

### 5. 極超音速風洞

#### 5.1 極超音速風洞全般

第2章に述べたように、超音速風洞は既設の高圧空気源（圧力 200 気圧、貯気槽容積 4m<sup>3</sup>）を動力源とする吹出型断続式風洞である。図 5.1 に全体配置図、図 5.2 に弁類の配置を示す系統図を掲げた。

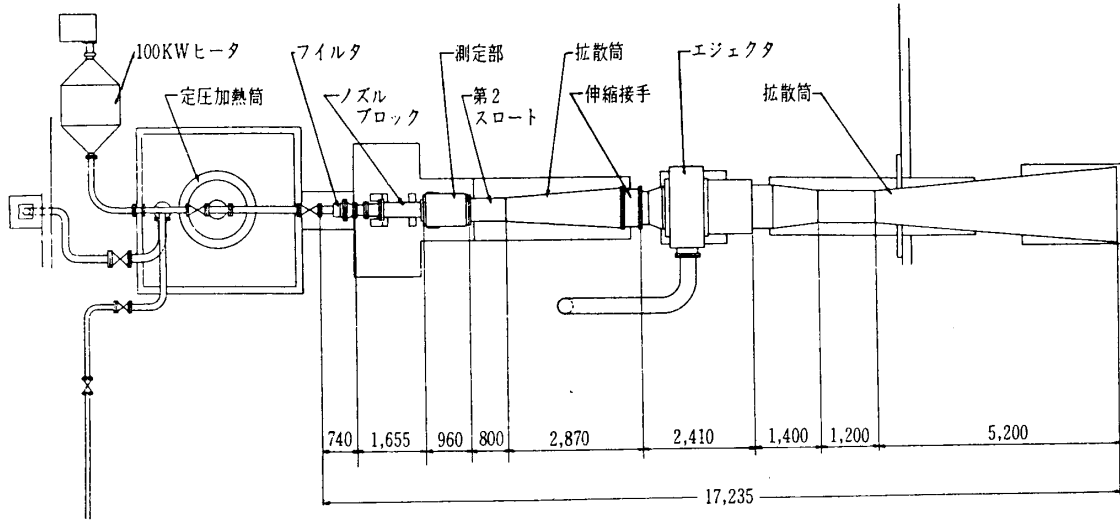


図 5.1 極超音速風洞全体配置図

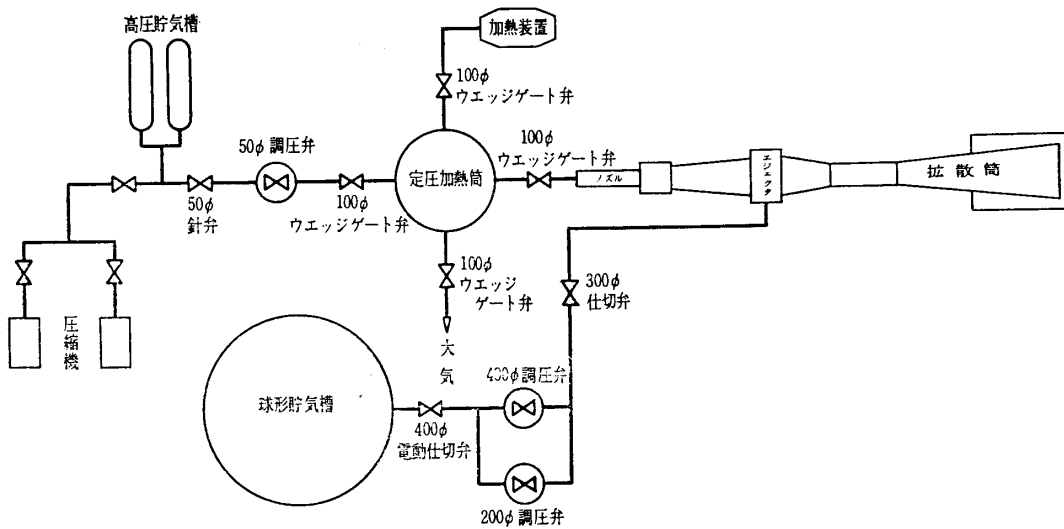


図 5.2 弁類系統図

これらの図面からわかるように、高圧貯気槽を出た空気は、締切弁および制御弁（直径 50 mm）を通して、直径 50 mm の管によって定圧加熱筒に導かれる。定圧加熱筒は、外形寸法高さ 2.13 m、胴体部直径 1.27 m の円筒型容器で、半地下式に直立して設置され、内部に 1.2 ton の耐熱鋼材の金網を積み重ねた蓄熱材を収容している。高圧空気は、定圧加熱筒の底部より入り、蓄熱材を通して加熱された後、加熱筒上部より直径 100 mm の管によ

