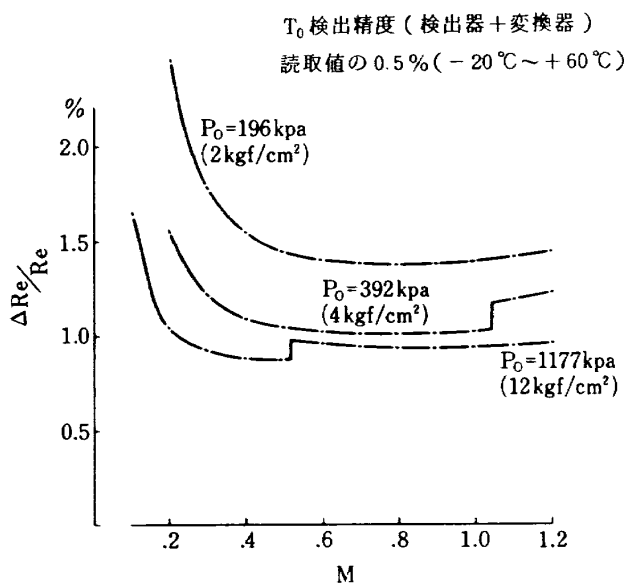


図 6 (c) レイノルズ数検出精度

めである。ちなみに、初期仕様<sup>15)</sup>の風洞動作範囲  $P_0 = 392\text{kpa}(4\text{kgf/cm}^2) \sim 1177\text{kpa}(12\text{kgf/cm}^2)$ ,  $M = 0.2 \sim 1.2$  に対して、検出精度は、 $(P_0 - P_L)$  圧力変換器の最大検出範囲に比べて検出圧力の極端に小さくなる  $P_0 = 392\text{kpa}(4\text{kgf/cm}^2)$  の場合の  $M > 1.04$  の範囲を除いて、 $\Delta M < 0.002$ ,  $|dq/q| < 1\%$ ,  $|\Delta Re/Re| < 1.1\%$  である。

試験レイノルズ数範囲を初期仕様よりも拡大して行うために必要な圧力変換器の検出精度については、後章(8章)で述べることにする。

### 3.4 制御精度の評価

まず、A/D変換によって収集した圧力、温度、弁開度などのデジタルデータは、雑音成分を除去するために、次のような移動平均演算処理を行った。すなわち、得られたデータの時系列を  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) とすると

$$X_i = \frac{1}{P} \sum_{j=-m}^m x_{i+j}, \quad P = 2m + 1 \quad (3-4)$$

の重み 1 の移動平均演算を行う。ただし  $X_i$  ( $i = m, m+1, \dots, N-m$ ) について演算する。ここでは 11 点移動平均、すなわち、 $m = 5$  とした。この移動平均演算によるフィルタ特性  $G(j\omega)$  は、ローパスフィルタ特性を示し、収集データのサンプリング周期を  $\Delta T$  とすると、

$$G(j\omega) = \frac{\sin \omega \Delta T m}{\omega \Delta T m} \quad (3-5)$$

の正弦関数で表され、 $\Delta T = 10 \times 10^{-3} \text{ sec}$ ,  $m = 5$  とした場合の -3 db カットオフ周波数は約 3Hz となる。この値は、収集した制御データに含まれる制御応答の最高周波数 (2Hz 程度) よりも高く、移動平均演算のもつフィルタリング特性によって、有効な周波数成分を除去するようなことは無い。

風洞内気流の制御精度は次の諸量で評価する。それは、集合胴圧力、測定部マッハ数、および動圧については、それぞれ変動する値の平均値、標準偏差、および最大変動量である。移動平均演算後の集合胴圧力データ、集合胴-プリナム室差圧データ  $P_{0i}$ ,  $(P_0 - P_L)_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) に対して、

$$\bar{P}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{0i} \quad (3-6)$$

$$\sigma_{P_0} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_{0i} - \bar{P}_0)^2} \quad (3-7)$$

$$\Delta P_{0max} = \text{Max}\{|P_{0i} - \bar{P}_0|\} \quad (3-8)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i \quad (3-9)$$

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (3-10)$$

$$\Delta M_{max} = \text{Max}\{|M_i - \bar{M}|\} \quad (3-11)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i \quad (3-12)$$

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (q_i - \bar{q})^2} \quad (3-13)$$

$$\Delta q_{max} = \text{Max}\{|q_i - \bar{q}|\} \quad (3-14)$$

であらわす。ただし、

$$M_i = \sqrt{5 \left[ \left\{ 1 - \frac{(P_0 - P_L)_i}{P_{0i}} \right\}^{-3.5} \right]} \quad (3-15)$$

$$q_i = 0.7 P_{0i} (1 + 0.2 M_i^2)^{-3.5} M_i^2 \quad (3-16)$$

である。又、 $\text{Max}\{\cdot\}$ の記号は $\{\cdot\}$ 内の変数の最大値を取ることを意味する。

また、動圧変動は誤差伝播の法則より、 $\sigma_{P_0}$ 、および $\sigma_M$ より計算でき、次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_q'}{\sigma_R} = \sqrt{\left( K_{P_0} \frac{\sigma_{P_0}}{P_0} \right)^2 + \left( K_M \frac{\sigma_M}{M} \right)^2} \quad (3-17)$$

ここで、 $K_{P_0} = \partial q / q / \partial P_0 / P_0$ 、 $K_M = \partial q / q / \partial M / M$ であり、(3-16)式を用いて、これらの値を計算すると、 $K_{P_0} = 1$ 、 $K_M$ は

$$K_M = 2 - \frac{1.4 M^2}{1 + 0.2 M^2} \quad (3-18)$$

になる。(3-17)式は、集合動圧力変動および測定部マッハ数の変動が測定部気流の動圧の変動に与える割合の関係を示す。

レイノルズ数変動の評価については、通風中に集合動温度 $T_{0i}$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )が時間と共に降下していくので(特に、通風流量の多い高レイノルズ数試験において、その降下率は大きい)、レイノルズ数の平均値は

$$\bar{Re} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Re_i \quad (3-19)$$

であらわすが、変動量は

$$\Delta Re = Re(f) - Re(i) \quad (3-20)$$

で示す。ここで、

$$Re_i = 46.147 \times 10^6 L \frac{M_i P_{0i}}{T_{0i}} \left( \frac{1}{1 + 0.2 M_i^2} \right)^{1.5} \cdot \left( \frac{T_{0i}}{1 + 0.2 M_i^2} + 117 \right) \quad (3-21)$$

$L$ : 基準長 (0.25m)

$$Re(i) = Re_i (i=1), \quad Re(f) = Re_i (i=N) \quad (3-22)$$

である。上記の各々の統計量を求めるための平均区間 ( $i=1, 2, \dots, N$ )は、通風開始後、測定部気流整定し、その後の計測開始から計測終了の間を取る。この間隔は、翼面上の圧力分布測定用のスキヤニバルブが一回転し、かつ、翼抗力測定用のウェクトラバース測定システムが一行程動く時間である。この時間は、通常約6秒間である。

#### 4. 高レイノルズ数高速試験

極めて高い風洞内圧力と通風流量の多い状態で試験をする高レイノルズ数高速試験において、特に重要なことは、風洞内気流が整定するまでの過程、すなわち、風洞起動と第2スロート弁あるいは抽気弁によるマッハ数制御を開始して測定部マッハ数がある精度以内に整定するまでの過程で、消費する貯気槽内の空気量を少なくし、気流整定時の貯気槽圧力を高く保つことである。そのことによって、気流整定時の貯気槽圧力と、高レイノルズ数試験において必然的に高くなる通風終了時の貯気槽圧力(吹止り圧力)との圧力差を大きくし、有効に使用できる貯気槽空気量を多くして計測時間を確保する。本風洞では、圧力損失の少ない改良型調圧弁を用いて貯気槽吹止り圧力を小さくし、計測時間を長くするように設計されているが<sup>9)</sup>さらに、気流整定時の貯気槽圧力を高く保つことはデータ生産性および風洞の使用効率を向上させると一般的に言える。

本風洞の高レイノルズ数試験の風洞起動過程において、もう一つ重要なことは、風洞起動時の壁差圧、模型負荷などが過大となることを避け安全性を確保することである。

本風洞の起動はプリチャージ起動と普通起動が可

能であるが、普通起動実施の際に、整流金網差圧が異常の値を示し過負荷になったので、安全確保のため、普通起動における詳細な制御試験は実施しなかった。ここでは、プリチャージ起動方式と普通起動方式の比較を行うに止める。

プリチャージ起動方式は、このような起動方式で運転されている吹出式風洞は他に例が無いために、風洞と制御機器を含めた数式モデルを作り、プリチャージ起動方式による制御過程の数値シミュレーションを行ったが<sup>10)</sup>ここでは、実際の結果との比較を行った。

高レイノルズ数高速試験は、集合胴圧力  $P_0=1177$  kpa(12kgf/cm<sup>2</sup>)で、設定マッハ数  $M_R=0.75$  (亜音速) および  $M_R=1.0$  (遷音速) で実施した。

#### 4.1 集合胴圧力制御

図7は総合試運転時に実施した  $P_{0R}=1177$ kpa(12 kgf/cm<sup>2</sup>)でプリチャージ起動した場合の集合胴圧力制御試験結果である。マッハ数制御は行っていない。

図7(a)は  $M_R=0.75$ 、図7(b)は  $M_R=1.0$  の場合の集合胴圧力および測定部マッハ数の応答を示す。

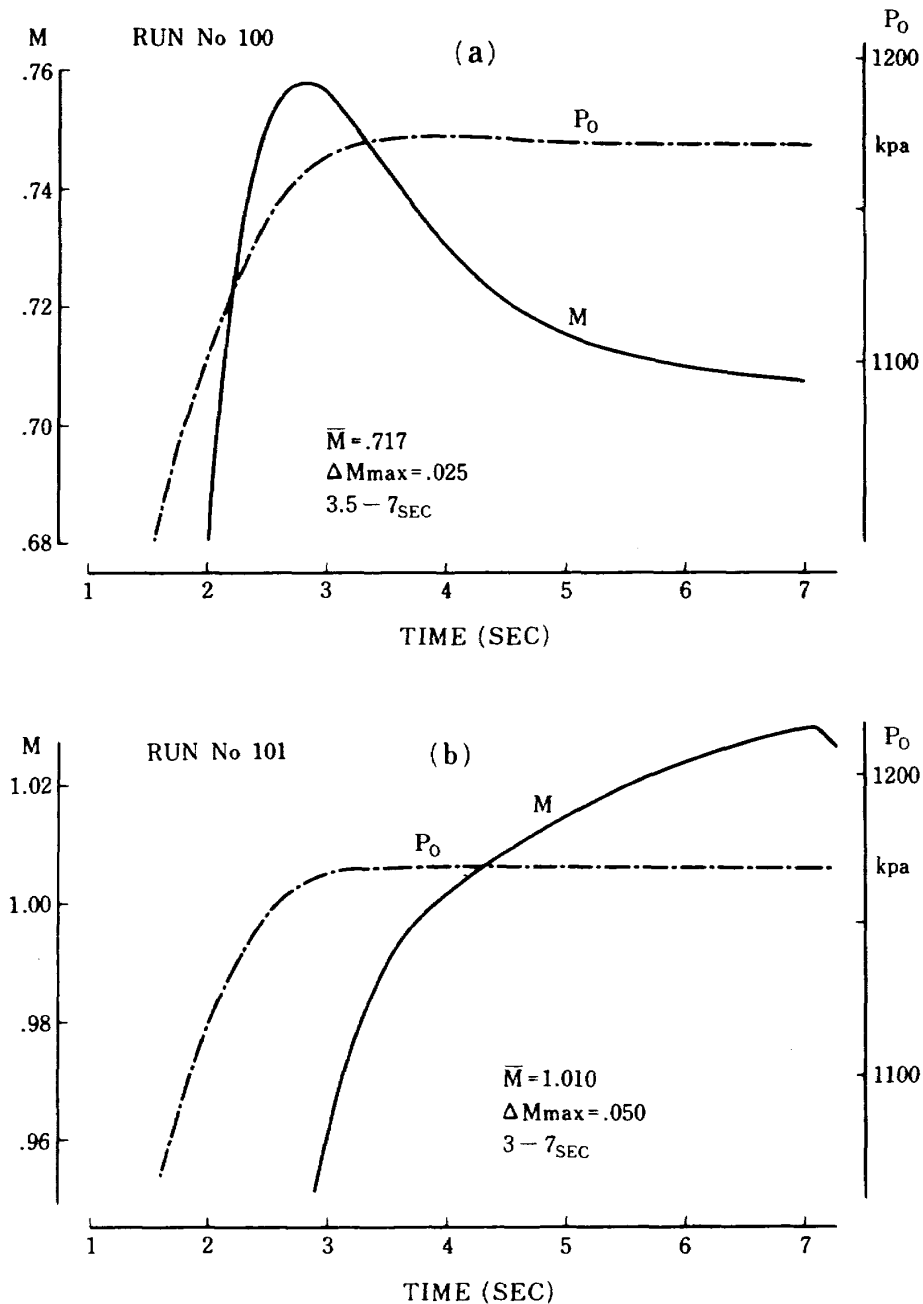


図7 制御不適切の例

この試験結果から、集合胴圧力は  $M_R = 0.75$  の場合には約 3.5 秒で、 $M_R = 1.0$  の場合には約 3 秒で整定しているが、測定部マッハ数は、いずれの場合も、7 秒後まで整定していない。 $M_R = 0.75$  の場合は、測定マッハ数がオーバーシュートし、集合胴圧力整定時から 7 秒後まで測定部マッハ数は 0.035 変化する。 $M_R = 1.0$  の場合は、集合胴圧力が整定しても測定部マッハ数は一定にならず、その後から通風終了まで測定部マッハ数は 0.07 変化する。この原因は、 $M_R = 0.75$  の亜音速の場合と  $M_R = 1.0$  の遷音速の場合で異なるが（その理由はこの後の項 4.1.1 および 4.1.2 において述べる）、いずれの場合においても、集合胴圧力制御系の最適調整を行っていないことが主な原因である。このことは、測定部マッハ数の整定について、起動時の集合胴圧制御系の同調を最適に取ることが重要であることを示している。

4.1.1 亜音速試験

設定集合胴圧力  $P_{0R} = 1177\text{kpa}(12\text{kgf/cm}^2)$ 、 $M_R = 0.75$  の亜音速において、集合胴圧力制御系の最適同調を取るために、制御装置調節部のゲイン  $K_{PC}$ 、および積分時間  $T_{IC}$  の値を種々変化させて集合胴圧力および測定部マッハ数の応答を見たのが図 8 である。この試験では、積分時間  $T_{IC}$  を 0.2 秒から 0.35 秒まで 0.05 秒間隔で、ゲイン  $K_{PC}$  を 1.0 ずつ変化させた。第 2 スロート弁は、起動時に、50 %/sec の開速度で開け、その後 66.5 % に固定した。図 8 に示す測定部マッハ数の起動時の応答は、積分時間およびゲインのわずかな変化でかなり変化することを示している。特に、測定部マッハ数を一度オーバーシュートさせると（ゲインが小さい場合）、オーバーシュートの後に、アンダーシュートになり整定に要する時間は大巾に増える。

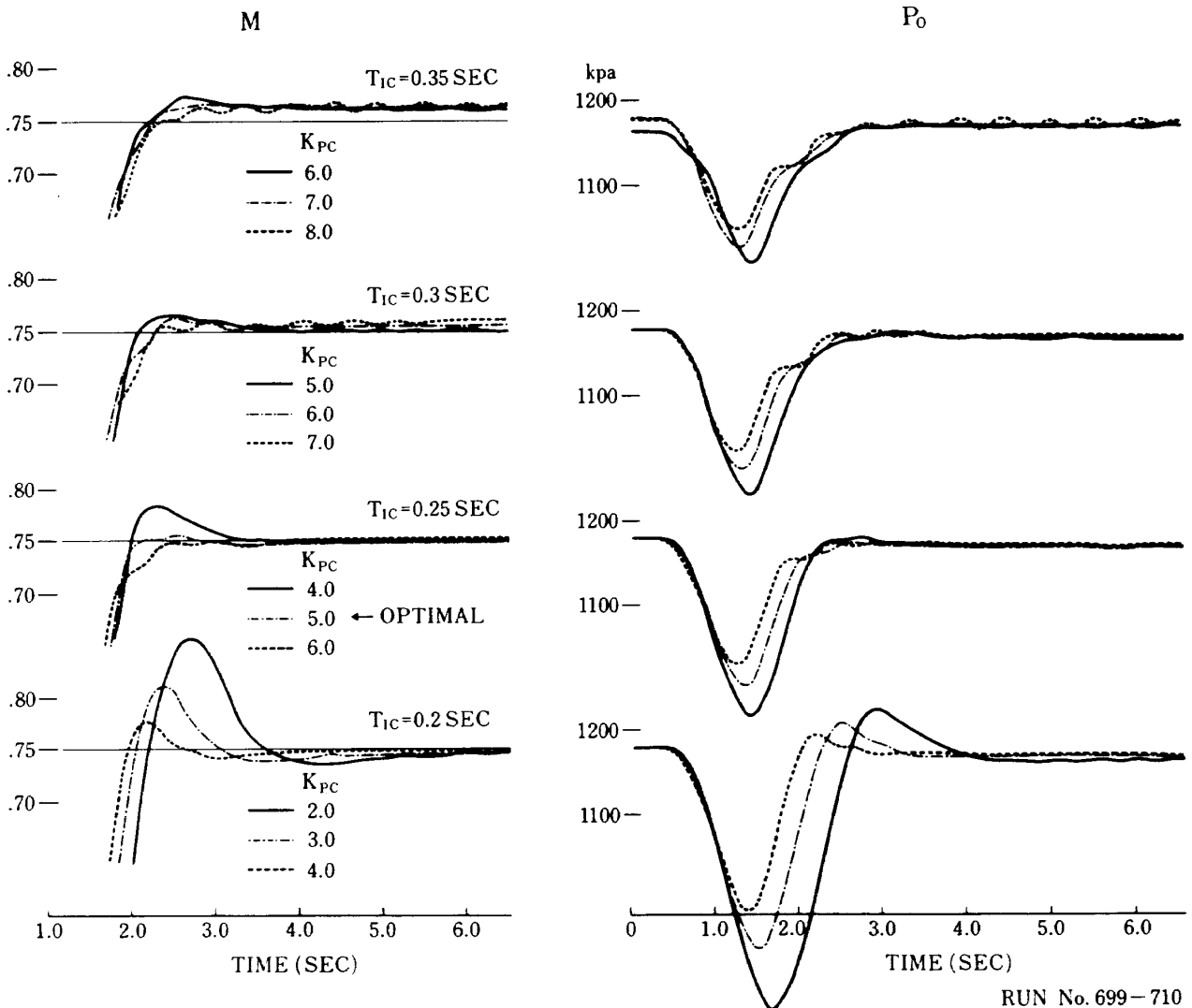


図 8 集合胴圧力制御試験（亜音速、 $M_R = 0.75$ ）

RUN No. 699-710

わずかなゲインの変化による測定部マッハ数の整定遅れの例を図9に示す。これは、図8において最適なゲインおよび積分時間として $K_{PC}=5.0$ 、 $T_{IC}=0.25\text{ sec}$ を選び、そのときの応答と、ゲインのみを1.0小さくした場合の応答を比較したものである。集合胴圧力の整定時間はほとんど同じであるが、測定部マッハ数整定時間は約1秒遅れる。この値は、通風流量が多く、かつ貯気槽吹止り圧力が高いために通風時間が短くなる高レイノルズ数試験において、かなり大きな値であることはいうまでもない。

集合胴圧力応答に依存するこのようなマッハ数整定時間の遅れは、遷音速風洞特有の通気性壁とプリナム室の存在によるものである。固定壁の場合には、測定部マッハ数の値は、亜音速においては、集合胴圧力に関係なく測定部断面積と第2スロート弁の開口面積の比で決まる。通気性壁がある場合には、プリナム室圧力が安定するまで測定部気流は整定しない。プリチャージ起動において、測定部マッハ数が整定するためには、第2スロート弁が全閉の位置から所定の位置に達したときにできるだけ集合胴圧力が整定していることが必要である。その時点で、集合胴圧力が定常流における集合胴圧力より低下した状態である場合には、プリナム室圧力が測定部気流

の定常状態における静圧よりも低下し、プリナム室圧力とその値とはほぼ等しく平衡するまで、測定部マッハ数はオーバーシュートするものと考えられる。

図10は最適調整試験結果と調整前、すなわち総合試運転時における結果(図7(a)参照)を比較したものである。この比較によると、最適調整試験結果はかなり改良されていることを示している。この改良の結果は、集合胴圧力制御調節部の最適調整によるものばかりでなく、図10(b)に示すように、第2スロート弁の指定位置固定精度にもよる。第2スロート弁のストローク位置油圧制御において、油圧サーボ弁の圧力ゲインが有限な値であるために定常位置偏差があり、それを無くするために第2スロート弁位置制御系の調節部に積分演算要素が入っている。この積分要素のために、図の一点鎖線で示すように、第2スロート弁が所定の位置まで達するのにかなり時間がかかる。この状態では測定部マッハ数整定時間が長くなる。そこで、ここでの改良は積分要素を取り除くことによって第2スロート弁の動きを図の実線のようにした。改良前の第2スロート弁ストロークの動きは集合胴圧力整定後ほぼ0.5%であり、この動きによって変化する測定部マッハ数はほぼ0.018に相当する。これは、図10(a)(あるいは図

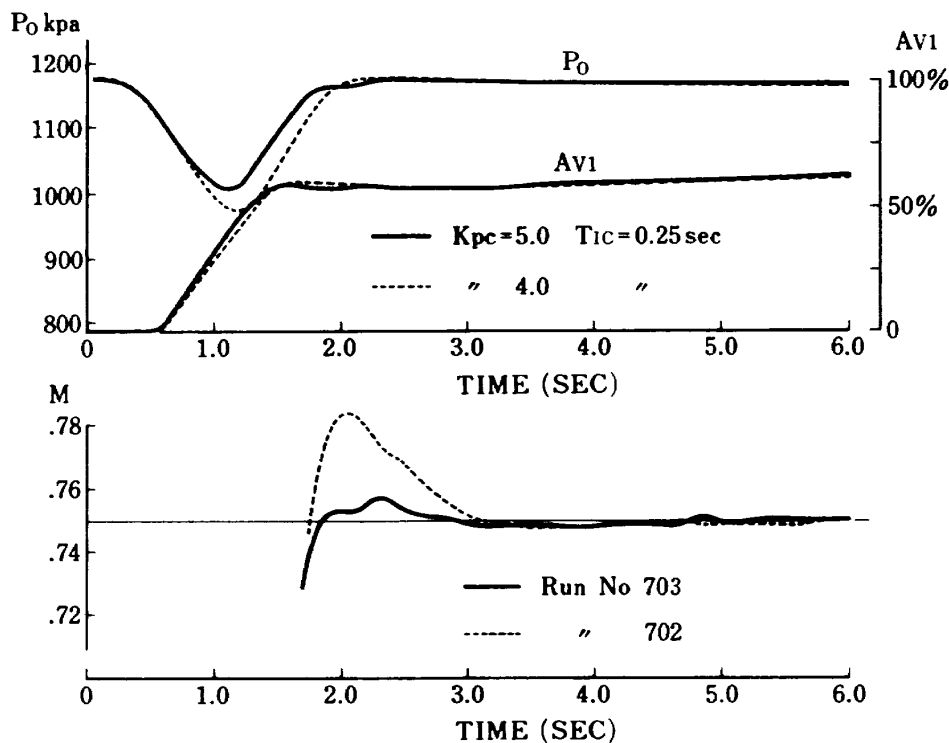


図9 ゲイン変化による応答変化の例

RUN No	$\bar{M}$	$\Delta M_{max}$	AVERAGING
100	.717	.025	3.5-7sec
703	.751	.006	2-6sec

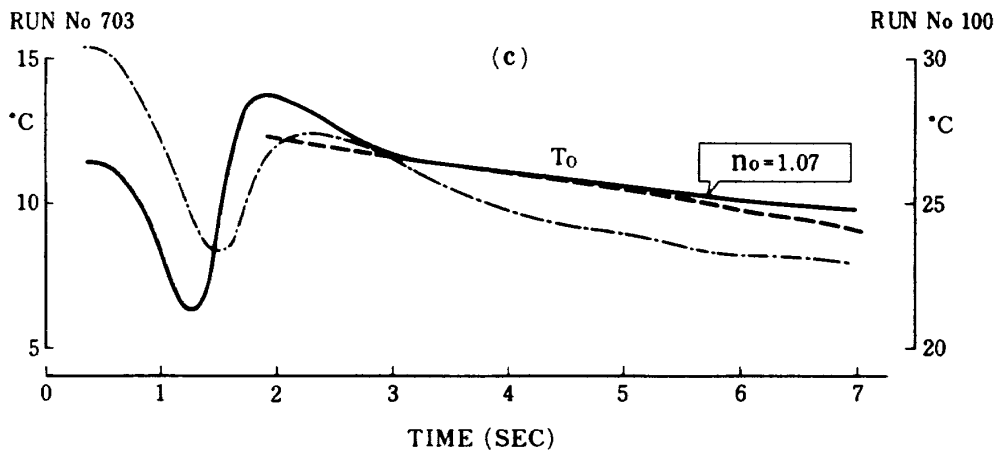
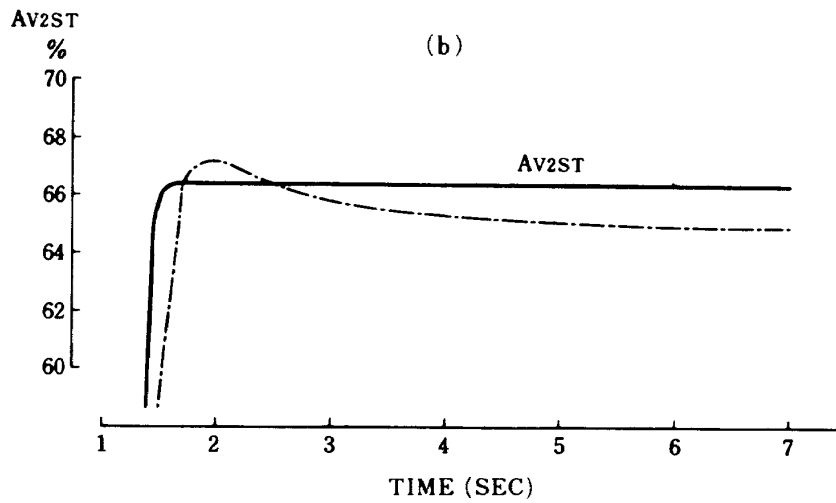
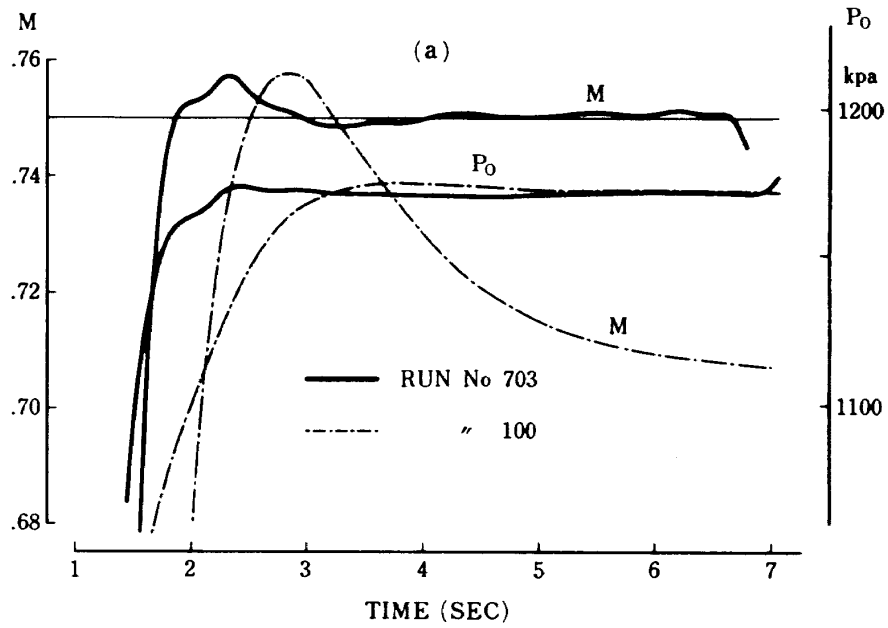


図 10 (a), (b), (c) 最適調整試験結果



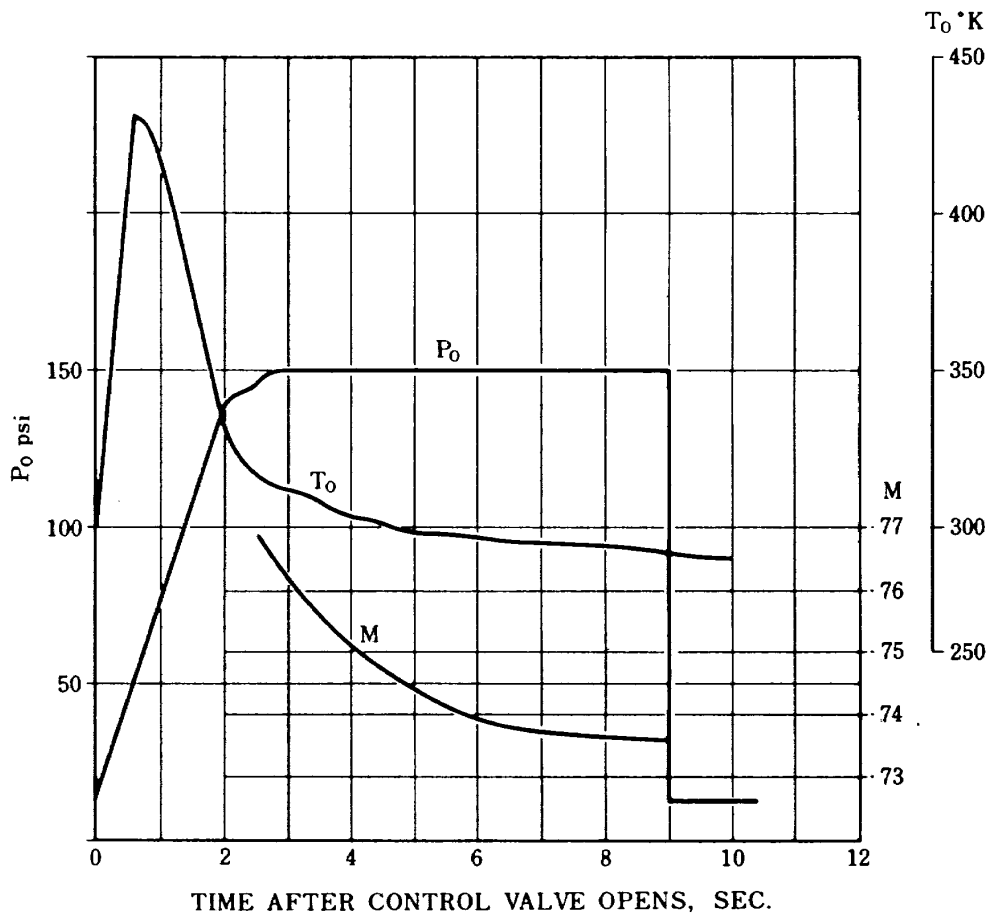
7(a)に示す総合試運転時における集合胴圧力整定後の測定部マッハ数の降下量 0.035 の約 50%は、第2スロート弁開度の変化によるものであることを示す。ちなみに、図8に示す集合胴圧力制御試験の結果は、第2スロート弁位置制御系の調節部の改良後に実施したものを示しており、風洞起動時を除いて、第2スロート弁の動きはない。

図11は、カナダNAEの高レイノルズ数遷音速風洞(二次元測定部形態)における集合胴圧力、測定部マッハ数、および集合胴温度の高レイノルズ数高速領域での応答を示す<sup>11)</sup>このNAEの風洞は普通起動方式で本風洞のプリチャージ起動方式と異なるが、図に示す測定部マッハ数の応答は、図7(a)あるいは図10(a)で示す風洞における集合胴圧力制御系の最適調整前の測定部マッハ数応答に類似している。文献11)では、この測定部マッハ数の変化は風洞起動時の集合胴温度上昇によるものと説明されているが、この

原因はむしろ本風洞の場合と同じように、プリナム室圧力の整定遅れによるものであると考える方が妥当であろう。このような現象は、吹出式遷音速風洞特有なものであるが、本風洞では、風洞起動時にプリチャージ起動方式を採用し、かつ集合胴圧力制御系の最適調整を行うことによってこのような風洞起動時の測定部マッハ数の変動を避けることができた。

4.1.2 遷音速試験

高レイノルズ数遷音速における集合胴圧力制御系の最適調整試験は、設定集合胴圧力  $P_{0R} = 1177\text{kpa}$  ( $12\text{kgf/cm}^2$ )、設定マッハ数  $M_R = 1.0$  で実施した。図12はその試験結果を示す。この時、第2スロート弁は  $50\%/s$  の開速度で開け、その後  $75.5\%$  の一定値に保持し、抽気弁は、起動と同時に  $48\%$  まで急開させその後一定値であるようにした。最適調整試験の結果、ゲインおよび積分時間の最適値として、それぞれ  $5.0$ 、 $0.3\text{sec}$  の値を得ることができ



TYPICAL TIME HISTORY OF FLOW CONDITIONS DURING A HIGH REYNOLDS NUMBER RUN (\*7697)

図11 NAE 2D-TWTの応答

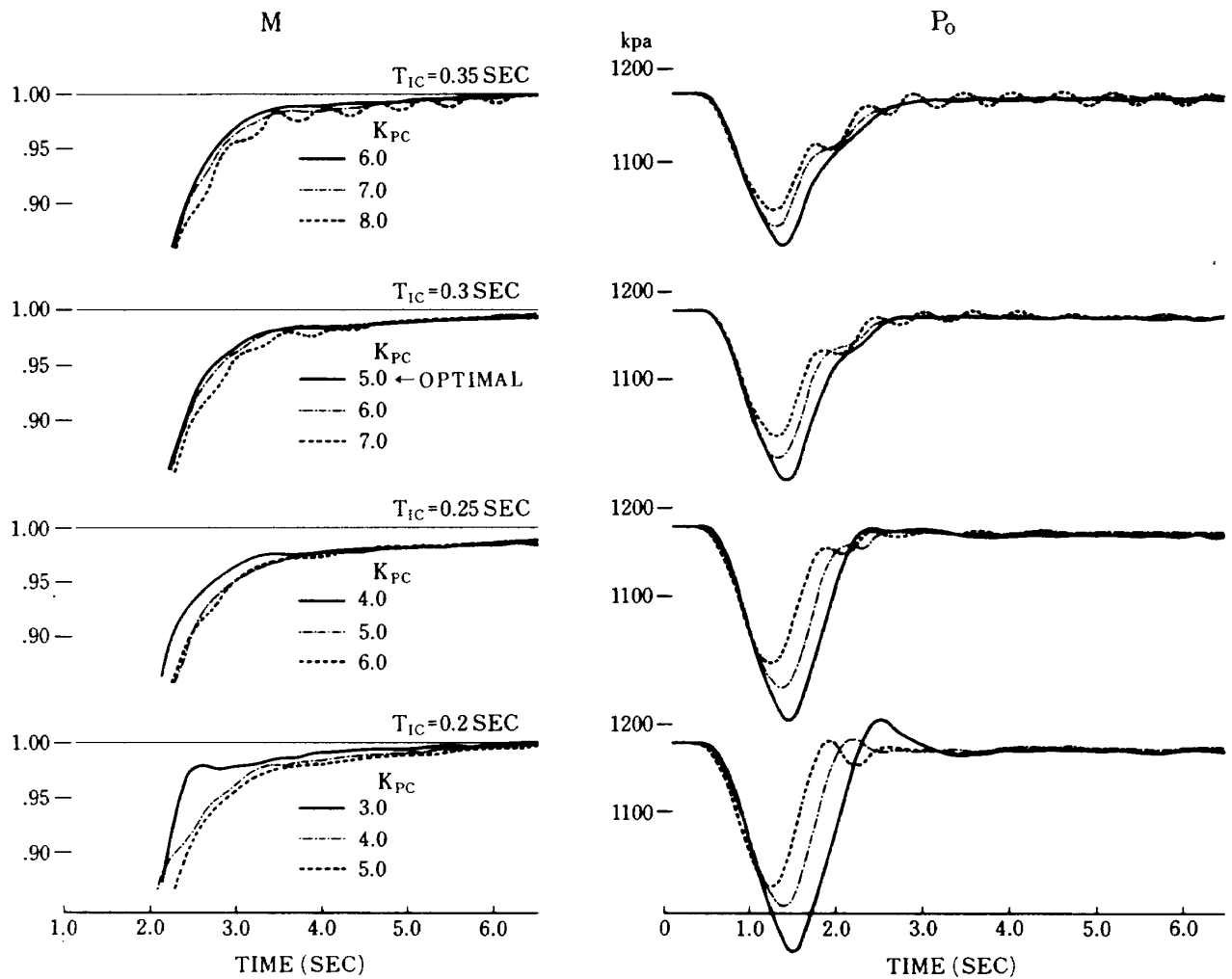


図 12 集合胴圧力制御試験 (選音速,  $M_R = 1.0$ )

