

高速直線翼列風洞

浅 沼 強
難 波 昌 伸

High Speed Linear Cascade Wind Tunnel

By

Tsuyoshi ASANUMA, Masanobu NAMBA

Abstract: This paper gives the construction and general characteristics of a new blow-down type high speed linear cascade wind tunnel, which is characterized by the ability to vary the exit pressure for independent variation of Mach number and Reynolds number as well as for air bleeding through the porous walls of the test section to control the boundary layer.

Its specifications are as follows:

Type: blow-down type,

Test section : width 75 mm (constant), maximum height 300 mm (variable),

Mach number: equal to or less than 1.0,

Temperature in the settling chamber: room temperature,

Running time: about 12 min. (with the maximum area of the test section, Mach number of 1.0 and exit pressure of 1.0 ata.).

概 要

本報告は新設の高速直線翼列風洞の一般的特性および構造に関するものである。この風洞は境界層制御を吹き出しによって行なうことおよびレイノルズ数をマッハ数に対して独立に変え得ることを特徴としており、おもな仕様は次の通りである。

型式：吹出し型断続式

測定部断面積：幅 75 mm (一定)，高さ最大 300 mm (可変)

気流温度：整流筒内で常温

連続運転時間：測定部断面積最大，マッハ数 1，出口圧大気圧の場合で約 12 分

1. ま え が き

近年、航空機用ジェットエンジンの開発としては特に V/STOL 機用のエンジンのように小重量大推力化が一つの目標となっており、それにともなっている遷音速あるいは超音速軸流圧縮機の性能向上の研究はますます重要な課題となっている。一般に軸流型流体機械の

内部流れの研究には種々の理論的および実験的方法が用いられているが、翼に対する気流の速度が遷音速あるいは超音速となる範囲での理論的解析は非常にむずかしく、必然的に実験的方法に比重が置かれるようになる。そのうちでもいわゆる二次元翼列実験は翼列特性を知る上で最も基礎的な手段であり、それによって非常に広範囲な資料が比較的安価かつ容易に得られる点できわめて有用である。本報告の高速直線翼列風洞はこのように高速における二次元翼列の特性の研究を目的とするものである。

一般に風洞実験においては模型が大きいほど精密な測定が可能であり、また二次元流に近い一様な気流を得るためにも風洞は大型である方が有利である。さらにまた運転が連続的に長時間行なえるものの方が望ましいことはいままでもない。しかし本風洞は既設の球型貯気槽 (524m³) に貯められた高圧空気 (最大 16ata) を空気源とすることを出発点としているので、必然的に型式は吹出型断続式 (いわゆるブローダウン式) を採用することとなった。そうすると風洞の寸法を大きくすることと連続運転時間を長くすることは互に相反する条件となるが、本風洞は翼模型の翼弦長を 30mm, アスペクト比 2.5, 翼列中の翼数 7~8 枚という前提条件に基づいて、測定部断面の幅 75mm, 高さは最大 300mm という寸法に決定された。この結果連続運転時間は最低約 12 分となるが、基礎的な研究を目的とする限りは最低の条件を満たし得るものと考えられる。

ところが上記のようにアスペクト比 2.5, 翼数 7~8 枚の翼列の中央部に一様流に近い流れを実現するためには翼列の上下壁および側壁の境界層の制御を行なう必要がある。低圧空気源を用いる風洞においては壁の境界層制御は真空ポンプによる吸出しによって行なうのが普通である。しかしこの風洞は空気源として高圧空気を用いるので、測定部の空気の圧力を外気圧より高い状態にし、壁を通して風洞内部から外部へ作動空気の一部を吹き出させることによって境界層制御を行なうことを第 1 の特徴としている。この場合翼列出口圧を大気圧以上に保つために翼列出口に調圧槽が設けられている。

またマッハ数とレイノルズ数とは互に独立に選択できることが望ましいが、このためには低圧空気源を用いる風洞では風洞出口を大気圧以下の任意の圧力に保ち得る低圧室として形成する方法が採用されている。ところが本風洞では上記のように逆に翼列出口の圧力を大気圧以上に調節できるので、それによってレイノルズ数をマッハ数に独立に設定することが可能になっている。これがこの風洞の第 2 の特徴である。また、作動空気が高圧水準にあるから、レイノルズ数 Re は大きくすることができ、乱流境界層の確保のための条件である $Re > 3 \times 10^5$ は容易に実現できる。以下この高速直線翼列風洞の性能および構造の概要を報告する。

2. 高速直線翼列風洞の特性

風洞の諸元および型式は次の通りである。

型式：吹出型断続式 (ブローダウン式)

