

ISSN 0452-2982
UDC 533. 6. 071:
533. 6. 071. 4

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-472

航空宇宙技術研究所計器用風胴の概要と
改造した正方形断面測定部特性試験

高木正平・高橋 侖

1982年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

航空宇宙技術研究所計器用風胴の概要と 改造した正方形断面測定部特性試験*

高木正平** 高橋 侖**

1. はじめに

当所計器用風胴は、主として計器の校正を目的として、昭和38年日本飛行機(株)によって製作された。風胴形式は回流式で、測定部は大気開放型であった。

集合筒は1.4m角、縮流筒の吹口形状は一辺0.5mの正方形であった。その構造部材は一部を除いてほとんど木製であった。

その後昭和43年から44年にかけて、みずほ製作所(有)によって、2次元模型実験用として、改修と追加工事が行なわれた。このとき乱れの低減と一様性向上のために集合筒は1.4m角から2m角に拡大されると同時に測定部は開放から密閉方式に変更され、その断面は幅0.25m、高さ1mになった。翌45年にはこの2次元風胴を用いて、2次元断面形を有する循環制御翼の実験的研究が実施された。この風胴はまた従来と同様に計器校正用に3次元縮流筒、測定部およびその付属部品が用意されていた。その測定部断面は一辺0.5mの正方形であった。ところが最近になって、この3次元風胴を乱流境界層の基礎実験に応用できるように改造を行った。また将来の実用STOL機の研究の一環として、2次元断面形を持つ多翼素翼の空力特性を把握するための実験的研究が計画され、このために3次元風胴を容易に2次元風胴に変えられるようにしてある。改造した測定部の断面は一辺0.5mから0.6mの正方形に、その長さは1mから2.7mに延長された。これに伴って縮流筒も作り直した。約一年余りの工期を経て一応完成した風胴改造後の2次元測定部内の気流特性試験はまだ行っていないが、改造した3次元測定部における気流特性試験はほぼ終了したので、とり

あえずこの結果を先に報告する。この報告書の前半では改造後の風胴概要について、また風胴本体と2次元測定部に関する報告はまだないのでここにまとめて報告する。後半では改造した3次元測定部における気流特性試験の測定結果について述べてある。

2. 風胴概要

2.1 風胴全体

改造した風胴の内面線図を図1に、要目(*は改造品ないしは改造にともなって変化)を次に示す。

形式	ゲッチンゲン型(回流式)
全長*	約13m
全幅*	約3.6m
全高	約2.2m(中心高さ約1.15m)
動力	超分巻電動モータ7.5KW
ファン	直径約1m、片持ベルト駆動
平行筒*	1.42m角×約3.8m
整流格子	焼青銅板厚さ0.4mm、幅100mm、格子間隔16.5mm
集合筒*	2m角×約1.5m、25メッシュの整流網6枚
縮流筒*	絞り正弦曲線、絞り面積比 $\frac{9}{100}$ 、長さ1.985m