たが、測定部マッハ数を整定させるには到らなかった。測定部マッハ数は、集合胴圧力が整定した後も、通風終了する 7 秒後まで一定にならず、その間 0.02 変化する。この傾向は図 12 に示す測定部マッハ数の応答の全てにおいて見られる。これは、測定部マッハ数が 1.0 に近づくとき、測定部の流れは阻塞状態になり、プリナム室から多溝壁、第 2 スロート弁を通して排気される空気量が無くなるために、プリナム室圧力の整定遅れ時間が増えることによるものと考えられる。この整定遅れは、風洞起動過渡時に、抽気弁を通常の開度より大きく開け、プリナム室内の空気を余分に排気 (過剰抽気) することによって避けることができる。

過剰抽気の効果を図 13 に示す。図は過剰抽気を行わない場合、抽気弁を 90% で 1.2 秒間開けて過剰抽気した場合、90% で 2 秒間開けて過剰抽気し

た場合の測定部マッハ数の応答をそれぞれ示す。抽気弁の定常開度は 50% である。過剰抽気の方法として、いろいろな抽気弁開度の時間関数が考えられるが、ここでは、一番簡便な方法をとった。図 13 に示す結果から、抽気弁を 90%、2 秒間開けて過剰抽気した場合には、測定部マッハ数はオーバーシュートし、この開度あるいは時間以下で最適な値があることが分る。ここでは最適な過剰抽気の方法として、抽気弁を 90%、1.2 秒間開けて行う方法を選ぶ。このときに、測定部マッハ数は通風開始後約 3 秒で整定する。

集合胴圧力制御系を最適調整し、かつ、最適な過剰抽気を行った部と、これらの調整を行わない総合試運転のときの集合胴圧力および測定部マッハ数の応答の比較を図 14 に示す。集合胴圧力の整定時間は、最適調整前後でほぼ同じ 3 秒となるのに対し、

RUN No	$\bar{M}$	$\Delta M_{max}$
744	.9933	.0091
746	.9992	.0040
747	1.0088	.0122

3-7<sub>SEC</sub>

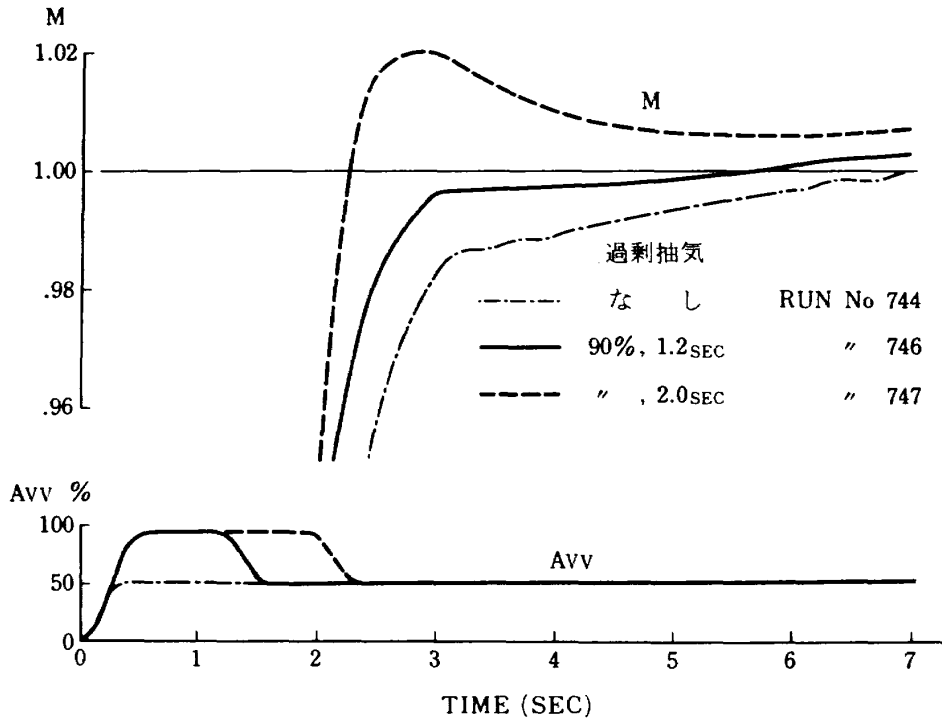


図 13 過剰抽気効果

RUN No	$\bar{M}$	$\Delta M_{max}$
101	1.010	.050
746	.999	.004

3-7<sub>SEC</sub>

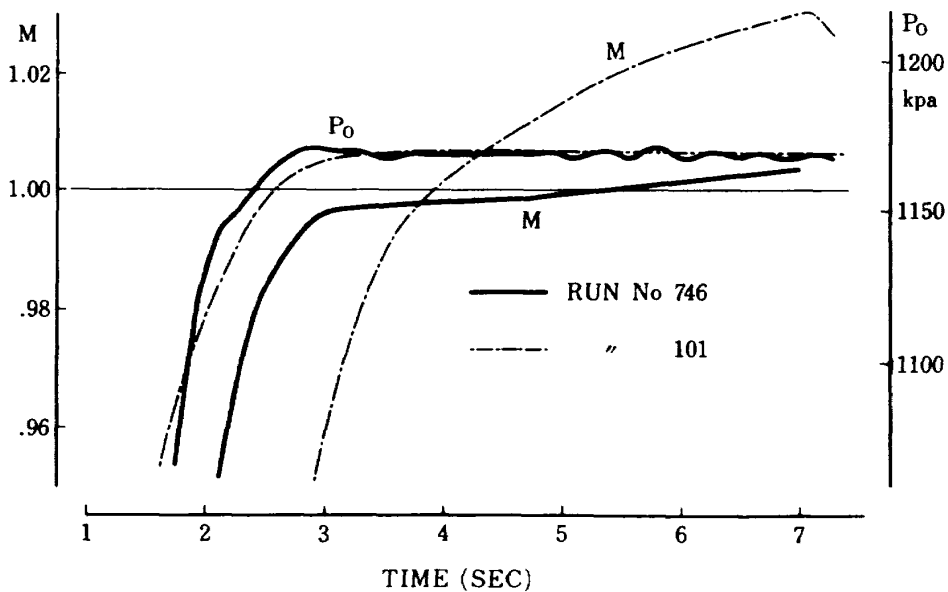


図 14 最適調整試験結果

測定部マッハ数の整定時間は大巾に異なる。最適調整前の測定部マッハ数は通風開始後に相当時間変化しているのに対し、最適調整後は  $\Delta M = \pm 0.005$  以内に整定する時間を3秒程度にすることが出来た。しかし、それでも測定部マッハ数は、わずかではあるが、除々に変化する。これは過剰抽気の方法（弁開度および開放時間）をさらに微細に調整する必要があることを示しているが、このようなわずかな測定部マッハ数の変化は、次に述べるマッハ数の自動制御を行うことによって無くするようにすることが出来る。

4.2 マッハ数制御

本風洞のような一様流マッハ数の微妙な変化が翼の特性に及ぼす効果を試験する設備では、測定部マッハ数を一定にして試験することが望まれる。そのために、本風洞では測定部マッハ数の自動制御を行う。このことによって、吹出式風洞では一連の試験データ（例えば  $C_D - C_L$  ポーラカーブ）を得るため

の試験を数十回に分けて行う際に必要な通風毎の測定部マッハ数の再現性を持たせること、および模型迎角によって翼まわりの流れが変り、その結果変化する一様流マッハ数を一定に保持することができる。

4.2.1 亜音速におけるマッハ数制御

設定マッハ数が 0.75 以下の場合には、第2スロート弁によるマッハ数自動制御を行う。抽気は行わず、抽気弁は常に全閉状態である。第2スロート弁は、最大開口面積  $5000\text{cm}^2$  の全行程  $420\text{mm}$  のプラグ型弁で、その構造図を図15に示す。

第2スロート弁によるマッハ数制御の制御精度はこの弁の位置決め精度による。第2スロート弁は、プリチャージの際の締切弁として使用すると同時に、亜音速におけるマッハ数調節弁として用いるために、マッハ数制御時には微細な動きが要求される。第2スロート弁の開口面積と測定部マッハ数の関係は、 $M < 1$  において、

$$\frac{A_{v2}}{A} = M \left[ \frac{1}{1.2} (1 + 0.2M^2) \right]^{-3} \quad (4-1)$$

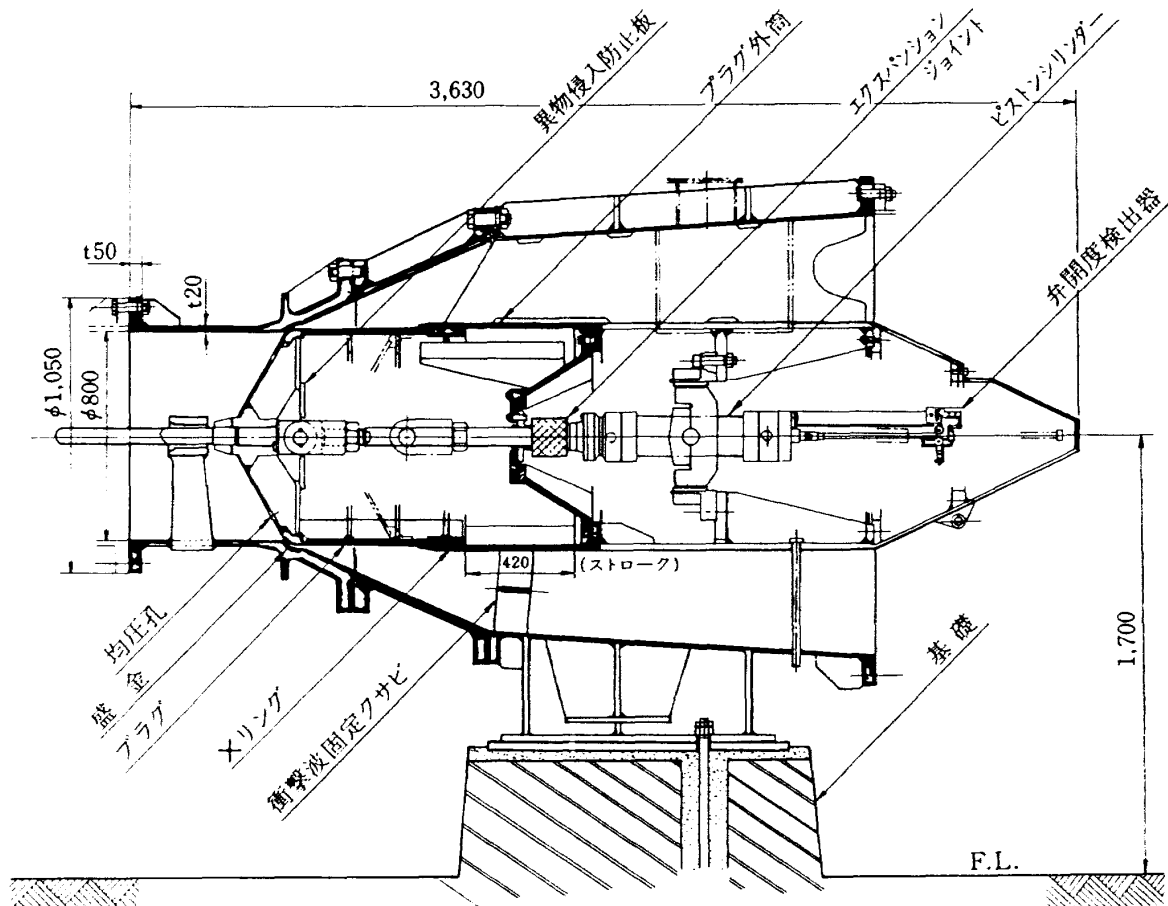


図15 第2スロート弁構造図

で与えられ、第2スロート弁開口面積の変化と測定部マッハ数の変化の関係は

$$\frac{\Delta A_{V2}}{A_{V2}} = \left( \frac{1}{M} - \frac{1.2M}{1+0.2M^2} \right) \Delta M \quad (4-2)$$

になる。ここで、一番厳しい位置決め精度が要求されるのは  $M = 0.75$  のときである。このときのマッハ数変化  $\Delta M$  を  $0.005$  としたときに、 $\Delta A_{V2}/A_{V2}$  は  $0.0026$  となり、これは、マッハ数制御精度を  $0.005$  以内にするために  $\Delta A_{V2} = 7.6 \text{ cm}^2$  以内の開口面積の微細な制御が必要であることを示している。この値は、第2スロート弁開口面積  $5000 \text{ cm}^2$  の  $0.15\%$  であり、開口面積とストロークが比例するものとするれば、第2スロート弁のストロークは  $0.63 \text{ mm}$  以内の微細な位置制御が必要になることを示している。

このような高精度の位置決め精度の要求に対し、通風中にそれを阻害する要因として弁プラグ部に作用する空気力、気密のための用いられているプラグとプラグ外筒の間のXリング部の習動抵抗（乾性摩擦）、油圧サーボ弁のドリフト、および電気信号系に混入するノイズなどが考えられる。また、長期的な油圧サーボ弁、制御用増巾器、開度検出器などの特性の経時変化があり、これらが第2スロート弁の位置設定精度を悪くする。

本風洞制御系の設計の際には、以上のようなことを考慮して、サーボ弁、制御用演算増巾器、開度検出器などの機器を選択して用いているが、他に、マッハ数制御演算部はデジタル演算装置を採用し特性安定化、高精度化を図った<sup>8)</sup>

マッハ数制御試験結果の風洞各部の状態量の応答を全体にわたって見るために、ペンオシロ記録を図16(a), (b)に示す。図16(a)はマッハ数自動制御を行ったときの応答を、図16(b)はマッハ数自動制御を行わないときの応答を示す。これらの記録は、上から、高圧導管圧力 ( $P_D$ )、集合胴圧力 ( $P_0$ )、プリナム室圧力 ( $P_L$ )、マッハ数の指標値 ( $(P_0 - P_L)/P_0$ )、模型迎角、調圧弁開度、第2スロート弁開度、および集合胴・プリナム室差圧 ( $P_0 - P_L$ ) を示す。マッハ数自動制御系の最適調整は、外乱として模型迎角を  $-2^\circ$  から  $+6^\circ$  にステップ状に変化させ、このときに生ずる測定部マッハ数の変動の時間が最小になるような制御系調節部のゲイン  $K_{pH}$  および積分時間

$T_{IH}$  を選ぶ方法で行った。図16(a), (b)から、集合胴圧力、プリナム室圧力、および  $(P_0 - P_L)/P_0$  の値は、起動後ほぼ2秒で整定していることがわかる。マッハ数自動制御を行ったときに（図16(a)）、自動制御は測定部マッハ数偏差  $\Delta M$  が  $\Delta M \leq 0.005$ 、 $\Delta M/\Delta t < 0.1$  になったときに開始し、自動制御開始直後の変動からやがて一定になる。その後、途中で模型迎角を  $-2^\circ$  から  $+6^\circ$  に変化させて外乱を与えたときに、測定部マッハ数は僅か低下するがその後再び一定値に戻る。この模型変角量は通常の高レイノルズ数試験において考え得る最大外乱量に相当する量である。マッハ数自動制御を行わない場合は（図16(b)）、自動制御開始時の測定部マッハ数の変動はないが、模型変角後にその値は低下し、一定に保持できなくなることが分る。風洞停止時においては、第2スロート弁を調圧弁よりも早く閉め（この場合0.5秒）、風洞内に高圧空気を残した状態で停止する（一時停止）。このことによって、続いて行う通風のプリチャージ時間を短縮する。

通風ナンバが異なるが、マッハ数制御試験時に収集データをプロットしたものを図17に示す。この図は、集合胴圧力 ( $P_0$ )、調圧弁ストローク ( $A_{V1ST}$ )、測定部マッハ数 ( $M$ )、第2スロート弁ストローク ( $A_{V2ST}$ )、集合胴温度 ( $T_0$ )、レイノルズ数 ( $Re$ )、および動圧 ( $q$ ) のマッハ数自動制御 on のとき（実線）およびマッハ数自動制御 off のとき（一点鎖線）についての応答を示す。マッハ数自動制御 on のときの制御動作は次の通りである。マッハ数自動制御は風洞起動後2.1秒で開始し、測定部マッハ数が整定しないうちに自動制御回路に切り換えが行われているために、 $0.5\%$  程度の第2スロート弁ストロークの突変があり、そのことによって測定部マッハ数の変動があるが、測定部マッハ数は3.3秒後に設定値の  $\pm 0.005$  以内に整定する。通風途中で模型迎角を  $-2^\circ$  から  $+6^\circ$  に変化させたときの測定部マッハ数の応答は、模型変角直後に  $0.005$  降下するが、一秒後には一定値に回復する。そのときの第2スロート弁の制御動作は、一旦僅かオーバーシュートしてからほぼ  $0.6\%$  開いた一定値に戻る。

マッハ数自動制御 off のときは、測定部マッハ数は2.7秒後に  $\pm 0.005$  以内に整定する。途中の模型

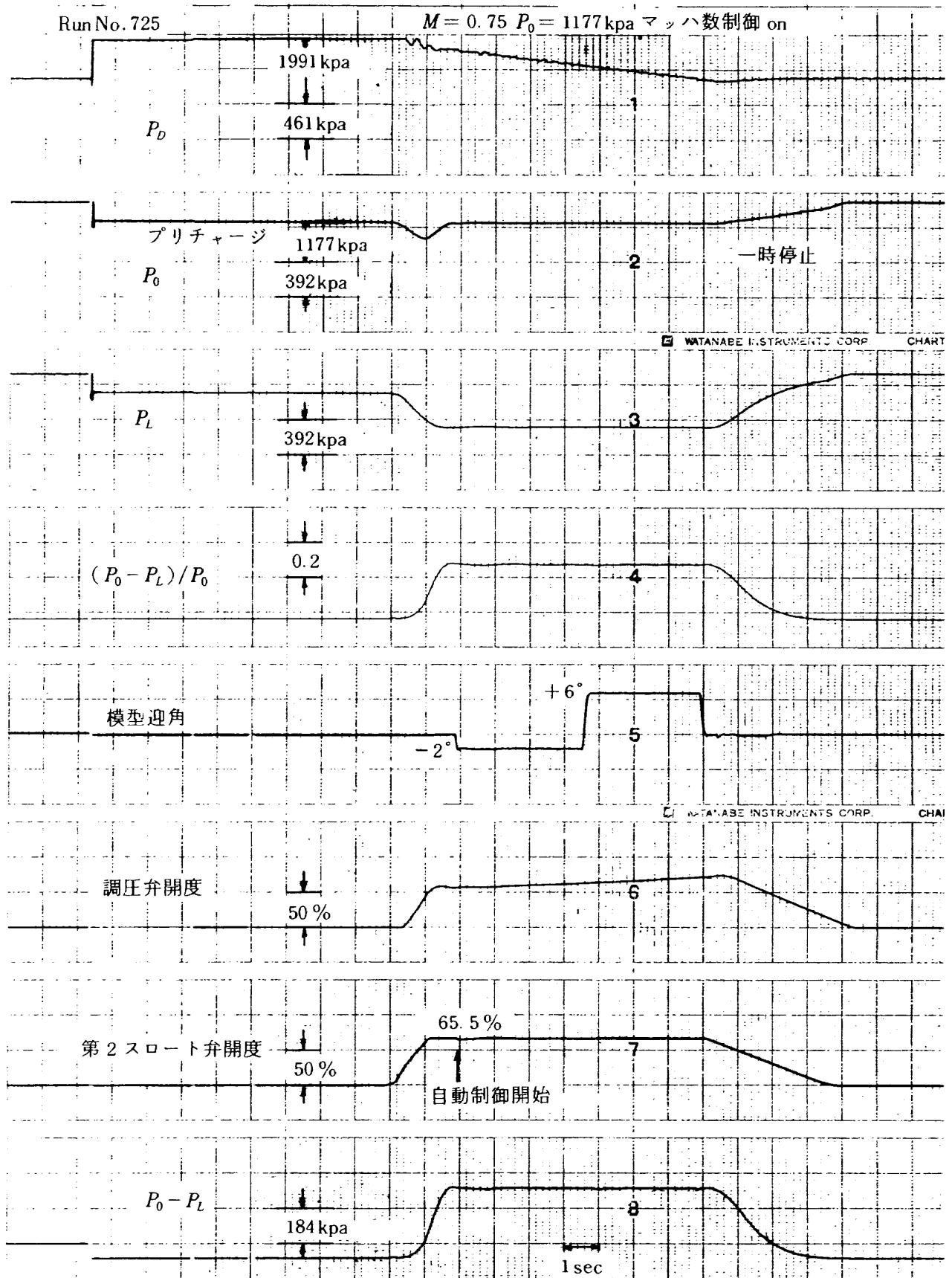


図 16(a) ペンオシロ記録 (マッハ数制御 on)

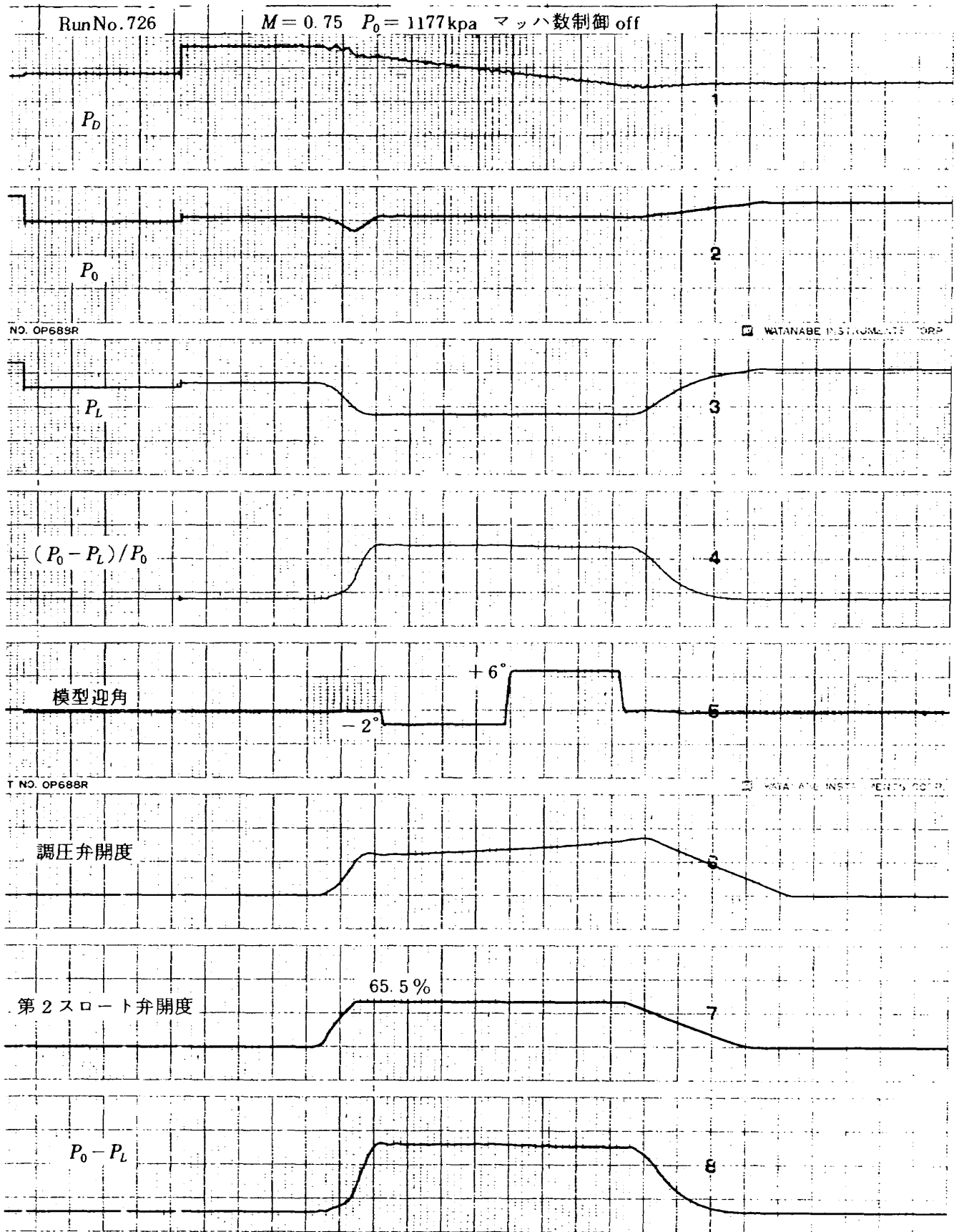


図 16(b) ペンオシロ記録 (マッハ数制御 off)

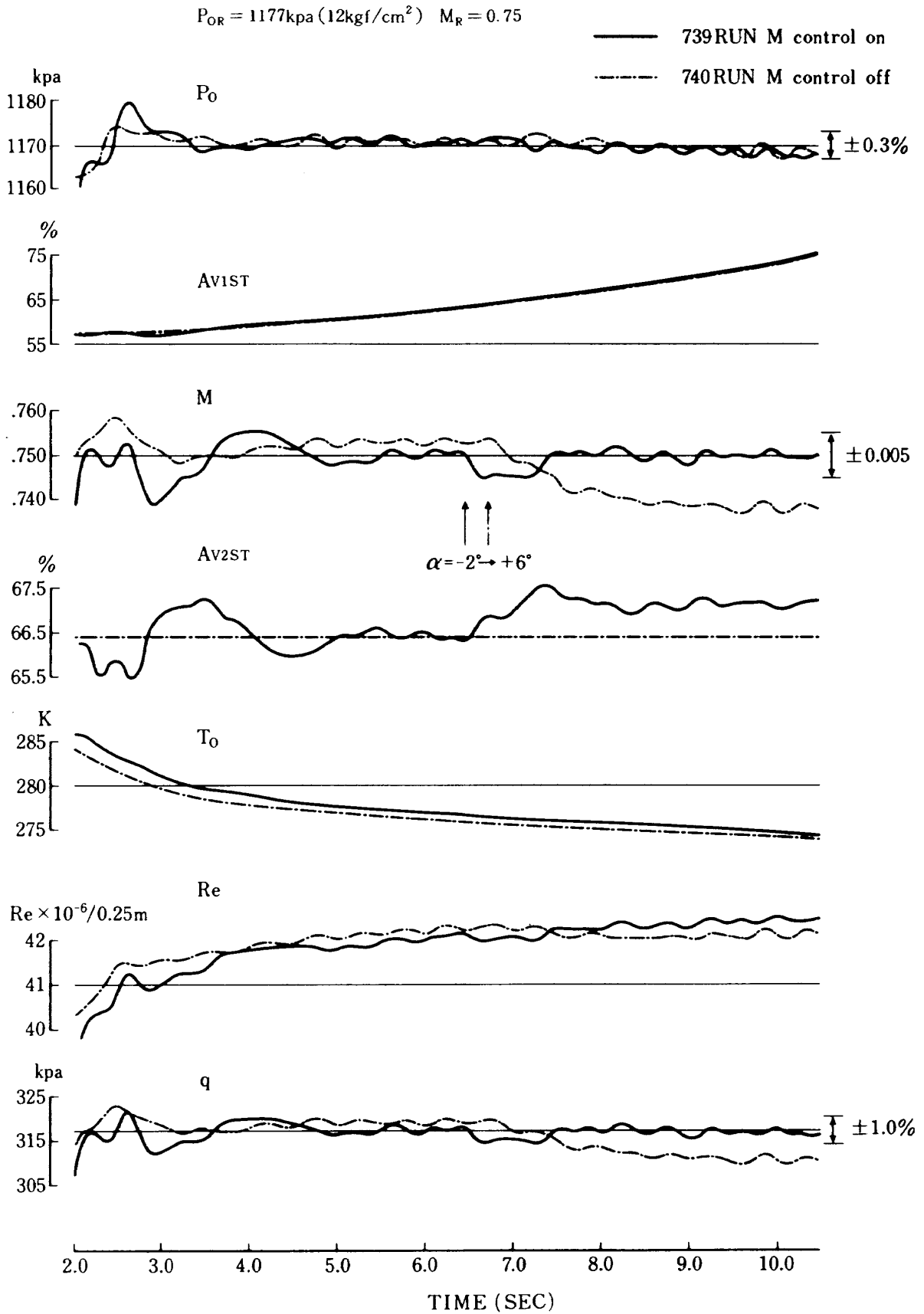


図 17 マッハ数制御応答 (亜音速,  $M_R = 0.75$ )



迎角変更による測定部マッハ数の変化は、2秒以上かかって下降し、その後一定値になる。このとき、マッハ数変化量は0.015に達する。

マッハ数自動制御 on のときの測定部マッハ数整定時間3.3秒と制御 off のときの整定時間2.7秒との差0.6秒は、マッハ数自動制御を行うことによって生じる通風時間の損失と考えることができる。しかし、このマッハ数自動制御による整定遅れは、習熟によりマッハ数制御切換え前の第2スロート弁の指定位置をより精度良く推定することによってより短くすることができる。

図17に示されているレイノルズ数が時間経過によって増えるのは、集合胴温度が時間と共に降下するためである。また、動圧は、図に示すように、マッハ数自動制御 on のときには、マッハ数制御過渡時を除いて、ほぼ一定になっている。

マッハ数自動制御を行う際に、第2スロート弁が制御動作を行うことによる集合胴圧力の変化は少い。この理由は二つある。一つは、模型迎角変化によって変化する第2スロート弁開度の変化量は、模型阻塞効果によって生じるマッハ数変化を補正する量であって、このときの第2スロート弁の開閉動作によって通風流量が変化するわけではないからである。他は、後節(6.1節)で述べるように、第2スロート弁開度変化による集合胴圧力の変化は、第2スロート弁の開度に依存し、第2スロート弁開度の大きい高亜音速試験においてはあまり影響を与えないからである。

#### 4.2.2 遷音速におけるマッハ数制御

遷音速領域におけるマッハ数制御は、弁径250mmφのロート型弁を抽気弁として用い、この弁を制御して行う。この抽気弁によるマッハ数制御は、抽気弁位置決め精度が $\Delta M = 0.005$ に対し、 $\Delta A_{VV}/A_{VV} = 0.01$ 、すなわち1%程度で良く、微細な調節を要する第2スロート弁による亜音速制御よりも精度に関して有利である。また、流れのスロート部が、第2スロート弁から測定部に移る測定部マッハ数範囲では(本風洞では $M \geq 0.8$ )、第2スロート固定位置精度についても高精度である必要がなくなる。

設定マッハ数 $M_R = 1.0$ におけるマッハ数制御試験結果のペンオシロ記録を図18(a)および図18(b)に

示す。マッハ数制御系の調節部のゲイン $K_{PE}$ 、積分時間 $T_{IE}$ 、および微分時間 $T_{DE}$ はそれぞれ最適な値にセットされている。図18(a)はマッハ数制御を行ったときの、図18(b)はマッハ数制御を行わないときのペンオシロ記録である。

図18(a)、(b)の双方の場合において、風洞起動直後の抽気弁の開度は、過剰抽気のため、90%、1.6秒間開け、その後47%の指定位置に戻る動作をさせた。 $M_R = 1.0$ 附近においては、起動後のマッハ数整定が遅れるので(図12参照)、早めにマッハ数制御を開始させる。そのために、自動制御開始の切換えのためのマッハ数整定条件の中を拡げ $\Delta M \leq 0.02$ 、 $\Delta M/\Delta t \leq 0.1$ とした。マッハ数制御を行わない場合の応答を示す図18(b)において、測定部マッハ数が、通風途中の迎角変更によってかなり降下することを図は示している。

図19はマッハ数制御による応答変化をより詳細に比較するために、必要な状態量を拡大して示す。図は上から集合胴圧力( $P_0$ )、調圧弁ストローク( $A_{V1ST}$ )、測定部マッハ数( $M$ )、抽気弁開度( $A_{VV}$ )、集合胴温度( $T_0$ )、レイノルズ数( $Re$ )、および動圧( $q$ )の通風中の時間履歴を表す。実線はマッハ数制御を行ったときの応答を、一点鎖線はマッハ数制御を行わないときの応答を示す。この図から、集合胴圧力はマッハ数制御のON、OFFによって変化はないが、通風終了近くになったときに、僅か低下することが分る。これは調圧弁開度が80%附近の広開度では、貯気槽圧力と集合胴圧力の差が小さくなるために調圧弁開速度が急速に加速され、集合胴圧力制御系の追従性が悪くなって偏差が大きくなるためである。

マッハ数制御を行ったときと、行わないときの測定部マッハ数の応答の差異は歴然としている。マッハ数制御を行わないときの測定部マッハ数の応答は、過剰抽気によってわずかオーバーシュートしやがて整定するが、その整定値は希望する値にならない。これは通風毎の再現性が期待できないことを示す。マッハ数制御を行わない場合には、模型迎角変更によって測定部マッハ数は0.03以上変化し、一定値に整定するまでに3秒以上かかる。このような時間遅れは、亜音速 $M_R = 0.75$ における測定部マッハ数の