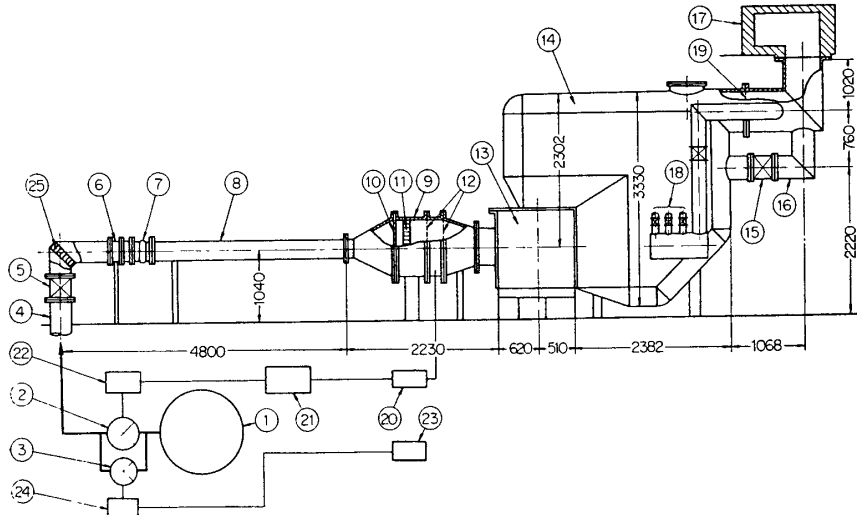
測定部断面積：幅 75mm, 高さ最大 300mm

マッハ数範囲：1.0 以下

気流温度：整流筒内で常温

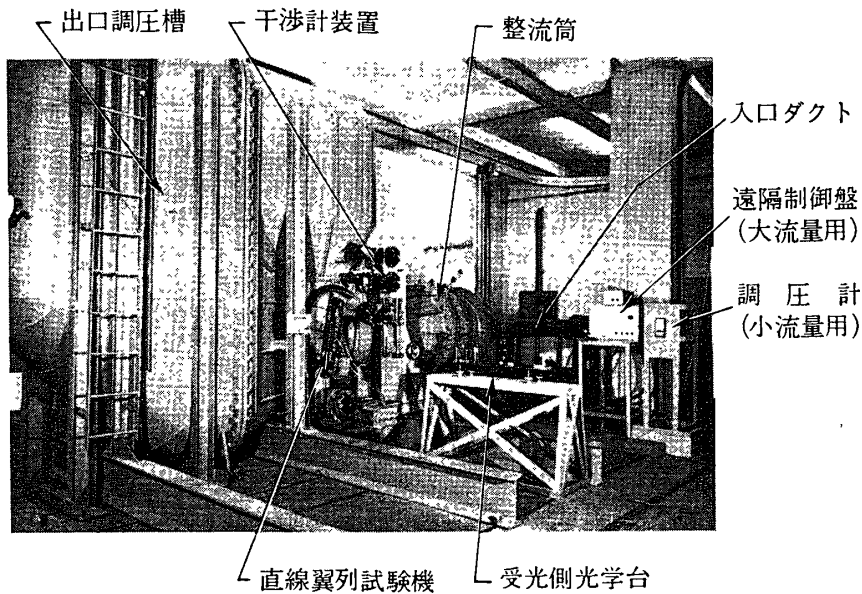
連続運転時間：測定部断面積最大，マッハ数 1，出口圧大気圧の場合で約 12 分

第1図に本風洞の系統図を，また第2図に主要部概観図を示す．第1図に示すように球形貯気槽①（直径 10m，容積 524m³）に貯えられた高压空気（最大 16 ata）が大流量用調圧

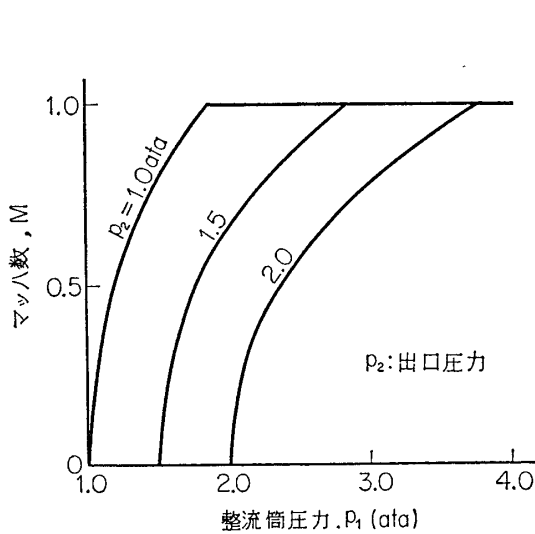


- ①球形貯気槽 (524m³)，②大流量用調圧弁，③小流量用調圧弁，④12インチダクト，⑤12インチ仕切弁(電動)，⑥滑り型伸縮継手，⑦ゴム製伸縮継手，⑧入口ダクト(10インチガス管)，⑨整流筒，⑩多孔板，⑪整流格子，⑫二重スクリーン，⑬直線翼列試験機，⑭出口調圧槽，⑮出口調圧弁(12インチ仕切弁)，⑯出口ダクト(12インチガス管)，⑰消音ダクト，⑱境界層吹出流導入管，⑲安全用破壊板，⑳遠隔制御盤(大流量用)，㉑中央制御盤，㉒油圧装置，㉓調圧計(小流量用)，㉔小流量制御装置，㉕コーナーベーン