2次元縮流筒

絞り面積比 $\frac{1}{16}$ 、長さ1.57m

測定部* 0.6m角×2.7m

移動装置*
縦0.5m、横±0.2m、精度0.1mm
電動
前後2m、精度0.2mm 手動

2次元測定部

幅0.25m×高さ1m×長さ1m

風速* 最大28m/s、常用5~25m/s

気流特性* 3次元測定部一様性±0.5%以内、乱れ強度0.03%以下、脈動なし

* 昭和57年8月16日受付

** 新型航空機研究グループ

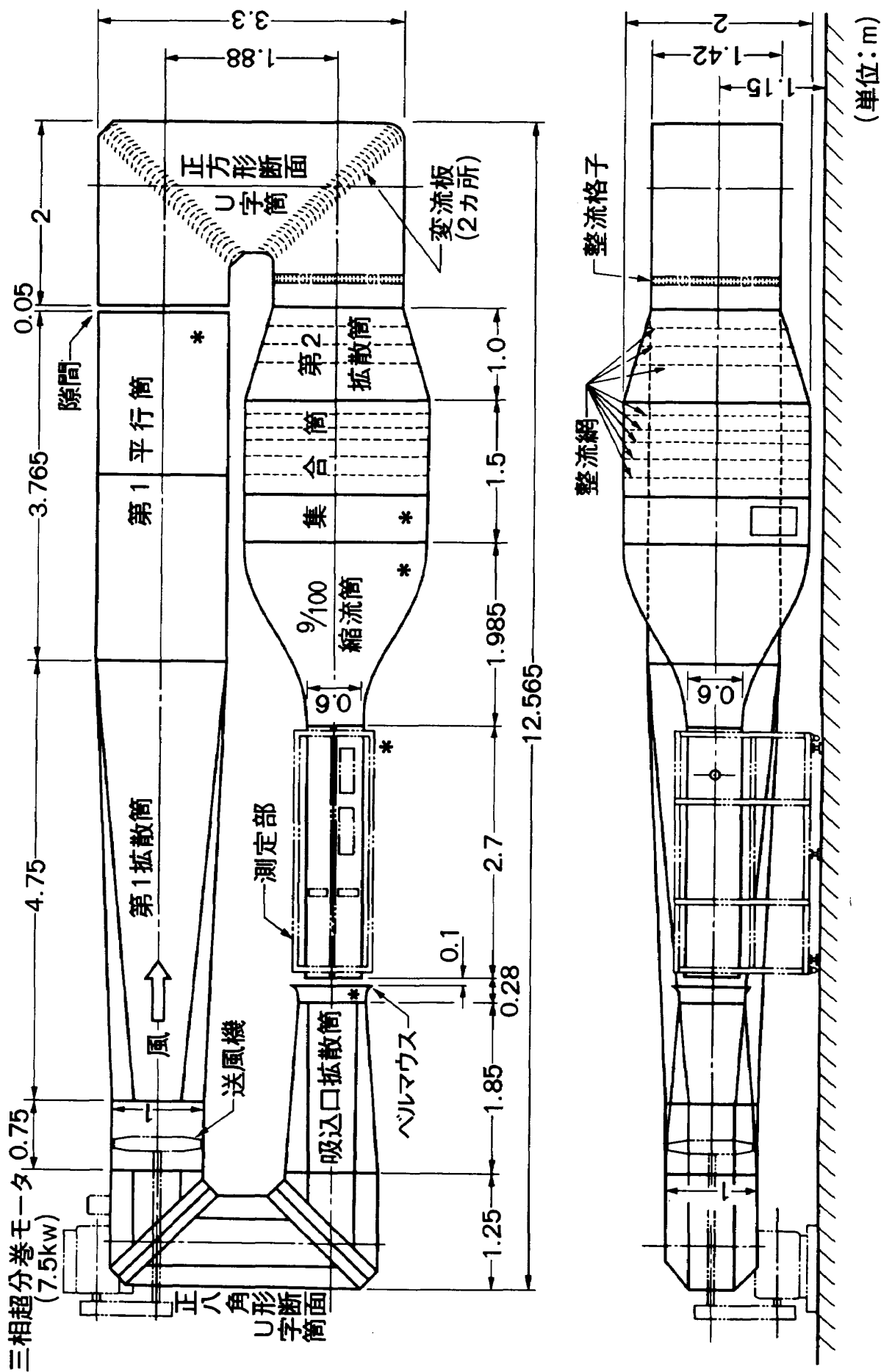


図 1 改造計器用風胴内面線図 (* 改造, 追加品)

図1の測定部における流れの方向は右から左である。集合筒整流網等から生ずる乱れの減衰路として、新たに軟鋼製の平行路を50cm延長し、この部分に点検孔と側壁中央に静圧孔を設けてある。縮流筒、集合筒および測定部の延長にともなって、第1平行筒は約1.8m延長され、送風機に起因する振動除去策としてU字筒との間に5cmの隙間を開けて、ナイロンテープで連結してある。なおこの平行筒も軟鋼製で、入出可能な点検孔もある。測定筒を通った気流は、ベルマウスを有する拡散筒に達するが、この間に約10cm程度の隙間をとり、大気に開放した。これは改造前の測定部において、ピトー静圧管と液柱マノメータの組合せで、数秒ないしは数十秒周期の脈動が検出された。その原因については明確でないが、本改造に当って防止ないしは調節代としてとった。

2.2 縮流筒

図2(a)は改造した3次元用の、同図(b)は既存の2次元用絞り曲線の内面線図で、その座標も示してある。3次元用は厚さ3.2mmの軟鋼製で、2次元用は木製である。絞り曲線の最適設計に関する研究はいくつかあるが^{(1),(2),(3)}本縮流筒では比較的良好な結果⁽⁴⁾が得られている単純な正弦曲線を採用した。3次元用の縮流筒吹口は60cm×60cmであり、した

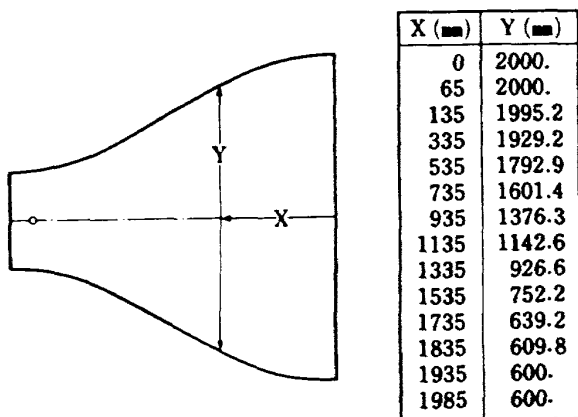
がって絞りの面積比は100：9で、2次元用の16：1に比べて小さいが、長さは約40cm長く設計されている。2次元用との交換の容易性を考えて、3次元用は縦割2分割がとられ、それぞれ独立して下部にキャストが付いていて、設置時には上下の微動もできる。組立ての際には接合部に粘土を埋めるなどしてなめらかにした。

なお3次元縮流筒の入口から1835mm下流の側壁中央平行部に静圧孔があけてある。

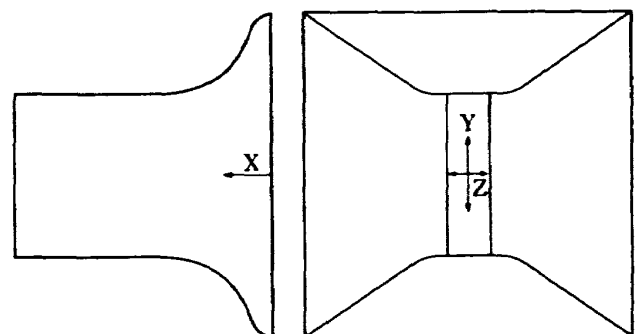
2.3 3次元測定部

すでに図2(a)に示した3次元縮流筒は、図3(a)の測定部に連絡して用いる。その概観を写真1に示す。測定部の断面入口は60cm×60cm、その出口は63cm×60cm、長さ2.7mである。乱流境界層の実験用にはできるだけ長い測定部が要求されるが、風洞の設置条件からこの長さが限度であり、またその断面も広いほどよいが、絞り比が小さくなれば、風洞の乱れが大きくなること、実験の容易性、測定筒内での作業性などを考慮してこの大きさが選ばれた。