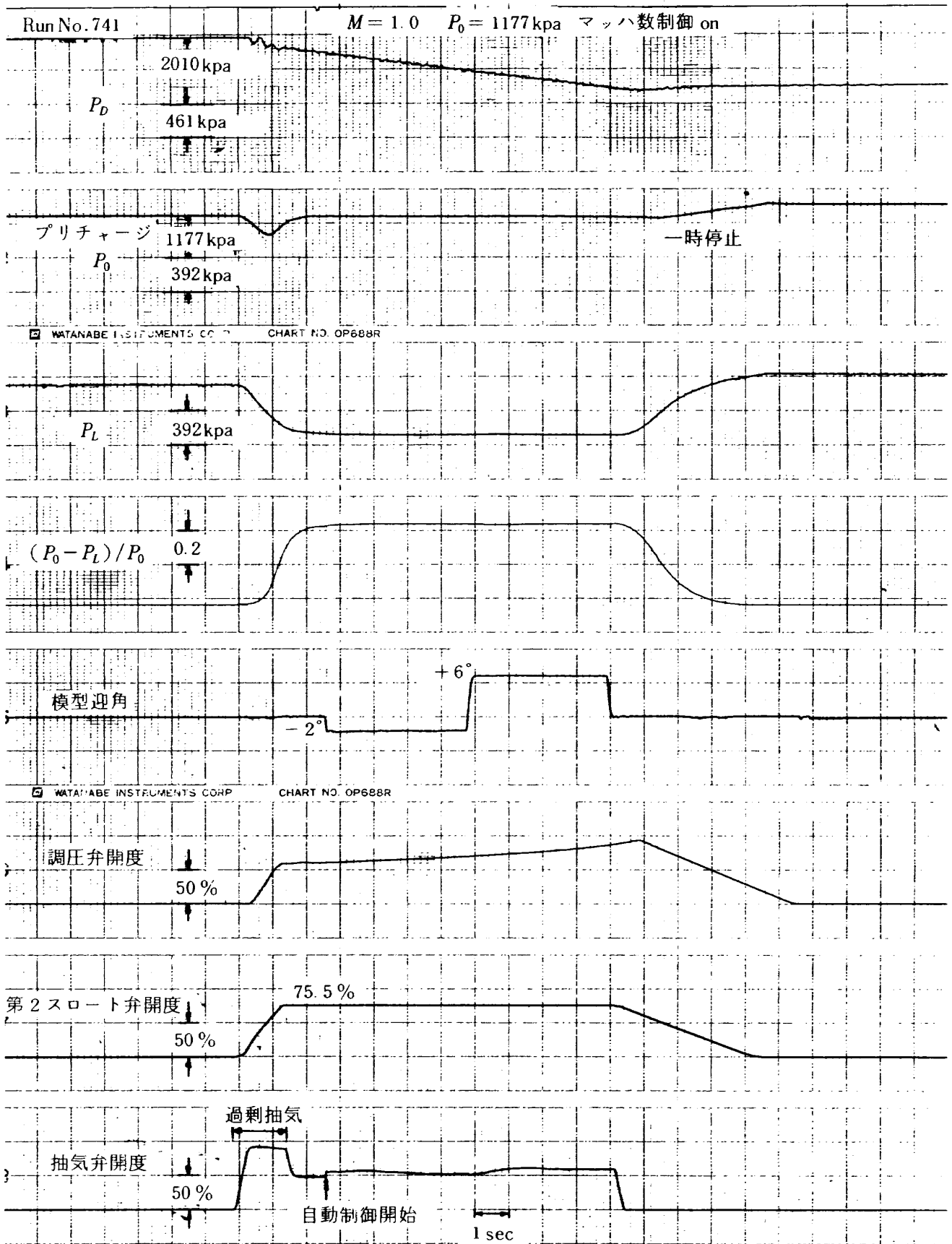


図 18(a) ペンオシロ記録 (マッハ数制御 on)

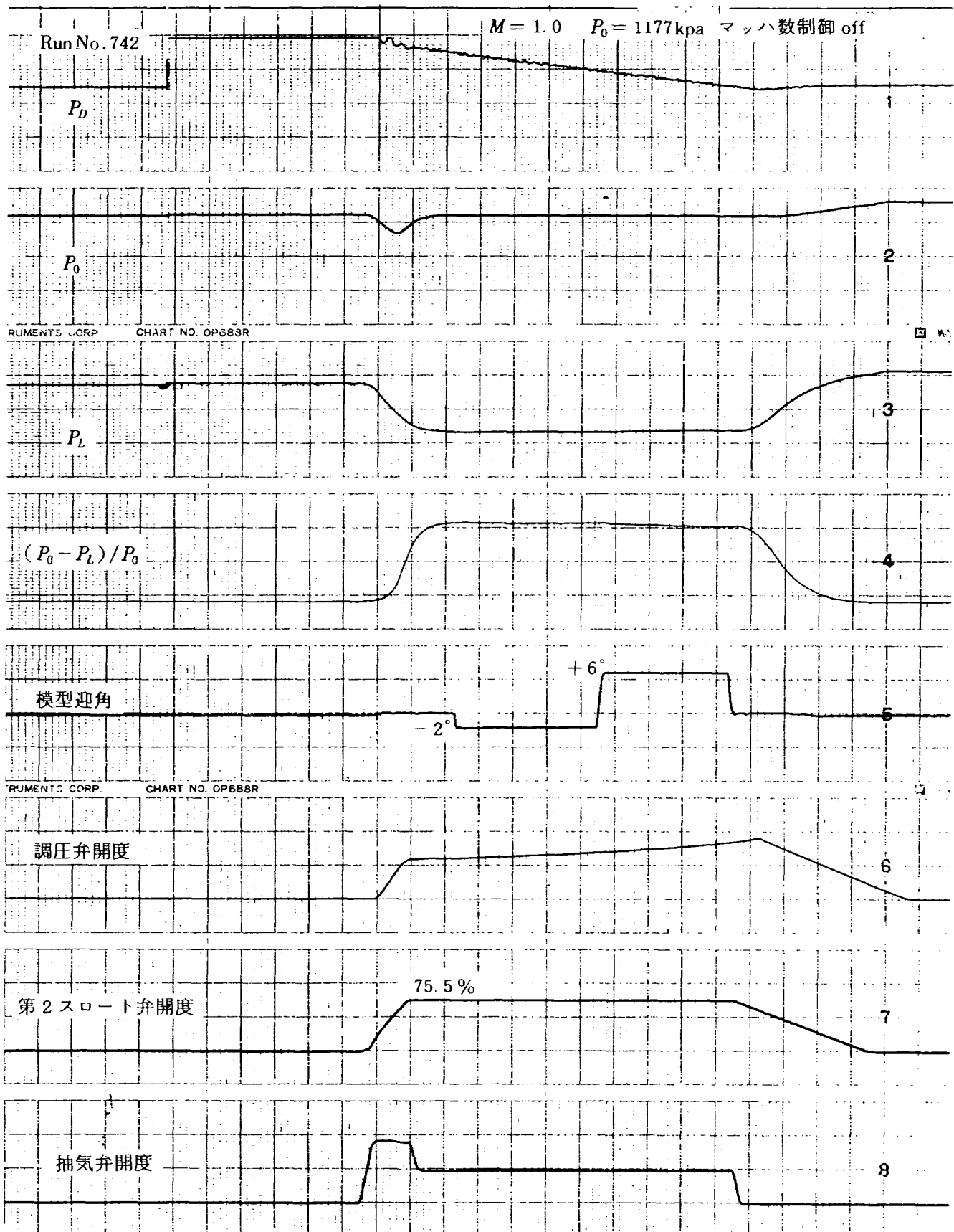


図 18(b) ペンオシロ記録 (マッハ数制御 off)

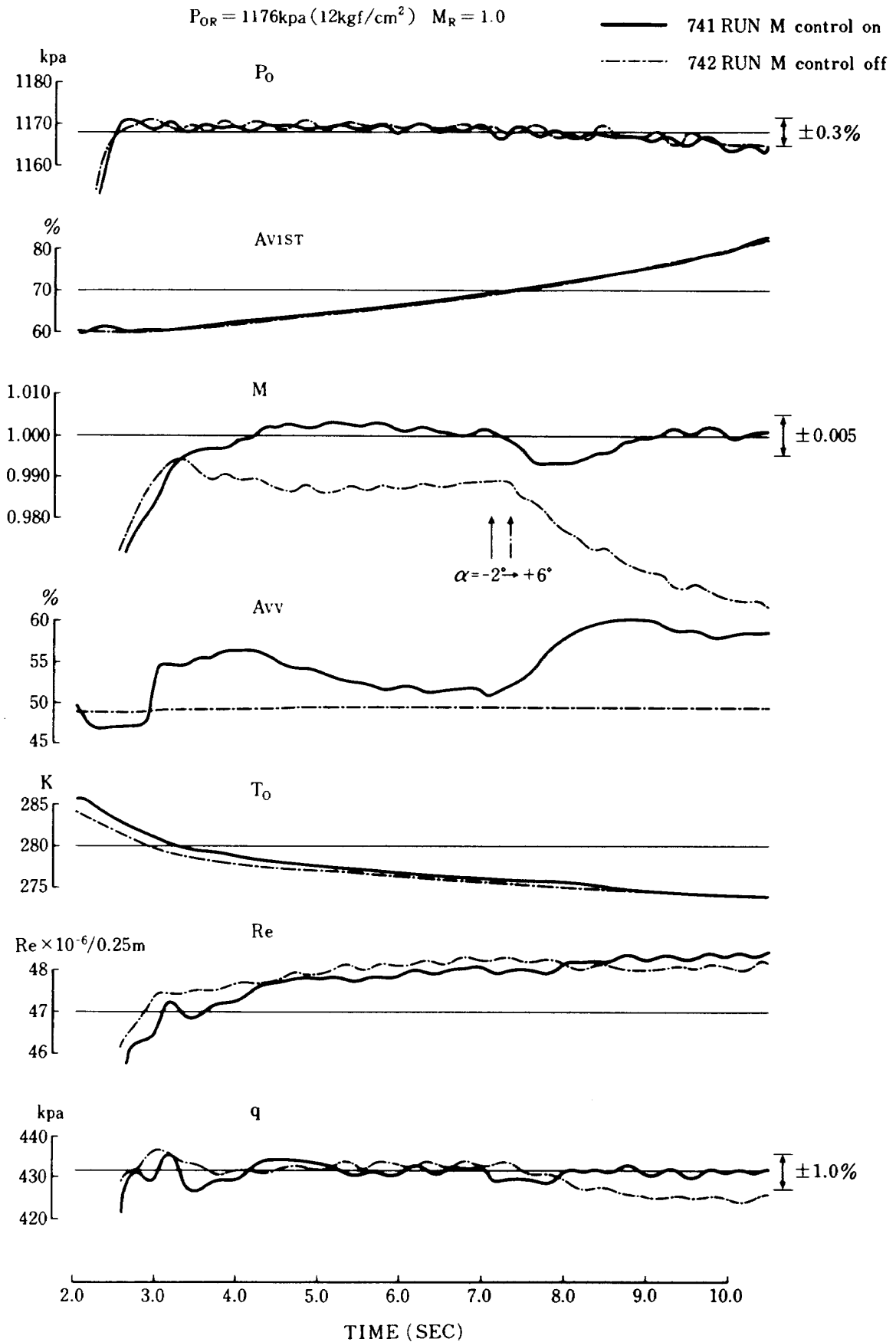


図 19 マッハ数制御応答 (遷音速,  $M_R = 1.0$ )

応答(図17参照)と比較して著るしく大きい。この原因は、風洞起動時の測定部マッハ数整定遅れと同じように(図12参照)、測定部内の流れが阻塞状態になることによって測定部下流の静圧は高くなり、測定部下流部におけるプリナム室から測定部への流れ(Inflow)がなくなるためにプリナム室内の空気は、専ら抽気弁によって排気が行われるためと考えられる。そのために、プリナム室圧力が平衡するまでかなりの時間を要する。

マッハ数制御を行ったときの抽気弁開度は、制御調節部に微分演算要素があるために、マッハ数自動制御開始と同時に急開し、オーバーシュートする。測定部マッハ数は通風開始後ほぼ3.5秒で設定マッハ数の±0.005以内に整定する。模型迎角変化の外乱による測定部マッハ数の変動は僅か(0.006)であり、1.5秒後に再び一定値に回復する。このときの抽気弁の制御動作は、マッハ数整定を早めるためオーバーシュートする。このことは制御系の速応性を

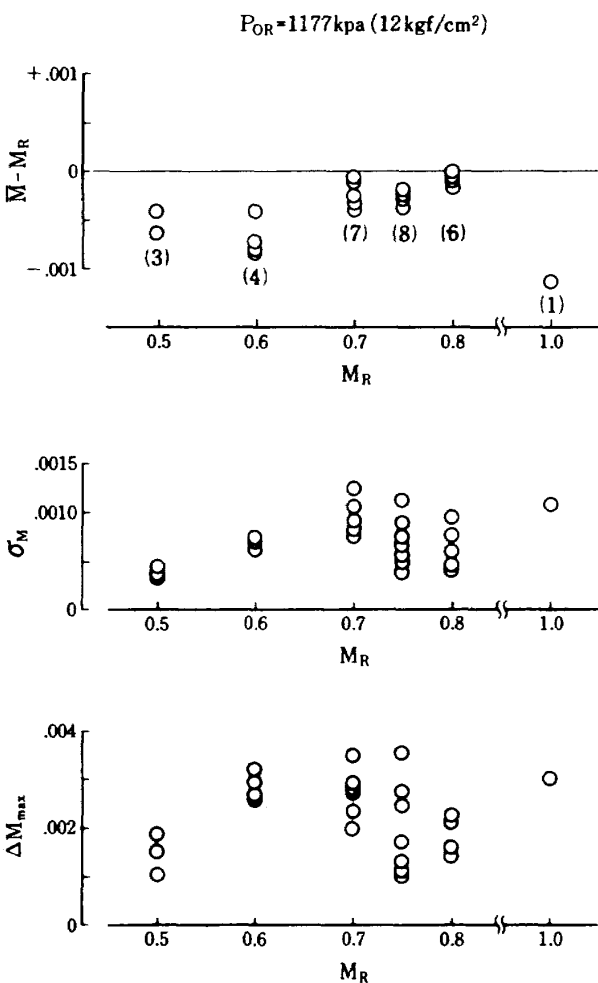


図 20 (a) マッハ数制御精度

増すために制御調節部に用いた微分演算要素が有効に作用していることを示している。

図19に示すレイノルズ数の値は時間と共に増加して行く。これは時々湖々低下する集合胴温度によるものであって、その降下量は通風流量の多い高レイノルズ数高速試験において特に大きくなる。

動圧は、集合胴圧力、および測定部マッハ数を一定に制御することによって、制御過渡時を除いて、ほぼ一定に保持されていることを図は示している。

### 4.3 制御精度

本風洞の高レイノルズ数、亜音速～遷音速流における集合胴圧力制御、およびマッハ数制御による測定部気流の制御精度を図20(a)~(d)、表3(a)、(b)に示す。これらの試験結果は、設定集合胴圧力  $P_{OR} =$

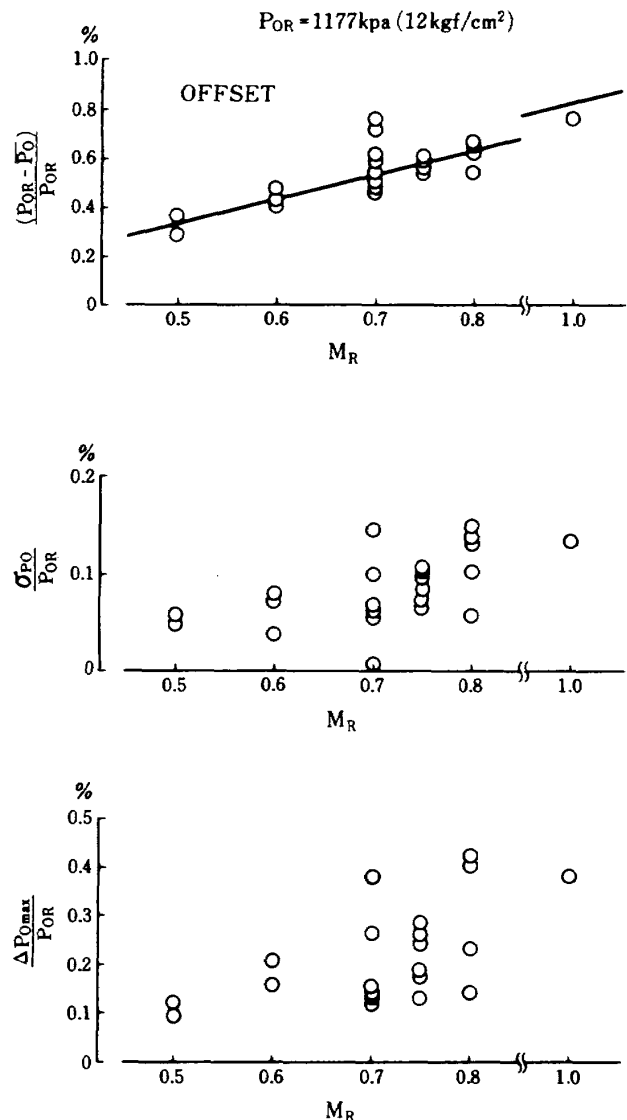


図 20 (b) 集合胴圧力制御精度

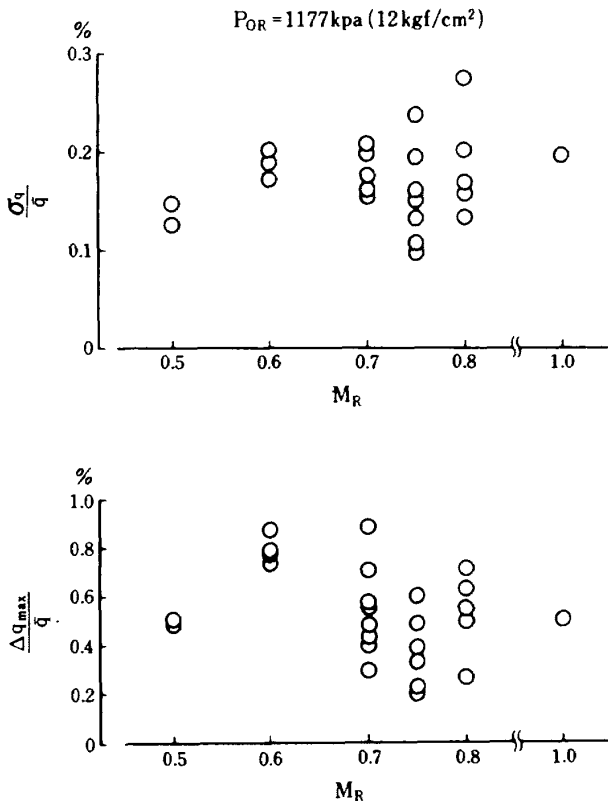


図 20 (c) 動圧変動

1177kpa(12kgf/cm<sup>2</sup>)における設定マッハ数範囲 $M_R = 0.5 \sim 1.0$ について、マッハ数制御試験時の2 RUNと翼型経常試験時の27 RUN合計29 RUNの通風回数分の制御データをまとめたものである。得られた時系列データを(3-6)~(3-22)式を用いて計算機処理したもので、時系列データの処理対象区間は、測定部マッハ数が設定マッハ数の±0.005以内に整定した後、翼面上の圧力分布測定用のスキヤニバルブが一回転し、同時に、翼後流のウェーク測定用ピトトラバース装置がスィープする時間、すなわち、一模型迎角の計測時間で、ここではほぼ6秒間である。ただし、マッハ数制御試験時に取得したデータについては、通風途中で模型迎角を変えて制御系に外乱を与えているために、制御過渡時の区間のデータは除いて計算してある。

図 20 (a)はマッハ数制御精度を表す。図中に記入されている( )内の数字は該当するマッハ数での通風回数を示す。測定部マッハ数の平均値 $\bar{M}$ と設定マッハ数 $M_R$ との差 $\bar{M} - M_R$ の値は、測定部マッハ数の通風毎の再現性を現す。この値は、全体的に負の値を示し、 $M_R = 1.0$ を除いて、±0.001以内である。

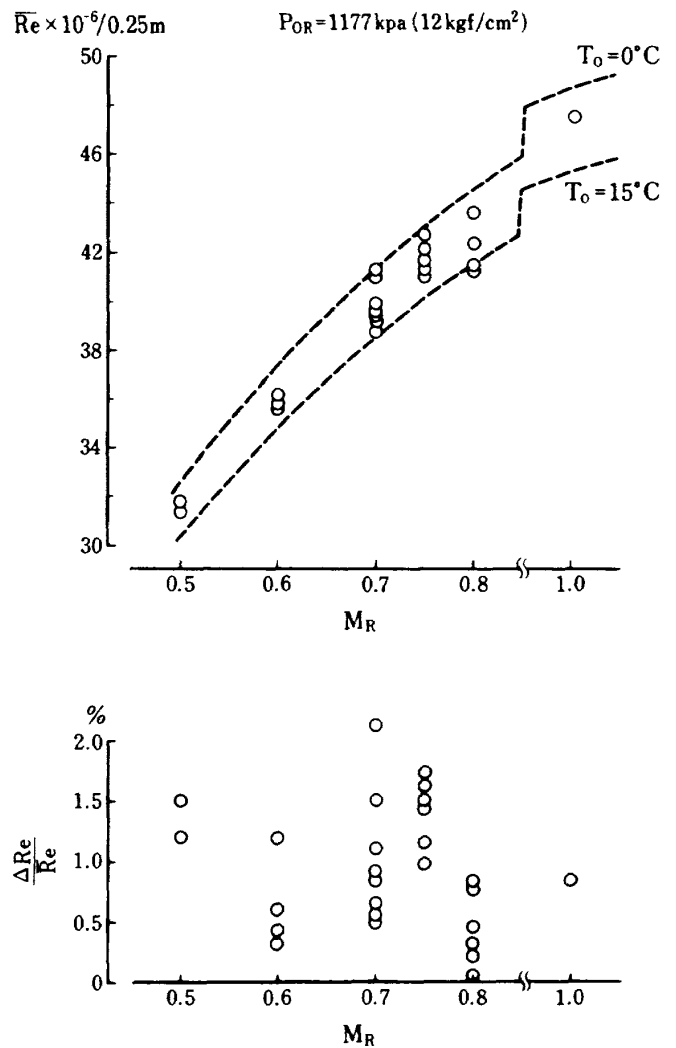


図 20 (d) レイノルズ数変化

特に、 $M_R = 0.7 \sim 0.8$ の高亜音速において $\bar{M} - M_R$ の値は小さく再現性が良い。 $M_R = 1.0$ においては、一回のみの通風データの比較に過ぎないが、他のマッハ数領域よりも再現性が悪くなること分る。

$\sigma_M$ および $\Delta M_{max}$ の値は、測定部マッハ数変動を表す量であって、 $\sigma_M$ 、すなわち、測定部マッハ数変動の標準偏差は、 $M_R = 0.5 \sim 1.0$ の範囲で0.0015以内でかなり小さい。しかし、最大変動量 $\Delta M_{max}$ は0.004以内ではあるが比較的大きな値になる。これは、図 17および図 19に示す測定部マッハ数の時間履歴を見ると分かるように、マッハ数自動制御開始時直後の変動によるもので、計測開始のマッハ数整定条件の値を±0.005以内にしたためである。この値を小さくすれば、 $\Delta M_{max}$ の値は小さく出来るが、マッハ数整定までの時間損失が増え通風時間が長くなる。マッハ数制御開始以前の第2スロート弁、

表 3(a) マッハ数制御精度 (高レイノルズ数試験)  
マッハ数制御精度 (高レイノルズ数試験)  $P_0 = 1177\text{kpa}(12\text{kgf/cm}^2)$

RUN No	設定マッハ数	$\bar{M}$	$ M_R - \bar{M} $	$\sigma_M$	$\Delta M_{max}$	備考
739	0.75	.7496	.0004	.0011	.0025	マッハ数制御試験
741	1.00	1.0011	.0011	.0011	.0030	マッハ数制御試験
805	0.50	.4993	.0007	.0005	.0015	経常試験
808	0.60	.5996	.0004	.0008	.0030	経常試験
811	0.70	.6997	.0003	.0009	.0028	経常試験
818	0.75	.7498	.0002	.0004	.0013	経常試験
823	0.80	.8000	0	.0006	.0022	経常試験

計測時間 6.0 sec

表 3(b) 集合胴圧力制御精度 (高レイノルズ数試験)  
集合胴圧力制御精度 (高レイノルズ数試験)  $P_{0R} = 1177\text{kpa}(12\text{kgf/cm}^2)$

RUN No	設定マッハ数	$\bar{P}_0$ (kpa)	OFFSET ( $\bar{P}_0 - P_{0R}$ )/ $P_{0R}$	$\sigma_{P_0}/P_{0R}$ (%)	$\Delta P_{0max}/P_{0R}$ (%)
739	0.75	1169.6	0.61%	0.10	0.24
741	1.00	1167.8	0.76	0.13	0.38
805	0.50	1172.4	0.37	0.06	0.12
808	0.60	1172.0	0.41	0.07	0.21
811	0.70	1171.0	0.49	0.07	0.15
818	0.75	1170.0	0.59	0.11	0.26
823	0.80	1169.3	0.63	0.10	0.23

計測時間 6.0 sec

あるいは抽気弁の指定位置を希望する測定部マッハ数が得られる値に設定できれば、切換え時の変動は少くなり、 $\Delta M_{max}$ の値は小さくできる。図 20(a)の $\Delta M_{max}$ の値にバラツキがあるのは、弁指定位置が良好であった場合とそうでなかった場合があったからである。

図 20(b)は集合胴圧力制御精度を表す。集合胴圧力は、通風中、一定の値に保持されてさえいれば、設定値からの多少のずれは許される。集合胴圧力の平均値の設定値からの偏り ( $P_{0R} - \bar{P}_0$ )/ $P_{0R}$  %は、図に示すように、設定マッハ数が増えるに従って大きくなる。これは、時間と共に降下する貯気槽圧力

が集合胴圧力制御系に外乱として入り、制御系の定常位置偏差(オフセット)が生じるためである。この偏差は、貯気槽圧力の降下率が大きくなるに従って、すなわち通風流量が多くなるに従って大きくなる。図に示す実線は、設定マッハ数が大きくなるに従って通風流量が増え偏差が大きくなる様子を示す。この偏差量は、 $M_R = 0.5 \sim 1.0$ の範囲で、ほぼ0.3%から0.8%に増える。

集合胴圧力の変動を示す標準偏差  $\sigma_{P_0}/P_{0R}$  %、および最大変動量  $\Delta P_{0max}/P_{0R}$  %は、偏差量と同様に、設定マッハ数と共に増える傾向にある。 $\sigma_{P_0}/P_{0R}$ の値は、設定マッハ数  $M_R = 0.5 \sim 1.0$ の範囲で0.15

%以下になり、小さな値であると言える。 $\Delta P_{0max}/P_{0R}$ の値は、設定マッハ数と共に増えると同時に、バラツキも大きくなる。 $\Delta P_{0max}/P_{0R}$ の値が大きくなる場合は、貯気槽初期圧力を十分に高くしないで通風したときに起る。このときは、通風終了近くで貯気槽圧力は低下し過ぎ、調圧弁は80%程度まで開き、集合胴圧力制御系の追従不足のために、集合胴圧力が下降し始めるからである(図19参照)。 $\Delta P_{0max}/P_{0R}$ の値は $M_R = 0.5 \sim 1.0$ の範囲で最大0.45%程度になるが、通風前の貯気槽圧力を十分に高くした状態から通風すればこのような現象はなくなり、0.3%以下を期待できる。

図20(c)は測定部気流の動圧変動を表す。この図に示す動圧の変動は(3-13)式より計算したものであるが(3-17)式を用いて集合胴圧力変動の標準偏差 $\sigma_{P_0}$ 、および測定部マッハ数の標準偏差 $\sigma_M$ より求めることができる。 $M_R = 0.75$ 附近では、図20(a)、図20(b)から $\sigma_{P_0}/P_{0R}$ 、 $\sigma_M/M_R$ の最大値はほぼ0.15%程度、 $\partial q/q/\partial M/M = 1.29$ であるから、 $\partial q/\bar{q}$ の値は、

$$\partial q/\bar{q} = \sqrt{0.15^2 + (1.29 \times 0.15)^2} = 0.25\%$$

になる。動圧変動は(3-17)式から集合胴圧力変動と測定部マッハ数変動の2乗和則によって増えるが、それぞれの変動の大きさが動圧変動の大きさに与える影響の度合いは(3-18)式の $K_M$ の値を与えるマッハ数によって異なる。遷音速附近では $K_M = \partial q/\bar{q}/\partial M/M \div 1$ であるから、動圧変動は同程度に再変動の影響を受けるが、マッハ数が低くなると、 $K_M$ の値は増えてゆき、マッハ数変動による影響が大きくなる。図20(c)に示す動圧変動 $\partial q/\bar{q}$ の値が、図20(a)、図20(b)にそれぞれ示すマッハ数変動および集合胴圧力変動が $M_R = 0.7$ 以下で小さな値になる割に、小さくならないのは、低マッハ数において、マッハ数変動の影響が大きくなるためである。図20(c)から、動圧変動 $\frac{\sigma_q}{\bar{q}}$ の値は、 $M_R = 0.5 \sim 1.0$ の範囲で0.25%以下であると言える。

動圧の最大変動量 $\Delta q_{max}/\bar{q}$ の値は1%以下である。 $M_R = 0.7$ 以上の高亜音速において、 $\sigma_q/\bar{q}$ 、および $\Delta q_{max}/\bar{q}$ の値に相当なバラツキがある。それらの値が大きい場合は、前述したように、通風終了近くの集合胴圧力低下によって集合胴圧力変動が増

え、その影響を受けたものである。

図20(d)は計測時間内のレイノルズ数の平均値 $\bar{Re}$ 、および変化量 $\Delta Re/\bar{Re}$ %を表す。レイノルズ数の変化量 $\Delta Re$ は、計測開始時のレイノルズ数 $Re(i)$ と計測終了時のレイノルズ数 $Re(f)$ との差で(3-20)式より求める。 $\bar{Re}$ は通風時の貯気槽内空気温度、貯気槽定温装置温度<sup>12)</sup>などによって変化する。又、これらの温度、貯気槽充填空気温度などの影響を受ける。図に示す破線は集合胴温度が0℃および15℃のときのレイノルズ数を表わしたもので、 $\bar{Re}$ はほぼこの2つの曲線の中に入るものと考えてよい。

集合胴温度は、貯気槽内の空気が集合胴に達するまでに、途中で貯気槽内の定温装置から熱エネルギーを受けて、ポリトロプ指数 $n = 1.07$ の等温変化に近い変化をする(図10(c)参照)。しかし、通風流量の多くなる高レイノルズ数試験において集合胴温度は5℃程度の降下がある(図17および図19参照)。図20(d)に示す $\Delta Re/\bar{Re}$ の値は主にこの集合胴温度の降下によるものである。しかしながら、高亜音速において $\Delta Re/\bar{Re}$ の値は減る傾向にある。これは、通風終了近くで貯気槽圧力を降下させ過ぎた場合に集合胴圧力が僅か下がり、その分だけレイノルズ数の値が減り、このレイノルズ数減少分と集合胴温度降下によるレイノルズ数増加分が互に相殺されるためである。通風終了近くの集合胴圧力の降下が無ければ $\Delta Re/\bar{Re}$ は増える。図から、計測時間中のレイノルズ数変化は2%以下であると言える。この程度のレイノルズ数の変化は通常の翼型試験では問題にならない値であると考えられる。

表3(a)および表3(b)は図20(a)および図20(b)にプロットしたデータのうち、各設定マッハ数における代表的な値を表にしたものである。表3(a)はマッハ数制御精度、表3(b)は集合胴圧力制御精度を表す。

#### 4.4 プリチャージ起動と普通起動の比較

本風洞の起動方式、プリチャージ起動方式と普通起動方式のうち、普通起動方式においては、前述のように高レイノルズ数試験の際に、集合胴内に設置されている整流金網差圧が異常な値を示したために、普通起動方式による高レイノルズ数風試は実施しなかった。ここでは、設定集合胴圧力を下げ、高レイ



ノルズ数試験における設定集合胴圧力  $P_{0R}=1177\text{kpa}$  ( $12\text{kgf/cm}^2$ ) の  $1/2$  の  $P_{0R}=588\text{kpa}$  ( $6\text{kgf/cm}^2$ ) におけるプリチャージ起動方式と普通起動方式のそれぞれの特徴について比較を行った。

図 21 (a)~(g)は、設定マッハ数  $M_R = 0.7$  においてプリチャージ起動および普通起動した場合の風洞各部の状態量の応答を比較するために示したものである。実線がプリチャージ起動、一点鎖線が普通起動の場合の応答である。図 21 の(a)から(g)まで示す各状態量の順に以下比較する。

〔貯気槽圧力〕図 21 (a) 普通起動の場合には、

調圧弁入口に近い高圧導管の部分で、かなりの圧力変動が風洞起動直後に見られる。この圧力変動の初期に示す大きな圧力変動の振巾値は peak-to-peak 値で  $180\text{kpa}$  に達する。これは、普通起動において、調圧弁が急開動作をするために生じるもので、調圧弁で発生した膨脹波が高圧導管内を上流に向かって進行し、反対側の終端で反射し戻るといったような繰返しを行い、やがて減衰するという過程をとるために起る。このときの振動波形は、複雑な高圧導管配管系のために、単調な減衰振動波形ではない。この振動は風洞起動後約  $3.5$  秒で消滅する。プリチャージ