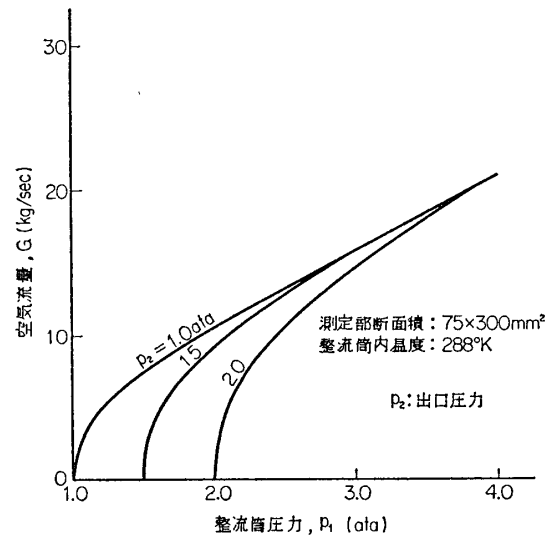
第1図 高速直線翼列風洞系統図



第2図 高速直線翼列風洞概観



第3図 マッハ数と整流筒圧力

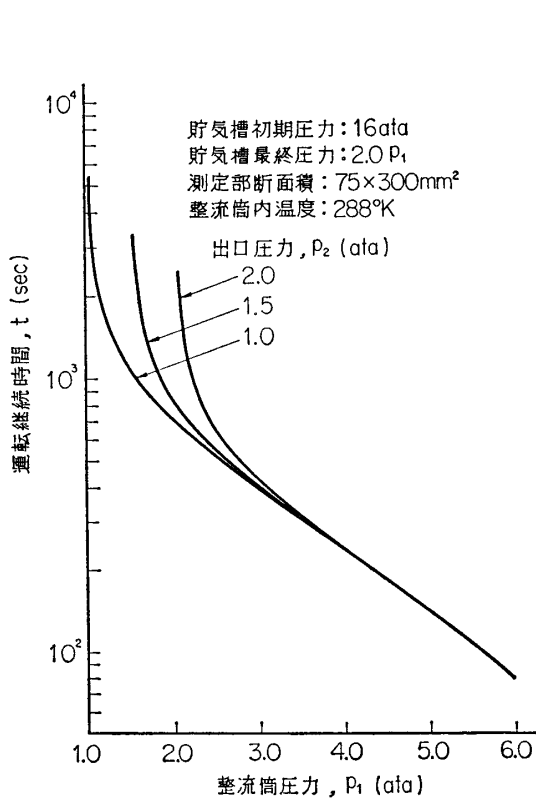


第4図 空気流量と整流筒圧力

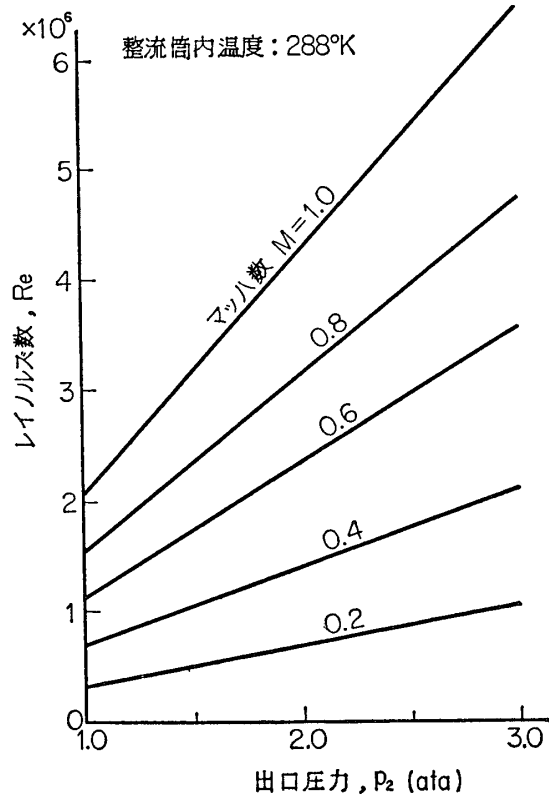
弁②または小流量用調圧弁③によって流量制御を行なわれてから本風洞実験室内の仕切弁⑤を通過して高速直線翼列風洞に導かれる。空気は整流筒⑨で整流された後、高速直線翼列試験機⑬に流入し、出口調圧槽⑭内に放出され、さらにそこから出口調圧弁⑮、消音ダクト⑰を経て外気中に放出される。

翼列試験測定部のマッハ数 M は整流筒内の静圧 p_1 および出口調圧槽内の静圧 p_2 によって決まるが、整流筒から測定部までの流れを断熱変化と仮定すると第3図に示すような関係が成り立つ。出口調圧槽内の静圧 p_2 の調節は空気流量に応じて出口調圧弁の開度を変えることによって行ない、整流筒内の静圧 p_1 は大流量の場合は遠隔操作盤⑳(第1図)により、また小流量の場合は小流量用調圧計㉑によりそれぞれ大流量用調圧弁②または小流量用調圧弁③を自動的あるいは手動的に制御できるようになっている。両制御装置の使い分けは貯気槽内の元圧 p_0 と空気量 G および希望運転時間 t によって決められる。空気流量 G は p_1 , p_2 および試験機測定部断面積 A によって決まるが、後述のように A は可変であって、いまそれを最大値の $75\text{mm} \times 300\text{mm}$ とすれば G , p_1 および p_2 の関係は第4図に示す通りである。さらに運転継続時間 t は測定部断面積 A をやはり最大値 $75\text{mm} \times 300\text{mm}$ とし、貯気槽内元圧 p_0 を最大値の 16ata とした場合第5図に示すようになる。ただしこの場合貯気槽から整流筒までの圧力損失を考慮し、貯気槽内最終残留圧を p_1 の2倍と仮定した。これよりわかるように、たとえば p_2 を大気圧 1ata とした場合マッハ数1の流速では大体12分程度の継続時間が可能である。ところがこの場合第4図より流量 G は約 10kg/sec であるが、小流量制御弁では空気流量を 10kg/sec 以上流すためには貯気槽元圧 p_0 が 7ata 以上でなくてはならないので、小流量制御装置を用いる場合の継続時間は約7分ということになる。

測定部流路の幅 (75mm) と測定部の流速とを基準にしたレイノルズ数 Re は第6図に示されているように出口圧 p_2 の調節によってある程度マッハ数 M に独立に選択できる。たとえばマッハ数1の場合 p_2 を $1.0 \sim 3.0\text{ata}$ の範囲に変えるとそれに応じて Re は 2×10^6



第5図 吹出風洞の運転継続時間



第6図 レイノルズ数とマッハ数

～ 6.5×10^6 の間に変る。

測定部の気流温度は整流筒内の気流温度および測定部気流のマッハ数によって決まるが、いま整流筒内を 0°C 、マッハ数を1とすれば、整流筒以後を断熱変化と仮定すると測定部の気流温度は -46°C となる。作動空気は露点 -40°C に乾燥されたものであるが、 -46°C 程度ならば過飽和の状態を保ち得るので、マッハ数1以下の実験条件では水蒸気の凝結の心配はないように思われる。