測定部手前側壁は目視ができる厚さ10mmの亚克力板で、他の3面は厚さ5mmのアルミ板で構成されている。この測定部は堅固な軟鋼枠組に底面、上面とも固定されている。枠組はキャスト付で、高さ及び水平調整器が6箇所ある。作業孔として天井



X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
0	2000.	2000.	785.	1000.0	359.5
78.5	1924.1	1895.0	942.	1000.	305.8
157.0	1634.3	1497.7	1099.	1000.	274.8
235.5	1393.9	1133.7	1256.	1000.	258.3
314.	1233.7	887.0	1413.	1000.	250.8
471.	1067.3	601.7	1570.	1000.	250.0
628.	1003.2	447.7			



(a) 改造した3次元用絞り曲線（正弦曲線）
◎静圧孔（X = 1835mm）

(b) 既存の2次元用絞り曲線

図2 縮流筒絞り曲線

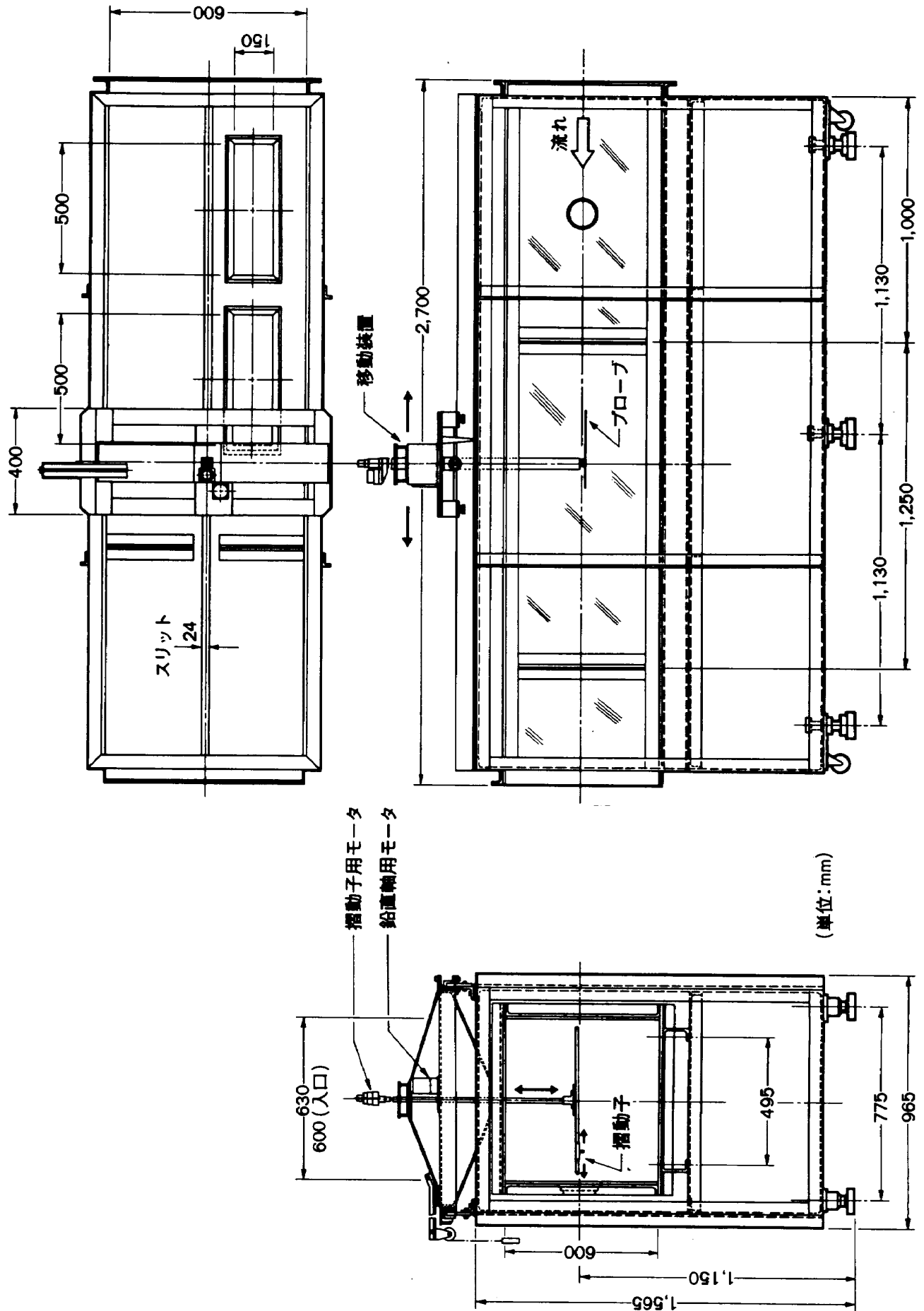
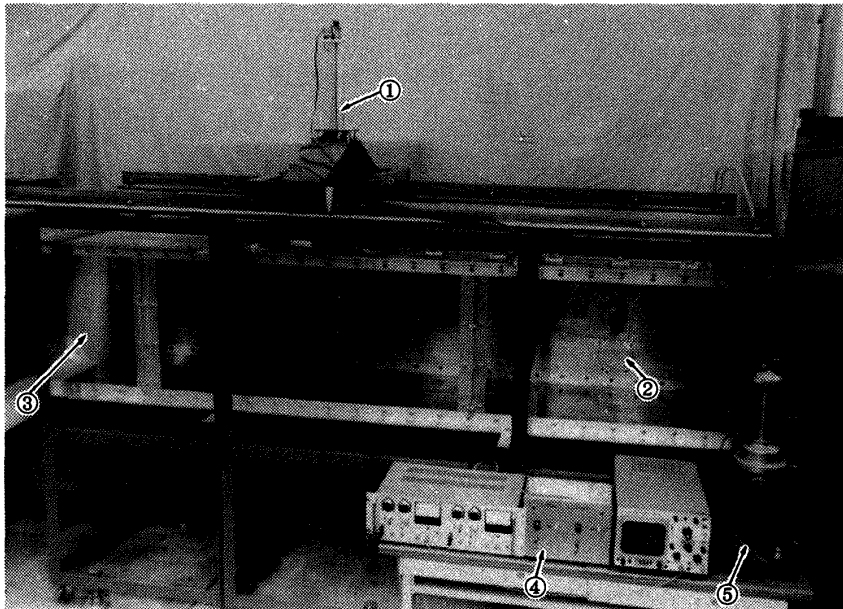