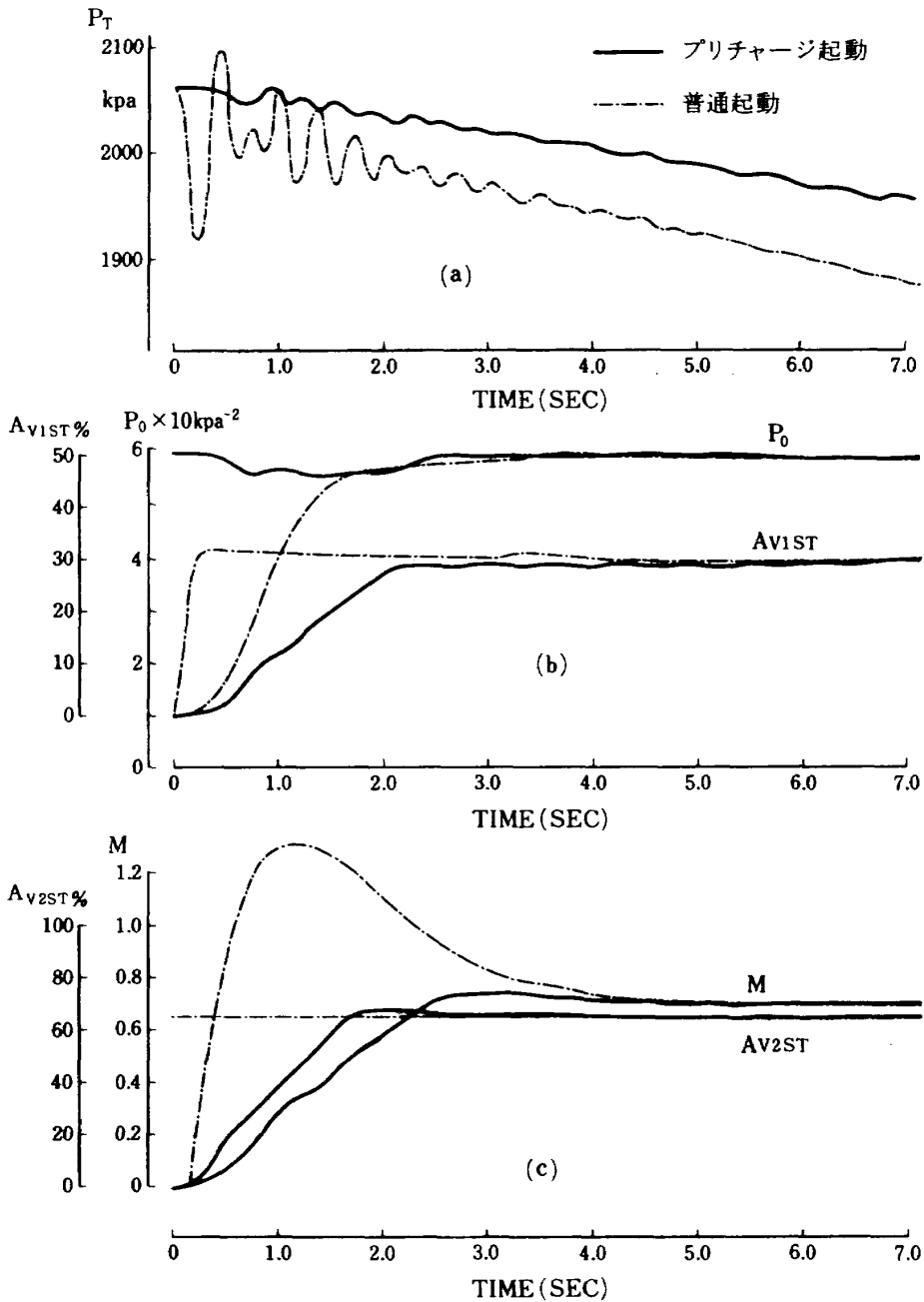


図 21 (a)~(g) プリチャージ起動と普通起動の比較

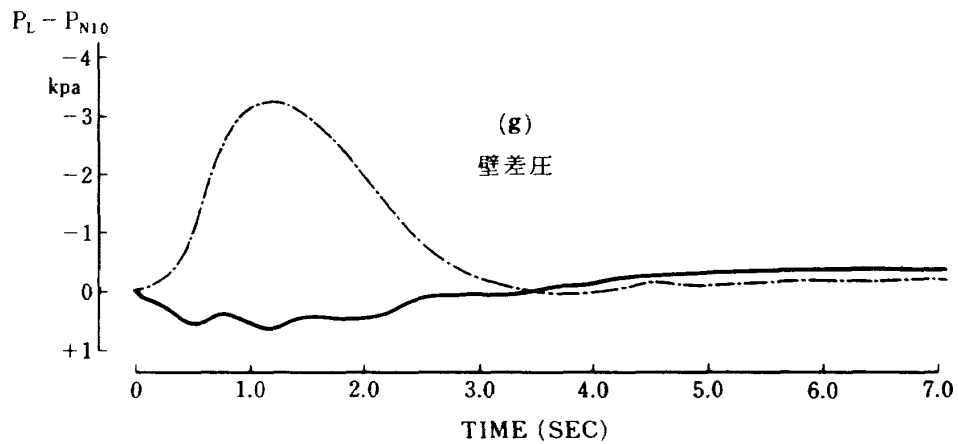
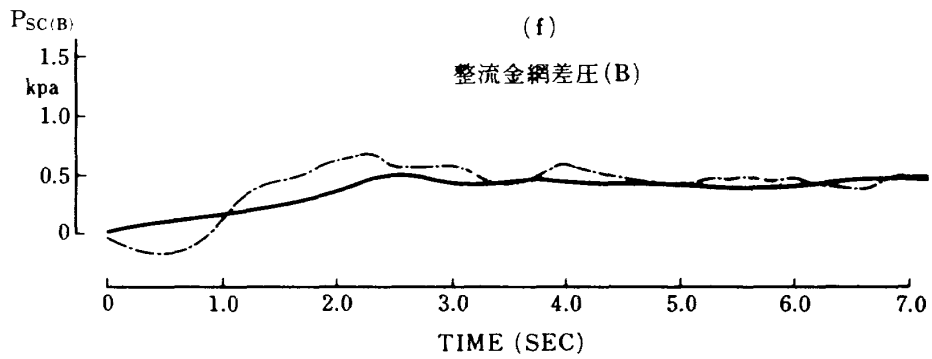
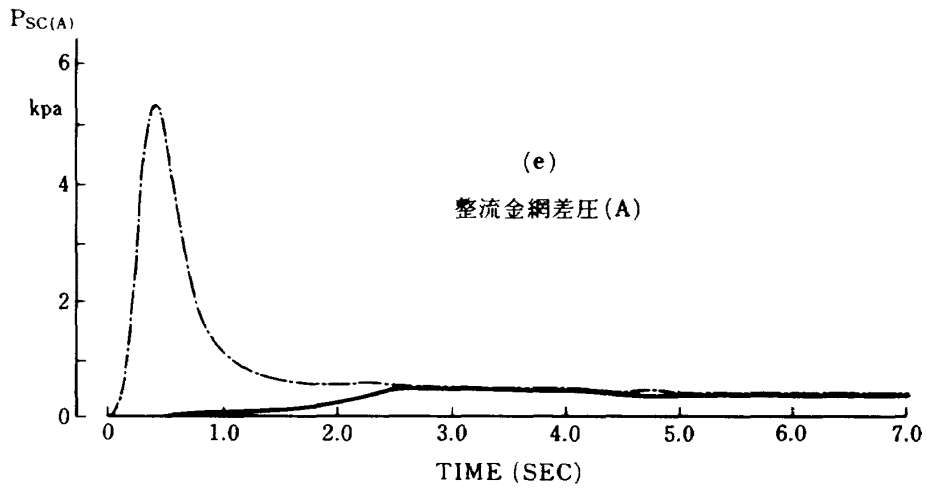
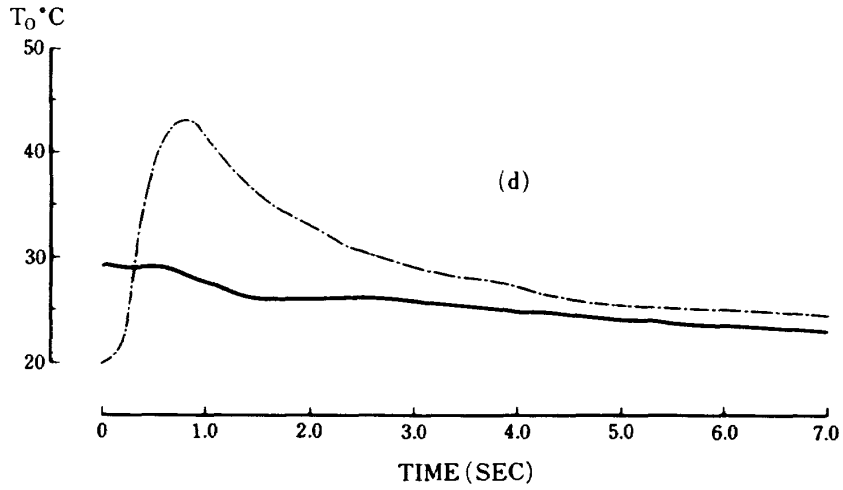


図 21 (a)~(g) プリチャージ起動と普通起動の比較 (続き)

起動の場合は、調圧弁が緩やかに開くので、高圧導管内の圧力変動は僅かである。

普通起動の場合の方がプリチャージ起動の場合よりも貯気槽圧力の降下率が大きくなるので、風洞起動時に消費する貯気槽内の空気量は、普通起動の場合の方がプリチャージ起動の場合よりも多くなる。

〔集合胴圧力〕図 21 (b) まず、前述した風洞起動時の高圧導管内の圧力振動は、調圧弁下流の圧力、すなわち集合胴圧力に、普通起動、プリチャージ起動の双方の場合において影響を与えていないことが分る。

プリチャージ起動の場合には、風洞起動後、集合胴圧力は約 40kpa (設定集合胴圧力の約 7%) 低下し、2.5 秒後に整定する。普通起動の場合は、集合胴圧力が ±0.5% 以内に整定するのに約 3.5 秒かかる。しかし、調圧弁をオーバーシュートさせることによって、整定時間を 2 秒程度にすることは可能である。

〔測定部マッハ数〕図 21 (c) プリチャージ起動においては、測定部マッハ数は約 2.5 秒で整定する。しかし、普通起動においては、測定部マッハ数は、大きくオーバーシュートするために、整定するまでにかかなりの時間を要する。ここでは整定時間は 5 秒以上である。これは、普通起動において、集合胴圧力を最短時間で整定させようとする、集合胴圧力とプリナム室圧力との差圧が起動過渡時に大きくなり測定部マッハ数にオーバーシュートが生じるようになることを示している。このオーバーシュートは、集合胴体積 (39.4m<sup>3</sup>) とあまり変わらない体積をもつプリナム室 (32m<sup>3</sup>) 内圧力の整定遅れによるものであるから、普通起動においては、風洞内全体を高圧空気で充填しておいてから起動するプリチャージ起動よりも測定部マッハ数の整定時間はかなり長くなる。このことは、本風洞の高レイノルズ数試験において、普通起動方式で風洞を起動させた場合には、必要な計測時間 (6 秒以上) を確保することが困難であることを示す。

図 11 に示すカナダ、NAE の二次元風洞における測定部マッハ数の整定遅れ<sup>11)</sup>についても、同風洞が普通起動方式であって本風洞の普通起動の場合の測定部マッハ数応答に類似していることから、前述し

たようなことが原因であると考えられる。

〔集合胴温度〕図 21 (d) プリチャージ起動においては、風洞起動後、集合胴圧力の低下による温度が僅かに下がるが、その後は貯気槽から放出される空気の温度に等しくなる。普通起動の場合は、起動直後に調圧弁から集合胴に突入する空気によって、風洞内に在った空気は圧縮され、集合胴温度は 20℃ 以上上昇する。この圧縮された空気が風洞内から完全に掃気されるまで、この温度上昇状態は続く。

〔整流金網差圧〕図 21 (e), (f) 4 枚の整流金網 (10 メッシュ, 開口比 58%, 線径 0.6mm; 1 枚, 22.5 メッシュ, 開口比 60%, 線径 0.25mm; 3 枚) の内、上流側の 2 枚分の整流金網差圧  $P_{SC}(A)$  を図 21 (e) に、下流側 2 枚分の差圧  $P_{SC}(B)$  を図 21 (f) に示す。上流側の整流金網差  $P_{SC}(A)$  は、プリチャージ起動においては、通風開始後徐々に増え、定常流時の金網差圧の値になるが、普通起動の場合には、起動直後にかなり大きなピーク値を示す。これは、普通起動時において、調圧弁が急開したときに調圧弁下流で発生する圧縮波によるものであって、この圧縮波は、多孔板と吸音板でその強さは弱められつつも通過し、整流金網に達し、上流側の整流金網で散逸する。そのときに、上流側の整流金網に大きな差圧が発生するものと考えられる。下流側の整流金網差圧  $P_{SC}(B)$  は、普通起動において、また、プリチャージ起動においても起動時のピーク値を示さない。

図 22 は集合胴圧力を 392kpa (4kgf/cm<sup>2</sup>) から 588 kpa (6kgf/cm<sup>2</sup>) の範囲で変えたときに、普通起動時の上流側整流金網差圧のピーク値  $P_{SC}(A)_{max}$ 、および上下流の整流金網差圧の定常値の変化を表す。

普通起動時の上流側整流金網差圧のピーク値は、集合胴圧力の上昇と共に急に増え、定常値の 11~14 倍にもなる。集合胴圧力がほぼ 440kpa (4.5kgf/cm<sup>2</sup>) 以上になると整流金網差圧は過大警報レベル 4 kpa を越える。この値は、整流金網取付部の金網素線の応力が最大許容応力の 1/5 の値になり、安全率を含む値であるが、この値を越えて通風することは危険であり好ましくない。風洞気流が定常流になったときの整流金網差圧の値 (定常値) は小さく、その値は理論値<sup>13)</sup> と良く一致することが確かめられている。

〔壁差圧〕図 21 (g) 図は壁開口比  $\tau_w = 10\%$  の

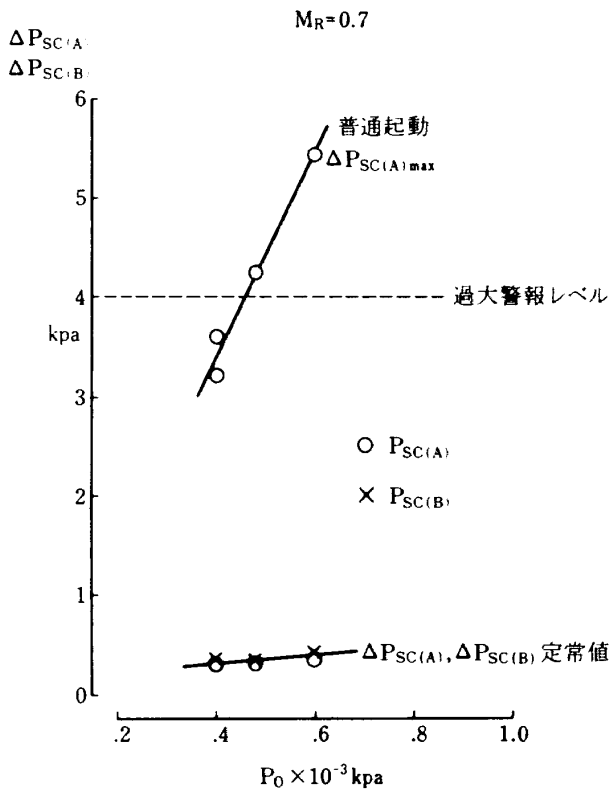


図 22 整流金網差圧

場合で、模型中心位置より下流 583mm の位置の測壁静圧とプリナム室圧力の差圧を示す。壁差圧は、プリチャージ起動と普通起動で圧力差の向きが逆になり、その大きさは普通起動の場合の方がかなり大きくなる。しかし、その値はピーク値で 3.3 kpa であり、側壁強度上の許容値 200kpa よりははるかに小さな値なので、風洞起動時の保安上の問題はない。

4.5 模型応力

風洞内圧力を高めることによって空気密度を増し、高レイノルズ数の測定部気流を得る本風洞のような型の風洞においては、模型に作用する空気力が極めて大きくなる。そのため、本風洞の二次元翼供試模型は十分な強度をもって製作されている。ここでは、安全性確認のために実施した風洞起動過渡時、および気流定常時の模型取付部の応力について述べる。図 23 は翼に作用する揚力と模型取付部の応力についての測定結果を示す。応力測定箇所は、翼本体と板状の取付腕との付け根の部分の応力  $\sigma_1$  と、模型

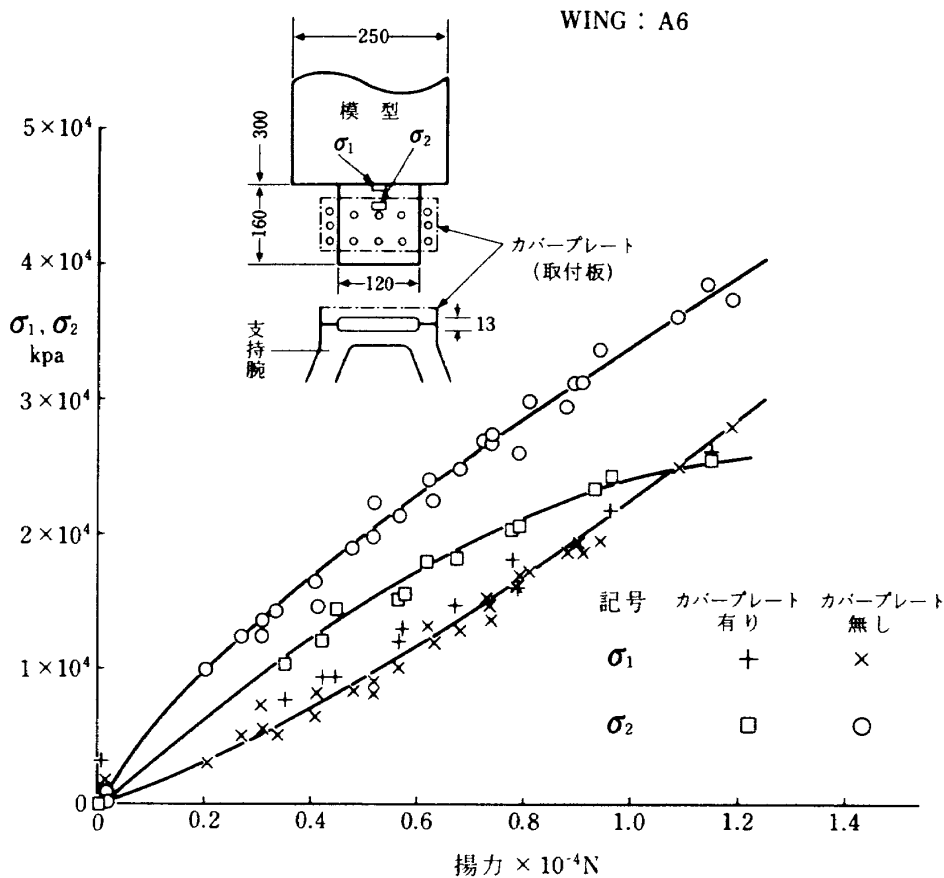


図 23 模型取付部応力

支持腕に取付けるために翼本体の取付腕(板)に  
 いる取付けボルト穴附近の応力  $\sigma_2$  の2ヶ所であ  
 る。

供試模型の支持腕に取付ける方法は2通りある。  
 1つは模型本体取付腕(板)に  
 いる6ヶ所のボルト穴を利用して支持腕に取付ける方法である  
 (カバープレート無し)。この取付け方法は、風洞  
 内圧が低い低レイノルズ数試験で模型に作用する空  
 気力が小さい場合に用い、カバープレートを取除き、  
 頭の低い平頭ボルトで取付けることによって模型上  
 面の視界を確保し、シュリーレンその他の可視化試  
 験に用いる取付け方法である。もう一つの取付方法  
 は、風洞内圧の高い高レイノルズ数試験のときに用  
 いる取付け方法で、カバープレートで模型取付部を  
 覆い取付けボルト(12mm $\phi$ ) 6本で模型支持腕に強  
 固に取付ける。模型取付け部の応力  $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  の  
 測定箇所は、それぞれ、カバープレート有りおよび  
 カバープレート無しの場合に発生する応力が最大値  
 になる場所を選んだ。

図 23 は翼に作用する揚力(模型中央断面の圧力  
 分布から計算したもの)と模型取付方法の違いによ  
 る応力の関係の測定値を示す。この結果から、 $\sigma_1$  は  
 カバープレート有無に関係なくほぼ同じ値を示し、  
 揚力の大きさに比例して大きくなる。 $\sigma_2$  の値は、当  
 然ながらカバープレートの有り無しで応力値は異  
 なる。カバープレート無しの場合の  $\sigma_2$  の値は、 $\sigma_1$  の値の  
 1.5 ~ 2 倍大きくなる。カバープレート有りの場合

の  $\sigma_2$  の値は、揚力が小さい範囲では  $\sigma_1$  より大きい  
 が、揚力が大きくなるとカバープレートの効果によ  
 って飽和する傾向を示し、揚力の大きい範囲では  $\sigma_1$   
 の値より小さくなる。本試験で与えた最大揚力は  
 $1.2 \times 10^4 N$  (1177kgf) であり、そのときの  $\sigma_1$  の値  
 は  $2.8 \times 10^4 \text{ kpa}$  (286kgf/cm $^2$ ) になる。実際の試  
 験における最大揚力は  $5 \times 10^4 N$  程度まで考えれば  
 良く、そのときの  $\sigma_1$  の値は外挿値で  $11.7 \times 10^4 \text{ kpa}$   
 (1190kgf/cm $^2$ ) になる。この値は材料の許容応力よ  
 り十分小さく安全である。カバープレート無しの場合  
 の  $\sigma_2$  の値は、実際の最大揚力を考えた場合に、  
 かなり大きな値に達するので、この取付け方法では  
 風洞内圧の高い試験は不可能であることが分る。

図 24 は風洞起動時の応力  $\sigma_1$  の時間変化を示した  
 ものである。図はプリチャージ起動した場合の応答  
 で、設定集合胴圧力 588kpa(6kgf/cm $^2$ )、設定マッ  
 ハ数 0.775 および 1.200 において測定したものであ  
 る。

超音速風洞の場合は、風洞起動時に強い衝撃波の  
 通過に伴って、模型に大きな非定常空気が過渡的  
 に加わることが知られている<sup>14)</sup>。本風洞で試験可能な  
 最高マッハ数は 1.2 であるので、そのときに発生す  
 る衝撃波の強さは超音速風洞の場合ほどではないが、  
 気流の動圧が大きいのでそれに加わる僅かな負荷が  
 あっても、模型および模型支持が過負荷状態になり、  
 その安全性が懸念された。

図 24 は風洞起動時の過負荷はなく、安全である

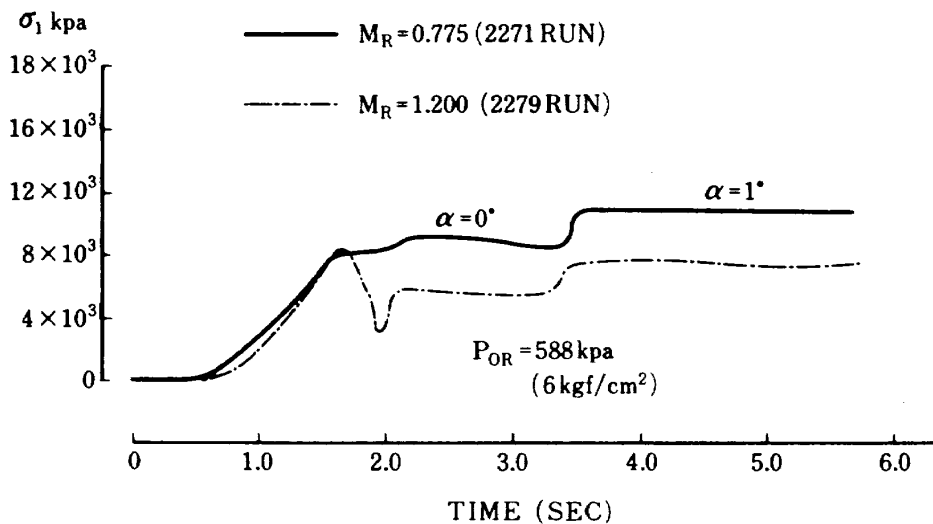


図 24 風洞起動時の模型応力

ことを示している。風洞起動後 1.6 秒までは、設定マッハ数が 0.775 の場合と 1.200 の場合で同じ応力の値を示し、その後はむしろ設定マッハ数 1.200 の方が応力は小さい。これは、翼面上の衝撃波の発生により揚力が減るためである。

#### 4.6 シミュレーションとの比較

本風洞において採用したプリチャージ起動方式の制御過程を把握し、その有効性を確かめるために実施した数値シミュレーション<sup>10)</sup>と実際の通風試験結果の比較を図 25 に示す。この比較は設定集合胴圧力  $P_{0R} = 1177\text{kpa}(12\text{kgf/cm}^2)$ 、設定マッハ数  $M_R = 0.75$  において行った。集合胴圧力制御系の調節部のゲインおよび積分時間は最適値  $K_{PC} = 5.0$ 、 $T_{IC} = 0.25\text{sec}$  に選んである。比較の結果、集合胴圧力と測定部マッハ数の応答は良い一致を示す。これは、プリチャージ起動における本風洞の数値モデルとそれを用いたシミュレーションによる風洞制御過程の予測が妥当なものであったことを示す。しかし、調圧弁および第 2 スロート弁の制御動作は実際の場合とシミュレーションの場合で幾分異なる。これは、シミュレーションの場合は弁の開口面積比を示しているが、実際の場合は弁のストロークを示しているこ

と、シミュレーションにおいて用いた弁のストロークと弁の開口面積の関係を表す流量特性が実際と多少異っていたことのためである。

#### 5. 低レイノルズ数高速試験

本風洞は実機相当のレイノルズ数で試験ができる高レイノルズ数風洞であるが、遷移、剝離あるいは衝撃波と境界層の相互干渉などの翼面上の粘性流の特性のレイノルズ数による変化、すなわちレイノルズ数効果を測定するためには、試験レイノルズ数の可変範囲を拡大して試験できることが望ましい。本風洞においてシミュレートできるレイノルズ数の可変範囲は、初期の設計仕様段階では、設定マッハ数  $M_R = 0.75$  の遷音速において、 $Re = 13.4 \times 10^6 \sim 40.1 \times 10^6$  の範囲であった<sup>15)</sup>。これは設定集合胴圧力  $P_{0R} = 392\text{kpa}(4\text{kgf/cm}^2) \sim 1177\text{kpa}(12\text{kgf/cm}^2)$  で試験することに相当する。この間の試験レイノルズ数の可変範囲は 1 : 3 である。もし、集合胴圧力を  $196\text{kpa}(2\text{kgf/cm}^2)$  に下げて試験できるとしたら、試験レイノルズ数の可変範囲は 1 : 6 になり大巾に拡大される。このときの試験可能レイノルズ数範囲は、 $M_R = 0.75$  に対して、 $Re = 6.7 \times 10^6 \sim 40.1 \times 10^6$  となる。試験可能なレイノルズ数の最低値は、

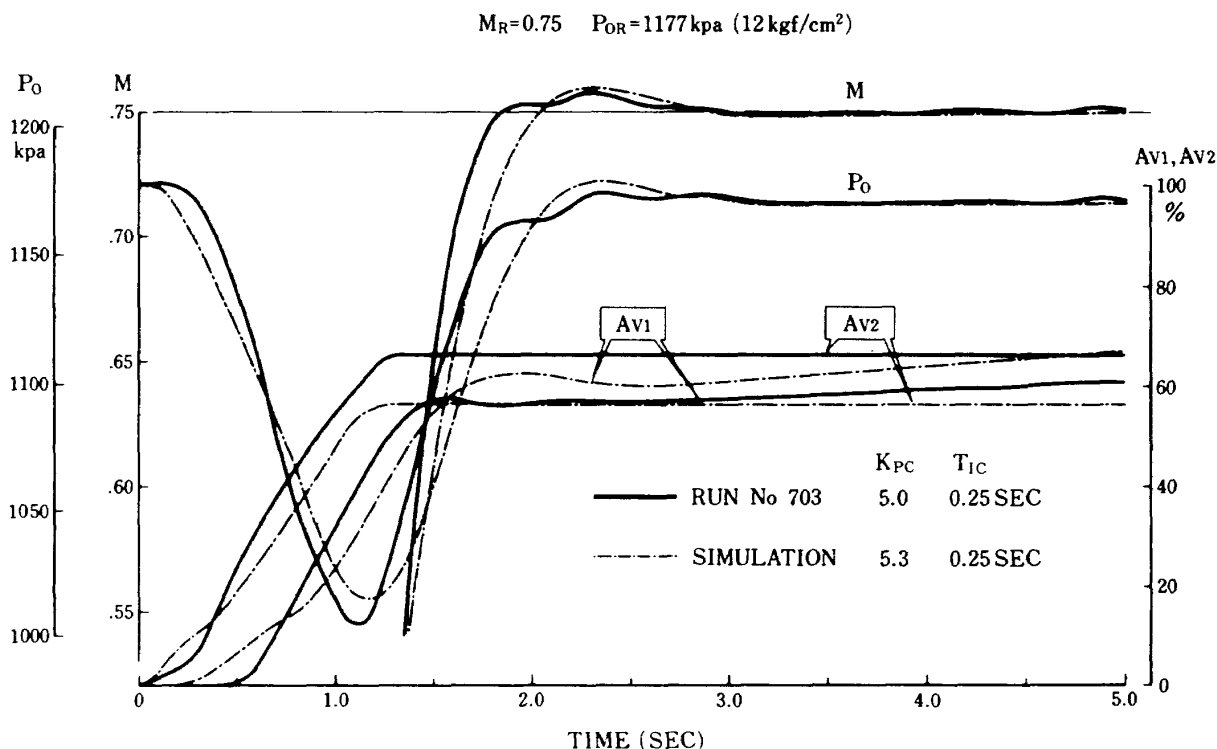


図 25 シミュレーションとの比較

従来型の遷音速風洞での試験レイノルズ数  $2 \sim 3 \times 10^6$  の値に近づき、本風洞の試験データは他風洞の試験データとレイノルズ数に関し連続した対応が付きやすくなる。

低レイノルズ数試験においては、通風流量が少くなって、かつ貯気槽内の有効な使用可能空気量が増すので通風時間に関する制限は大巾に緩和される。しかし、一方、風洞制御について次のような不都合が生じるようになる。それは、通風時の流量が小さくなるために、流量調節弁である調節弁開度が小さくなり、集合胴圧力の微細な制御が困難になってその制御精度が悪くなることである。調圧弁の流量特性は、高レイノルズ数試験で大流量を流すときに良好な特性をもつように設計されており、流量の小さい範囲での流量特性についてはあまり考慮されていない。

ここでは設定集合胴圧力が  $196\text{kPa}(2\text{kgf/cm}^2)$  の

ときの、設定マッハ数  $M_R = 0.75$  (亜音速試験)、および  $M_R = 1.0$  (遷音速試験) でマッハ数制御試験を実施した結果の気流制御精度について述べる。

### 5.1 調圧弁流量特性

本風洞に用いられている調圧弁は、弁本体に短縮ディフューザを組込んだ構造<sup>8)</sup>になっている(図26)。これは、特に通風流量の多くなる高レイノルズ数試験において、調圧弁での圧力損失を少なくすることによって、貯気槽吹止り圧力を低くし、通風時間を長くするためである。この調圧弁の流量特性を

$$G_{V1} = A_{V1} \cdot P_D' \sqrt{\frac{1}{RT_D} \frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{P_0}{P_D'} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P_0}{P_D'} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (5-1)$$

で与え、いろいろな値の集合胴圧力  $P_0$ 、および高压導管全圧  $P_D'$  の実測値について実効開口面積  $A_{V1}$  を求め、この値を調圧弁ストロークに対して表したの

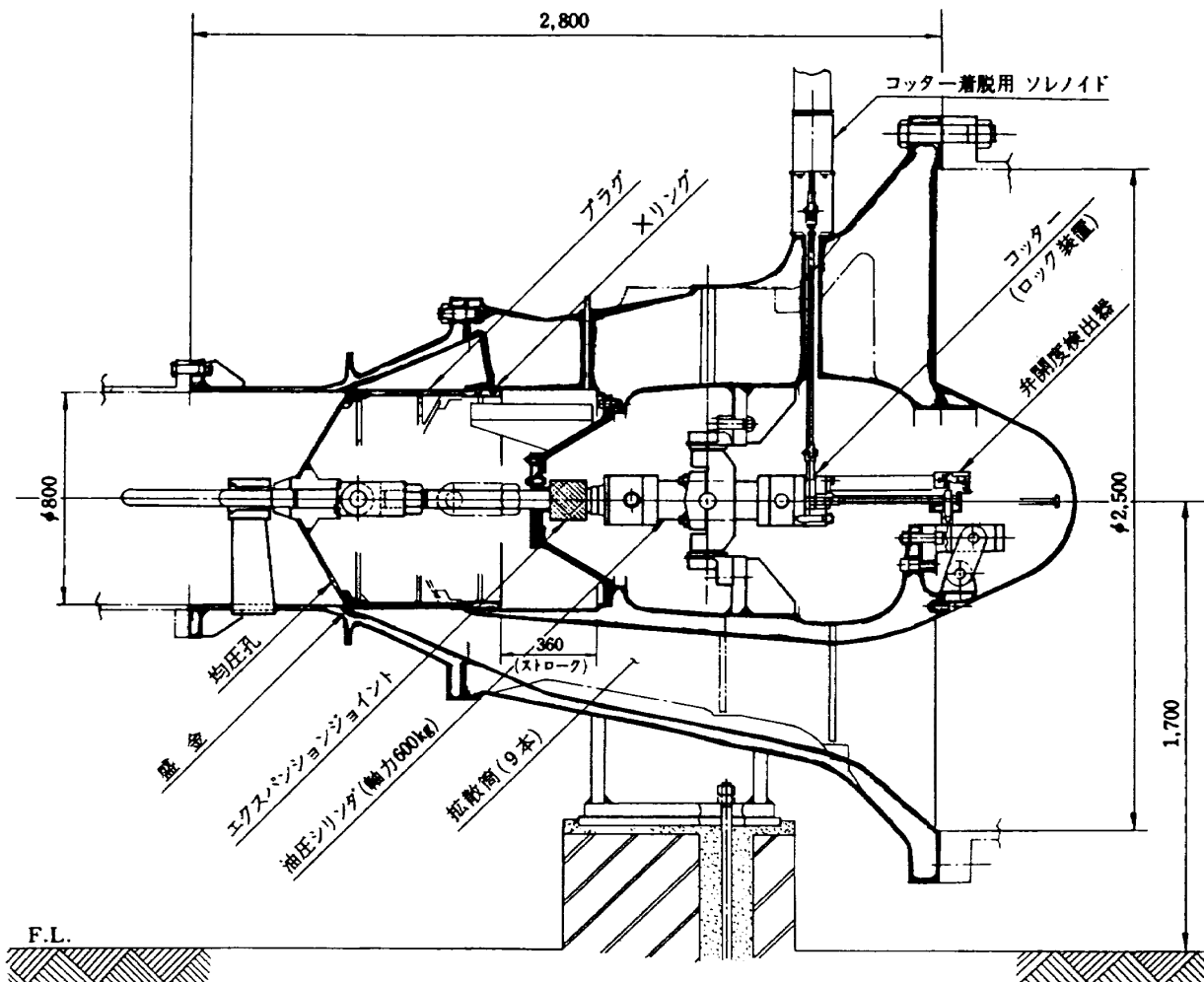


図 26 調圧弁構造図

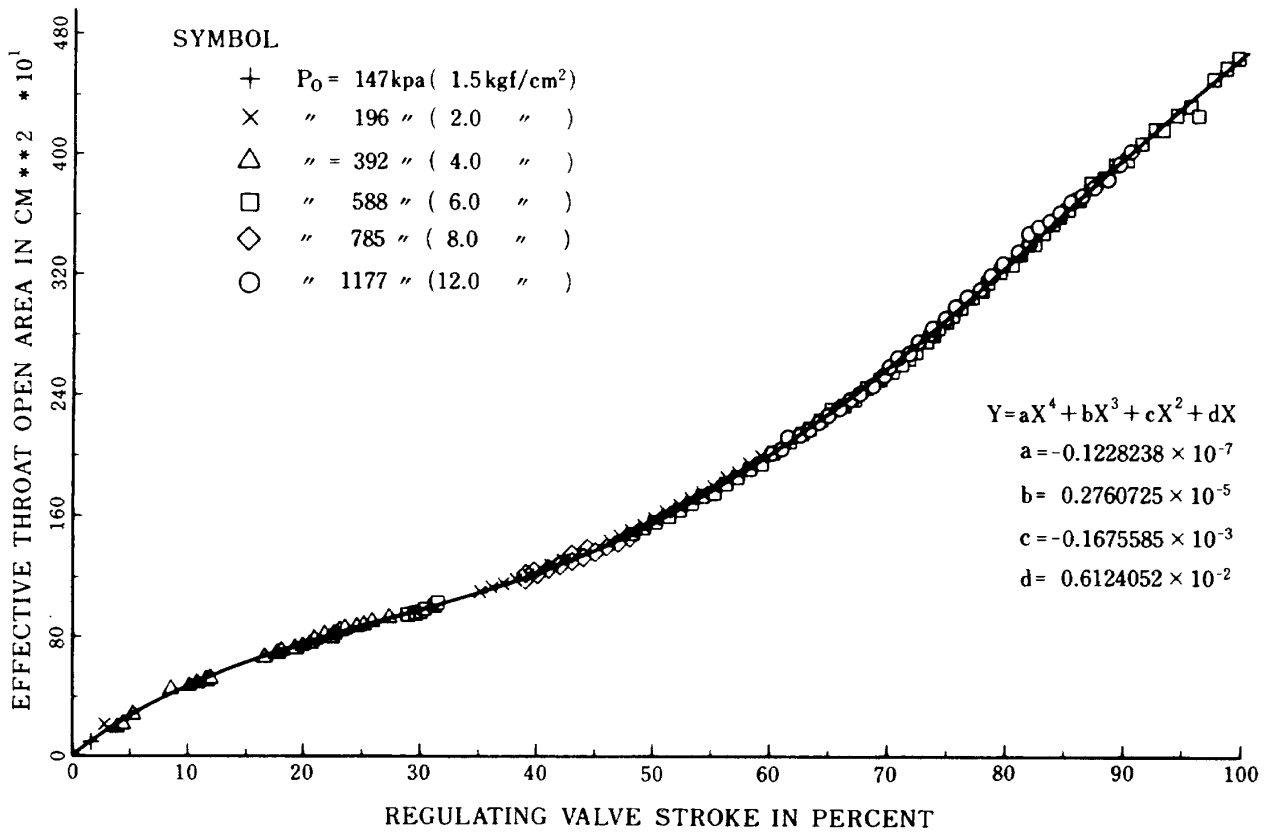


図 27 調圧弁実効開口面積

が図 27 である。ここで調圧弁流量は連続の法則より  $G_{v1} = G_n$  ;  $G_n$  : 測定部流量

$$G_n = AMP_0 \sqrt{\frac{\kappa}{RT_0} \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad (5-2)$$