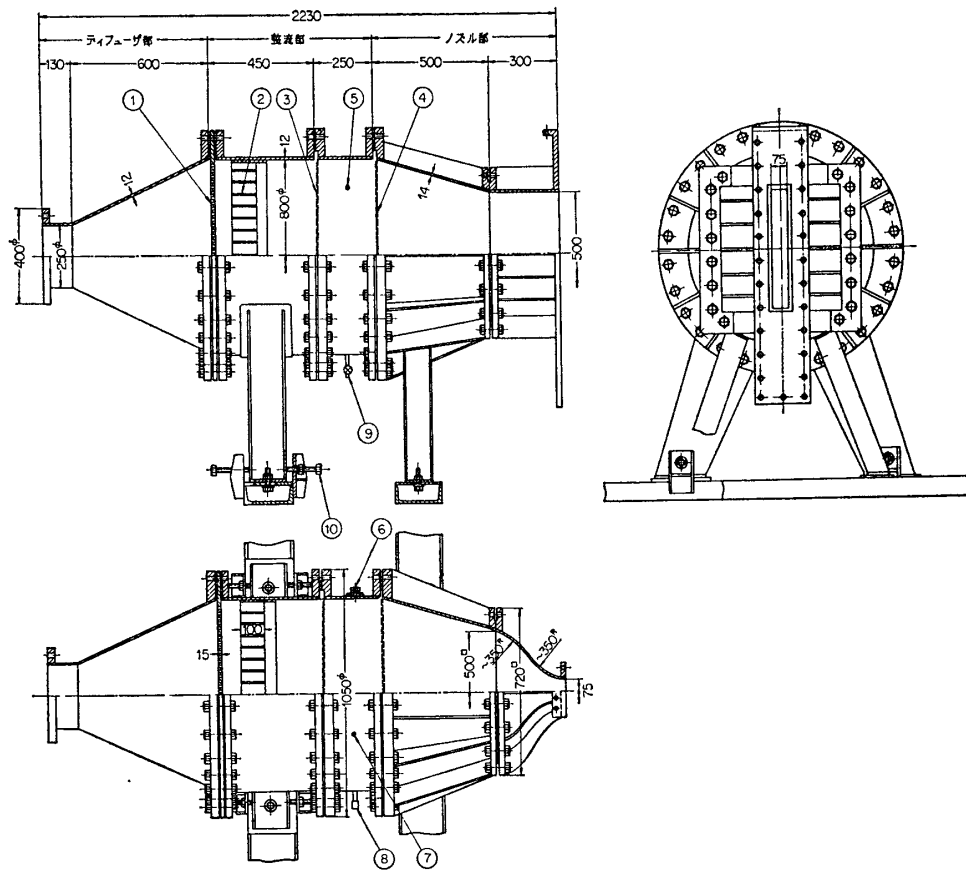
3. 各部構造および機構

3.1 入口配管部

入口配管部は第1図に示すように、12インチガス管④、12インチ仕切弁⑤、コーナーベーン⑥、滑り型伸縮継手⑦、ゴム製伸縮継手⑧および10インチガス管⑨から成る。これらのうち滑り型継手⑦は軸方向に約 $\pm 5\text{cm}$ の伸縮が可能で、これは管路の熱膨張やバンドに生ずるスラストを吸収するためのものであるばかりではなく、10インチダクト⑨と整流筒⑩とを上流方向に約 5cm 移動することによって直線翼列試験機⑬の取付け取りはずしを容易にするものである。

3.2 整流筒

整流筒は第7図に示すように上流側からディフューザ部、整流部、ノズル部に大別される。ディフューザ部は口径約 250mm の入口部から内径 800mm の整流部までの半開角約



- ①多孔板, ②整流格子, ③④二重スクリーン, ⑤サーミスタ温度計用座,
 ⑥ピトー管挿入孔座, ⑦ブルドン管圧力計用座, ⑧制御盤用圧力ピック
 アップ, ⑨ドレインコック, ⑩微動調整ボルト

第7図 整流筒

25°, 肉厚 12mm の鋼板製円錐胴体で形成されている。

整流部は長さ 700mm, 内径 800mm, 肉厚 12mm の鋼板製円筒体で, 内部に上流側から順に有孔板①, 整流格子②, 二重スクリーン③および④を備えている。有孔板①は直径 20mm の孔を 30mm 間隔で有する有孔率 40%, 肉厚 15mm の鋼板であり, 整流格子②は幅 100mm, 厚さ 3.2mm の鋼板によって 50mm×50mm の格子単位を形成している。二重スクリーン③は 20メッシュと 2½メッシュの金網から成り, 同じく④は 30メッシュと 3メッシュの金網から成っていて, 材質はいずれも SUS 27 ステンレス鋼材である。

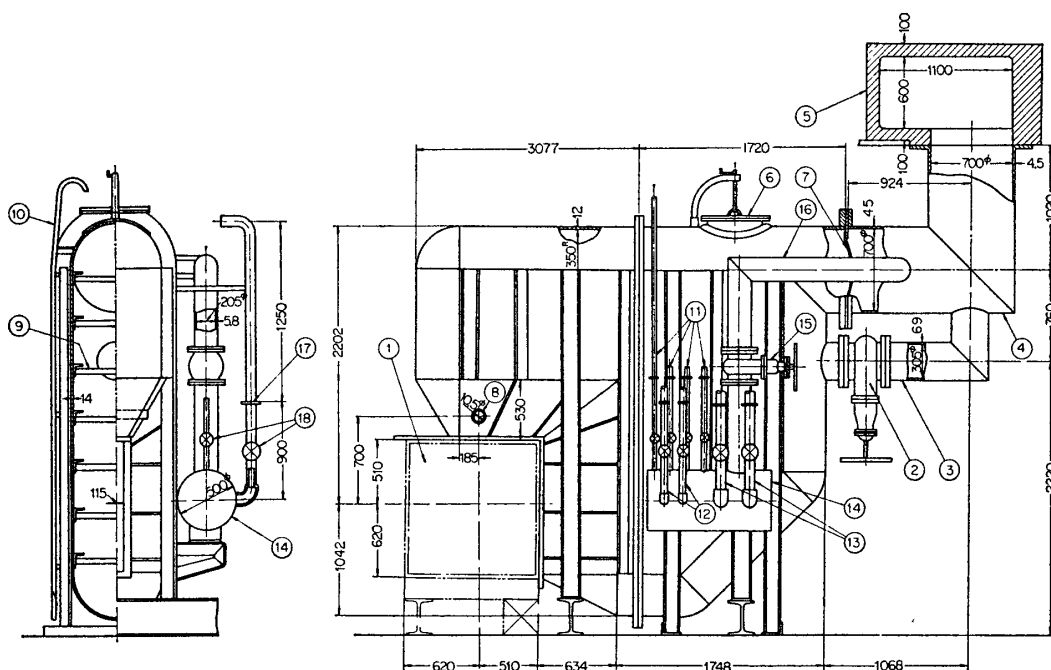
ノズル部は内径 800mm の円形断面から最初に 500mm×500mm の正方形断面に縮小し, そこからさらに 75mm×500mm の長方形断面に縮小されている。この部分は側面が円筒面でないのでリブで補強し, さらに肉厚は 14mm としてある。

支持部は図に示すように床の上に固定されたみぞ形鋼材上に溶接されたスロット状のボル

ト穴を有する板の上にボルトで固定されているが、特に微動調整ボルト⑩によって取付けの際の位置決めを容易にしている。なお材質はスクリーン金網を除きいずれも SS 41 圧延鋼材であり、整流筒の制限圧力は 20 気圧である。

3.3 出口調圧槽

出口調圧槽は、測定部出口の静圧を大気圧以上に保つことを可能にするためのものであるが、その中の空気の流れが上流の測定部に影響を及ぼさないようになっていなくてはならない。さらにまた万一の場合を考えて圧力 15 気圧に耐える強度を有することも必要である。翼列出口の気流の流出方向は翼列の食違角および流入角に応じて水平方向から上向き約 80° まで変る可能性がある。第 8 図に示す出口調圧槽の構造は上記の点を考慮して決定されたもので、その本体は直線翼列試験機出口に半開角約 25° のディフューザ部によって接続し、高