図 3 (a) 3次元測定部及び移動装置

に2箇所(強化ガラス入り蓋), 下流アルミ側壁に1箇所あけてある。風路天井中央に流れに沿って, 測定プローブそう入用の幅24mmのスリットが切っている。このスリット用に長さが異なった蓋(140cm×1本, 120cm×1本, 60cm×1本, 30cm×1本, 15cm×1本, 10cm×1本, 7.5cm×5本, 5cm×5本, 2.5cm×5本)が用意しており, その組合せによって使用部分を除く他は蓋をすることができる。この測定部はまた模型あるいはその後流の実験に用いることもできる。このために測定部入口から500mm下流の両側壁中央に模型取付用円板がある。アルミ側円板は風路内側にアクリル側円板は風路外側にそれぞれ1°ずつ目盛が刻んであり, 模型取付調節がし易

くなっている。またこの円板はアルミ板側に取付けた電動モータによって毎分1回の定速度で回転し, 正逆回転も可能である。流れ方向の静圧調整は左右の側壁で行い, 入口から1000mmは平行とし, その下流から測定部出口までは片側15mmずつ直線的に広げている。

なお静圧の下流方向への変化は測定部の内壁に発達する境界層に起因するが, 境界層が層流と乱流では異なるし, 風速や壁面粗さによっても違うから完全に静圧勾配を取り除く場合は, その都度調整を行う必要がある。しかし本測定部では, 発達する境界層は層流としてその厚さを見積り, 上下内面に発達する境界層分も左右の側壁で調整し, 半固定とした。



- ① 移動装置
- ② 模型取付円板
- ③ 透明アクリル板
- ④ 移動装置制御箱
- ⑤ Betz マノメータ

写真1 3次元測定部概観

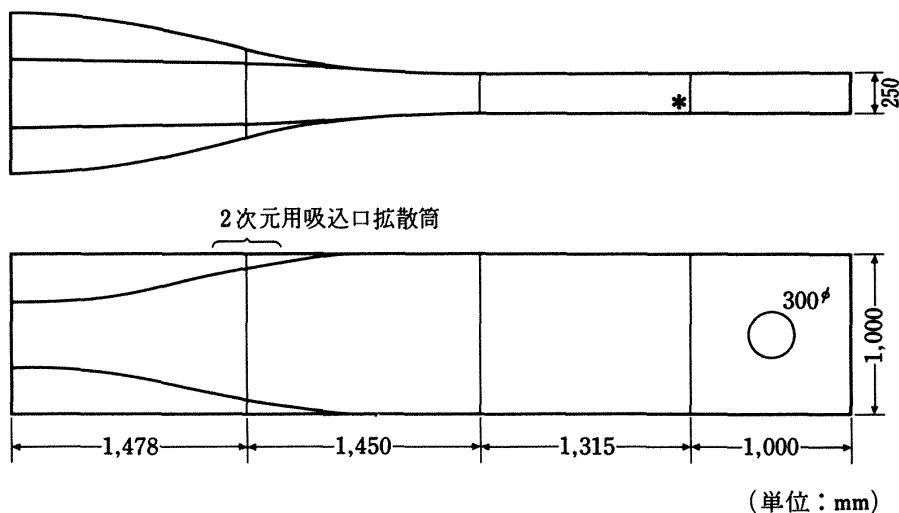


図3(b) 2次元測定部と2次元用吸込口拡散筒, *は追加部品

底面中央には流れに沿って 20 cm 間隔に直径 0.8 mm の静圧孔が 13 箇所あけてある。

2.4 2次元測定部

2次元模型実験には図 2(b)の縮流筒と図 3(b)の測定部、2次元用吸込口拡散筒を連結して、図 1 で示した 3次元用の縮流筒から吸込口拡散筒までをとりはずして交換すればよい。測定部下流の長さ 1.315 m の平行風路は今回の風路延長にともなって新たに追加された。測定部の両側壁中央には直径 300 mm の模型取付用円板がある。この円板に 1° 間隔に 60° 目盛が刻んであり、これを手動で回転し固定する方法がとられている。手前側壁と円板は透明アクリル板で、反対側壁の円板材はアルミである。図 3(b)では手前アクリル板を除いた風路部材はすべて木製である。