より求めた。この図から、調圧弁ストロークと調圧弁実効開口面積の関係は、4 次の多項近似曲線で、あらわされることが分る。また、この試験結果から、調圧弁流量特性は、図 27 の調圧弁実効開口面積を用いて (5-1) 式から求めることができる。図 28 (a), (b), (c) はその計算結果で、図 28 (a) は集合胴圧力が 1177kpa(12kgf/cm<sup>2</sup>) の高レイノルズ数試験における調圧弁の流量特性、図 28 (b) は集合胴圧力 196 kpa(2kgf/cm<sup>2</sup>) の低レイノルズ数試験における流量特性、図 28 (c) は集合胴圧力 147kpa(1.5kgf/cm<sup>2</sup>) の限界低レイノルズ数試験における流量特性をそれぞれ表す。これらの図は、高レイノルズ数試験では調圧弁ストローク使用範囲が 50 % 以上であるのに対し、低レイノルズ数試験では 12 ~ 13 %、限界低レイノルズ数試験では 1 ~ 2 % の極めて小さな調圧弁

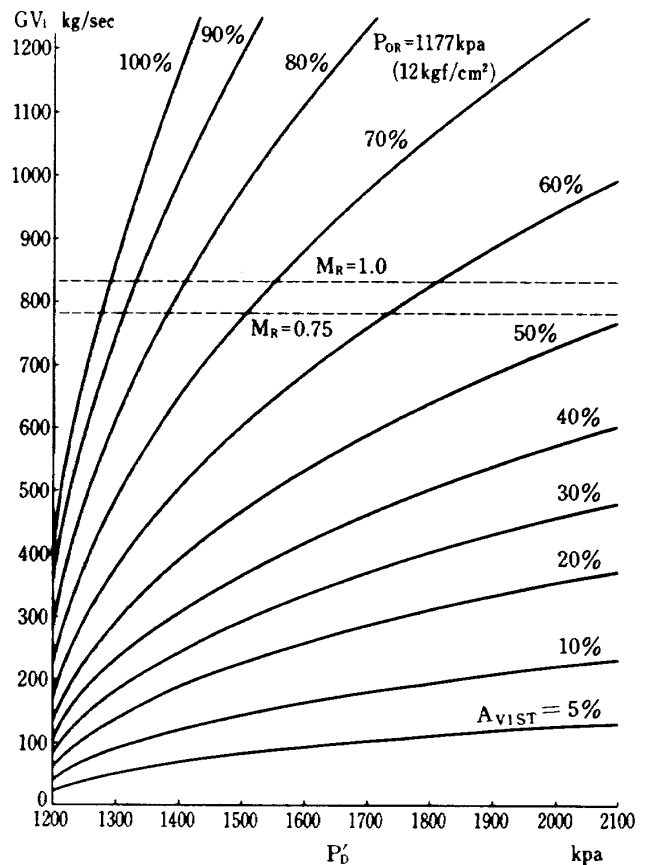


図 28 (a) 調圧弁流量特性 (高レイノルズ数試験)



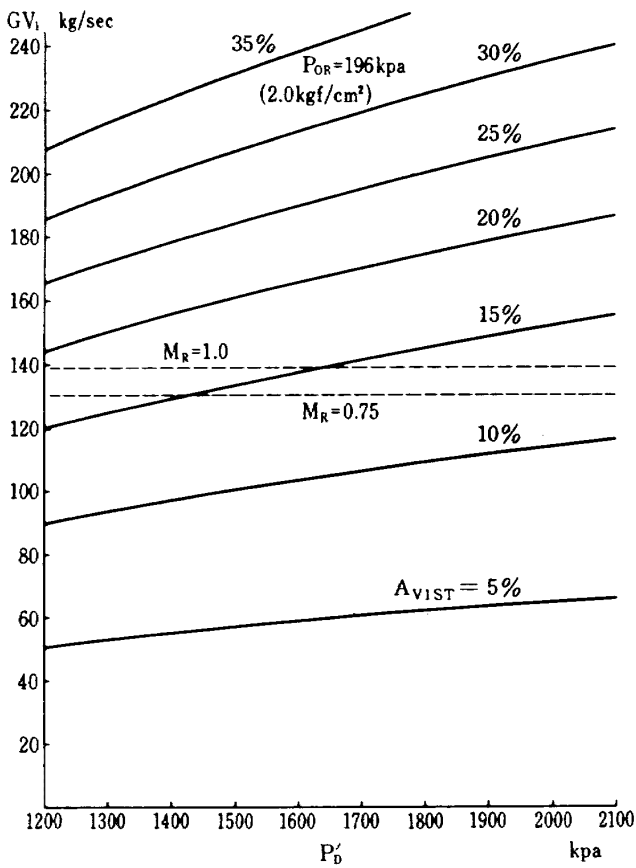


図 28 (b) 調圧弁流量特性  
(低レイノルズ数試験)

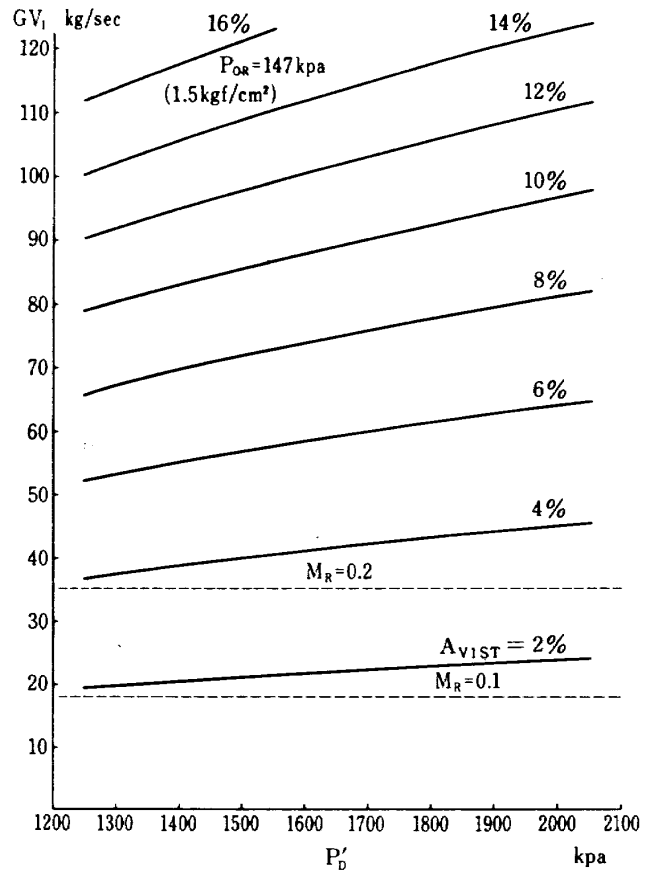


図 28 (c) 調圧弁流量特性  
(限界レイノルズ数試験)

ストローク使用範囲となることを示す。

図 29 は、図 27 から求めた調圧弁ストロークに対する実効開口面積ゲイン  $\partial A_{V1} / \partial A_{V1ST}$  を表す。実効開口面積ゲインの値は小さい値になるほど弁の位置決め精度に対する要求は緩やかになる。しかし、調圧弁は高開度において実効開口面積ゲインが大きくなる。このような開度においては貯気槽圧が低下し調圧弁前後圧力比が小さくなることにより調圧弁の効きが低下する領域であるから、このことはむしろ良好な特性であると言えよう。設定集合胴圧力が 392 kpa (4kgf/cm<sup>2</sup>) から 1177kpa(12kgf/cm<sup>2</sup>) の風試において使用する調圧弁ストロークの範囲は 20%~80%であるから、この範囲で調圧弁流量特性は良い特性を示すことが図 29 から言える。調圧弁ストロークが 15%以下で使用する低レイノルズ数試験においては、調圧弁ストロークが小さくなるに従って実効開口面積ゲインは増え、より高い調圧弁位置決め精度が要求される。一点鎖線で示すような実効開口面積ゲイン特性にすれば、低レイノルズ数における

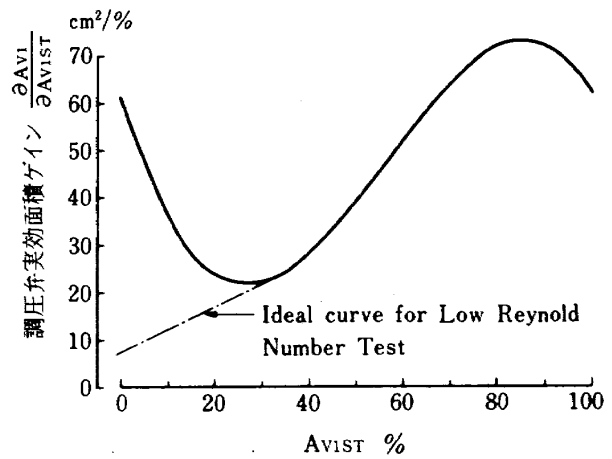


図 29 調圧弁実効面積ゲイン

集合胴圧力制御が容易になり、調圧精度が向上するものと考えられる。

### 5.2 マッハ数制御試験

低レイノルズ数風試においては、通風時間が長く取れるので、風洞起動時の集合胴圧力および測定部気流のマッハ数の整定時間についてそれほど厳しい

要求はない。したがって、低レイノルズ数における風洞起動時の集合胴圧力制御の最適調整について述べることは省略し、ここではマッハ数制御試験結果のみについて述べる。

〔亜音速マッハ数制御試験結果〕

図 30 に設定集合胴圧力  $P_{OR} = 196\text{kpa}(2\text{kgf/cm}^2)$ , 設定マッハ数  $M_R = 0.75$  におけるマッハ数制御試験結果の、風洞各部気流の状態量および弁開度の時間履歴を示す。集合胴圧力制御系の調節部、およびマッハ数制御系の調節部は最適調整されており、その

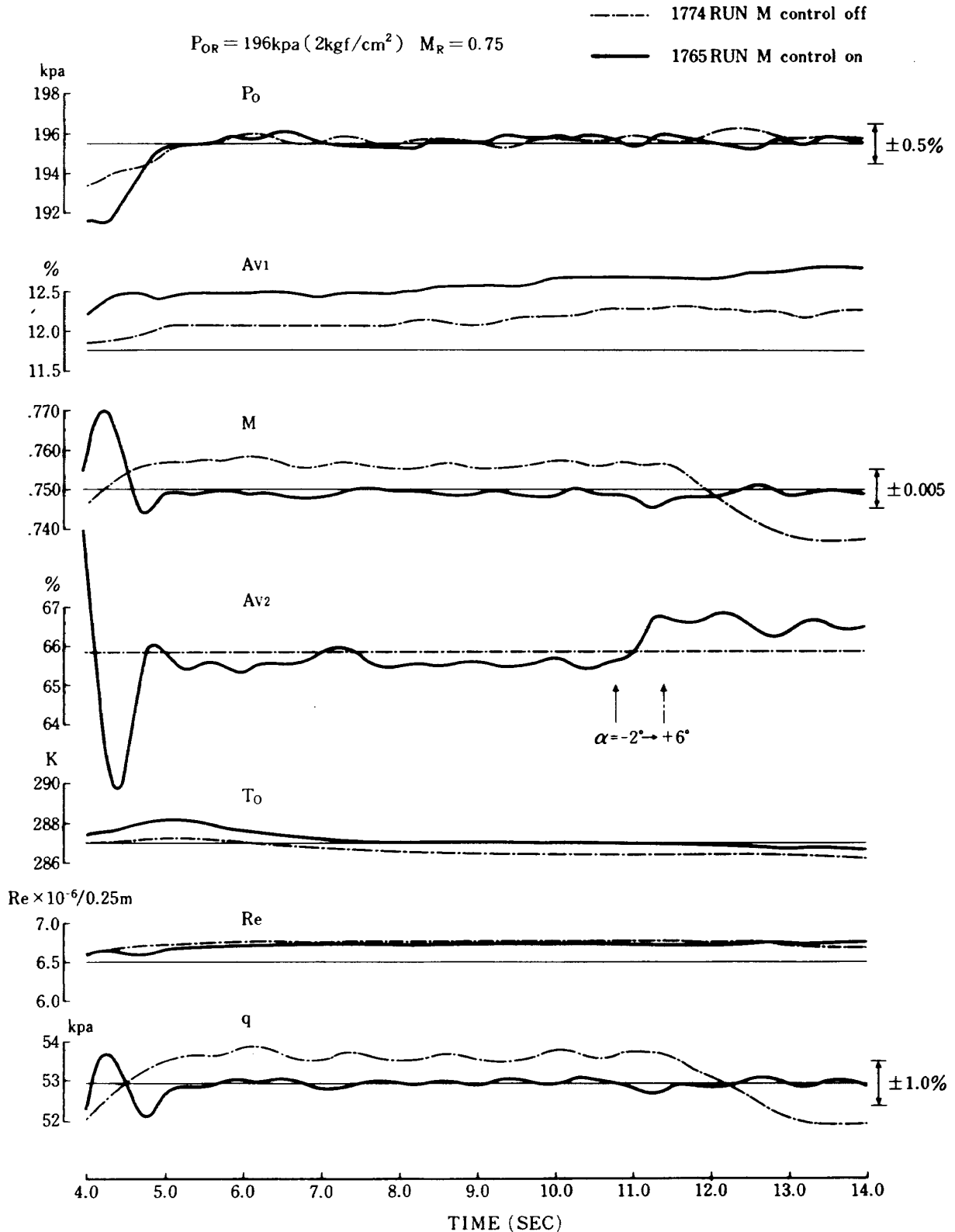


図 30 低レイノルズ数マッハ数制御試験結果 (亜音速,  $M_R = 0.75$ )

時の応答を実線で示す。比較のため、マッハ数制御を実施しないときの応答を一点鎖線で示す。

低レイノルズ数試験の集合胴圧力制御において、調圧弁の初期開度は13%以下であるから、風洞起動直後から調圧弁の実効開口面積ゲインがかなり大きな値になっているために、調圧弁開直後の調圧弁を流れる空気の突入現象によって、集合胴圧力はハンチングを起す。この現象を和らげるために、第2スロート弁開速度を高レイノルズ数試験の場合の1/2の25%/secにして起動する。そのために、集合胴圧力安定時間は5秒程度となって高レイノルズ数試験の場合より長くなる。測定部マッハ数の安定は集合胴圧力安定より早くほぼ3.6秒でマッハ数自動制御を開始する。図では第2スロート弁指定位置が不適切であったため、自動制御開始時に測定部マッハ数はハンチングを起すが自動制御開始後1.6秒、風洞起動後5秒で安定している。

模型迎角変更の外乱によるマッハ数制御系の応答はかなり良く、外乱によるマッハ数変動は1秒程度でなくなる。ここで与えた模型迎角変更量 $-2^{\circ}\sim+6^{\circ}$ は最大外乱量を考えて与えたもので、通常試験における変角量はこれより小さい。従って、模型迎角変更によるマッハ数変動の安定時間は1秒以内と考えてよい。高レイノルズ数試験と異って、低レイノルズ数試験においては、1回の通風で多数の迎角数を取って試験することが可能なので(最大10迎角)迎角変更後1秒程度の間隔を置いて計測を開始すれば迎角変更によるマッハ数変動の影響を避けることができる。

低レイノルズ数試験においては、通風流量が少いために、貯気槽圧力の降下速度は小さくなり、その結果集合胴温度変化は極めて小さい。図29に示す集合胴温度変化は測定部気流が安定する5秒後から14秒後までの9秒間で最大 $1.5^{\circ}\text{C}$ である。その間のレイノルズ数の変化も極めて小さい。高レイノルズ数試験においては、レイノルズ数の変化は主に集合胴温度変化によるものであったのに対し、低レイノルズ数試験においては、レイノルズ数の変化は集合胴温度、集合胴圧力および測定部マッハ数のそれぞれの変動の影響を受けて僅かに変化する。

図30の一点鎖線で示すマッハ数自動制御 off の

場合の測定部マッハ数の応答は、測定部マッハ数が模型迎角変更によって相当量変化し、また希望する値の一定値に保持できないので、マッハ数制御を行わない場合は測定部マッハ数の再現性を期待できないことを示している。

(遷音速マッハ数制御試験結果)

図31は設定マッハ数 $M_R=1.0$ の場合の低レイノルズ数試験結果を示す。集合胴圧力の安定時間は $M_R=0.75$ の場合よりも遅れ約5.5秒になる。ここでの試験には、プリナム室圧力は103.6kpa( $1.056\text{ kgf/cm}^2$ )となり大気圧に近くなる。プリナム室圧力と大気圧の圧力差を利用して抽気する本風洞の抽気方法では、 $M_R=1.0$ は、低レイノルズ数試験において試験可能な最高マッハ数と考えてよい。このときの抽気弁開度は85~90%になり、このような状態においては、風洞起動時に測定部マッハ数を早く安定させるために用いる過剰抽気の効果は期待できない。

図31のマッハ数制御 off の場合の測定部マッハ数は、 $\bar{M}\pm 0.005$ 以内に安定する時間は約7秒であるが、その後も一定にならず安定するまでに0.005程度変化する。マッハ数制御 on の場合は、自動制御切換条件のマッハ数安定巾を $\pm 0.05$ と大きくして早期に制御開始させる。そのときに、制御調節部の微分動作(D動作)によって抽気弁は100%の開度までオーバーシュートし、それに伴って測定部マッハ数は僅か(0.01)オーバーシュートする。マッハ数制御 on の場合の測定部マッハ数の安定時間は約6.5秒である。模型迎角変更による測定部マッハ数の変動は、マッハ数制御の off の場合には相当量変化する( $\Delta M=0.012$ )のに対し、マッハ数制御 on の場合には小さく、その変動は1.5秒後に一定値に回復する。従って、模型迎角変更後の計測開始までの安定時間は、通常風試においては、ここで与えた制御試験時の迎角変更量 $-2^{\circ}\sim+6^{\circ}$ よりもかなり小さいので、1秒間程度取れば十分である。

集合胴温度およびレイノルズ数の変化については、亜音速試験の場合と同様に小さいことを図31は示している。

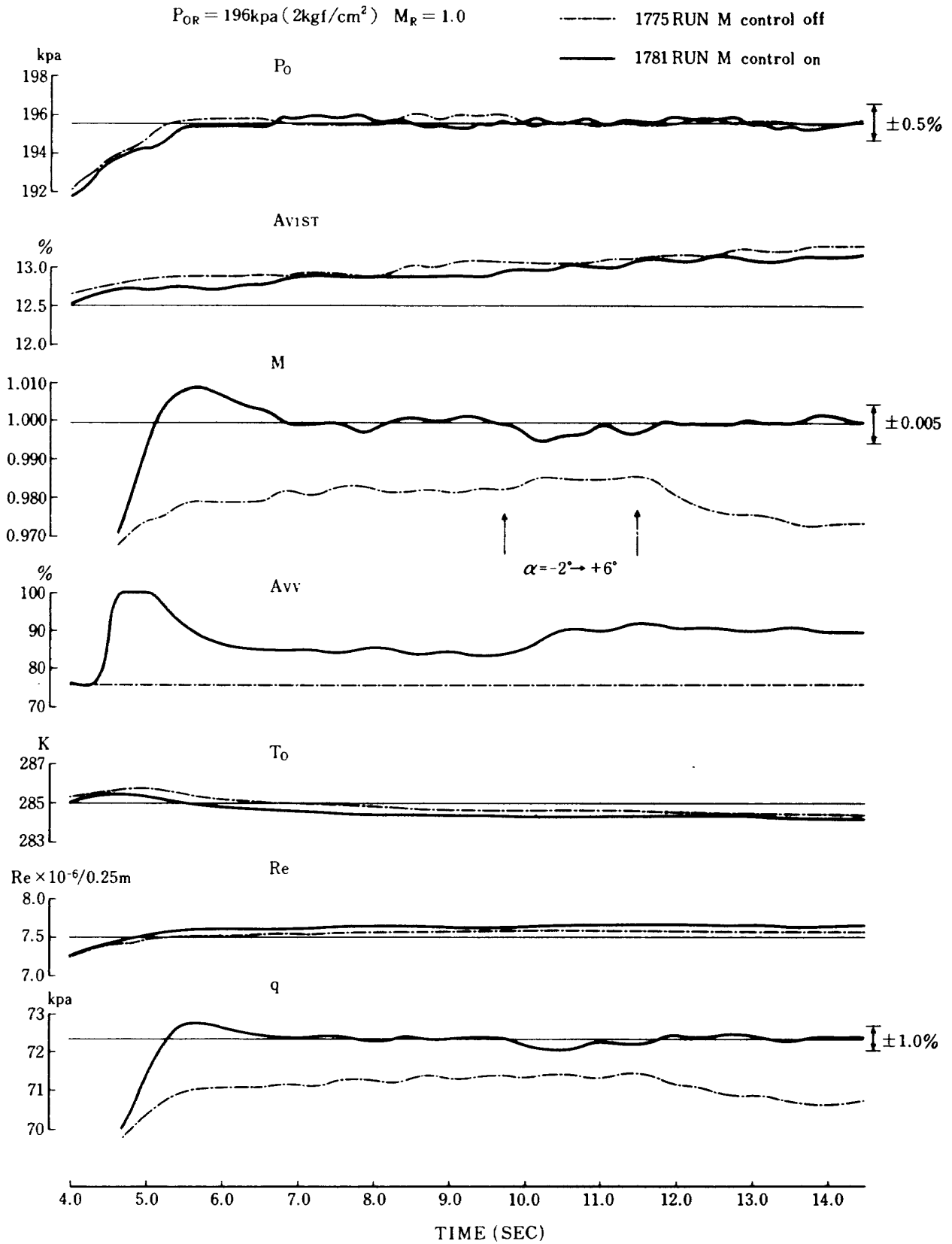


図 31 低レイノルズ数マッハ数制御試験結果 (遷音速,  $M_R = 1.0$ )

5.3 制御精度

低レイノルズ数試験においては通風時間を長くすることが出来、したがって、その間に多数の模型迎角(ただし、10迎角以内)について試験ができる。計測中の気流制御精度は、同一通風試験内ではあるが、各々の模型迎角の計測スキャンによって多少異

る。その様子を図 32(a), (b)に示す。図 32(a)は測定部マッハ数制御精度、図 32(b)は集合胴圧力制御精度を、各計測スキャンについて示す。図は経常翼型試験における試験結果を示したもので、設定マッハ数  $M_R = 0.75 \sim 0.85$  の範囲について、第 1 回~第 3 回スキャン、および最終回スキャン(第 6 回~第

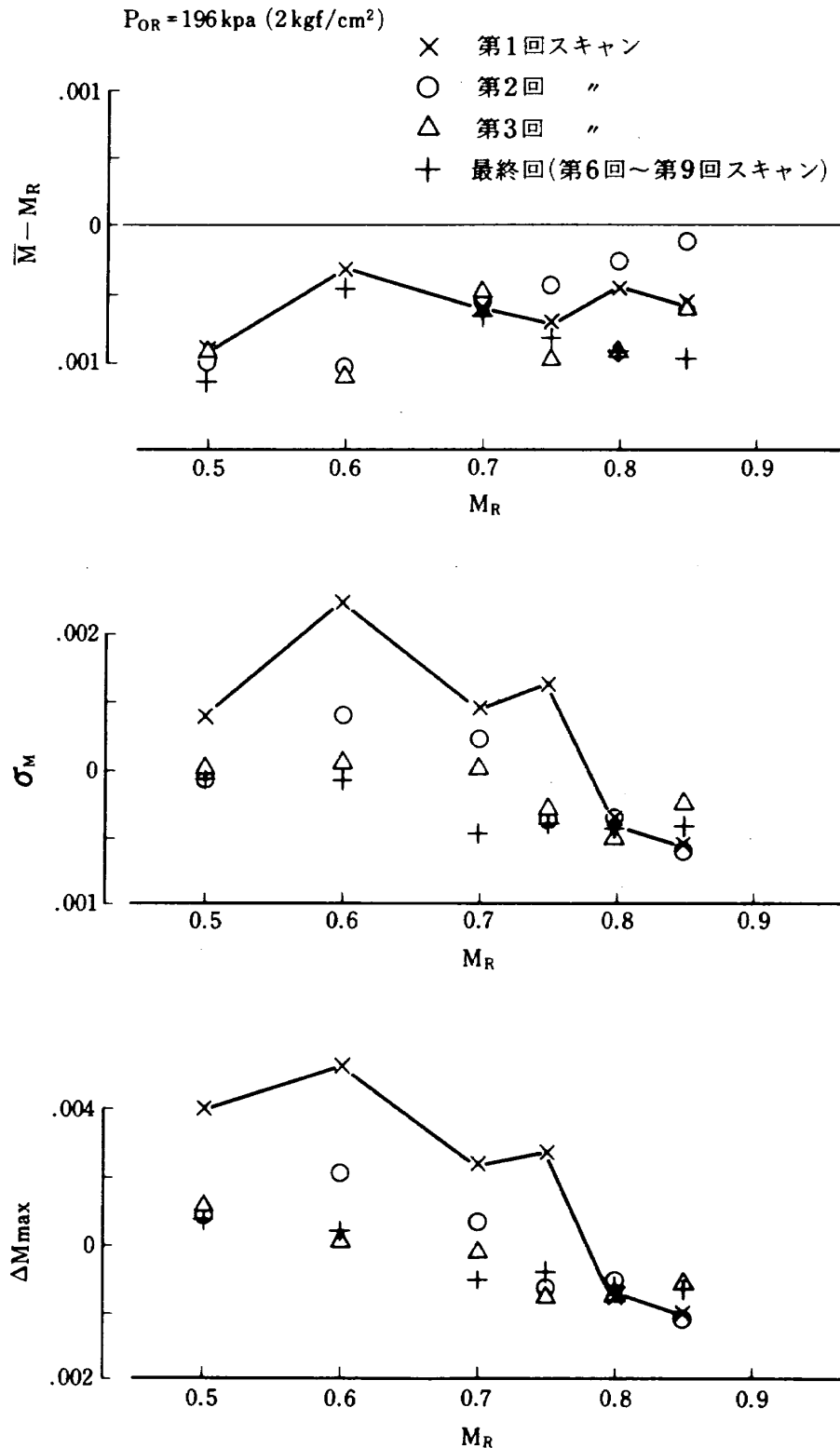


図 32(a) スキャン毎のマッハ数制御精度

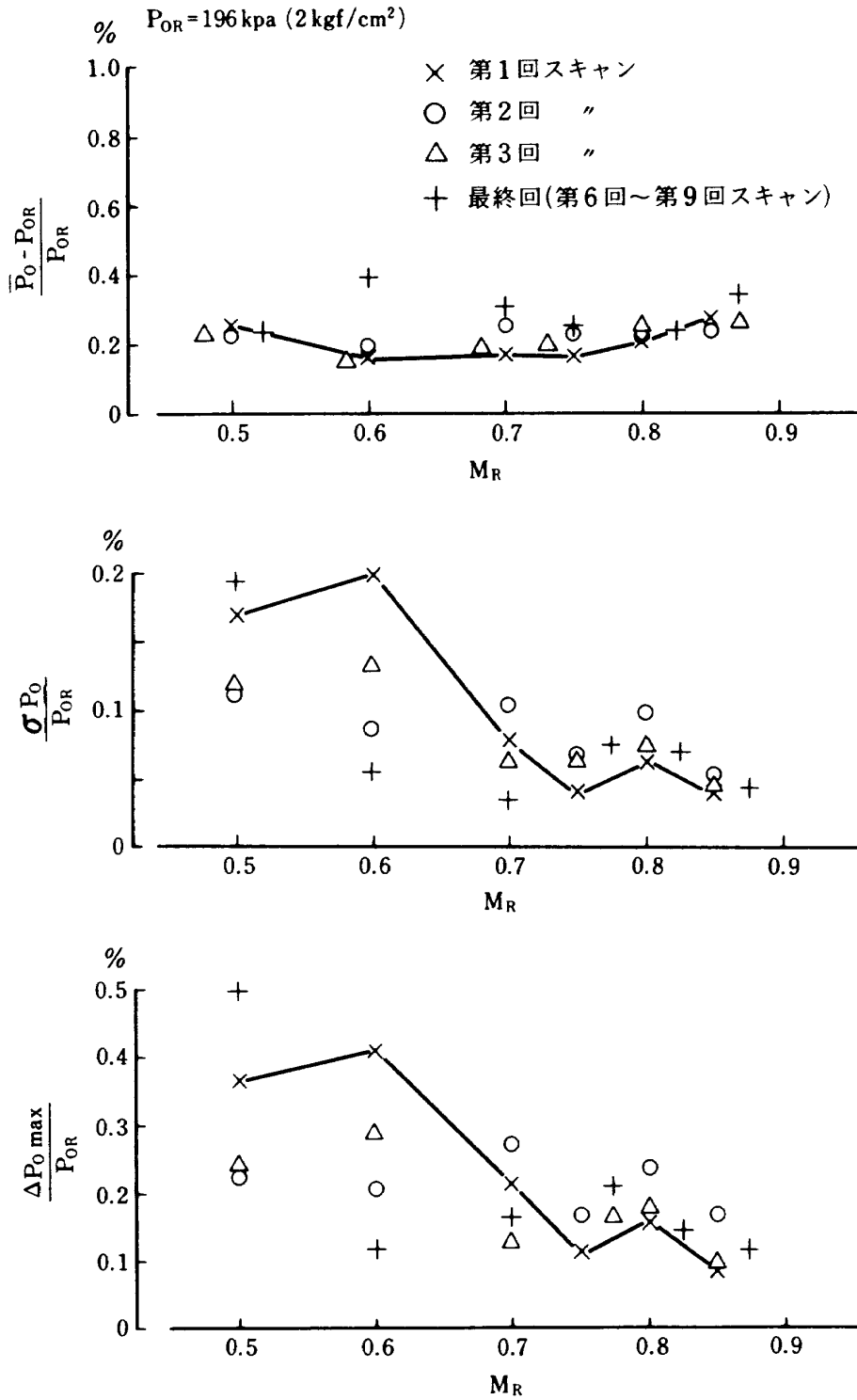


図 32 (b) スキャン毎の集合胴圧力制御精度

9回スキャンに相当)についての制御精度を示す。これらの図から、2つの特徴的なことが言える。1つは、図 31 (a)に示すマッハ数制御精度において、 $M_R = 0.75$  以下の亜音速制御の範囲で最初のスキャンの測定部マッハ数の変動を表す  $\sigma_M$ ,  $\Delta M_{max}$  の値が大きくなることである。 $M_R = 0.8$  以上の遷音速制御においてはこの傾向は見られない。その理由は、

風洞起動時に第2スロート弁の指定位置が不適切であったために、マッハ数自動制御開始時に第2スロート弁開度の突変が起き、第1回スキャンの測定部マッハ数の変動量が多くなるためである。この変動量は習熟により適切な第2スロート弁指定位置を知ることによって、あるいは単に計測開始時間を遅らせることによって小さくすることができる。もう一

特徴的なことは図 32(b)に示す集合胴圧力制御精度において、 $M_R = 0.6$ 以下の亜音速領域で $\sigma_{P_0}/P_{0R}$ および $\Delta P_{0max}/P_{0R}$ の値が相対的に大きくなり、スキャン毎のバラツキでも大きくなることである。この理由については後述する低速試験の項で考察する。

$\bar{M} - M_R$ 、および $(\bar{P}_0 - P_{0R})/P_{0R}$ の値は、スキャン毎のバラツキが少く、スキャン順番によってその値が系統的に変化するようなこともない。

設定マッハ数が0.5～1.0の範囲で行った数多くの通風試験の測定部気流の制御精度についてプロッ

トした結果を図 33(a)～(d)に示す。図 33(a)はマッハ数制御精度、図 33(b)は集合胴圧力制御精度、図 33(c)は動圧変動、図 33(d)はレイノルズ数変化についてそれぞれ示す。これらの図に示したデータはマッハ数制御試験 2 RUN、経常通風試験 36 RUN、計 38 RUNの試験から取ったものである。図の中の( )内の数字は当該試験マッハ数における RUN 数を示す。ここで表す精度の計測スキャン順番は 2 スキャン目を用いることとした。

図 33(a)に示す、測定部マッハ数の再現性を表す

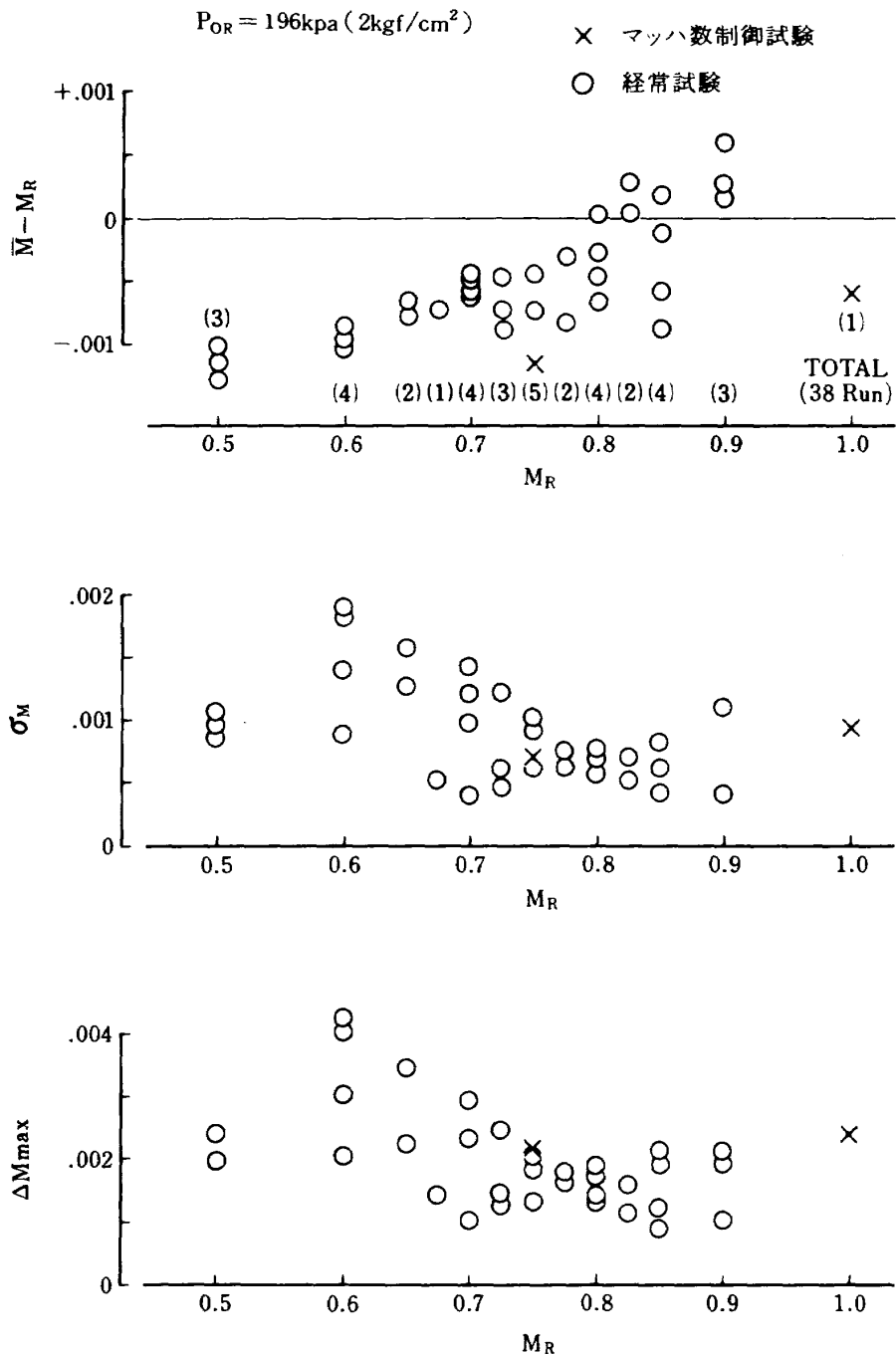


図 33(a) マッハ数制御精度 (低レイノルズ数試験)