- ①高速直線翼列試験機, ②出口調圧弁(12インチ仕切弁), ③出口ダクト(12インチガス管), ④主出口ダクト, ⑤消音ダクト, ⑥マンホール, ⑦安全用破壊板, ⑧干渉計光路用貫通管(4インチガス管), ⑨補強棒, ⑩はしご, ⑪境界層吹出流導入管(1インチガス管), ⑫境界層吹出流導入管(2インチガス管), ⑬境界層吹出流導入管(3インチガス管), ⑭境界層吹出流集合タンク, ⑮境界層吹出流主制御弁(8インチ仕切弁), ⑯境界層吹出流出口管(8インチガス管)⑰境界層吹出流量測定用オリフィス, ⑱境界層吹出流量調節弁

第 8 図 出口調圧槽

さ約 3.3m, 幅 750mm の SS41 鋼板製容器であって、ディフューザ部および本体は共に肉厚 12mm で、ディフューザ部は側面のリブにより、また本体は側面に溶接されたみぞ形鋼材および内部側壁間に溶接された直径 4cm の鋼棒によって補強されている。

気流は 12 インチダクト④を経て消音ダクト⑤内に流出するが、調圧槽内の圧力調節は 12 インチ仕切弁②の開度の調節によって行なう。

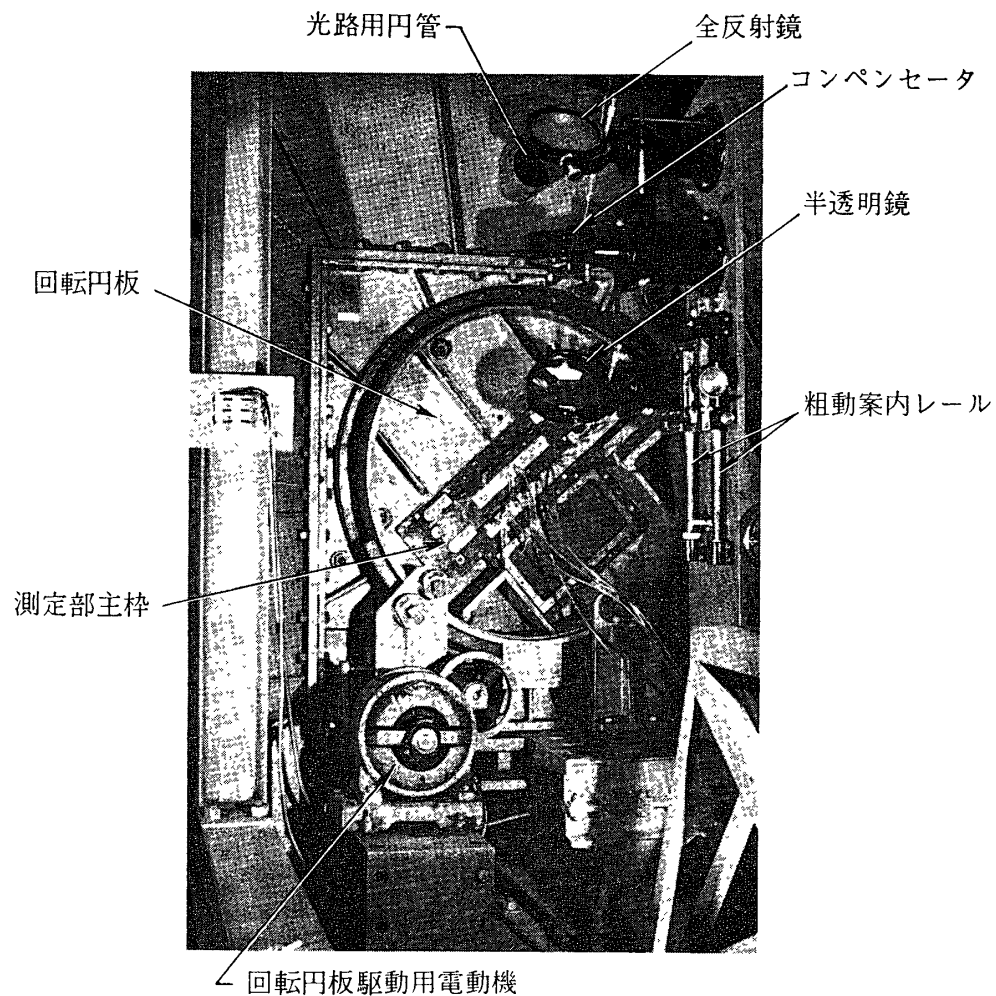
⑦は厚さ 0.3mm のステンレス鋼板製の安全用破壊板であって、約 4.5 ata の内圧で破壊されるようになっている。

直線翼列試験機測定部の流れの境界層制御を行なう場合各側壁から吹き出た気流は途中ホースを通して導入管⑪、⑫および⑬に入り、オリフィス⑰、流量調節弁⑱を経て集合タンク⑭に合流し、そこから 8 インチ主制御弁⑮を経て出口ダクト④に放出される。