2.5 移動装置

図 3(a)に示すような、流れの計測用に 3 方向に移動可能な装置を用意した。実際にこの装置を測定部上部に取り付けた外観は写真 1 のようになる。

この装置は基本的には風路に沿って移動する台車、風路断面内の上下左右に移動するための鉛直軸と水平軸及び上下動にはほぼ釣り合う分銅（重量可変）から構成されている。手動によって台車は風路上面に取り付けた 2 本のレール上を、流れ方向の任意の位置に移動固定可能で、その位置はレールに張った 0.5 mm 刻みの金尺で読み取ることができる。風路内の上下動は、スリットを通して鉛直軸の上下で行う。この上下には風路外部に取り付けた無段変速付誘導モータを用いた。その速度は、毎分 2 mm から 40 mm まで任意に設定できる。この他にもモータの減速機が何種類か用意されているから、実験によって使いわければよい。水平方向の移動は、図 4 にその詳細を示すように鉛直軸の下端に取り付けた水平軸をはさんで、摺動子（下面はプローブ等支持可能）を滑らす機構がとられている。その駆動用にパルスモータが鉛直軸上端に取り付けてあり、鉛直軸内を通した駆動軸を介して摺動子を移動させる。パルスモータは 2 種類用意してあり、その移動分解能は 1 パルス当たり、0.0037 mm と 0.022 mm である。

その移動速度は最大毎秒 1.3 mm と 7.7 mm である。この水平軸は実験目的に応じて容易に着脱できる構造にしてある。両方向の移動範囲は上下方向に 500 mm、水平方向に ± 200 mm である。この移動量は、それぞれモータに連結したポテンショメータで電圧値ないしは抵抗値の変化分として知ることができる。モータとの伝達形式は鉛直軸では、ラックとピニオン、摺動子とはプーリによるため、いずれもバックラッシュを生じ、測定中の移動は同一方向のみとした。これによる位置の再現性は両方向とも 0.1 mm 以内であった。

3. 3次元測定部の気流特性試験

3.1 送風機回転数と風速ならびに気流温度特性

改造前の 2次元測定部と改造後の 3次元測定部入口における風速と送風機回転数の関係を図 5 に示す。送風機の回転数と風速とは、いずれの場合もほぼ比例している。改造前後で測定部断面積は 44 % 広がっているが、同一回転数で風速は約 20 % 減少したにすぎない。改造後の最大風速は約 28 m/s であるが、常用の風速範囲は 5 m/s から 25 m/s である。

本風胴のように回流式風胴では、プロペラファンや整流網等の摩擦熱による気流の温度上昇は避けられない。図 6 は改造後（今後断りがない限り改造後の結果を示す）、風胴気流速度が 20 m/s と 25 m/s のときにおける、運転時間に対する気流温度上昇特性と室温変化を示す。

風速が 20 m/s と 25 m/s では実験日が違う。

風速が 20 m/s のとき、破線で示す時間帯には一時実験を中断している。2 時間程度の連続運転では、どちらの風速でも気流の温度は一定にならない。図 6 に示すように、風速が 25 m/s と 20 m/s では気流の温度上昇の勾配比は約 2 であるが、このことは送風機の出力がその回転数つまり風速の 3 乗にほぼ比例することから説明できる。