$\bar{M} - M_R$ の値はかなり小さく、設定マッハ数 0.5 ~ 1.0 の範囲で  $\pm 0.0015$  以内である。特に高亜音速 0.7 ~ 0.9 の範囲では  $\pm 0.001$  以内であると考えてよい。 $\bar{M} - M_R$ の値は設定マッハ数が低下する程大きくなる傾向を示す。また、 $M_R = 0.75$  以上の抽気弁によるマッハ数では  $\bar{M} - M_R$ の値の通風毎のバラツキが大きくなる。測定部マッハ数の変動を表す  $\sigma_M$  および  $\Delta M_{max}$  は、この 2 つの値について、低マッハ

数になるほど大きくなり、通風毎のバラツキも大きくなる。逆に、 $M_R = 0.75$  以上の遷音速制御において、それらの値は小さくなる。全体的に、 $M_R = 0.75$  以上の遷音速領域において測定部マッハ数の再現性は良くなり変動量も少い。反対に、 $M_R = 0.75$  以下においては、低マッハ数になるに従って、再現性は悪くなり変動量も多くなることが言える。設定マッハ数 0.5 ~ 1.0 の範囲で、 $\bar{M} - M_R$ の値は  $\pm 0.0015$

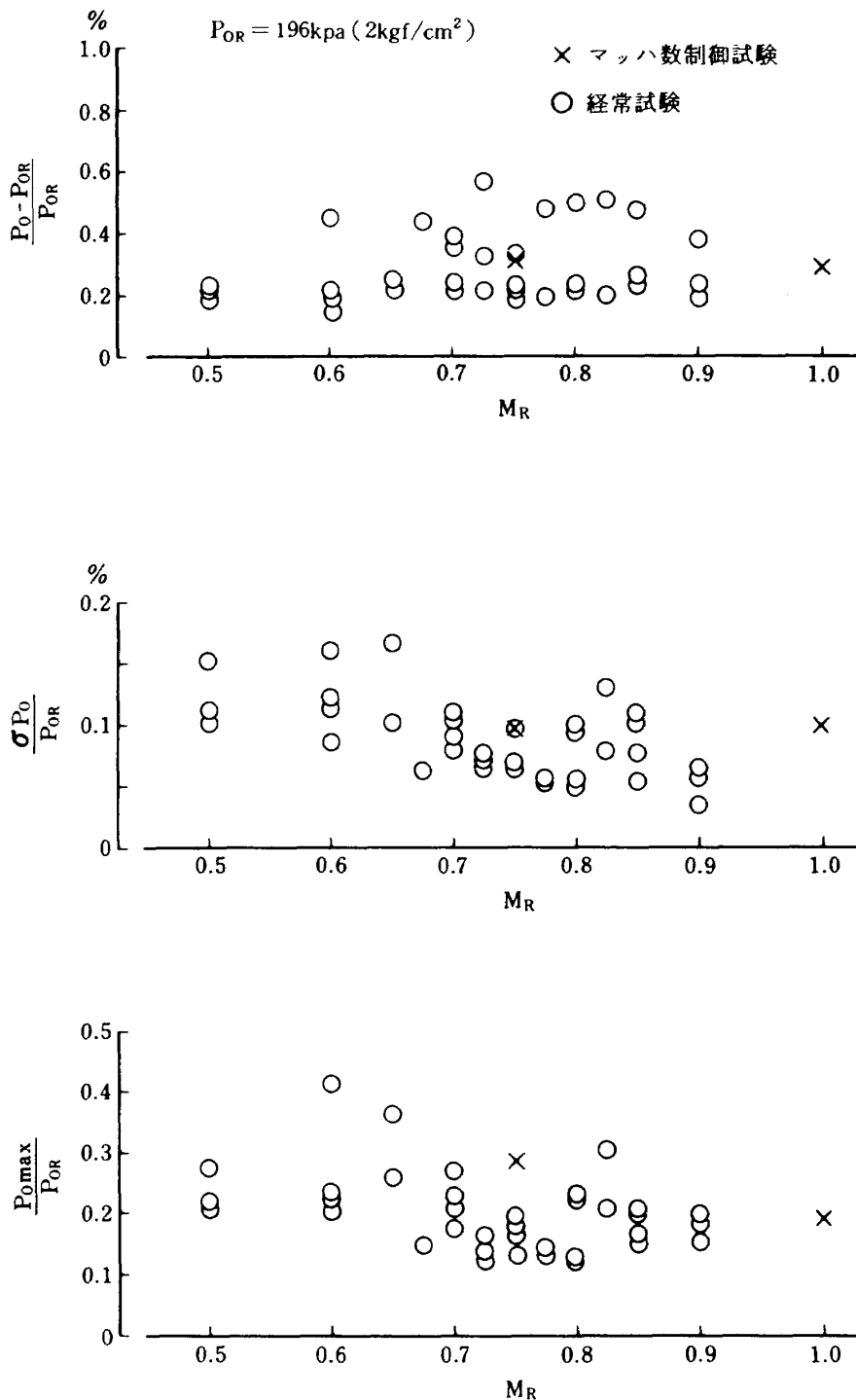


図 33 (b) 集合胸圧力制御精度 (低レイノルズ数試験)



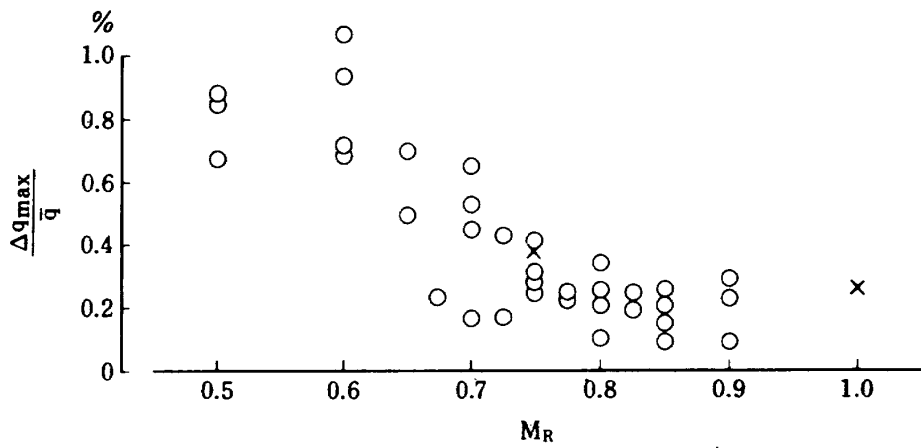
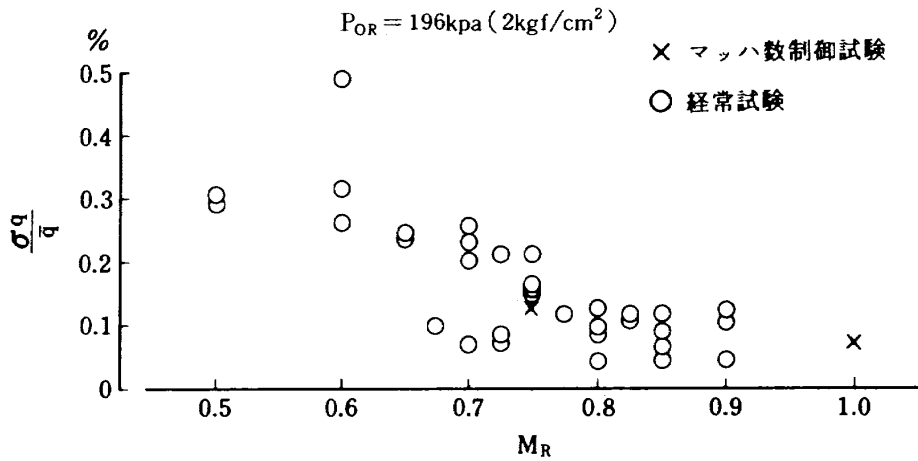


図 33(c) 動圧変動(低レイノルズ数試験)

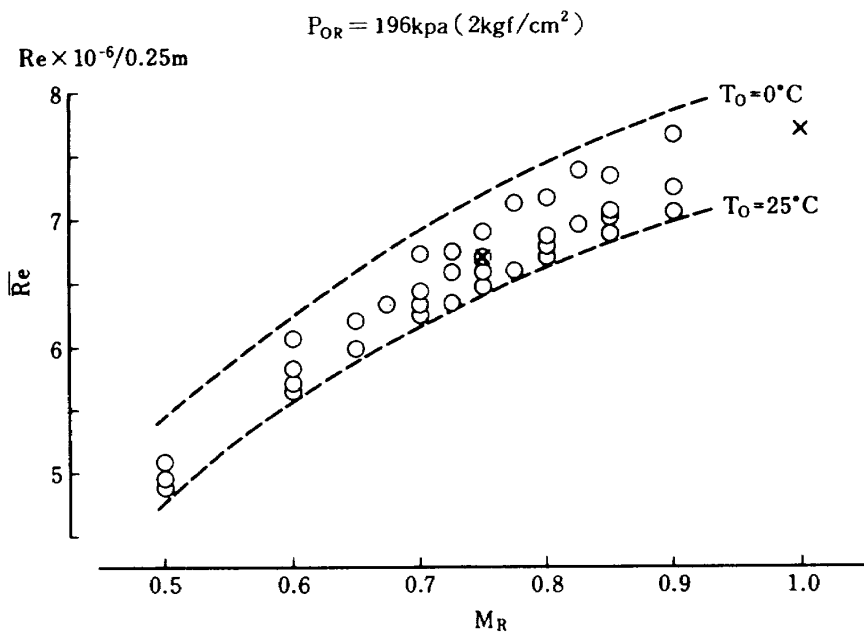


図 33(d) 通風毎のレイノルズ数変化(低レイノルズ数試験)

以下、 $\sigma_M$ の値は0.002以下、 $\Delta M_{max}$ の値は0.005以下である。 $M_R = 0.75 \sim 1.0$ の範囲に限れば、 $\bar{M} - M_R$ の値は±0.001以内、 $\sigma_M$ の値は0.001以下、 $\Delta M_{max}$ の値は0.003以下になり、測定部マッハ数の変動は $M_R = 0.5 \sim 0.75$ の範囲の場合の変動量の約1/2になる。

図33(b)に示す集合胴圧力制御精度において、 $(\bar{P}_0 - P_{0R})/P_{0R}$ の値は設定マッハ数に関係なく、ほぼ一定の値のまわりに分散する。 $(\bar{P}_0 - P_{0R})/P_{0R}$ の値は常に正の値で、集合胴圧力は設定値よりも常に高く、 $M_R = 0.5 \sim 1.0$ の範囲で、0.6%以下の値である。集合胴圧力の変動を表す $\sigma_{P_0}/P_{0R}$ および $\Delta P_{0max}/P_{0R}$ の値は、 $M_R = 0.75$ 以上ではほぼ一定値以内であるが、 $M_R = 0.75$ 以下では、 $M_R$ の低下と共に漸増する。 $M_R = 0.5 \sim 1.0$ の範囲で、 $\sigma_{P_0}/P_{0R}$ の値は0.2%以下、 $\Delta P_{0max}/P_{0R}$ は0.4%以内である。 $M_R = 0.75 \sim 1.0$ の範囲に限れば、 $\sigma_{P_0}/P_{0R}$ は0.15%以下、 $\Delta P_{0max}/P_{0R}$ は0.3%以下になる。

図33(c)に示す動圧変動については次のようなことが言える。すなわち、 $M_R = 0.75$ 以上の遷音速領域に於いては動圧変動は少く、 $\sigma_q/q_R$ の値は0.2%以下に、 $\Delta q_{max}/\bar{q}$ の値は0.4%以下になる。それに対し、 $M_R = 0.75$ 以下では、測定部マッハ数の低下と共に、 $\sigma_q/\bar{q}$ および $\Delta q_{max}/\bar{q}$ の値は急増する。 $M_R = 0.5 \sim 0.75$ の亜音速領域では、 $\sigma_q/\bar{q}$ の値は0.4%以下、 $\Delta q_{max}/\bar{q}$ の値は1%以下になる。亜音速におけるこのような動圧変動の増加は、特に、マッハ数変動のこの領域での増大によるものである。それは、集合胴圧力変動と測定部マッハ数変動の動圧変動への影響を表す(3-17)式および(3-18)式から、 $K_M \sigma_M/M$ の項の値がマッハ数の低下と共に増大することから理解できる。

図33(d)にレイノルズ数の平均値 $\bar{Re}$ の通風毎の変化を示す。低レイノルズ数試験においては、計測中のレイノルズ数の変化はほとんどないと考えてよい(図30, 図31参照)。図に示す破線は、集合胴温度0℃と25℃の場合のレイノルズ数を表しており、 $\bar{Re}$ の値はこの2つの曲線で囲まれた範囲内に入る。

## 6. 低速試験

二次元翼型風試において、高亜音速、あるいは遷

音速における翼特性ばかりでなく、離着陸時の低速における基本翼型、あるいはフラップなどの高揚力装置付き翼型の高揚力形態における風試を行う事も重要である。特に、低速、高揚力における翼特性は、翼面上の剝離流が支配的であるから、レイノルズ数に大きく依存する。そのため、低速においてレイノルズ数を大巾に変えて風試できることが望ましい。ここでは、測定部マッハ数が0.2のときの、集合胴圧力が196kpa(2kgf/cm<sup>2</sup>)の場合(低レイノルズ数低速試験)と、1569kpa(16kgf/cm<sup>2</sup>)の場合(高レイノルズ数低速試験)において実施した制御試験結果について述べる。このときのレイノルズ数は、それぞれ $2.2 \times 10^6$ および $17.7 \times 10^6$ (基準長0.25m)である。さらに、本風洞で風試可能なレイノルズ数の下限値における制御試験(限界低レイノルズ数試験)をマッハ数0.1、集合胴圧力147kpa(1.5kgf/cm<sup>2</sup>)で実施した。そのときのレイノルズ数は $0.84 \times 10^6$ (基準長0.25m)になる。

### 6.1 低速試験における集合胴圧力制御モデル

低速試験の集合胴圧力制御において、特にその制御精度を悪くする要因が2つある。その1つは、低レイノルズ数高速試験の場合よりもさらに少い通風流量になるために、調圧弁開度は小さく、調圧弁ストローク変化に対する実効開口面積の変化の割合を現す調圧弁実効開口面積ゲインが大きくなることである(図29参照)。2つ目は、測定部マッハ数を低くするために第2スロート弁を閉めて行くと、調圧弁開度変化に対する集合胴圧力の変化、すなわち調圧弁開度と集合胴圧力関係を表す伝達関数のゲインが大きくなることである。このことは次に示す集合胴圧力制御系の簡略化した数式モデルによって示すことができる。

貯気槽、および集合胴内における圧力の変化は、集中定数系として考え、ほぼ次のような式で与えることができる。

$$\frac{dP_T}{dt} = -\frac{RT_T}{V_T} G_{V1} \quad (6-1)$$

$$\frac{dP_0}{dt} = \frac{RT_0}{V_0} (G_{V1} - G_{V2}) \quad (6-2)$$

ここで、 $G_{V1}$ は調圧弁を流れる空気流量、 $G_{V2}$ は第

2スロート弁を流れる空気流量である。調圧弁を流れる空気流量  $G_{v1}$  は、弁開度の小さい範囲では

$$G_{v1} = A_{v1} P_T \sqrt{\frac{\kappa}{RT_T} \left(\frac{2}{K+1}\right)} \quad (6-3)$$

であらわれ、第2スロート弁を流れる空気流量は

$$G_{v2} = A_{v2} P_0 \sqrt{\frac{\kappa}{RT_0} \left(\frac{2}{K+1}\right)} \quad (6-4)$$

であらわすことができる。ここで、貯気槽内温度、および集合胴内温度の変化を等温変化であると仮定すると、(6-1)式および(6-2)式は線型になるから、調圧弁開度および第2スロート弁開度の微小変化  $\delta A_{v1}$ 、 $\delta A_{v2}$  に対する貯気槽圧力および集合胴温度の応答の微小変化  $\delta P_T$ 、 $\delta P_0$  の間の伝達関数を直に求めることができる。伝達関数を

$$\begin{bmatrix} \delta P_T \\ \delta P_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(S) & G_{12}(S) \\ G_{21}(S) & G_{22}(S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta A_{v1} \\ \delta A_{v2} \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

の形で表し、各々の要素について求めると、

$$\left. \begin{aligned} G_{11}(S) &= \frac{K_{11}}{T_1 S + 1} \\ G_{12}(S) &= 0 \\ G_{21}(S) &= \frac{K_{21} S}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)} \\ G_{22}(S) &= \frac{K_{22}}{T_2 S + 1} \end{aligned} \right\} (6-6)$$

となる。ただし

$$\left. \begin{aligned} K_{11} &= -\frac{P_T}{A_{v1}} \\ K_{21} &= \frac{1}{\beta T_T} \sqrt{\frac{T_0}{R}} \frac{V_T P_T}{A_{v1} A_{v2}} \\ K_{22} &= -\frac{P_0}{A_{v2}} \\ T_1 &= \frac{1}{\beta \sqrt{RT_T}} \frac{V_T}{A_{v1}} \\ T_2 &= \frac{1}{\beta \sqrt{RT_0}} \frac{V_0}{A_{v2}} \\ \beta &= \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \end{aligned} \right\} (6-7)$$

である。ここで、貯気槽体積  $V_T$  がかなり大きな値になることを考えると、 $T_1$  は大きな値になり、近似的に  $T_1 S \gg 1$  と考えてよいから、 $G_{21}(S)$  については

$$\left. \begin{aligned} G_{21}(S) &= \frac{K'_{21}}{T_2 S + 1} \\ K'_{21} &= \sqrt{\frac{T_0}{T_T}} \frac{P_T}{A_{v2}} \end{aligned} \right\} (6-8)$$

と書きかえることができる。

ここで注目すべきことは、 $K'_{21}$ 、 $K_{22}$  および  $T_2$  の値は、貯気槽圧力と集合胴圧力を与えると第2スロート弁開度のみの関数となることである。図34に、伝達関数のブロック図と、 $K'_{21}$ 、 $K_{22}$  および  $T_2$  の値を第2スロート弁開度、および設定マッハ数に対して書いたグラフを示す。第2スロート弁開度と設定マッハ数の関係は(4-1)式より得たものである。このグラフは集合胴圧力  $196 \text{ kPa} (2 \text{ kgf/cm}^2)$ 、貯気槽圧力  $1961 \text{ kPa} (20 \text{ kgf/cm}^2)$  のときのものである。 $K'_{21}$  は集合胴圧力に対する調圧弁開度の効きを表し、 $K_{22}$  は集合胴圧力に対する第2スロート弁開度の効きを表す。 $T_2$  は調圧弁開度および第2スロート弁開

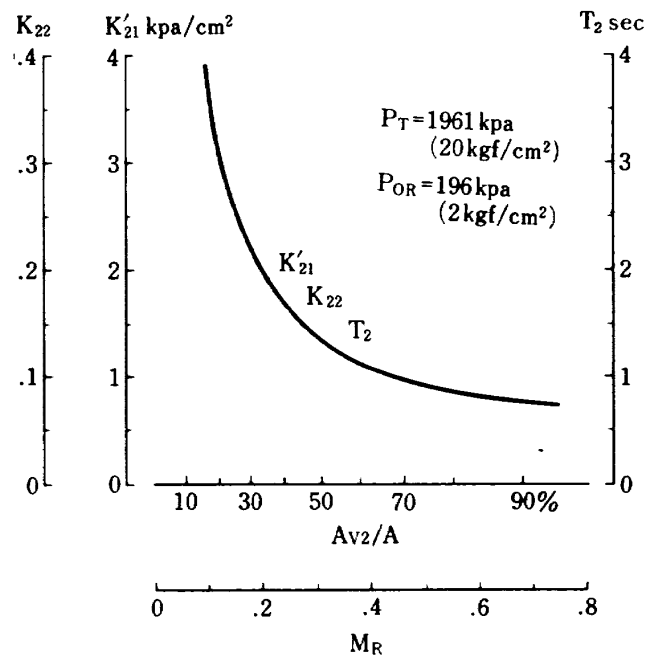
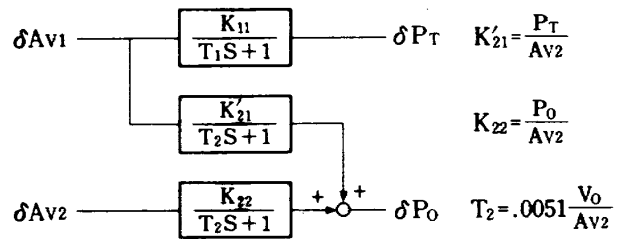


図34 集合胴圧力制御系伝達関数の第2スロート弁開度に対する変化

度に対する集合胴圧力応答の一次遅れ時定数である。この図から分かるように、 $K'_{21}$ 、 $K_{22}$  および  $T_2$  の値は設定マッハ数が小さくなるに従って急速に大きな値になる。特に、 $K'_{21}$  は大きな値になって、調圧弁開度の集合胴圧力に対する効きは増大することを示す。また、そのときに、 $T_2$  の値も大きくなり、そのことによって集合胴圧力制御系の速応性が減少していくことをグラフは示している。

### 6.2 低レイノルズ数低速試験

設定集合胴圧力  $P_{0R} = 196\text{kpa}(2\text{kgf/cm}^2)$ 、設定マッハ数  $M_R = 0.2$  において実施したマッハ数制御試験結果として、風洞各部の状態量の時間履歴を図 35 に示す。ここでは、集合胴圧力制御系、およびマッハ数制御系の最適調整を行った。マッハ数制御系の最適調整は、低速領域では模型迎角変更による測定部マッハ数の変化がないので、そのかわりに、マッ

ハ数の設定値を 0.200 から 0.207 に変更して測定部マッハ数が最短時間で設定値に追従するように調整する方法で行った。図の実線はマッハ数設定変更を行わないときの応答を、一点鎖線は設定変更したときの応答をそれぞれ示す。この図で集合胴圧力は、始めは振動的 (1.3Hz) であるが、やがて整定する。調圧弁開度は極めて小さく、調圧弁ストロークの値にして 2.3% ± 0.1% 程度で集合胴圧力を制御していることがわかる。測定部マッハ数は集合胴圧力の周期的な振動に伴って同様な振動をするが集合胴圧力の整定と共に一定になる。その間、第 2 スロート弁はマッハ数自動制御の制御動作によって変化し、測定部マッハ数変動を抑制していることが分る。このマッハ数制御による抑制効果の程度は次に述べる〔制御精度〕の項で述べる。通風途中のマッハ数設定値変更による測定部マッハ数の制御応答は、良い追従性を持ち、1 秒以内で応答している。 $M_R = 0.2$

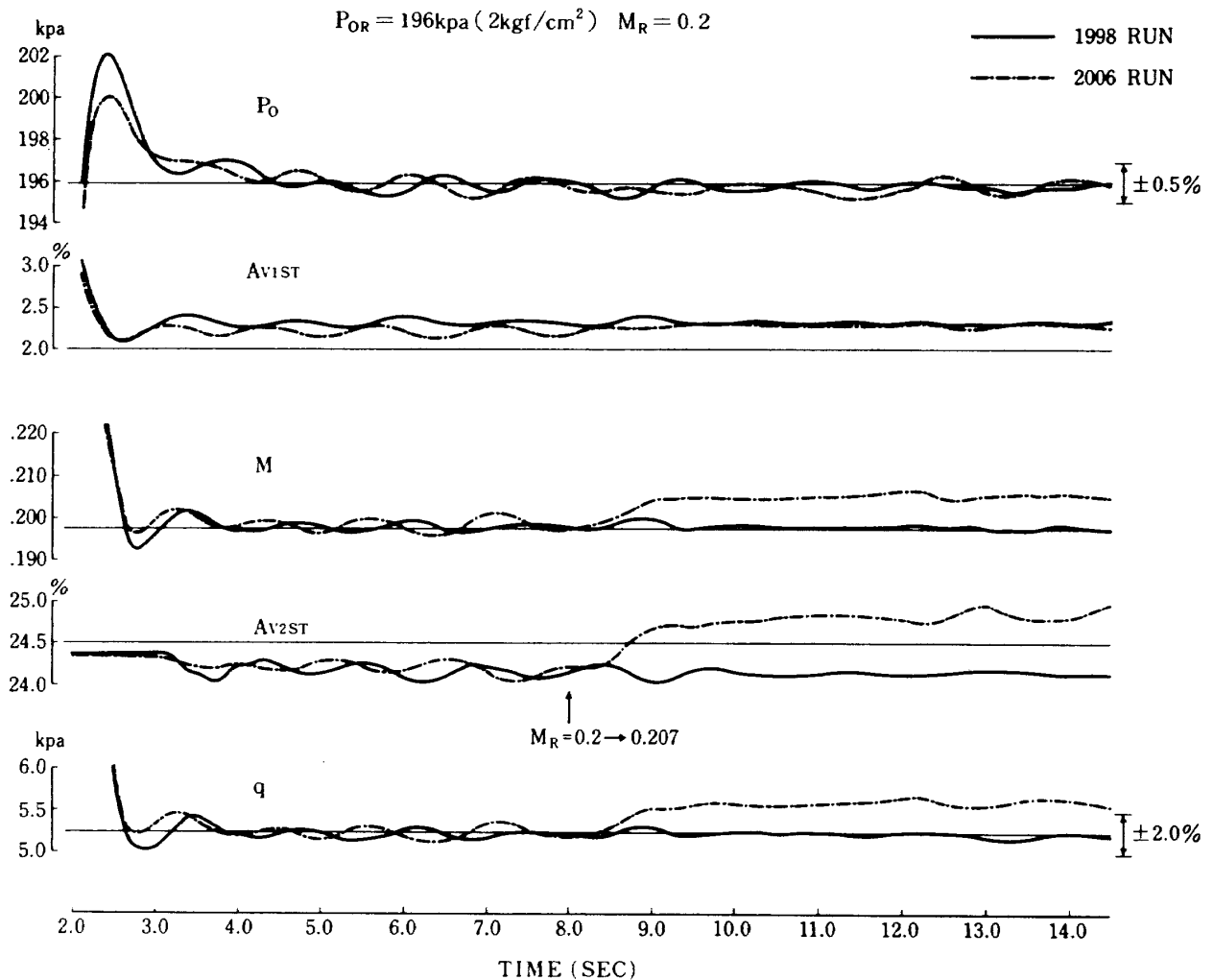


図 35 低レイノルズ数低速試験結果

のような低速領域においては、圧力検出信号レベルが低くなるために、 $(P_0 - P_L)/P_0$  検出精度が悪くなるので（特に、デジタル演算装置内の演算精度によるもの）、測定部マッハ数にオフセットが生じるようになる。

図 36 は、マッハ数制御を行わないときの応答を示す。この図は説明のために、特に集合胴圧力の変動の大きい場合の応答を示したもので、図では第 2 スロート弁ストローク値が一定であるのに対し、測定部マッハ数が集合胴圧力変動と同期して変化している例を示す。このような集合胴圧力変動による測定部マッハ数の変動は測定部に通気性壁をもつ遷音速風洞特有のものであることは既に述べた。図は、また  $M_R = 0.2$  の低速領域では測定部マッハ数変動

に与える集合胴圧力変動は高速領域と比べ大きくなることも示す。集合胴圧力変動の大きくなる原因は、調圧時の調圧弁開度が小さくなるために調圧弁実効開口面積ゲインが大きくなり（図 29 参照）、かつ、第 2 スロート弁開度が小さくなることにより調圧弁開度と集合胴圧力との伝達関数のゲインと時定数が大きな値になって（図 34 参照）集合胴圧力を一定に保持することが困難になるためである。集合胴圧力制御系に加わる電氣的ノイズ、弁に作用する空気力などの僅かな外乱によって制御系は振動的になる。従って低レイノルズ数低速試験においては、集合胴圧力が振動的になることに伴い測定部マッハ数が変動することはある程度避けることができないと考える。

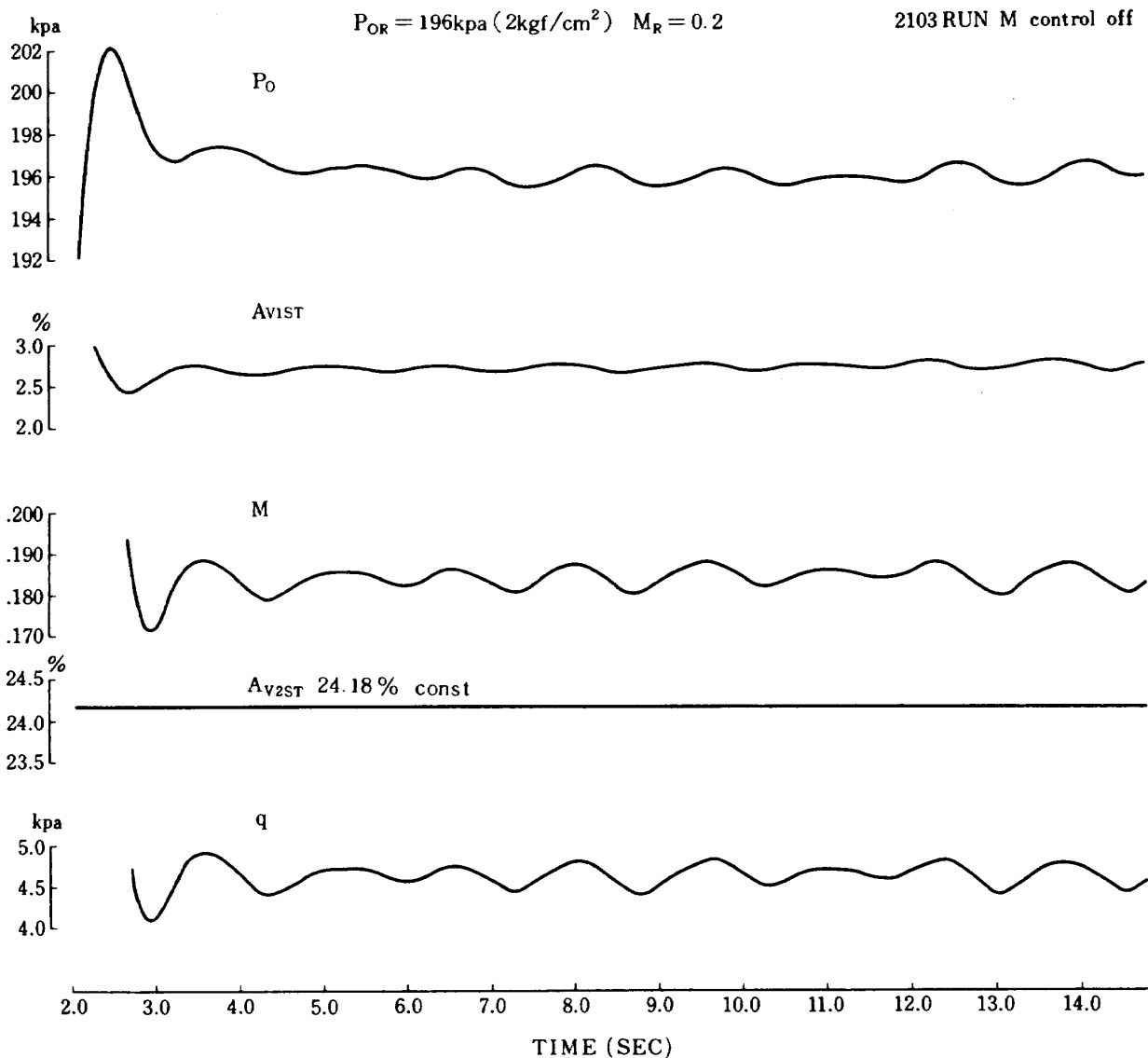


図 36 低レイノルズ数低速試験結果（マッハ数制御 off の場合）

〔制御精度〕

低レイノルズ数低速試験における風洞気流の制御精度を図 37 (a)~(c)に示す。これらの結果は、マッハ数制御試験のときの 2 RUN, および経常試験のときの 9 RUN 合計 11 RUN の通風試験についての制御データをまとめたものである。ただし、経常試験

9 RUN については、マッハ数制御を行わず、第 2 スロート弁は指定位置に固定のままである。これは、 $M_R = 0.2$  のような低い値では非圧縮流れとなって翼型特性のマッハ数依存性は少く、測定部マッハ数の再現性はそれほど重要性は無いという認識で経常試験を実施したためであるが、マッハ数制御 on と

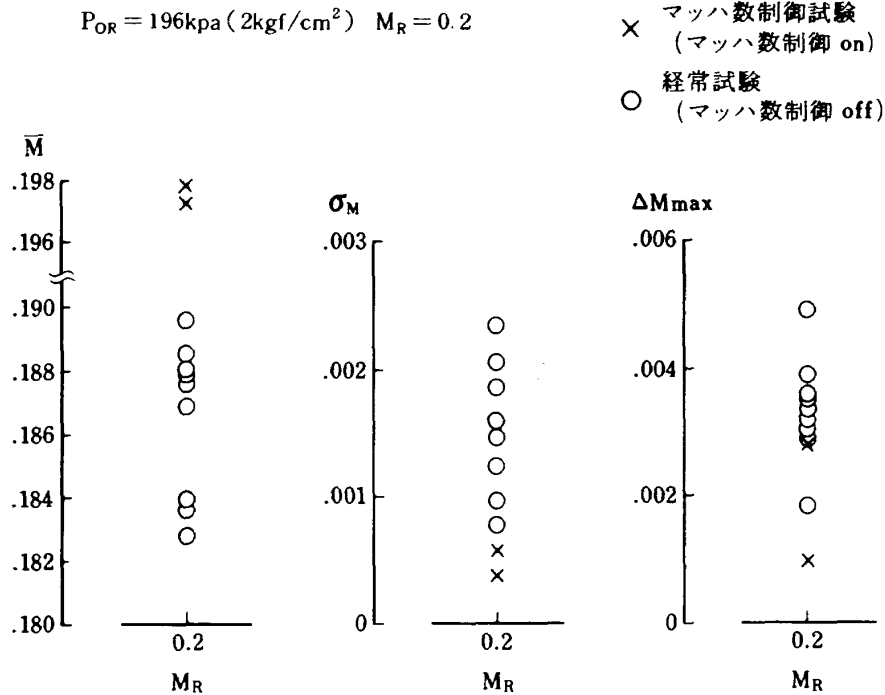


図 37 (a) マッハ数制御精度 (低レイノルズ数低速試験)