て風洞ノズルに導かれる。この導管内には塵埃除去のため 60 メッシュのフィルターを3層入れてある。ノズルは、長さ 1.72 m の軸対称整形式ノズル (AXIAL SYMMETRIC CONTOUR NOZZLE) で、わが国最初の試みとして、ニッケルを材料に電気メッキ法で製作されたものである。現在マッハ数 8 のノズルだけが完成しているが、昭和 38 年度中にマッハ数 7 および 9 の 2 本が同一製法によって作られる予定である。ノズルの下流部は、直径 0.2 m の円筒となり、ここを出た極超音速気流は、高さ 0.946 m、長さ 0.96 m、幅 0.72 m の測定室に開放される。測定室は両側壁に直径 20 cm の光学の実験用窓ガラスを備え、内部に模型支持装置を収容している。測定室の下流部は吸込口直径 0.36 m の拡散筒が接続している。ノズル出口から拡散筒入口までの間隔は 0.96 m で、この部分に直径 0.2 m の極超音速噴流が生ずることになる。なお、風洞が一応完工した後、この部に適当な噴流捕集部 (JET CATCHER) を設け、自由噴流の長さを短縮し、始動圧力比を低下させる予定である。拡散筒の上流側 0.80 m は直径一定の円筒状をなし、将来必要ならばこの部分に第二スロートを設けられるようになっている。その下流は開角約 4 度の拡大管で、伸縮接手を経てエジェクタ部に接続する。エジェクタ部は内径 0.90 m の円筒で内部に一次空気用ノズル 6 本を環状に配列してある。これらのノズルは、それぞれスロート部直径 63 mm、長さ 580 mm で、球形貯気槽よりの中圧空気によって駆動される。エジェクタ部から風洞末端部までは長さ 8.2 m の第 2 拡散筒で、断面円形、開角は入口で 6 度、出口で 16 度である。第 2 拡散筒は建屋壁を貫通して 4.5 m だけ消音塔内に突出している。

極超音速風洞には、上記の主風路のほかに加熱用風路が付属している。加熱器は 100 kW の電熱器に送風ファンを備えたもので、熱風を定圧加熱筒に送って蓄熱材を加熱する役目をする。加熱器を出る高温空気の温度は、加熱時間中定圧加熱筒への入口の温度が 600°C 以下のあらかじめ設定された温度に保たれるよう自動的に制御される。空気は、送風ファンによって大気から加熱器に入り、加熱された後導管を通過して上部より定圧加熱筒に入り、蓄熱材と熱交換した後加熱筒下部より導管を通過して建屋外部に放出される。加熱中は主風路は定圧加熱筒前後の締切弁によって遮断され、また風洞運転時には加熱回路は締切られる。

安全を確保するため、各種の弁の開閉などにはインターロック方式が採用され、また定圧加熱筒には 2 個の安全弁が設けられている。

次にこの極超音速風洞の性能について述べる。この風洞は定圧加熱筒内の最高圧力 50 気圧、最高温度 600°C において測定部にマッハ数 5~9、直径 0.2 m の極超音速気流を得る装置である。この風洞の作動範囲が大気中の実飛行状態に対しどのような位置にあるかを図 5-3 に示した。この図は、通常形式の極超音速風洞で大気中の実飛行状態を実現するために必要な定圧加熱筒内の空気温度  $T_0$  と圧力  $P_0$  との関係を示すもので、飛行高度  $Z$  と飛行マッハ数  $M$  とがパラメータとなっている。一例を示せば  $Z=30$  km,  $M=8$  の状態を実現するためには、 $T_0 \doteq 3000^\circ\text{K}$ ,  $p_0 \doteq 10$  気圧でなければならない。この計算では、作動気体として完全気体を仮定し実在気体効果を見捨てたから、3000°K 以上の温度はいわば形式的なものである。この図で左側の斜影をほどこした小さな部分がわれわれの極超音速風洞の作動範囲 ( $p_0 \leq 50$  気圧,  $T_0 \leq 600^\circ\text{C}$ ) で、実飛行の相似という点では大変不満足なものであることがわかる。しかしこれは特にこの風洞に限ったことではなく、数 10 秒程度の継続時間を