風速が 20 m/s のとき、実験中断前後で気流温度特性に違いがみられる。この特性は室温変化と似た傾向を示している。この日の天気は次のようである。

前半の実験時間中に雨天から天候が回復し、これに伴って室温が上昇した。後半の実験では午後から夕刻にかけて陽が蔭り始め、次第に室温の変化はゆ

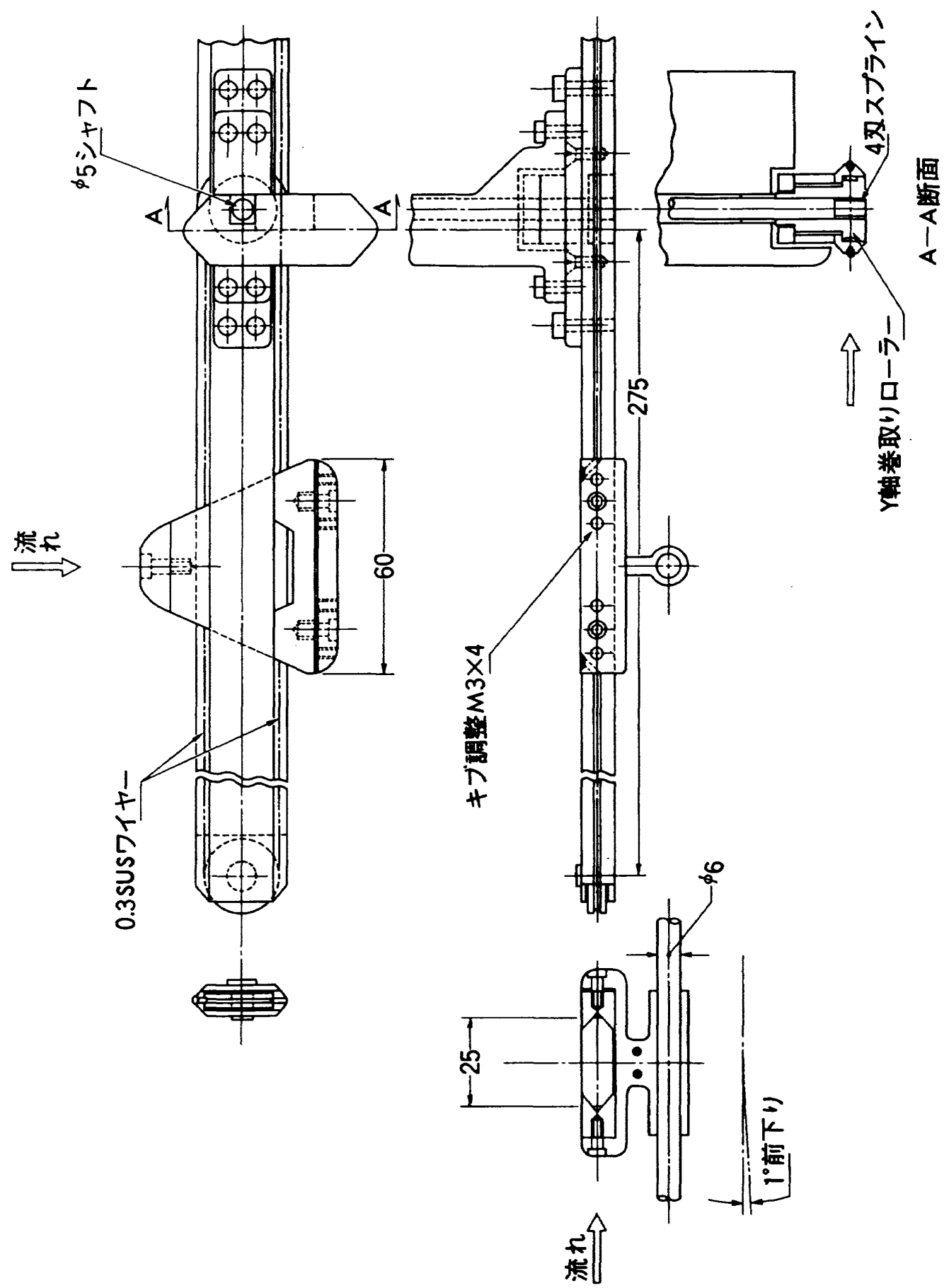


図4 移動装置の水平軸の詳細

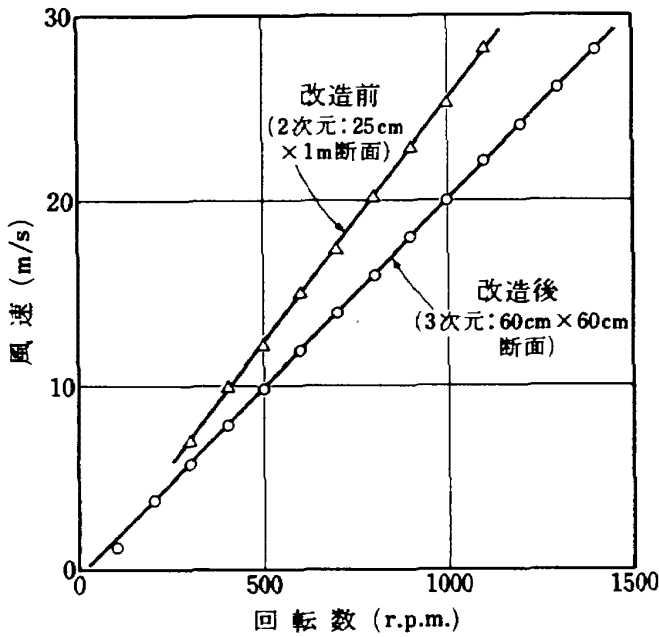


図5 送風機回転数と吹口風速

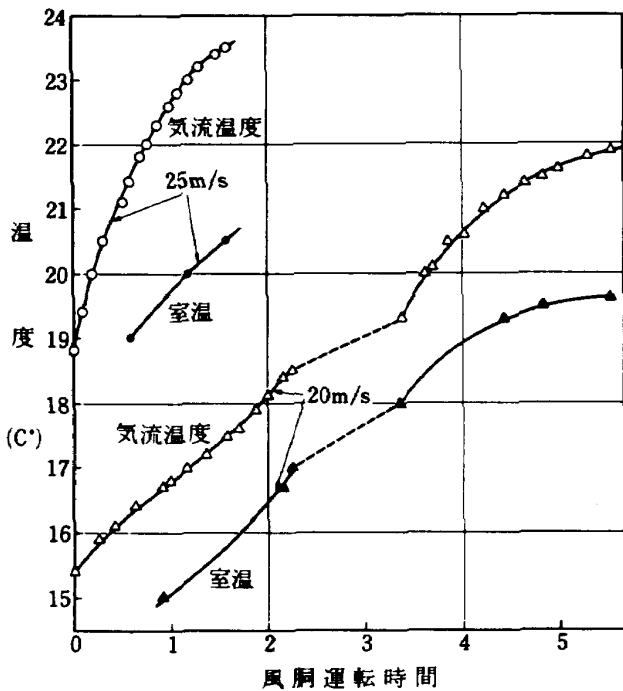


図6 風速が 20m/s, 25m/s における気流温度特性
 …は実験中断, 20m/s と 25m/s では実験日が違う

るやかになった場合である。

このように風速が一定でも、気流温度特性は一定しておらず、外界の温度変化の影響を受け易いことがわかった。

したがって温度変化に敏感な熱線風速計等の使用には、十分な注意が必要となる。

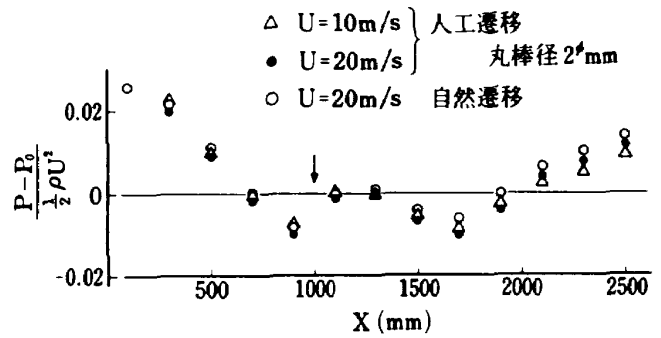


図7 測定部流れに沿った底面中心上の静圧分布
 P_0 は吹口側壁中央の静圧, 人工遷移では底面上 $X=100\text{mm}$ 横方向に粗さとして直径 2mm の丸棒を置いた。↓は底面アルミ板継ぎ目位置, ρ は空気密度, U は風速