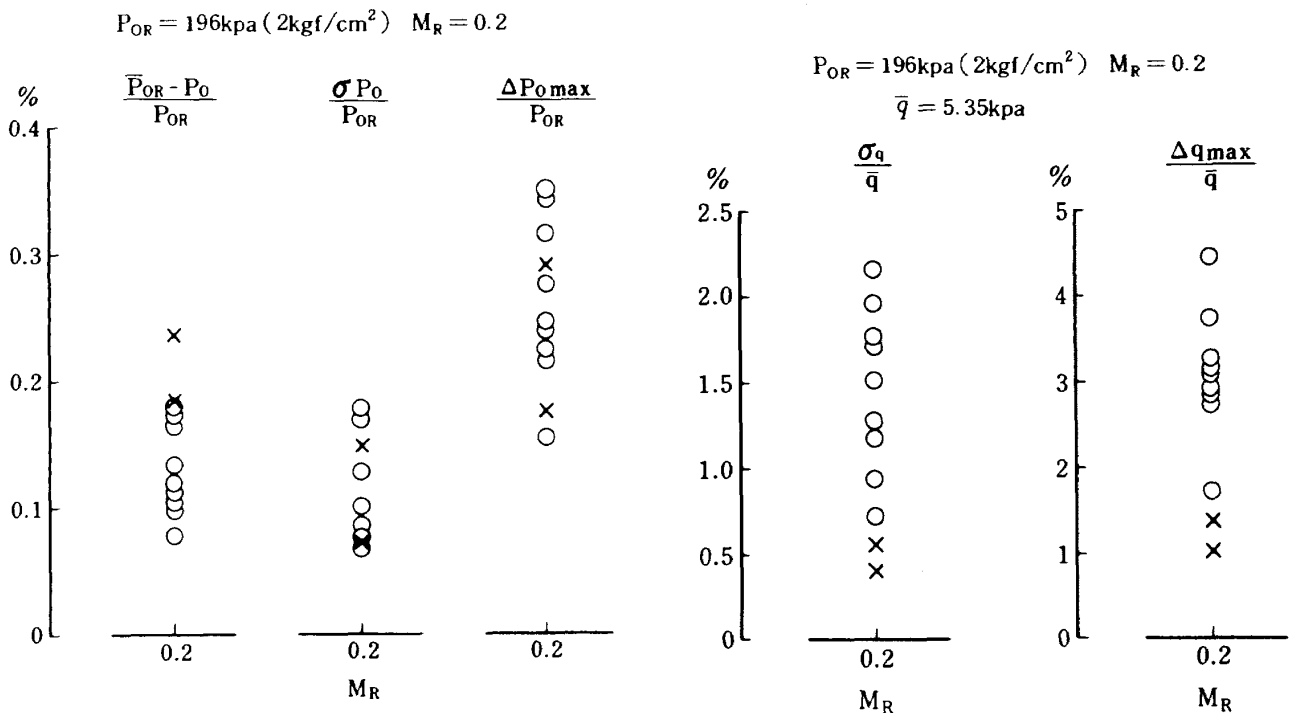


図 37 (b) 集合静圧制御精度  
(低レイノルズ数低速試験)

図 37 (c) 動圧変動 (低レイノルズ数低速試験)

off の場合では、マッハ数制御 on の場合の方が測定部気流精度はかなり良い結果を示す。以下、その結果を述べる。

図 37 (a) はマッハ数制御精度である。×印はマッハ数制御 on, ○印はマッハ数制御 off のときの精度である。図はマッハ数再現性を表す  $\bar{M}$  の値, マッハ数の変動を表す標準偏差  $\sigma_M$  および最大変動量  $\Delta M_{max}$  について示し, いずれの値についても, マッハ数制御 on の場合の方が結果が良い。マッハ数再現性  $\bar{M}$  について言えば, マッハ数制御 on の場合は, 測定部マッハ数を  $0.2 \pm 0.005$  以内に再現できるが, マッハ数制御 off の場合はかなりのバラツキがあって再現性があるとは言えない ( $0.2 \pm 0.02$ )。  $\sigma_M$  および  $\Delta M_{max}$  の値は, マッハ数制御 on の場合にはそれぞれ  $0.001$  以下,  $0.003$  以下になり, マッハ数制御 off の場合 ( $\sigma_M$  は  $0.003$  以下,  $\Delta M_{max}$  は  $0.005$  以下) と比較してかなり小さくなる。これは, 集合胴圧力変動が原因でおこる測定部マッハ数の変動を, マッハ数制御を行うことによって抑制していることを明らかに示している。

図 37 (b) は集合胴圧力制御精度を表す。図は集合胴圧力の平均値を表す  $(P_{0R} - \bar{P}_0)/P_{0R}$  は  $0.3\%$  以下, 集合胴圧力変動を表す  $\sigma_{P_0}/P_{0R}$ , および  $\Delta P_{0max}/P_{0R}$  の値はそれぞれ  $0.2\%$  以下,  $0.4\%$  以下を期待できる。これらの値は図 35, 図 36 に示す集合胴圧力の応答からその変動はかなり大きいように見えるが実際は小さな値であると言える。

図 37 (c) は動圧変動を示す。動圧変動の標準偏差  $\sigma_q/\bar{q}$  および動圧変動の最大値  $\Delta q_{max}/\bar{q}$  は, マッハ数制御 off の場合にはそれぞれ最大  $2.5\%$ ,  $5\%$  となってかなり大きな値になるのに対し, マッハ数制御 on の場合は, それぞれ最大  $0.8\%$ ,  $1.5\%$  程度になりかなり減少する。測定部マッハ数が低い場合には, 動圧変動のほとんどは測定部マッハ数変動によるものであるから ((3-17) 式で表される  $K_M$  および  $\sigma_M/M$  の値が低マッハ数で大きな値になる), マッハ数制御を行うことは, 測定部マッハ数変動を小さくするためばかりでなく, 動圧変動を抑制するためにもかなり効果がある。

### 6.3 高レイノルズ数低速試験

設定集合胴圧力  $P_{0R} = 1569\text{kpa}$  ( $16\text{kgf/cm}^2$ ), 設定マッハ数  $M_R = 0.2$  で実施した高レイノルズ数低速試験の結果を図 38 に示す。この図は最適と思われる制御結果を示し, 風洞気流の状態量と弁開度の時間履歴, および制御精度をあわせて表す。経常試験において, このような試験は実施していないので制御試験結果のみを記す。高レイノルズ数の測定部気流を得るために, このような高い集合胴圧力の試験では, 高圧導管圧力と集合胴圧力の比が  $1$  に近くなる。図に示すように高圧導管圧力と設定集合胴圧力の圧力比  $P_D/P_{0R}$  は, 測定部気流が整定したときから ( $4$  秒後) 通風終了 ( $11.5$  秒後) まで  $1.17$  から  $1.07$  に変化する。このとき, 調圧弁開度は, その前後圧力比がかなり小さくなっていくために, 急速な開度で開く。このような状況のもとでは, 集合胴圧力を一定に保つのは困難で, 集合胴圧力は時間と共に徐々に低下する。しかし, 気流整定時 ( $4.25$  秒) から  $11.5$  秒までの  $7.25$  秒間に, オフセット  $(\bar{P}_0 - P_{0R})/P_{0R} = 0.4\%$ ,  $\sigma_{P_0}/P_{0R} = 0.122\%$ ,  $\Delta P_{0max}/P_{0R} = 0.257\%$  であるから, その間の集合胴圧力の変動は小さい値であると言える。測定部マッハ数は起動過渡時にオーバーシュートし,  $4$  秒後に整定する (起動時の第 2 スロート弁指定位置が適切な値であったのでマッハ数制御開始後の気流整定は早い)。マッハ数制御系の最適調整を行うために行った通風途中のマッハ数設定値の変更 ( $0.200 \rightarrow 0.207$ ) に対する制御系の応答は速応性があり良い結果を示す。マッハ数設定変更後の測定部マッハ数がなかなか整定しないのは, 丁度この時刻 ( $7$  秒後) から始まる集合胴圧力の低下によるものである。マッハ数制御精度は,  $\bar{M} - M_R < 0.0015$ ,  $\sigma_M < 0.001$ ,  $\Delta M_{max} < 0.002$  が期待できる。動圧変動については,  $\sigma_q/\bar{q} < 0.7\%$ ,  $\Delta q_{max}/\bar{q} < 1.5\%$  となって低レイノルズ数低速試験のときの値とほぼ同じになると考えて良い。

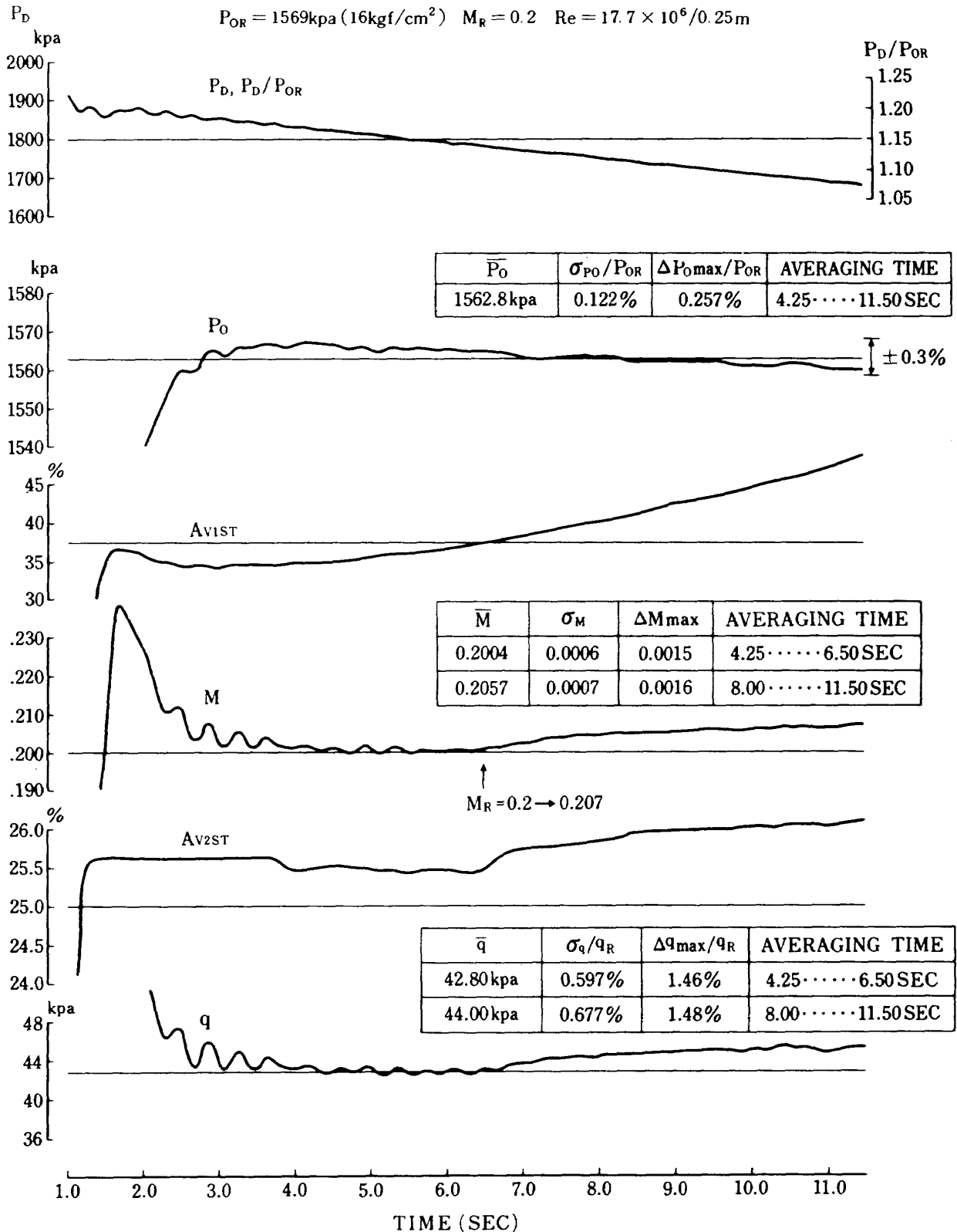


図 38 高レイノルズ数低速試験結果

6.4 限界低レイノルズ数試験

本風洞で試験できる低レイノルズ数の限界での制御性を見るために、 $P_{OR} = 147\text{kpa} (1.5\text{kgf/cm}^2)$ 、 $M_R = 0.1$ で制御試験を行った。その試験結果を図 39 に示す。この試験ではマッハ数制御は実施して

おらず、第 2 スロート弁ストロークは 14.8% の位置に固定したままである。調圧弁ストロークは極めて小さく、1.6% 前後で集合胴圧力を制御している。しかし、その割には集合胴圧力制御精度は良く ( $\bar{P}_0 - P_R)/P_{OR} < 0.1\%$ 、 $\sigma_{P_0}/P_{OR} < 0.35\%$ 、 $\Delta P_{0max}$



$P_{OR} = 147\text{kpa} (1.5\text{kgf/cm}^2)$   $M_R = 0.1$  2675 RUN M control off  
 $Re = 0.84 \times 10^6 / 0.25\text{m}$

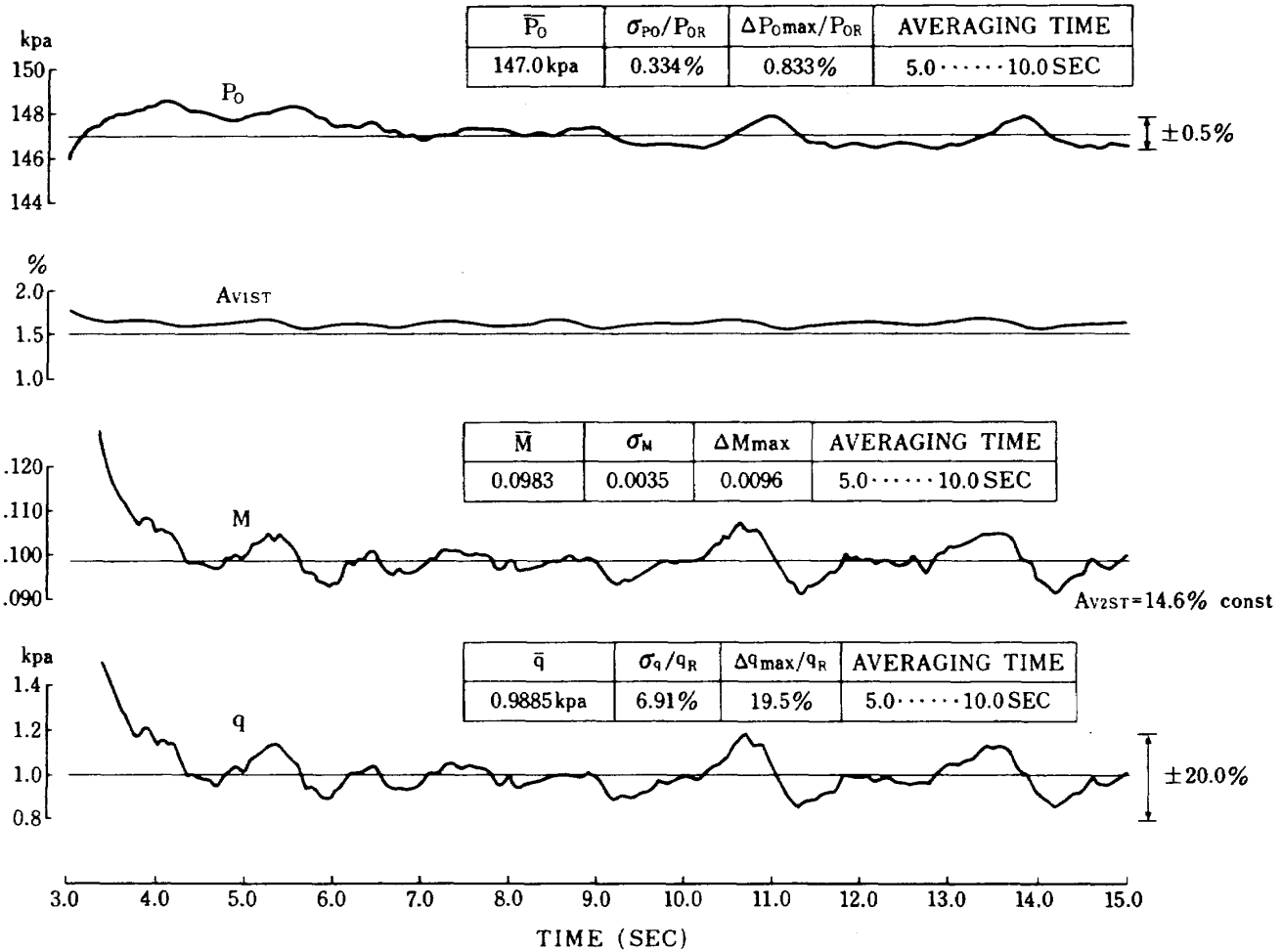


図 39 限界低レイノルズ数試験結果

$/P_{OR} < 1\%$ である。測定部マッハ数の変動量は、ここでの試験では  $\sigma_M = 0.0035$ ,  $\Delta M_{max} = 0.0096$  になってかなり大きな値になる。この大きな変動量は集合胴圧力変動に伴う測定部マッハ数の変動によるものだけではなく、マッハ数検出信号系に重畳される雑音にもよる。設定マッハ数が 0.1 の場合は  $(P_0 - P_L)/P_0 = 0.0105$  になり、 $P_0 = 147\text{kpa} (1.5\text{kgf/cm}^2)$  とすると  $P_0 - P_L = 1.54\text{kpa} (0.0158\text{kgf/cm}^2)$  となって、 $P_0 - P_L$  の値として極めて小さな圧力差を検出することになる。今回の試験では  $P_0 - P_L$  圧力検出器の測定レンジは  $196\text{kpa} (2\text{kgf/cm}^2)$  であったため、 $P_0 - P_L$  圧の検出信号の S/N 比は極めて悪くなった。そのため、当然のことながら、マッハ数の検出精度は極めて悪くなった(図 6(a)参照)。後の節で述べるように、適切な測定レンジを持った  $P_0 - P_L$  圧力変換器を用いれば、図に示されるよう

なマッハ数の変動はより少くなると考えられる。

動圧変動は、大きなマッハ数変動の影響を受けて、かなり大きな値になり、 $\sigma_q/\bar{q} = 6.91\%$ ,  $\Delta q_{max}/\bar{q} = 19.5\%$  に達する。

### 7. 計測時間

本風洞で可能な計測時間は、風洞起動後に集合胴圧力および測定部マッハ数が整定したときから、貯気槽圧力が低下して集合胴圧力を一定に保持できなくなるまでの時間である。計測時間  $t_s$  は次のようにして求めることができる。

貯気槽内の有効使用可能空気量を  $M_s$  とすると

$$M_s = \sum_{j=1}^3 (\rho_{rj} V_{Tj} - \rho_{fj} V_{Tj})$$

$$= V_T \left( \frac{P_{Tr}}{RT_{Tr}} - \frac{P_{Tf}}{RT_{Tf}} \right)$$

$$= \frac{V_T P_{Tr}}{RT_{Tr}} \left\{ 1 - \left( \frac{P_{Tf}}{P_{Tr}} \right)^{\frac{1}{n_T}} \right\} \quad (7-1)$$

が成立する。ただし

$$V_T = \sum_{j=1}^3 V_{Tj}, \quad \rho_r = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \rho_{rj} = \frac{P_{Tr}}{RT_{Tr}}$$

$$\rho_f = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \rho_{fj} = \frac{P_{Tf}}{RT_{Tf}}, \quad \frac{T_{Tf}}{T_{Tr}} = \left( \frac{P_{Tf}}{P_{Tr}} \right)^{\frac{n_T-1}{n_T}} \quad (7-2)$$

である。ここで、3個ある貯気槽 ( $j=1\sim 3$ ) に対して、

$\rho_r, P_{Tr}, T_{Tr}$ : 気流整定時における貯気槽内空気の密度, 圧力, および温度

$\rho_f, P_{Tf}, T_{Tf}$ : 通風終了時の貯気槽内空気の密度, 圧力, および温度である。

さらに、貯気槽初期圧力  $P_{Ti}$  および初期温度  $T_{Ti}$  を用いて

$$T_{Tr} = T_{Ti} \left( \frac{P_{Tr}}{P_{Ti}} \right)^{\frac{n_T-1}{n_T}} K_{Rr} = \frac{P_{Tr}}{P_{Ti}}, \quad K_{Rr} = \frac{P_{Tf}}{P_{0R}} \quad (7-3)$$

と書くと

$$M_s = \frac{V_T P_{Ti}}{RT_{Ti}} K_{Rr}^{\frac{1}{n_T}} \left\{ 1 - \left( \frac{K_{Rr}}{K_{Rr}} \frac{P_{0R}}{P_{Ti}} \right)^{\frac{1}{n_T}} \right\} \quad (7-4)$$

となり、 $M_s$  は設定集合胴圧力  $P_{0R}$ , 貯気槽初期圧力  $P_{Ti}$ , 貯気槽初期温度  $T_{Ti}$ , 気流整定時貯気槽圧力の貯気槽初期圧力に対する比  $K_{Rr}$ , および通風終了時貯気槽圧力の設定集合胴圧力に対する比  $K_{Rf}$  で表すことができる。

一方、通風流量  $G_s$  は

$$G_s = AM_R P_{0R} \sqrt{\frac{\kappa}{RT_0} \left( 1 + \frac{\kappa+1}{2} M_R^2 \right)^{-\frac{\kappa+1}{\kappa}}} \quad (7-5)$$

で表わされる。計測時間  $t_s$  は

$$t_s = M_s / G_s \quad (7-6)$$

より求めることができる。ここで、 $K_{Rr} = P_{Tr} / P_{Ti}$  および  $K_{Rf} = P_{Tf} / P_{0R}$  は次のようにして求める。まず、 $K_{Rr}$  については、実際に通風したときに測定した気流整定時の高圧導管圧力  $P_{Dr}$  より求める。図 40 に示す破線は数多くの通風試験について  $P_{Dr} / P_{Ti}$ , および  $P_{Dr} / P_{0R}$  を求めその平均値を示したものであ

る。測定部マッハ数 0.2 ~ 1.2 の範囲で、集合胴圧力 196kpa (2kgf/cm<sup>2</sup>), 1177kpa (12kgf/cm<sup>2</sup>), および 1569kpa (16kgf/cm<sup>2</sup>) についてそれぞれのグラフを示す。高圧導管圧力損失量を求める方法については APPENDIX に記す。

次に通風終了時の貯気槽圧力  $P_{Tf}$  は、図 28(a) に示す調圧弁流量特性から開度 100 % まで使用するとすれば  $P_D' / P_0 = 1.1$  まで通風可能であるが、高圧導管の圧力損失があるためと、全開附近 (90 % 以上) では調圧弁の実効面積のゲインが低下し (図 29 参照), 集合胴圧力の調圧精度が悪くなるために調圧弁全開附近の開度余裕を見込んで、設定集合胴圧力の 1.2 倍程度にした方がよい。ここでは  $K_{Rf} = P_{Tf} / P_{0R} = 1.2$  として計算する。ただし、設定集合胴圧力が低い場合は、 $K_{Rf} = 1.2$  とすると、貯気槽圧力が低下しすぎて貯気槽運用上都合が悪いので (貯気槽空気は貯気槽元弁をはじめ他の多くの操作機器の操作空気源としても用いられている), 貯気槽吹止り圧力の下限値を 1177kpa (12kgf/cm<sup>2</sup>) とする。すなわち  $P_{Tf} \geq 1177\text{kpa}$  とする。

以上に述べた条件のもとに計算した本風洞で試験可能な計測時間とレイノルズ数の関係を設定マッハ数と設定集合胴圧力について表したのが図 41 である。この図から、設定集合胴圧力  $P_{0R} = 1177\text{kpa}$  (12 kgf/cm<sup>2</sup>), 設定マッハ数  $M_R = 1.0$  の高レイノルズ数試験のときには、計測時間は 11.5 秒確保できることになる。設定マッハ数が 0.8 以下にすると、計測時間は図 40 に示すように気流整定時の貯気槽圧力が高くなるために幾分増える。同じ設定集合胴圧力で設定マッハ数を 0.7 にすると計測時間は 13.4 秒になり、一回計測スキップの時間を 6 秒、模型迎角変更による測定部マッハ数変動の整定時間を 1 秒として、迎角 2 点の計測が可能である。図 41 は 7.3 節で述べた高レイノルズ数低速試験 ( $P_{0R} = 1569\text{kpa}$ ,  $M_R = 0.2$ ) は計測時間が短くなり、風試が不可能であることを示している。これは、貯気槽吹止り圧力を  $P_{Tf} = 1.2 P_{0R}$  としたためで、実際は図 38 に示すように  $P_D = 1.1 P_{0R}$  程度まで貯気槽圧力を降下させて用いれば、6 秒以上の計測時間は確保できる。その場合には、調圧弁前後の圧力差が小さくなって調圧弁は急開動作をするために、集合胴圧力制御精度

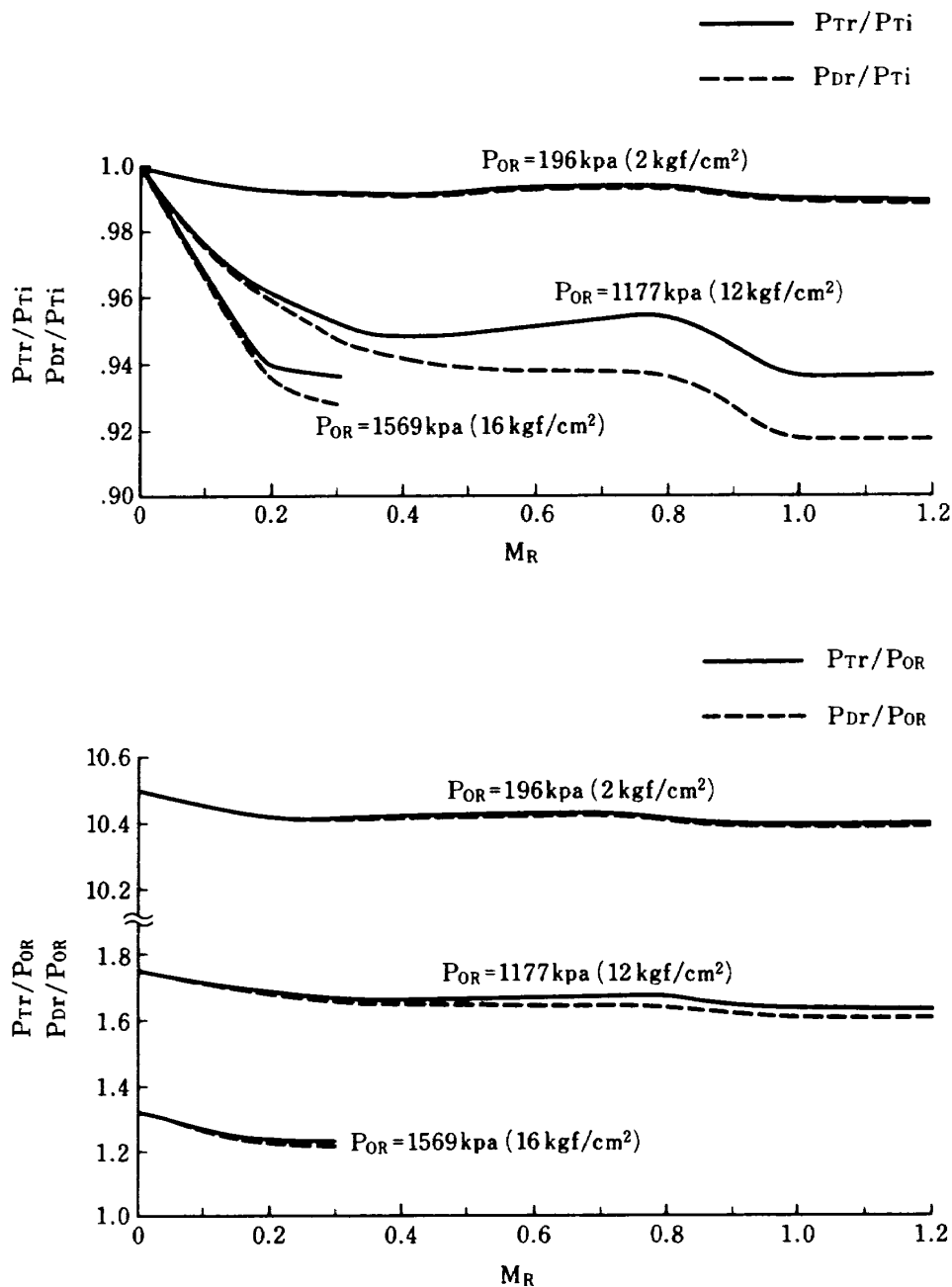


図 40 マッハ数整定時高圧導管圧力 ( $P_{Dr}$ ) および貯気槽圧力 ( $P_{Tr}$ )

は悪くなり、それに伴って測定部マッハ数精度も悪化する。したがって、ここでは高レイノルズ数試験における貯気槽吹止り圧力を  $P_{Tf} = 1.2 P_{OR}$  に決め、本風洞の性能としては、 $P_{OR} = 1569 \text{ kpa}$  (16 kgf/cm<sup>2</sup>),  $M_R = 0.2$ ,  $Re = 17.7 \times 10^6$  の試験は計測時間を確保できないので風試が不可能であるとする。設定集合胴圧力を  $1471 \text{ kpa}$  (15 kgf/cm<sup>2</sup>) に下げれば、計測時間は 9 秒間とれるので風試可能である。低マッハ数  $M_R = 0.2$  における高レイノルズ数試験の可能な

上限値は、設定集合胴圧力  $P_{OR} = 1471 \text{ kpa}$  (15 kgf/cm<sup>2</sup>) のときのレイノルズ数の値で、その値は  $Re = 16.6 \times 10^6$  になる。

設定集合胴圧力が  $981 \text{ kpa}$  (10 kgf/cm<sup>2</sup>) 以下の試験では、貯気槽吹止り圧力を  $1177 \text{ kpa}$  (12 kgf/cm<sup>2</sup>) に制限したために、貯気槽内使用可能空気量が限られるので、集合胴圧力および測定部マッハ数を下げても計測時間はそれほど延長されない。

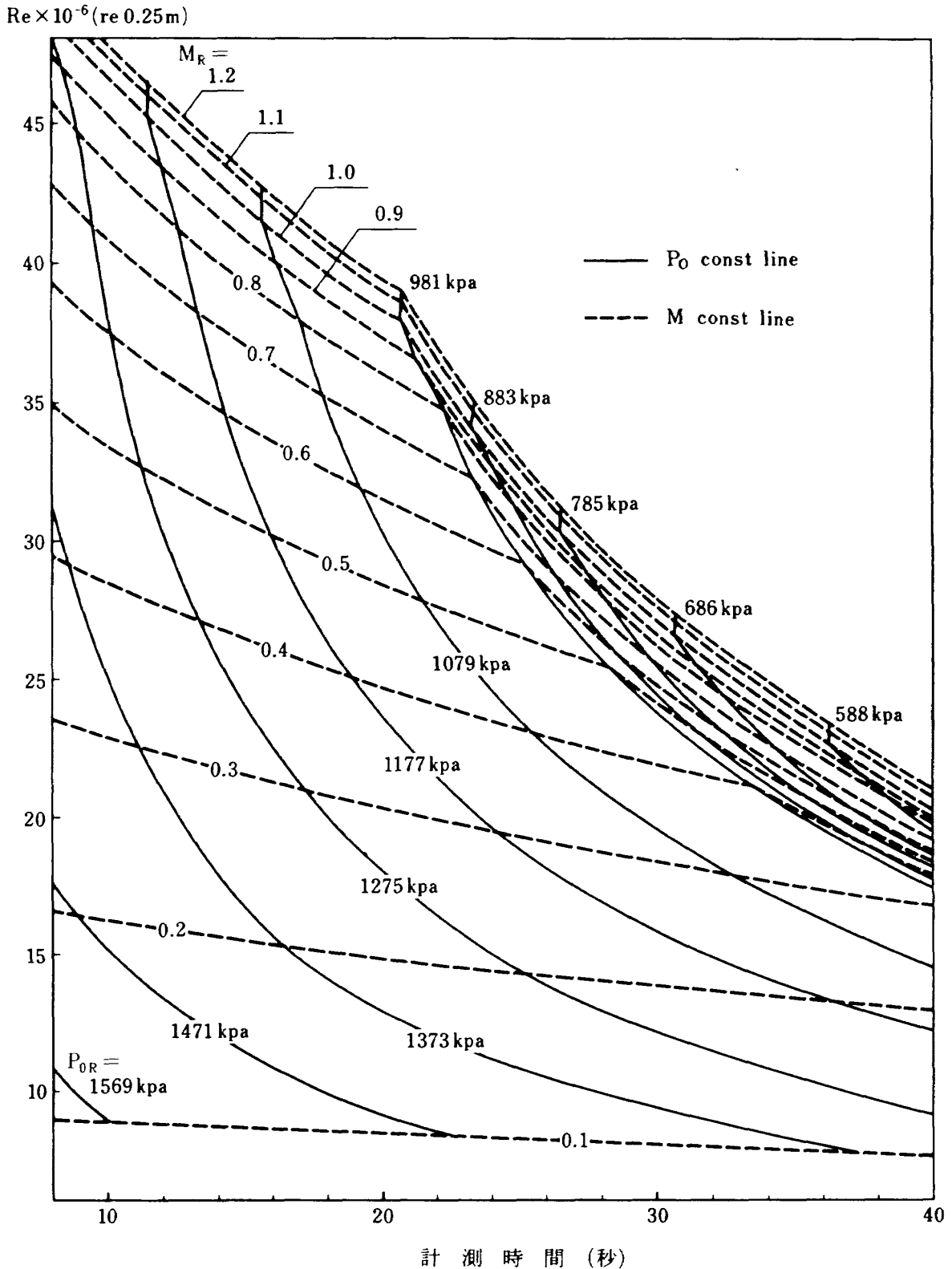


図 41 計測時間-レイノルズ数関係図

### 8. 試験レイノルズ数範囲

今までに実施して来た制御試験の結果から得た本風洞で風試可能なレイノルズ数とマッハ数の範囲を図 42 に示す。図中に書いてある○印は制御試験を

実施した点である。I の領域は、本風洞建設時における仕様範囲で、設定マッハ数範囲 0.2 ~ 1.2, 設定集合胴圧力 392kpa (4kgf/cm<sup>2</sup>) ~ 1177kpa (12kgf/cm<sup>2</sup>) に相当する範囲である。