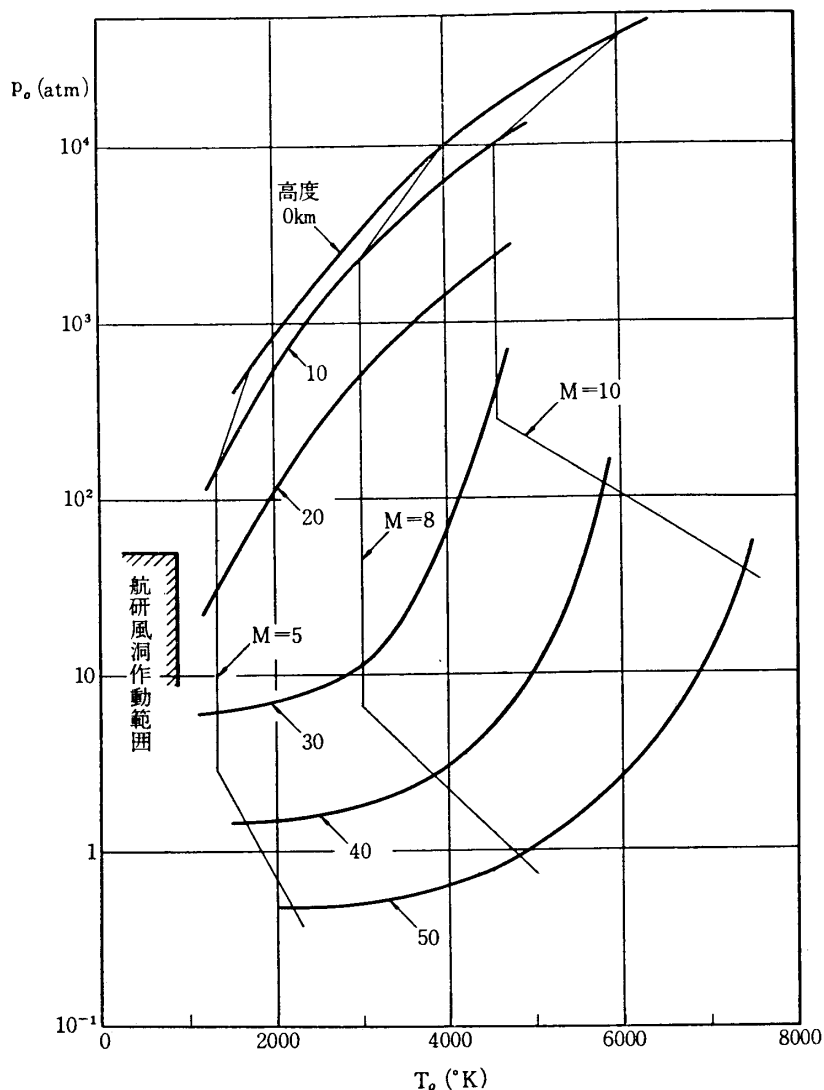


図 5・3 高層大気飛行の状態を実現するために必要な極超音速風洞の温度と圧力

もつ極超音速風洞についての共通問題である。実飛行状態を実現するためには、 $T_0$  を少なくとも  $1000^\circ\text{C}$  以上にする必要があり、このような高温状態を数 10 秒間維持することは技術的に非常に困難である。最近、粒状式加熱器 (PEBBLE HETAER) を用いて  $T_0$  をかなり高くできるようになったが、これでもせいぜい高度 40 km 以下、飛行マッハ数 7 以下の実飛行状態をどうにか実現できるにすぎない。

つぎに、図 5・4 は、この風洞を定圧加熱筒圧力 50 気圧、温度  $600^\circ\text{C}$  で運転した場合、測定部気流のマッハ数  $M$  と気流温度  $T$ 、気流静圧  $p$  との関係を示すものである。マッハ数が大きくなるにつれて気流は低温低圧となり、 $M=9$  では  $T=51^\circ\text{K}$ 、 $p=1.8\text{ mmHg}$  程度になる。測定部の圧力  $p$  と温度  $T$  との関係をマッハ数  $M$  をパラメータとして示したのが図 5・5 で、 $p_0=50$  気圧および 30 気圧、 $T_0=600^\circ\text{C}$  および  $300^\circ\text{C}$  の組合せによる 4 本の曲線が与えられてある。これらの曲線でおおわれる部分が、この風洞の大体の作動範囲で