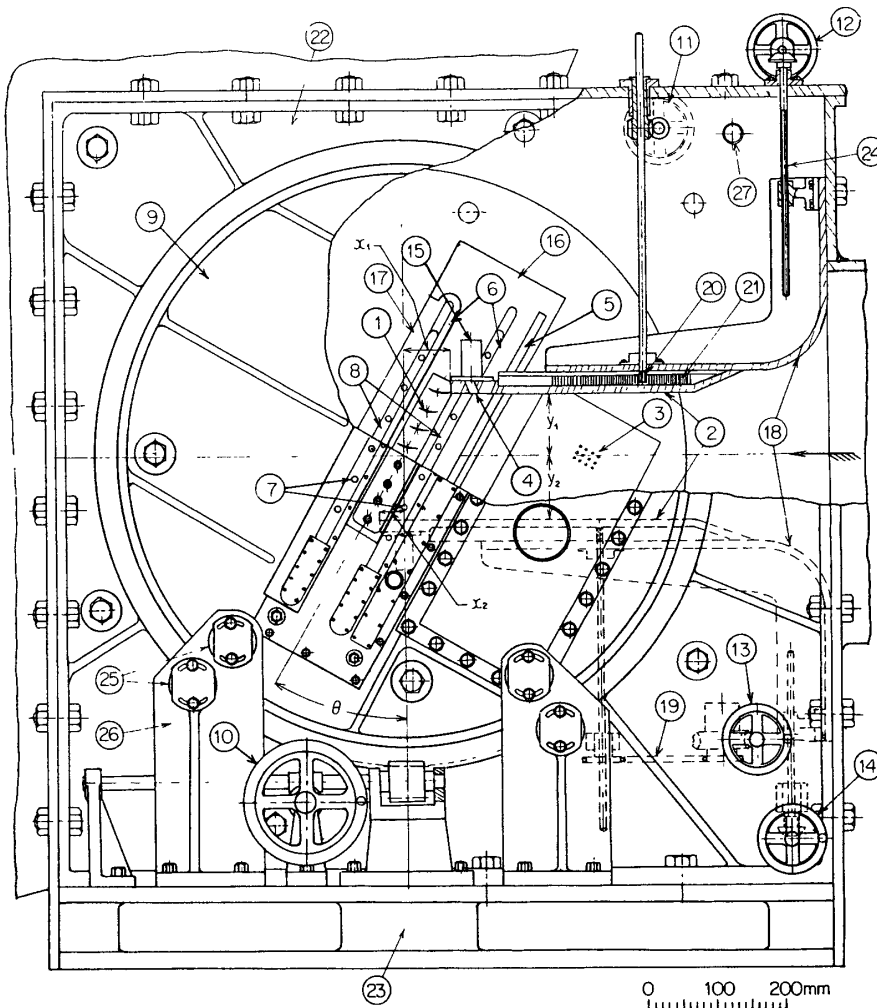
なおマッハツェンダー干渉計の光路用に 4 インチの円管⑧が測定部中心（翼列中心）の直上 70cm の位置において調圧槽を貫通している。

3・4 直線翼列試験機

直線翼列試験機は第 9 図および第 10 図に示すように、慣用の形式とほぼ同じ構造を有するもので、大別して第 10 図の側壁部②、入口ノズル部上下移動壁⑬、前後移動端板②、回転円板⑨および測定部主枠⑭から成っている。



第 9 図 直線翼列試験機概観



- ①翼, ②前後移動端板, ③側壁境界層吹出多孔板, ④上下壁境界層吹出スリット, ⑤側壁境界層吹出スリット, ⑥側壁静圧孔, ⑦測定プローブそう入孔, ⑧滑動帯棒, ⑨回転円板, ⑩円板回転用ハンドル, ⑪上端板前後移動用ハンドル, ⑫上端板上下移動用ハンドル, ⑬下端板前後移動用ハンドル, ⑭下端板上下移動用ハンドル, ⑮境界層吹出口, ⑯測定部主わく, ⑰後流測定部わく, ⑱上下移動壁, ⑲ローラーチェーン, ⑳ピニオン, ㉑ラック, ㉒側壁, ㉓基台, ㉔ねじスピンドル, ㉕回転円板用軸受, ㉖回転円板用軸受支柱, ㉗境界層吹出流導出口

第10図 直線翼列試験機

まず両側壁部②は 1120mm×1120mm で、厚さ約 20mm の鋳鉄でできており、中央部に回転円板⑨をはめ込むための内径 840mm のインロー付きの嵌合穴を有する。両側壁の間隔は翼列出口より上流側で 75mm、翼列出口より下流側で 115mm であって、できるだけ気流の通り路を避けて 6 本のステーボルトで両側壁の間隔が固定されている。また側壁の上および後部は出口調圧槽に、前部は整流筒にまた下部は鋳鉄製基台②3にいずれもフランジで結合されていて内部は本質的には外気に対してシャ断されている。

翼列入口ノズル部の上下壁を形成する上下端板②, および⑱は翼列のピッチ, 翼数, 食違

い角および流入角に応じて上下前後に独立に変位し得るものでなくてはならない。本機では上下端板が上下移動用端板⑩と前後移動用端板②とに分けられていて、前者は補強リブを有し、約 100mm の曲率半径でノズル部を形成する鋳鉄板であって、ハンドル⑫または⑭によるねじスピンドル⑮の回転によって上下移動を行なう。後者はラック⑱を内蔵する鋳鉄板であってハンドル⑪または⑬の回転によりピニオン⑲、ラック⑱を介して前後移動を行なう。可能変位は第 10 図の付号を用いて表わすと、 $y_1: 0 \sim 140 \text{ mm}$, $y_2: 0 \sim 170 \text{ mm}$, $x_1: 0 \sim 150 \text{ mm}$, $x_2: -25 \text{ mm} \sim 140 \text{ mm}$ である。なお上下端板②は先端から 50mm の位置に幅 16mm の境界層吹出スリット④を有する。

翼列流入角は、試験機側壁⑳にはめ込まれて中央部の側壁を形成する回転円板㉑の回転によって変えることができるが、それは 3 個のステーボルトで連結され嵌合部外径 840mm、肉厚 20mm の二枚の鋳鉄製円板により成り、各円板は外側に出張った周縁部をボールベアリング㉒を介して支柱㉓によって回転可能なように支持されている。回転はハンドル⑩によって行なうが、円板㉑と試験機側壁㉒との嵌合部が O リングによって気密保持されているので、その摩擦力に打ち勝つためにハンドル⑩と円板㉑との回転比は 7200 : 1 になっており、ハンドル⑩は電動機を用いて回転される。回転範囲は第 10 図の付号を用いて $\theta: -14^\circ \sim 75^\circ$ である。