II の低レイノルズ数側の領域は、設定集合胴圧力

(計測時間 8sec以上 測定部  $p=103\text{kpa}$ 以上)  
 (流量制限 833.28kg/sec以内 貯気槽容量  $V_T=1952\text{m}^3$ )  
 (1.2.3球)

$T_0=293\text{K}$   
 $P_{Tf}=1.2P_0$

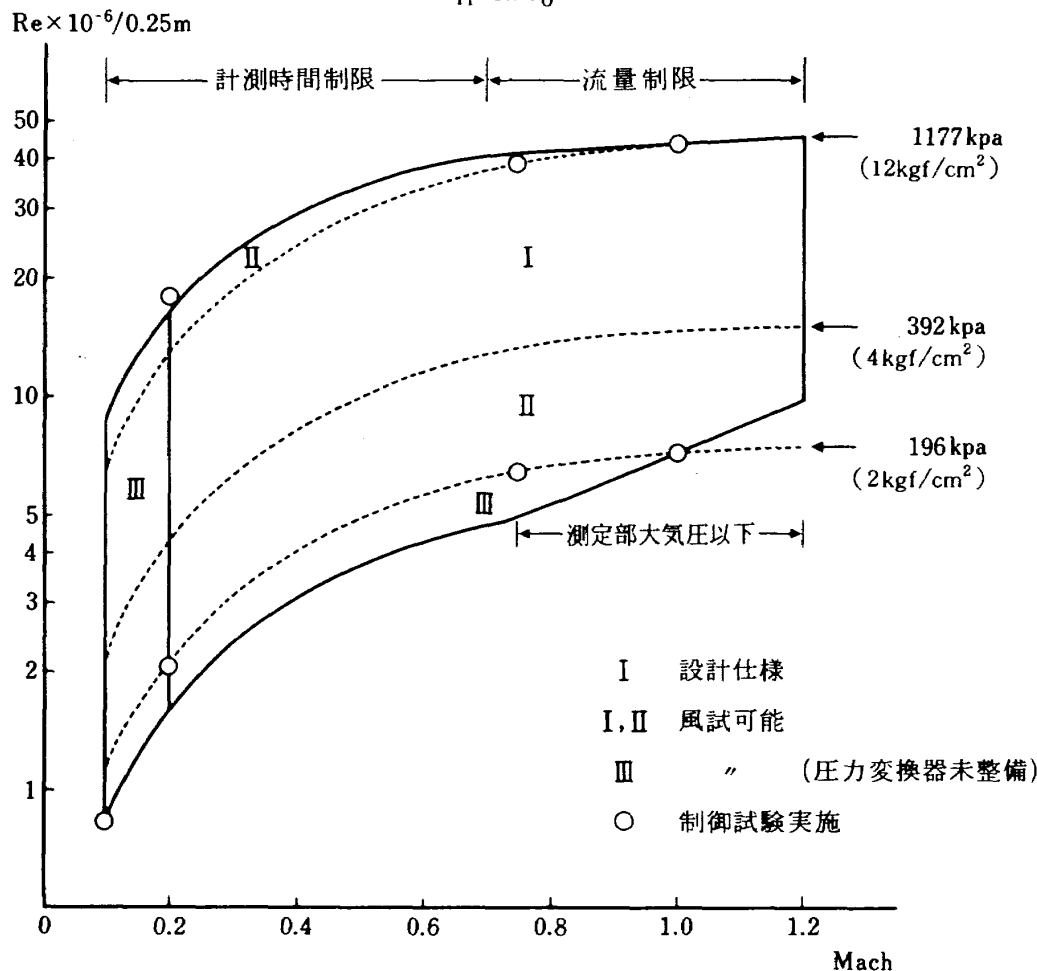


図 42 試験範囲の拡大

の下限を  $392\text{kpa}(4\text{kgf/cm}^2)$  から  $192\text{kpa}(2\text{kgf/cm}^2)$  に下げた場合に拡張される試験レイノルズ数範囲である。このことにより、かなり広範に試験レイノルズ数の範囲が拡大されることが分る。Ⅱの高レイノルズ数側の領域は、設定集合胴圧力を上げた場合に拡張される試験レイノルズ数範囲である。このときの集合胴圧力の上限は、計測時間を 8 秒以上確保でき、かつ通風時の流量が  $833\text{kg/s}$  ( $P_{0R}=1177\text{kpa}$ ,  $M_R=1.0$  のときの流量) 以下になるような値である。Ⅲの領域は、設定集合胴圧力を  $147\text{kpa}(1.5\text{kgf/cm}^2)$  に、設定マッハ数を 0.1 にそれぞれ下げた場合に拡張される試験レイノルズ数範囲である。しかし、低レイノルズ数側の遷音速領域 ( $M_R=0.75 \sim 1.2$ ) においては、測定部静圧が  $103\text{kpa}(1.05\text{kgf/cm}^2)$

$\text{cm}^2$ ) 以下になって、抽気不可能となるために、試験レイノルズ数範囲は狭くなる。

風試可能なレイノルズ数範囲、およびマッハ数の範囲を、図 42 に示すように、Ⅰの領域からⅡの領域、さらにⅢの領域へ拡張したが、ここで問題になるのは、拡張に伴って広範な圧力範囲に必要な精度が得られる圧力変換器を用意しなければならないことである。圧力検出範囲は、集合胴圧力については  $147\text{kpa}(1.5\text{kgf/cm}^2)$  から  $1569\text{kpa}(16\text{kgf/cm}^2)$  である。集合胴圧力と測定部静圧(プリナム室圧力)との差圧  $P_0 - P_L$  の圧力検出範囲は、図 42 に示す試験レイノルズ数およびマッハ数の全範囲を対象にすると、 $1.025\text{kpa}(0.0105\text{kgf/cm}^2)$  から  $692\text{kpa}(7.05\text{kgf/cm}^2)$  のほぼ 1 : 700 の広範な検出範囲が必要。

になる。このような広範な集合胴圧力  $P_0$  と差圧  $P_0 - P_L$  の検出の必要性に対処して、集合胴圧力検出用圧力変換器 3 台 (1569kpa(16kgf/cm<sup>2</sup>), 785kpa(8kgf/cm<sup>2</sup>), および 392kpa(4kgf/cm<sup>2</sup>) のレンジを持つ絶対圧力用圧力変換器), 差圧  $P_0 - P_L$  検出用圧力変換器 3 台 (785kpa(8kgf/cm<sup>2</sup>), 196kpa(2kgf/cm<sup>2</sup>), および 49kpa(0.5kgf/cm<sup>2</sup>) のレンジを持つ差圧型圧力変換器) を組合せて用いれば,  $P_0 - P_L$  の極く小さい範囲を除いて, ほぼ満足のいく検出精度が得られる。図 43 (a), (b) はフルスケール 0.05 % の精度をもつ圧力変換器とそれと同じ 0.05 % 以内の精度をもつ A/D 変換器を用いた場合の  $P_0$  検出精度, および  $P_0 - P_L$  検出精度を示す (図 5 (a), (b) と比較参照)。

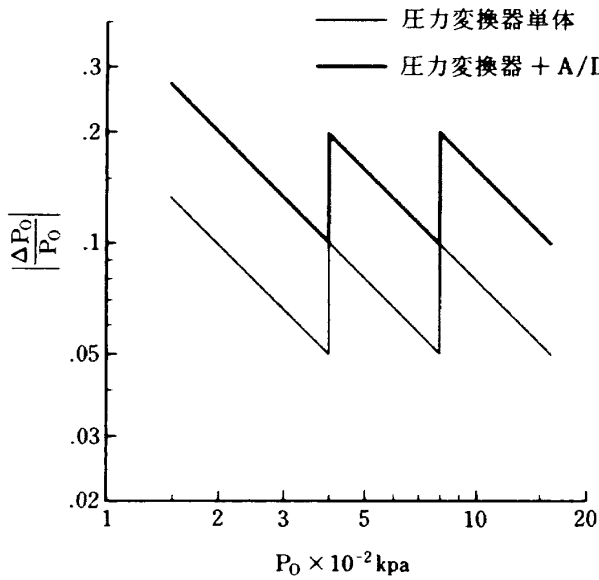


図 43 (a)  $P_0$  検出精度

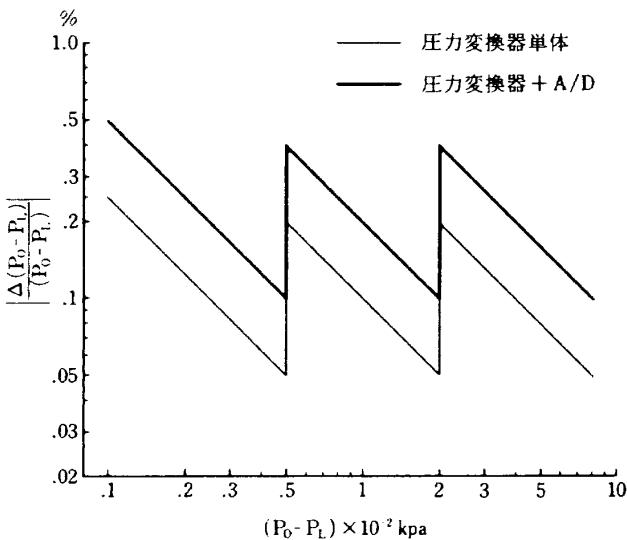


図 43 (b)  $(P_0 - P_L)$  検出精度

図 44 (a), (b), (c) は図 43 (a), (b) に示す精度の圧力変換器を用いた場合のマッハ数, 動圧, およびレイノルズ数の検出精度を表す。各々のグラフは, 設定集合胴圧力と設定マッハ数の値に応じて, 3 台の集合胴圧力変換器と 3 台の  $P_0 - P_L$  圧力変換器の測定

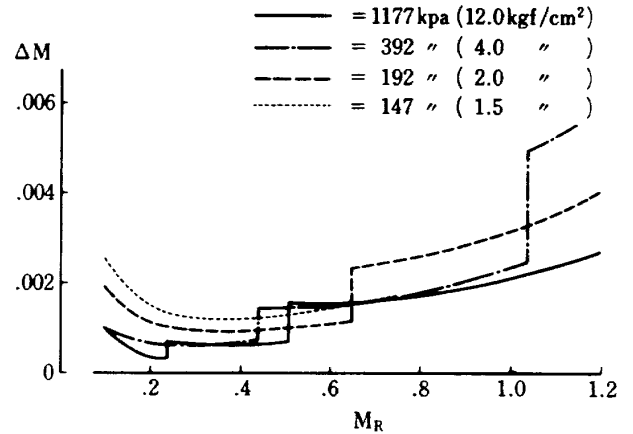


図 44 (a) マッハ数検出誤差

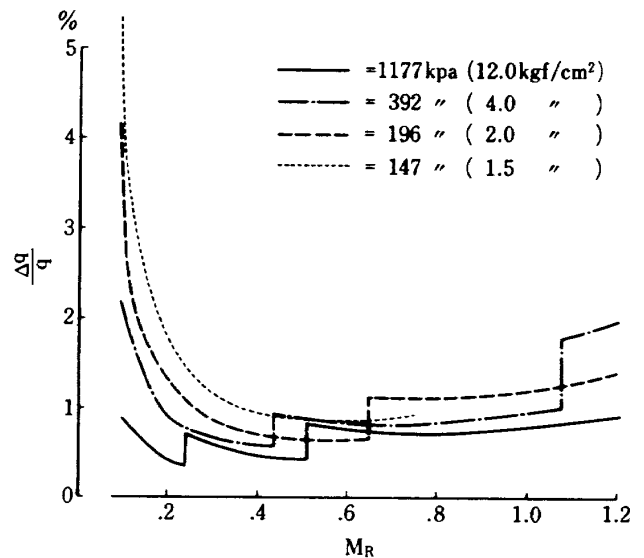


図 44 (b) 動圧検出精度

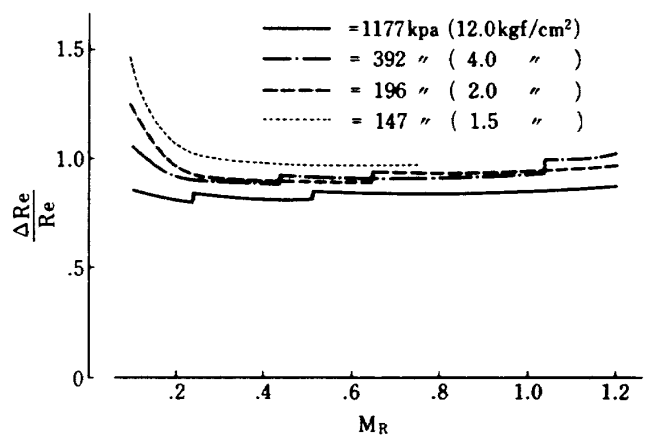


図 44 (c) レイノルズ数検出精度

レンジを適宜切換えて得られる精度である。これらの図から、マッハ数およびレイノルズ数の検出については、設定集合胴圧力とマッハ数の全域にわたってほぼ満足のいく検出精度が得られる(図6(a), (b), (c)と比較参照)。しかしながら、動圧の検出については、設定集合胴圧力が196kpa(2kgf/cm<sup>2</sup>)以下で、かつ設定マッハ数が0.2以下では検出精度はかなり悪くなる。この原因は、この範囲では動圧は低下し、 $P_0 - P_L$ の差圧は極めて小さな値になり(4kpa(0.04kgf/cm<sup>2</sup>)以下)、 $P_0 - P_L$ 差圧検出精度が悪くなるためである。この範囲の検出精度を上げるためには、

さらに小さな測定レンジをもつ $P_0 - P_L$ 圧力変換器を用意する必要がある。しかしながら、高圧の状態のもとで測定レンジの小さい差圧型圧力変換器を用いる事は、過圧保護、基準圧力(Line pressure)変化に伴う零点移動による検出精度悪化などの困難が生じるようになる。現在のところ、高圧状態のもとでの小さな差圧を検出する方法について未解決なので、図42に示す本風洞の風試可能な領域の一部(Ⅲの低レイノルズ数側の領域)で検出精度の悪くなることは避けることができない。

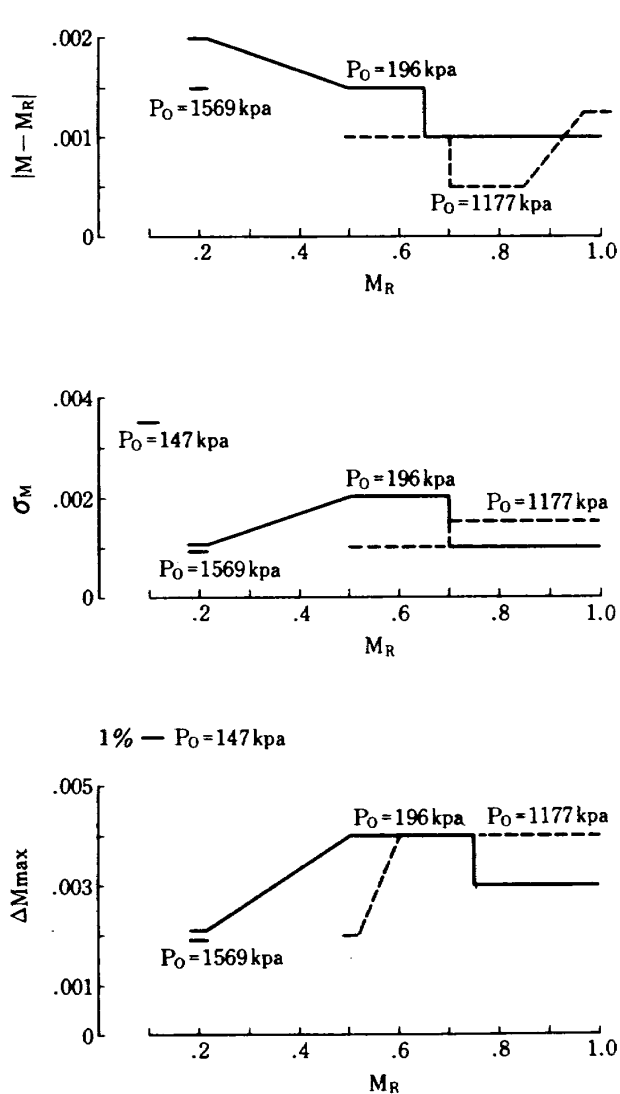


図 45(a) マッハ数制御精度

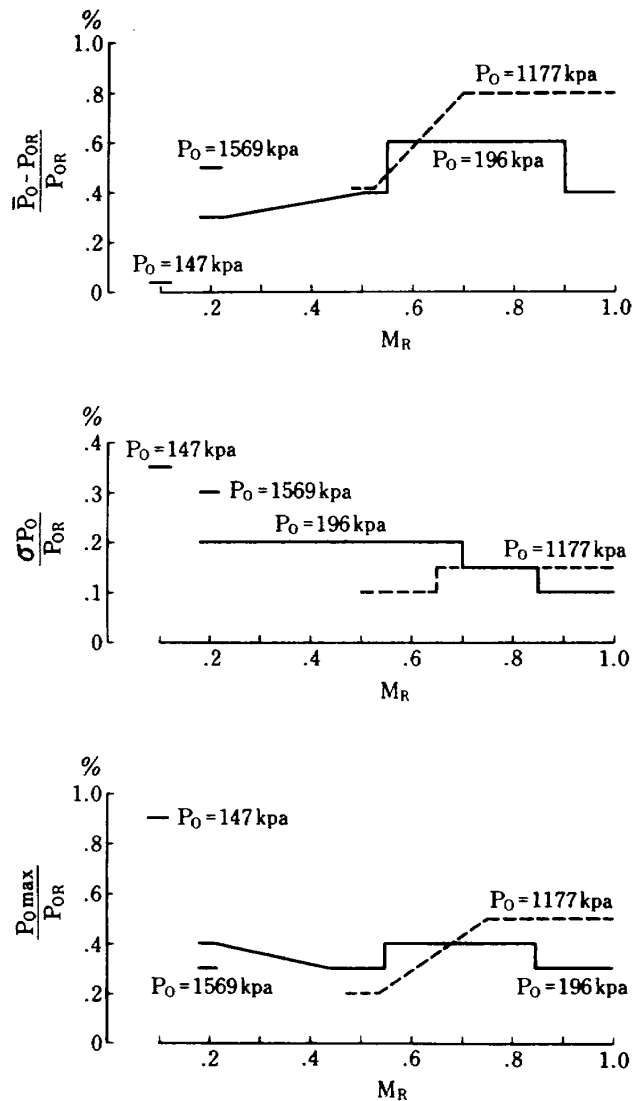


図 45(b) 集合胴圧力制御精度

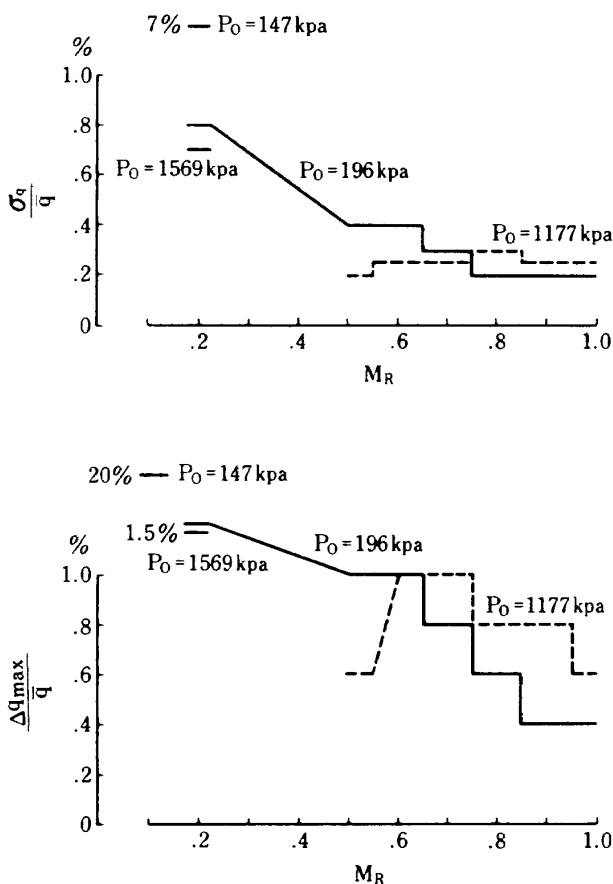


図 45(c) 動圧変動

## 9. ま と め

本報告は、高圧吹出式高レイノルズ数二次元風洞の風洞起動時を含む集合胴圧力制御および測定部マッハ数の制御試験を実施し、制御精度について述べた。あわせて、本風洞の試験可能レイノルズ数範囲の拡大を行った。その結果を要約すれば次の通りである。

1. 集合胴圧力 147kpa (1.5kgf/cm<sup>2</sup>) ~ 1177kpa (12kgf/cm<sup>2</sup>), 測定部マッハ数 0.1 ~ 1.2 の範囲 (ただし  $P_0 = 147\text{kpa}$  (1.5kgf/cm<sup>2</sup>),  $M = 0.1$  を除く), および集合胴圧力 1569kpa (16kgf/cm<sup>2</sup>), 測定部マッハ数 0.1 ~ 1.2 の範囲についてはほぼ満足のいく測定部気流の制御精度が得られることを示した。制御精度についてまとめたものを図45(a), (b), (c)に示す。これは、制御試験実施点における測定部気流の制御精度の最大値を表したものである。

2. マッハ数制御を行うことによって

(a) 測定部マッハ数の通風毎の再現性は格段に向上する。(b) 集合胴圧力変動による測定部マッハ数の変動 (特に低レイノルズ試験において) を抑制し小さくすることができる。(c) 制御動作による通風時間の損失は少ないなどのことが言える。

3. 低速, 低レイノルズ数において測定部気流の制御精度を決めるのは調圧弁の低流量時における流量特性である。
4. 本風洞で採用したプリチャージ起動によって, 高レイノルズ数試験において, (a) 風洞は安全に起動され, (b) 定常気流状態の時間の延長がはかれるため, マッハ数制御が実施可能となり, 必要な計測時間が確保できた。

最後に、本研究を実施するにあたり、激励と教示を頂いた二次元風洞研究室の高島一明室長、および榊原盛三主任研究官と通風試験に際し御協力頂いた遷音速風洞制御研究室の馬場滋夫技官、唐沢敏夫技官、小松行夫技官に対し、ここに記して感謝の意を表します。

## 10. 参考文献

- 1) 榊原盛三, 高島一明, 三輪 等, 小国保男, 佐藤 衛, 神田 宏: 航技研二次元風洞の気流特性について(I), 航技研報告 TR-693, (1982.1).
- 2) Takashima, K.: Experimental works in NAL High Reynolds Number Two-Dimensional Transonic Wind Tunnel on Advanced Technology and NACA Airfoils, ICAS 82-5.4.4 (1982.8).
- 3) 榊原盛三, 三輪 等, 小国保男, 佐藤 衛, 神田 宏: 航技研二次元風洞の気流特性について(II), 航技研報告 TR-836, (1984.9).
- 4) 小国保男他: 航技研二次元風洞の気流特性について(III), 航技研報告 TR-842, (1984.12).
- 5) 沢田秀夫, 榊原盛三, 佐藤 衛, 神田 宏: 航技研二次元風洞の壁干渉評価, 航技研報告 TR-829, (1984.8).



- 6) 高島一明, 榊原盛三, 三輪 等, 小国保男, 佐藤 衛, 神田 宏: 航技研二次元風洞とその新しい起動方式, 日本航空宇宙学会第11回 年会前刷集 (1980. 4).
- 7) 高島一明, 榊原盛三, 三輪 等, 小国保男: 二次元高圧風洞における実験法, 日本航空宇宙学会誌, 第 31 巻, 第 351 号, pp.180-184 (1983. 4).
- 8) 空気力学第二部: 航技研二次元風洞の構造と特性, 航技研報告 TR- 647, (1980. 11).
- 9) 榊原盛三, 馬場滋夫: 二次元風洞構成要素の研究(I), プラグ型調圧弁および多孔板の特性, 航技研報告 TR- 465, (1976. 7).
- 10) 三輪 等: 二次元風洞構成要素の研究(III), 集合調圧力制御のデジタルシミュレーション, 航技研報告 TR- 597, (1980. 1).
- 11) Ohman, L. H. Ed. : The NAE High Reynolds Number 15in.×60in. Two-Dimensional Test Facility. part I. General Information. NAE LTR-HA-4. (1970. 4).
- 12) 鈴木盛三, 萱場重男, 野口正芳, 小松行夫, 鈴木正光, 萩原秀徳: 吹出式風洞用高圧貯気槽設備の定温装置の特性と第 3 高圧貯気槽の増設, 航技研報告 TR- 639, (1980. 11).
- 13) Simmons, M.A., A.R.C.S., Cowdrey, C.F. : Measurement of the Aerodynamic Forces Acting Porous Screens, NPL, R & M No. 2276 (1945. 7).
- 14) Kinsolving, S.L. & Jackson, R. : Starting Loads in An Intermittent Supersonic Wind Tunnel. AEDC-TN-59.6 (1959).
- 15) 遠藤 浩: 航技研二次元風洞について, 日本航空宇宙学会誌, 第 26 巻, 第 299 号, pp. 611 ~ 617, (1978. 12).

## 11. APPENDIX. 貯気槽圧力の推定

図 A 1 に示す高圧導管の配管系の損失 (等価損失係数  $\zeta_{eq}$ ) を求め貯気槽圧力を推定する。図 A 1 に記入されている記号, すなわち, 3 個の貯気槽圧力  $P_{T1}$ ,  $P_{T2}$ , および  $P_{T3}$  と各配管部分における流速  $w$ , 密度  $\rho$ , および損失係数  $\zeta$  を用いて, 圧力条件より

$$P_{T1} = P'_D + \frac{1}{2} \zeta_D \rho_D w_D^2 + \frac{1}{2} \zeta_{12} \rho_{12} w_{12}^2 + \frac{1}{2} \zeta_1 \rho_1 w_1^2 \quad (A-1)$$

$$P_{T2} = P'_D + \frac{1}{2} \zeta_D \rho_D w_D^2 + \frac{1}{2} \zeta_{12} \rho_{12} w_{12}^2 + \frac{1}{2} \zeta_2 \rho_2 w_2^2 \quad (A-2)$$

$$P_{T3} = P'_D + \frac{1}{2} \zeta_D \rho_D w_D^2 + \frac{1}{2} \zeta_3 \rho_3 w_3^2 \quad (A-3)$$

貯気槽圧力を 3 個ある貯気槽圧力の平均値として定義する。すなわち,

$$P_T = \frac{1}{3} (P_{T1} + P_{T2} + P_{T3}) \quad (A-4)$$

(A-1) 式から (A-3) 式まで加え, これと (A-4) 式を用いて,

$$P_T - P'_D = \frac{1}{2} \zeta_D \rho_D w_D^2 + \frac{1}{3} \zeta_{12} \rho_{12} w_{12}^2 + \frac{1}{6} \zeta_1 \rho_1 w_1^2 + \frac{1}{6} \zeta_2 \rho_2 w_2^2 + \frac{1}{6} \zeta_3 \rho_3 w_3^2 \quad (A-5)$$

ここで, 各管路内の密度を一定とし, 調圧弁直前配管内の密度  $\rho_D$  および  $w_D$  を用いて, 次式で定義する等価圧力損失係数  $\zeta_{eq}$  を与えれば, すなわち

$$P_T - P'_D = \frac{1}{2} \zeta_{eq} \rho_D w_D^2 \quad (A-6)$$

$\zeta_{eq}$  は

$$\zeta_{eq} = \zeta_D + \frac{2}{3} \zeta_{12} \left( \frac{w_{12}}{w_D} \right)^2 + \frac{1}{3} \zeta_1 \left( \frac{w_1}{w_D} \right)^2 + \frac{1}{3} \zeta_2 \left( \frac{w_2}{w_D} \right)^2 + \frac{1}{3} \zeta_3 \left( \frac{w_3}{w_D} \right)^2 \quad (A-7)$$

で表され, 各管路部分の圧力損失係数と各管路内の流速と調圧弁前配管内流速  $w_D$  の比で求めることができる。この比の値は次のようにして求める。

各貯気槽から流出する空気流量は各貯気槽体積に

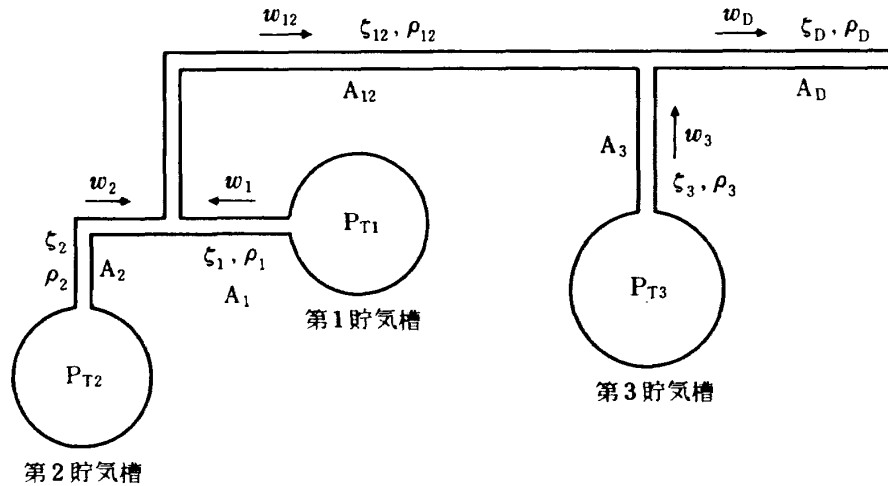


図 A 1

比例し、次の関係があるものとする。ρ = 一定の仮定から、

$$A_1 w_1 / V_{T1} = A_2 w_2 / V_{T2} = A_3 w_3 / V_{T3} \quad (A-8)$$

また、連続の式から

$$\left. \begin{aligned} A_1 w_1 + A_2 w_2 + A_3 w_3 &= A_D w_D \\ A_1 w_1 + A_2 w_2 &= A_{12} w_{12} \end{aligned} \right\} (A-9)$$

(A-8) および (A-9) から

$$\left. \begin{aligned} \frac{w_1}{w_D} &= \frac{A_D}{A_1} \frac{V_{T1}}{V_T} \\ \frac{w_2}{w_D} &= \frac{A_D}{A_2} \frac{V_{T2}}{V_T} \\ \frac{w_3}{w_D} &= \frac{A_D}{A_3} \frac{V_{T3}}{V_T} \\ \frac{w_{12}}{w_D} &= \frac{A_D}{A_{12}} \frac{(V_{T1} + V_{T2})}{V_T} \end{aligned} \right\} (A-10)$$

ただし、 $V_T = V_{T1} + V_{T2} + V_{T3}$

貯気槽および配管系の諸元は

- $V_{T1} = V_{T2} = 523.6 \text{ m}^3$  (10mφ球型貯気槽)
- $V_{T3} = 904.8 \text{ m}^3$  (12mφ球型貯気槽)
- $A_1 = 0.196 \text{ m}^2$  ( $d_1 = 0.5 \text{ m}$ ,  $l_1 = 8 \text{ m}$ )
- $A_2 = 0.385 \text{ m}^2$  ( $d_2 = 0.7 \text{ m}$ ,  $l_2 = 11.3 \text{ m}$ )
- $A_3 = 0.385 \text{ m}^2$  ( $d_3 = 0.7 \text{ m}$ ,  $l_3 = 12.5 \text{ m}$ )
- $A_{12} = 0.385 \text{ m}^2$  ( $d_{12} = 0.7 \text{ m}$ ,  $l_{12} = 8.7 \text{ m}$ )
- $A_D = 0.785 \text{ m}^2$  ( $d_D = 1 \text{ m}$ ,  $l_D = 10 \text{ m}$ )

であるから、本風洞の高圧導管配管系の等価損失係数  $\zeta_{eq}$  は

$$\zeta_{eq} = \zeta_D + 0.392 \zeta_{12} + 0.096 \zeta_1 + 0.049 \zeta_2 + 0.146 \zeta_3 \quad (A-11)$$

で表わされる。各管路の損失係数 ζ は、機械工学便覧より

$$\zeta = \lambda \frac{l}{d} + \zeta_\alpha \quad d: \text{管径}, l: \text{直管部長さ}$$

λ = 直管部損失係数 (0.02)

ζ<sub>α</sub> = 曲がり部損失係数 (1.0) + 管拡大部損失係数 (0.035) + 合流部損失係数 (0.3) + 管路入口部損失 + 伸縮接手部損失 (0.1)

で与え、 $\zeta_{eq}$  を求めると  $\zeta_{eq} \div 1.7$  になる。この値は貯気槽出口附近に設置されている定温装置による圧力損失、本風洞とは別の風洞 (超音速風洞およびフラッタ風洞) の配管接続部分の圧力損失などを含まない。

図 A 2 は、これらの不明な圧力損失要素および計算上の余裕を含めて  $\zeta_{eq} = 2.0$  とした場合の、通風流量と高圧導管圧力損失の関係をあらわしたものである。

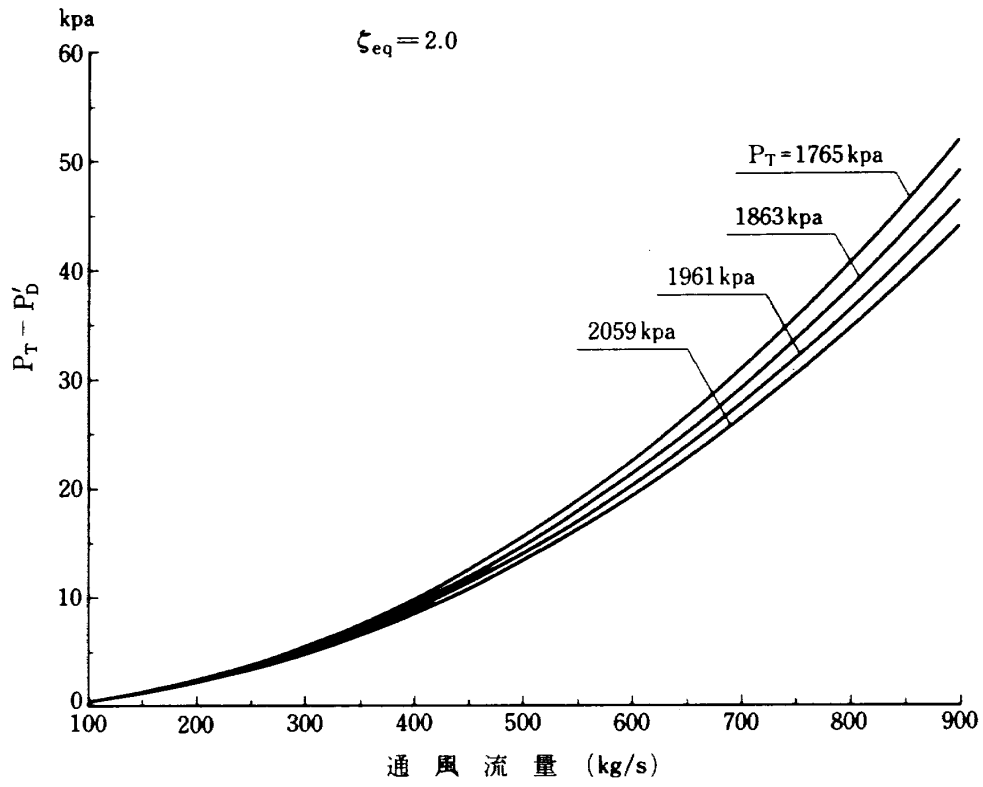


図 A 2 高圧導管圧力損失

---

## 航空宇宙技術研究所報告 862号

昭和60年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---

Printed in Japan