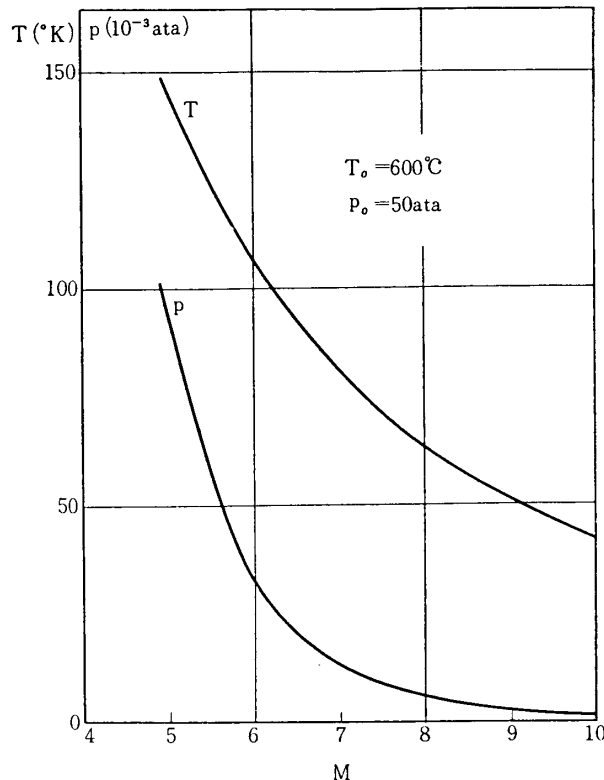


図 5・4 極超音速風洞測定部における温度  $T$ 、圧力  $p$  とマッハ数  $M$  との関係

ある。一方、図の左側にほとんど垂直に走る3本の曲線  $O_2$ ,  $A$ ,  $N_2$  はそれぞれ酸素、空気、窒素の蒸気圧曲線でこれより左側では液相、右側では気相が安定な状態として存在することを示す。この図からわかるように、本風洞ではマッハ数8以下ではほぼ空気液化の恐れはないが、マッハ数9ではかなり危険である。しかし従来の経験によれば、風洞気流中では相当程度に過飽和状態が持続する模様で、この風洞でも空気液化なしにマッハ数9が得られるものと期待される。なお図中の丸印は外国における同種風洞の作動点を示すもので、いずれも蒸気圧曲線の近傍にあることがわかる。

図 5・6 は、測定部にマッハ数  $M$  の気流を始動させるために必要な定圧加熱筒内の圧力  $p_{0,SR}$  の値を示すもので、最も簡単に垂直衝撃波理論から計算したものである。実際の始動圧力はこれより 20~30 パーセント高くなるものと推定される。この風洞は測定部下流にエジェクタを備え、その圧力比は5であるから、エジェクタを駆動する場合には、風洞の総圧力比は  $p_0$  対1気圧の5倍になる。図 5・6 の二つの曲線は、それぞれエジェクタを駆動する場合と駆動しない場合とにおける風洞始動に必要な定圧加熱筒の最低圧力を示すもので、この曲線より低い圧力では風洞は始動しない。一方、定圧加熱筒の常用最高圧力は 50 気圧であるから、マッハ数 6.5 以下ではエジェクタなしの運転が可能であり、また所定の最高マッハ数 9 はエジェクタを用いて十分出すことができる。実際の風洞では、摩擦損失その他の理由で、始動圧力比は単純な垂直衝撃波理論から得られる値より大きくなる傾向にある。しかし、この風洞ではエジェクタの設計圧力比は5であるが、これは多分に余裕をもった値であ