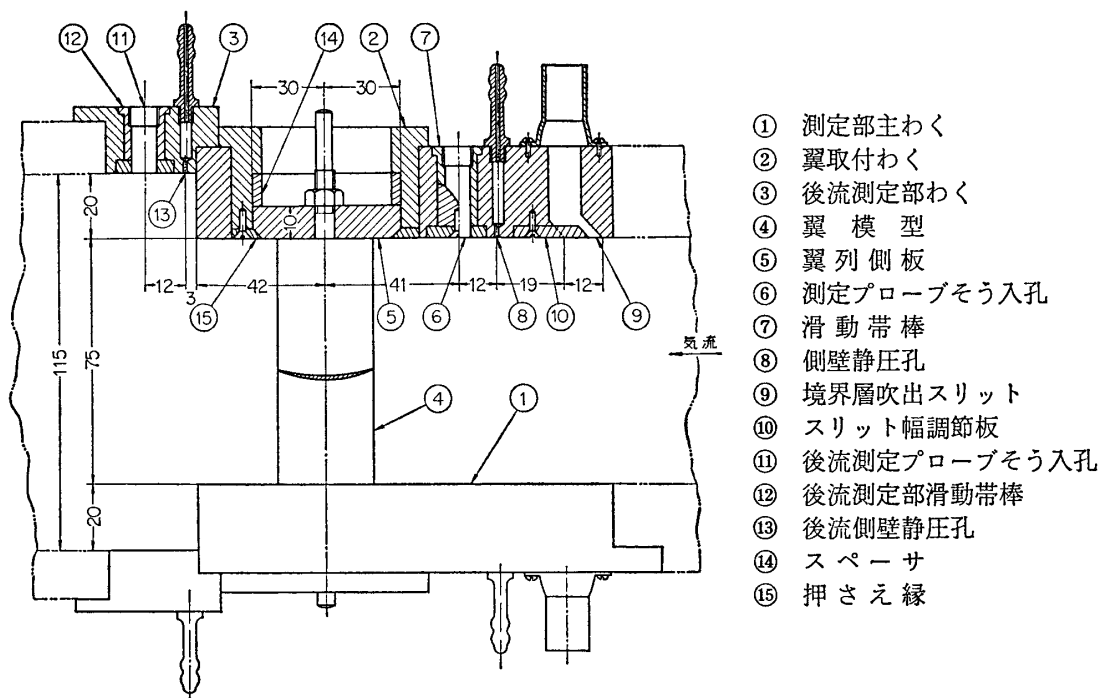
回転円板 ㉑ は、その中央に測定部主わく ⑩ および後流測定部わく ⑪ をはめ込むための 157mm × 620mm の長方形の穴を、またその上流側に境界層吹出多孔板③をはめ込むための 165mm × 315mm の長方形の穴を有する。また両側円板の間隔は側壁㉒と同じく測定部主わく嵌合口の後辺より上流側で 75mm、下流側で 115mm になっている。

測定部主わく ⑩ は、大体 157mm × 620mm の長方形に後流測定部わく ⑪ をはめ込むための切除部を有する厚さ 28mm の 2 枚の S15C 鋼板を上下 4 本のステーボルトで間隔 75mm に保ちつつ一体に連結されたもので、一体のまま回転円板㉑にはめ込み片側のみをフランジで円板に固定される。なお第 10 図に示すように境界層吹出スリット⑤、静圧孔列⑥、測定プローブそう入孔列⑦を有する滑動帯棒 (S15C 鋼製) および翼列取付わく嵌合口などが主わく ⑩ に備えられている。

後流測定部わく ⑪ は嵌合部が 28mm × 516mm、厚さ 20mm の S15C 鋼板でやはり静圧孔列⑥と測定プローブそう入孔⑦を有する滑動帯棒とを備え、両側別々に円板㉑と側壁㉒にまたがってフランジで固定される。

第 11 図は測定部主わくおよび後流測定部わくの翼列線方向に対して直角な横断面図である。この図からわかるように流路は翼列の中心を通る翼列線より、後流側 42mm までは幅 75mm、それ以後は幅 115mm となっている。境界層吹出スリット⑨は幅 12mm であるが取換可能な調節板⑩によってその幅を調節することができる。静圧孔⑧および⑬の内径は 1.5mm であって、翼列線方向に 40mm 間隔で並んでいる。測定プローブそう入孔⑥および⑪は内径 8mm で滑動帯棒⑦および⑫に 50mm 間隔で設けられていて、使用中以外の孔は盲栓でふさぐことができる。滑動帯棒⑦および⑫は翼列線方向に最大 60mm 滑動することができる。

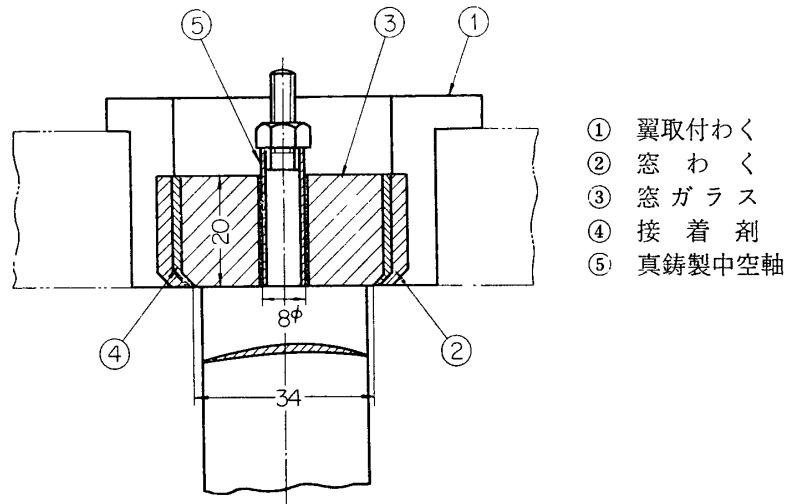
翼④は翼列側板⑤に取付けられ、側板⑤は取付わく② (SS 鋼製) にはめ込まれて押え縁



第11図 直線翼列試験機測定部横断面図

⑮ (SS 鋼製) で固定される。この取付わく②はさらに主わく①にはめ込まれる。側板⑤は翼列のピッチに対応した間隔の翼取付け孔を7または8個有する。翼列の中央の2枚を測定翼とする場合は翼数は8枚であり、中央の1枚を測定翼とする場合は翼数は7枚である。翼列ピッチに応じて側板⑤の翼列線方向の長さも異なるので取付けわく②も個々の側板に対応する長さの嵌合口を有するものが揃えられている。側板⑤の厚さは実験目的に応じて種々のものにすることができ、嵌込部にはそれに対応するスペーサ⑭をそう入する。現在のところ側板としては厚さ 10mm の鋼板、境界層吹出を行なうための同じく厚さ 10mm のポーラスメタルおよび厚さ 20mm の干渉計用窓ガラスが用意されている。