3.2 流れに沿う静圧分布

縮流筒側面中央出口 1 箇所と測定部の底面中心線上に、20 cm 間隔で下流方向に直径 0.8 mm の静圧孔が 13 箇所あけてある。縮流筒出口の静圧 (P_0) を基準に各点の静圧 (P) を測定し、動圧 ($\frac{1}{2} \rho U^2$: ρ は空気密度, U は風速) で整理した結果を図 7 に示す。吹口上流から発達してきた境界層が下流方向の滑らかな底面上に自然に発達する境界層の場合と、測定部入口から 100 mm 下流、流れに直角の底面上に直径 2 mm の丸棒を 2 次元粗さとして、境界層の遷移を早め、境界層を厚くした場合の結果が示してある。

図中矢印は底面アルミ板継ぎ目位置を示し、この位置から出口までの間で静圧調整のために予め左右の側壁を 15 mm ずつ広げてある。

いずれの静圧分布も W 字形をしている。ベルヌイの式によれば、静圧と動圧の和は一定であるから、静圧が減少している領域では、流れは加速され、逆にそれが増加すれば、減速している。

先にも示したように測定部入口から 1 m の区間の風路は平行であり、したがって下流方向にいくにつれて境界層が発達し、流れは加速され静圧は減少する。

このことと図 7 の結果は一致している。また風速が 20 m/s のとき自然遷移に比べて人工遷移の方が、静圧が低目であるのは底面上に発達する境界層が厚いからだと考えられる。しかし分布の形にほとんど変化はみられず、単なる上下の平行移動では

は両者は一致している。風路は1mより下流から出口まで直線的に左右に広げてあり、この領域の静圧分布の変化を先に示したように境界層の厚みの変化だけでは説明できない。この原因としては測定部上下あるいは左右内壁の固有のうねりなどが考えられる。

しかし模型設置位置から下流 2500mm の間に限れば、この静圧変化は、約±1%以内である。

3.3 平均風速分布

(1) 測定法

測定部断面内の風速の一樣性を代表的な風速 10 m/s, 20m/s および 25m/s について測定した。このために2つの方法を用いた。1つはピトー静圧管と圧力変換器の組合せて、もう1つは定温度型熱線風速計である。前者を変換器の定格内で用いることができる風速20m/sと25m/sの場合、後者を主に風速が10m/sの場合に用いた。圧力変換器の仕様を表1に示す。定格容量は風速換算で約28m/sである。出力の検定はピトー静圧管の動圧と静圧の差をマノメータによる読みと比較して行い、圧力差と出力電圧の直線性が規格内にあることを確認してから用いた。変換器の温度特性は表1より1℃当り、水柱換算で0.025mmである。風速10m/sの動圧を水柱に換算すると約6.25mmであるから、1℃当り0.4%ドリフトすることになる。1ケースの実験で2時間程度は要するから図6で示したように2℃前後の室

温上昇は考えられる。したがって動圧で0.8%ドリフトするから、これを風速換算すると0.4%の変化に対応する。風速が10m/sで±0.5%の一樣性を問題にする測定ではこの変換器を恒温状態に置かない限り使用に耐えない。なお風速が20m/sと25m/sでは、2℃の温度変化に対して、風速換算ドリフトは0.1%と0.064%である。

そこで風速10m/sの場合には、定温度型熱線風速計を用いた。この風速計も通常の使用では温度変化に対して出力はやはりドリフトするから、温度補償を施して用いた。ここでは Bearman⁽⁵⁾が提案した補償法を採用した。詳しくは付録に述べてある。温度補償した風速計出力の温度特性は気流温度10℃の変化に対し、風速換算で0.4%以内であった。またこの風速計を主流に対して45°傾斜した熱線に応用して、主流に直角な2方向の成分を求めた。

(2) 測定結果

風速が10m/s, 20m/s及び25m/sについて、測定部断面内主流方向の平均風速分布を測定した。この結果から断面中心風速 U を基準に、各測定点の風速偏差 $4U$ として、 $4U/U$ 一定の等速度線を表わしたのが図8である。(a), (b), (d)は測定部入口より500mm, 同図(c)は風速20m/sのとき2000mm下流断面における等速度線図である。座標は流れ方向に X 軸、底面直角方向に Y 軸、水平方向に Z 軸をとり、 X , Y および Z 軸の座標原点をそれぞれ測定部入口、底面および風路中心に定める。また図8では流れは紙面から手前直角方向である。斜線は $4U/U$ が正であって+0.3%以下の領域を示す。図8(a), (b), (c)に示すように $X=500$ mmでは、風速の違いにかかわらず、ほぼ断面中心の水平方向の領域では断面中心の風速に等しいかもしくは大きく、ここをささむ上下部で風速が遅い点はいずれにも共通している。風速20m/sのとき、図8の(b)と(c)に示すように X が500mmと2000mmにおける違いとして、(c)では上方の-0.4%の領域が小さくなって、逆に側方の+0.3%の領域が現われている。また底面中央付近で-0.5%の等速度線は下流側でやや高くなるが、定性的にはあまり変化はみられない。なお図8の(c)と(d)の+0.3%の内側は+0.4%以下である。100mm $\leq Y \leq 500$ mm, -200mm $\leq Z \leq +200$ mmの領域