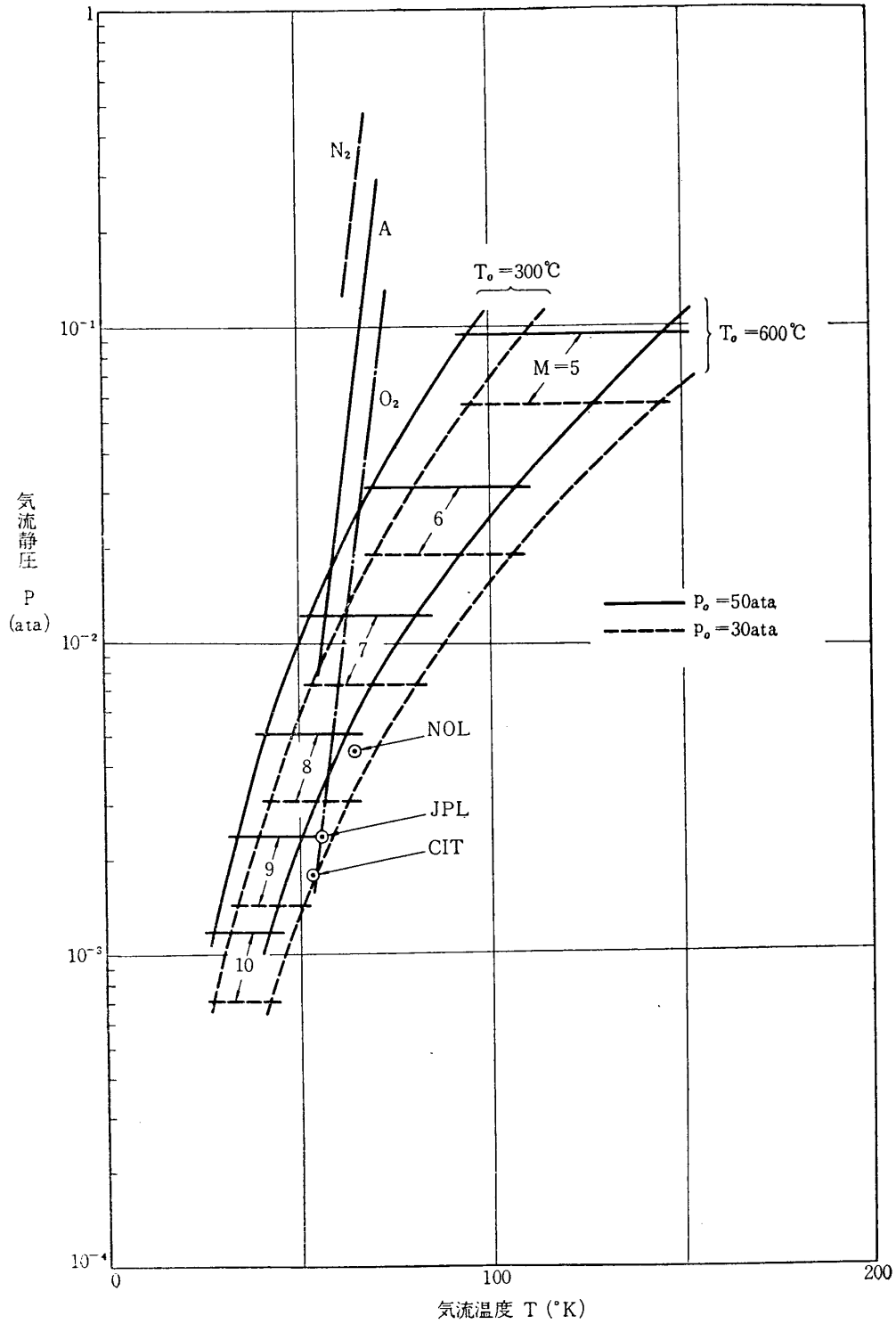


図 5・5 極超音速風洞測定部における気流の圧力  $p$  と温度  $T$  との関係

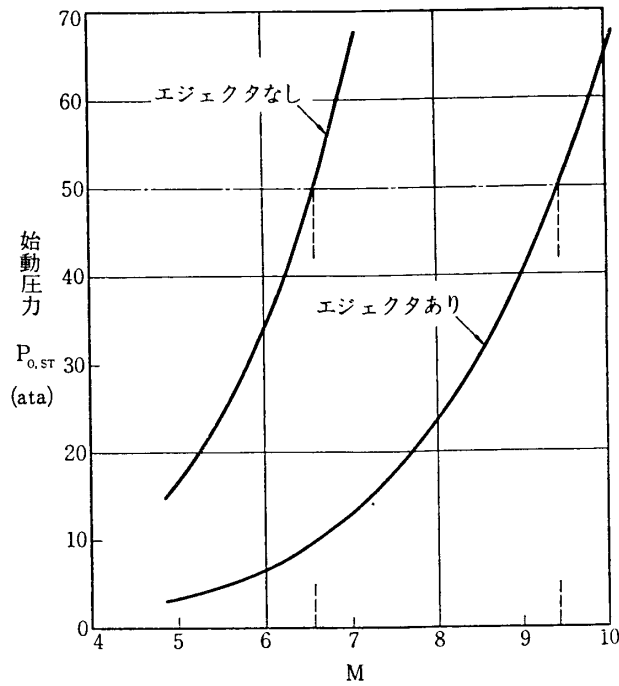


図 5・6 極超音速風洞のマッハ数  $M$  と始動圧力  $p_{0,ST}$  との関係

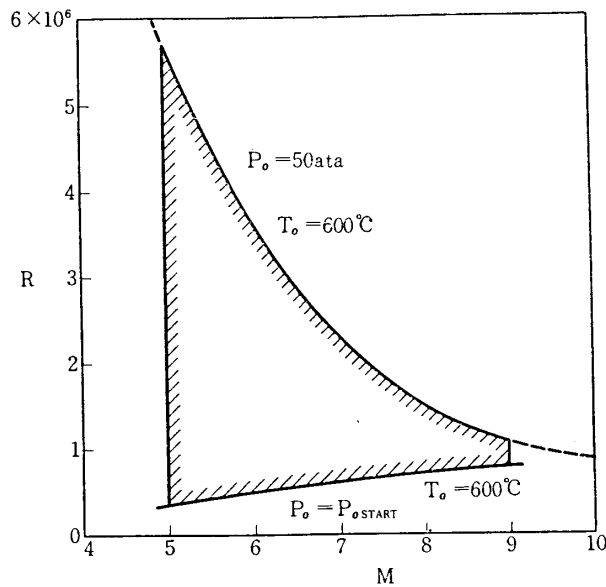


図 5・7 極超音速風洞のレイノルズ数  $R$  とマッハ数  $M$  の範囲

るから始動圧力比の増大はこの点で十分補われよう。

この風洞における実験レイノルズ数  $R$  を図 5・7 に示した。ここで  $R$  は  $R=UL/\nu$  ( $U$ : 測定部気流速,  $L$ : 気流直径=0.2 m,  $\nu$ : 測定部気流の動粘性係数) で定義される。基準長に測定部気流の直径をとった理由はすでに第 2 章で述べた。上側の曲線は、定圧加熱筒の圧力と温度とをそれぞれ  $p_0=50$  気圧,  $T_0=600^\circ\text{C}$  に保った場合の  $R$  と  $M$  との関係を示

し、下側の曲線は  $T_0$  を  $600^\circ\text{C}$  に保ち、 $p_0$  をエジェクタを駆動して風洞を始動できる最小値 (図 5・6 参照) にとった場合の  $R$  と  $M$  との関係である。したがって、この図の斜影部分が  $T_0=600^\circ\text{C}$  の場合の作動範囲となる。 $T_0$  を  $600^\circ\text{C}$  以下にすればこの範囲は幾分変化するが、それほど大きくは変わらない。