境界層吹出しは回転円板に設けられた上流側両側壁の多孔板 (第10図 ③), 上下端板のスリット (第10図 ④), 測定部主わくに設けられた側壁スリット (第10図 ⑤) およびポーラスメタル製翼列側板 (第11図 ⑤) の計8か所において行なうことができ、それらはいずれも導出管口部を有するふたを外側からかぶせられ、その導出管口部からホースを通して吹出流導入管 (第8図⑪, ⑫および⑬) に導かれる。ただし上下端板スリット (第10図④) からの吹出流は一たん吹出口⑮から試験機内部をホースを通して導出口⑦に導かれ、そこから前記の導入管 (第8図⑪) に導かれる。多孔板 (第10図③) は有孔率 20% (孔径 2mm, ピッチ 4mm) と 40% (孔径 2.7mm, ピッチ 4mm) の2種類が用意されている。境界層吹出用側板 (第11図 ⑤) としては内側に厚さ 4mm の焼結合金と外側に厚さ 6mm 有孔率 13% (孔径 2.5mm, ピッチ 6mm) の鋼製多孔板とを重ね合わせたものが用意されている。



第 12 図 風洞窓ガラス取付部断面図

干渉計あるいはシュリーレン用の窓ガラスは、第 12 図の断面図からわかるように、厚さ 20mm の鋼製窓わく②に厚さ 20mm の BK7 ガラス③が接着剤④で固定されたもので、ガラス部の翼列線方向の長さは翼列の中央の 2 枚の翼が完全に透視範囲に入る大きさになっており、残りの翼は窓わく②が兼用する側板に固定される。ガラスには中心線上に翼列ピッチに等しい間隔で 2 個の真ちゅう製中空軸⑤が接着剤で固定されていて、それに翼支持軸がはめ込まれてナットで固定される。

4. 光学的計測装置

光学的計測装置としては本風洞専用のマッハツェンダー型干渉計装置が備えられており、それはシュリーレン装置としても兼用できる。

この装置の仕様は次の通りである。

マッハツェンダー型干渉計

ベッド：堅型

半透明鏡：直径 150mm, 厚さ 25mm

全反射平面鏡：直径 150mm, 厚さ 20mm

風洞窓ガラス（前述）：厚さ 20mm

コンペンセータ：直径 120mm, 厚さ 40mm

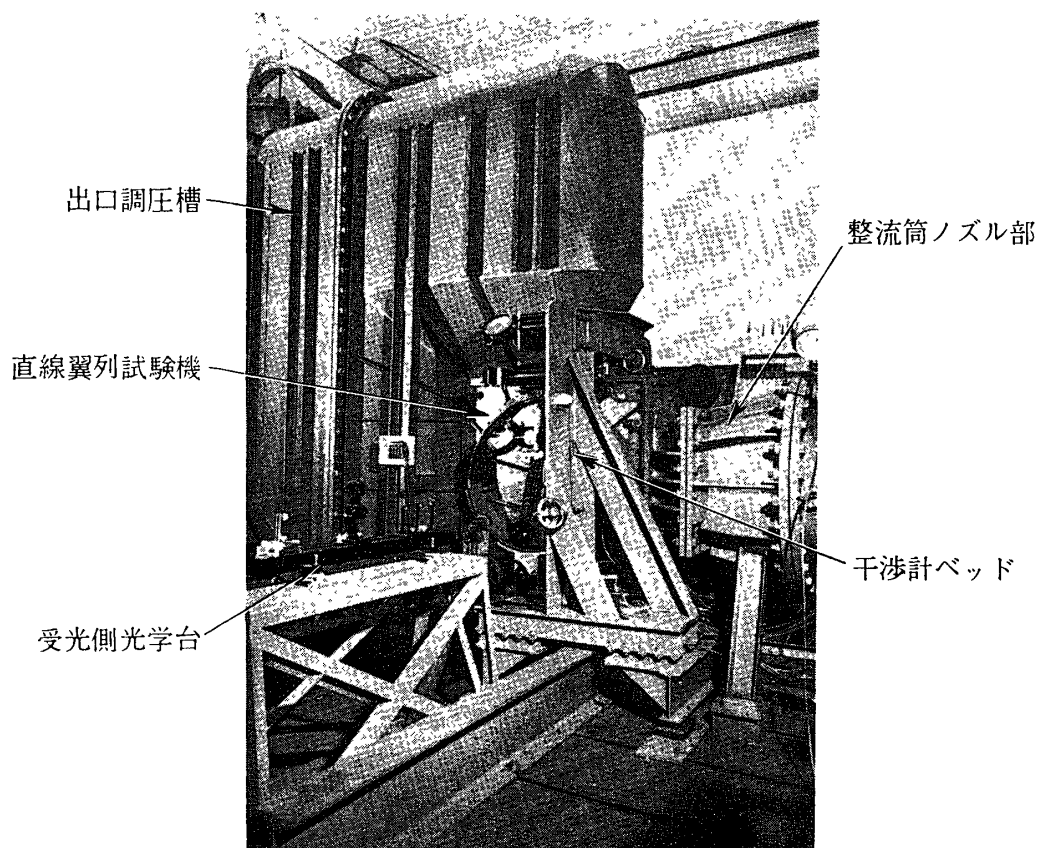
コンデンサー凹面鏡：直径 30cm, 焦点距離 2.175m

コリメータ凹面鏡：直径 30cm, 焦点距離 1.1m

光源：超高圧水銀灯, スペクトル水銀灯, エキサイターランプ

ベッドは第 2 図および第 13 図の写真にその概観が示されているように堅型であって、上側の水平光路は第 8 図⑧の円管内を通り抜け、下側の水平光路が測定部窓を通過する。鏡間距離は水平方向 110cm, 垂直方向 71.5cm である。

このベッドは本風洞専用に製作されたもので、それは直線翼列試験機をまたぐアーチ状の



第13図 光干渉計装置概観

形をしており、そのアーチの上辺部は調圧槽を避けて上流側にわん曲しており、左右支柱部はそれぞれ別個の基台に固定され、それら両基台は直線翼列試験機の下部をくぐるI型鋼で連結固定され、防震ゴムを介して床上の鉄板上に置かれている。

測定部窓と同一水平面上に位置する下側の半透明鏡および全反射鏡は、干渉計を使用しない実験の際に邪魔になるので約20cm上方に移動できるように粗動案内レール(第9図参照)上に取付けられている。

5. あとがき

以上、新設した高速直線翼列風洞の概要につき述べたが、これの建設に当っては、八田桂三教授の示唆によるが多く、また設計製図については、北村菊雄元技官をはじめ各位の助力を、また組立調整に当っては齋藤芳郎助手、山川八郎技官の協力を得た。ここに記して厚く感謝したい。

1956年10月30日 原動機部