平板境界層の遷移レイノルズ数は、低速では大体  $10^6$  以下である。極超音速流でこの値がどう変るか明確ではないが、かりに低速の値がそのまま使えるとすると、図 5・7 からわかるように、この風洞の全作動範囲において、実験レイノルズ数は遷移レイノルズ数より大きくなる。ノズル内および噴流における境界層の発達によって、測定部における一様な極超音速気流の直径はノズルの幾何学的直径  $0.2\text{ m}$  より相当縮小するものと考えなければならぬが、一方高いマッハ数では風洞壁の干渉を受けることなくかなり大きい模型を使うことができるから、この両者は大体相殺し合うであろう。これらの諸点を考慮すれば、この風洞の実験レイノルズ数は遷移レイノルズ数付近にあると言えよう。

この風洞は断続式であるから、1 回運転の継続時間が問題になる。すでに第 2 章で述べたように、継続時間 80 秒以上がこの風洞に対する基本的要求であった。この種の風洞の継続時間は、一方では貯蔵空気量から、また一方では蓄熱体の熱容量からきまってくる。まず空気流量について考えると、直径  $0.2\text{ m}$  の測定部断面をマッハ数  $M$  の気流が流れる場合の空気流量  $Q$  は簡単に計算できる。定圧加熱筒圧力  $p_0$  が大きいほど、またその温度  $T_0$  の低いほど  $Q$  は大きくなる。図 5・8 に  $p_0=50$  気圧の時の  $Q$  と  $M$  との関係を  $T_0=600^\circ\text{C}$  および  $300^\circ\text{C}$  の二つの場合について示してある。これでわかるように、 $Q$  は高々  $1.3\text{ kg/sec}$  程度にすぎない。実際は境界層によって気流の有効断面積は減少するから、 $Q$  はこれより小

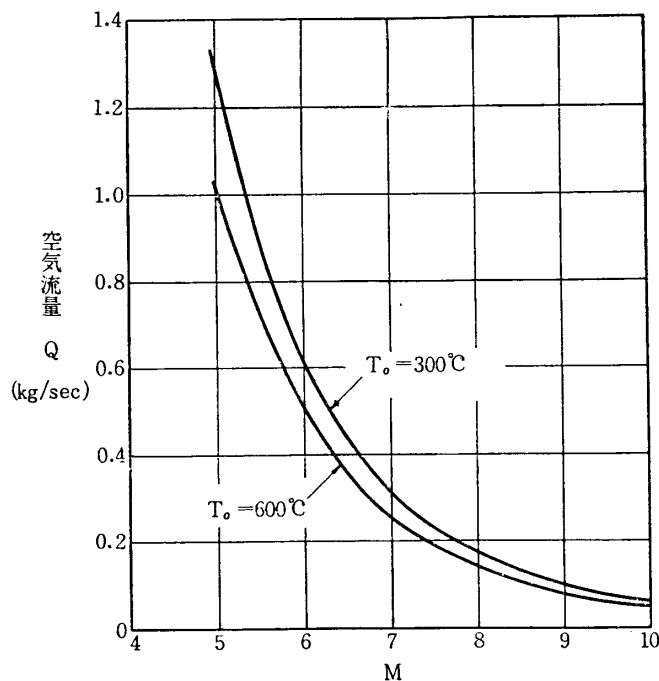


図 5・8 極超音速風洞の空気流量  $Q$  とマッハ数  $M$  との関係 ( $p_0=50\text{ ata}$ , 気流直径  $0.2\text{ m}$ )

くなるものと考えられる。一方、有効に使用できる空気量  $W$  について考えよう。まず、運転開始時に高圧貯気槽の圧力が  $p_1$  であるとする、この時の貯気量  $W_1$  は温度を常温として貯気槽容積  $4 \text{ m}^3$  から計算できる。風洞運転中に貯気槽圧力は次第に低下して行き、所定の定圧加熱筒圧力と等しくなったところで風洞の運転は終了する。この時貯気槽内の空気は断熱膨張するものと仮定してよい。運転終了時の残存空気量  $W_2$  も上記のような仮定のもとに計算でき、結局  $W = W_1 - W_2$  が有効空気量になる。また、この  $W$  を風洞の空気流量  $Q$  で割れば最大運転継続時間  $t_{\max}$  が得られる。定圧加熱筒圧力を 50 気圧とし、貯気槽初期圧力  $p_1$  を変えた場合の  $W$  と  $t_{\max}$  とを図 5・9 に示した。  $M=5$ ,  $T_0=300^\circ\text{C}$  の場合がこの風洞として最もきびしい条件となるが、初期圧力  $p_1$  を 100 気圧としてもなお 150 秒程度の運転継続時間が得られるから、空気流量の点から言えば貯気槽の容量は十分である。つぎに定圧加熱筒内における蓄熱材と空気との熱交換現象を考えると、空気は加熱筒の下部から流入して上部に出るまでの間に高温の蓄熱材から熱を奪って温度が上昇し、出口では蓄熱材の温度に到達する。熱交換は下部ほど激しく、したがって蓄熱体は下部の方から次第に冷却されて行き、この温度低下が蓄熱体の最上部におよべばそれ以後は出口における空気温度は所定の設定値より低下しはじめる。したがって、蓄熱体の出口側の温度が低下しはじめた時が、この風洞の運転終了時となる。熱交換の正確な計算は第5章第3節に譲り、ここではごく概略の推算を示す。まず、空気の定圧比熱は  $0.25 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ 、蓄熱材(耐熱鋼)の比熱は  $0.11 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$  であるから、同一熱量で同じ温度差を得るためには、空気量に対し蓄熱

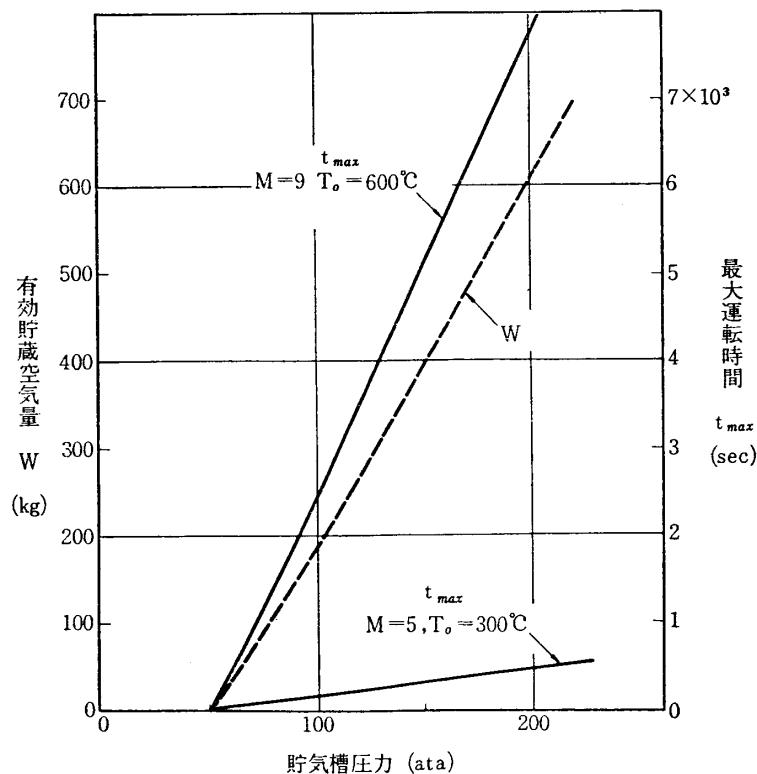


図 5・9 極超音速風洞の最大運転時間



材の重量は約 2.5 倍となる。風洞の運転終了時には蓄熱体の全部が流入空気と同じ温度になる訳ではなく、大部分はこれより高温の状態を保っているから、ここに残存熱量を生ずる。この点を考慮し、蓄熱量の 30% 程度が空気加熱に利用でき 70% が残存するものと仮定すると、空気 1 kg に対して必要な蓄熱材の量は  $2.5 \div 0.3 = 8.3$  kg となる。すでに述べように、 $p_0 = 50$  気圧、 $T_0 = 600^\circ\text{C}$ 、 $M = 5$  の時空気流量  $Q$  は約 1 kg/sec となり、80 秒の継続時間中に流れる空気量は約 80 kg となる。したがって、加熱に必要な蓄熱材の量は 660 kg と計算される。この風洞の加熱器は 1200 kg の蓄熱材を収容しているから、これから逆算すれば最もきびしい条件の時にも継続時間は 150 秒程度となり、当初の要求を十分満していることになる。

極超音速風洞の運転は、まず定圧加熱筒内の蓄熱材の加熱に始まる。定圧加熱筒前後の主風路締切弁を閉じ、加熱風路を開放した後加熱器を始動して加熱を開始する。加熱器の運転は加熱器制御盤によって行なわれ、運転時間中加熱空気の温度があらかじめ設定された温度に等しく保たれるよう自動的に制御される。蓄熱材全部を  $600^\circ\text{C}$  まで加熱するに要する時間は約 2 時間である。加熱終了後は、加熱風路を閉、主風路を開にし、消音塔を開き、ノズル冷却水を循環させた後、極超音速風洞の始動に入る。この風洞の運転は、超音速風洞と共通の中央制御盤によって自動的に行なわれる。まず、制御盤上で定圧加熱筒圧力を設定した後、高圧貯気槽と風洞とをつなぐ元弁を開放し、ついで始動のスイッチを入れれば制御弁が開いて高圧空気が主風路に流入する。始動スイッチを入れた後定圧加熱筒が所定の圧力に達するまでの時間は 5~6 秒である。この間に制御盤より司令してエジェクタを始動させれば、風洞は正規の運転状態に入る。運転中は制御弁が自動的に作動して定圧加熱筒内の圧力は一定に保たれる。ただし制御機構上定圧加熱筒の実際の圧力と設定圧力との間には若干のオフセットを生ずる。実験終了後は中央制御盤よりの司令によって風洞運転は停止される。

模型の取付けや交換は測定室の側壁を開いて行なう。模型支持装置は測定部中央を上下に貫通し、内部に水管を通じて冷却される。支持装置は測定室外部から操作して水平方向に 0.25 m だけ移動させることができるが、変角装置は備えていない。支持装置にはストレンゲージ式天秤（最大直径 24 mm、水冷）が接続する。計測装置および計測法については超音速風洞と同じである。  
(河村龍馬)

## 5・2 弁及び圧力制御系

### 1. 設計方針

本風洞も吹出式風洞であるから圧力制御については超音速風洞の場合と同様に考えることができる。この風洞の圧力制御系に要求される性能およびその構成は超音速風洞の場合とほぼ同様であるが、風洞諸元および通風状態が大幅に異なるので制御系の設計に当っては次の点を考慮して調圧状態の安定化を計る必要を生ずる。

(1) 定圧加熱筒容積/ノズル断面積 (cm で表わされる特性値で風洞部の時定数を支配する) が著しく大きいため、調圧弁の作動に対するノズル入口部の圧力変化の時間遅れが大きい。

(2) 調圧弁で制御された空気は定圧加熱筒で加熱されるため、空気温度が常温の場合に比べて、ノズルからの流出量が減少する結果となり、この影響は前項と同様時間遅れを大き