表1 圧力変換器(ST研究所, PD80A-0005)の仕様

試験項目	仕様
定格容量	50mm Ag
入力電圧	DC12V ± 2V
出力電圧	1VFS
過負荷	500%FS
非直線性	±0.5%FS
(ヒステリシス)	
再現性	0.2%FS
温度特性	±0.025mm/℃
使用温度範囲	-15℃ ~ +75℃

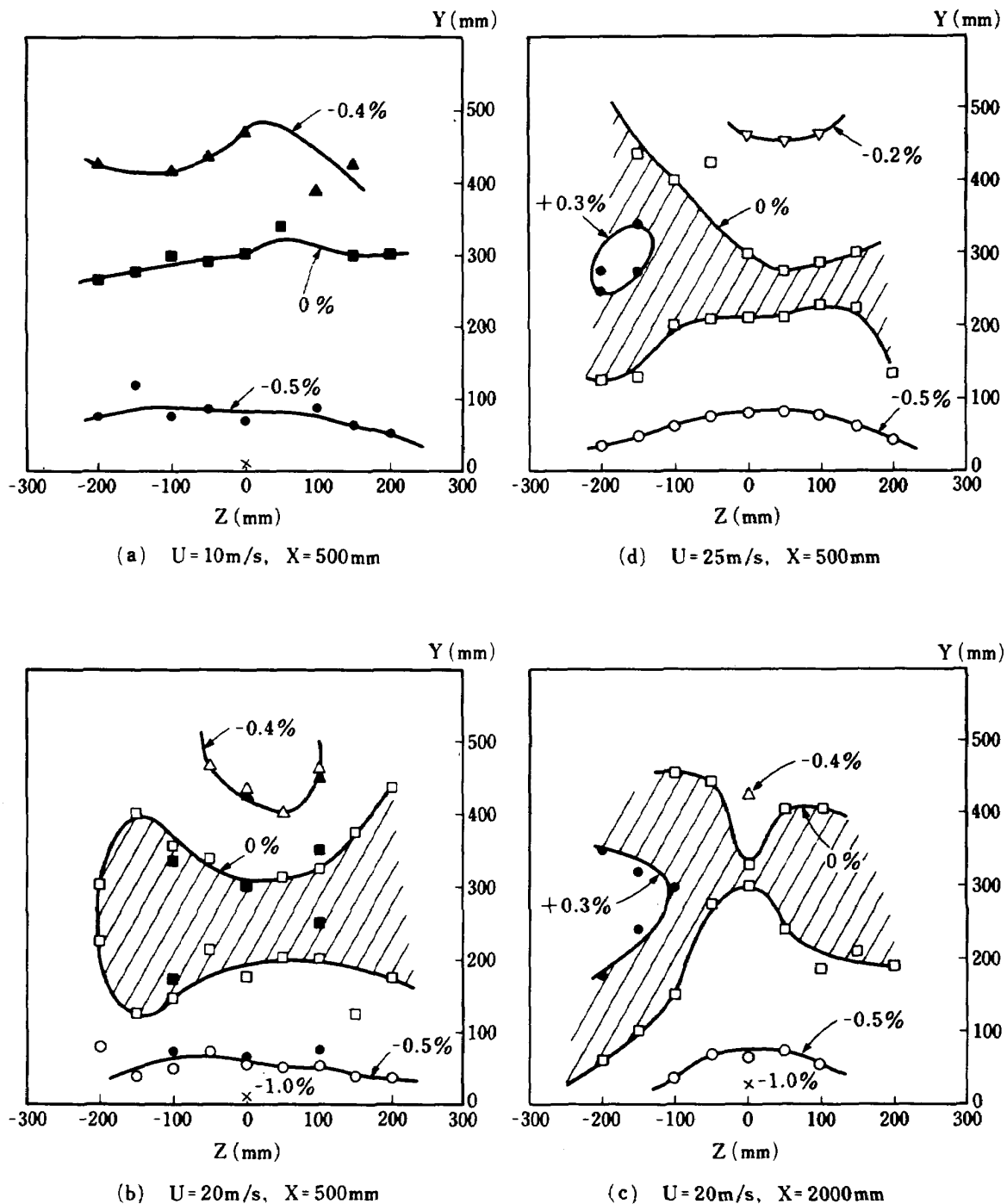


図8 等速度線図，流れは紙面から手前%の値は $\Delta U/U \times 100$ ， U は断面中心点 ($Y=300\text{mm}$ ， $Z=0$) における流速， ΔU と U との流速差，斜線は $0 < \Delta U/U < 0.3\%$ の領域，■，▲，●，×は熱線風速計，□，△，○は圧力変換器を用いた。

に限れば，いずれの風速でも，断面内の一様性は -0.5% から $+0.4\%$ 以内である。風路内面には境界層が発達するが，底面に発達する境界層厚を $\Delta U/U = -1\%$ となる底面からの高さとするると図8(a)では約 4mm ，(b)と(c)ではそれぞれ約 9mm と約 28mm であった。図8(b)には熱線風速計と圧力変換器による結果が示してあるが，両者の結果はかなりよく一致している。

矩形の吹口をもつ風胴には，その吹口断面に大きな4つの渦による旋回流が存在しているという報告がある⁽⁶⁾。本測定部でもその存在の有無を調べるために，図9のように測定部断面の右半分に約 75cm の刺しゅう糸9本を張って吹き流し試験を行った。その結果風速が 10m/s と 20m/s では，各糸の上下の振れについては重力の影響で明確にできなかったが，図9の下図に示すように渦の存在を示唆する左右の

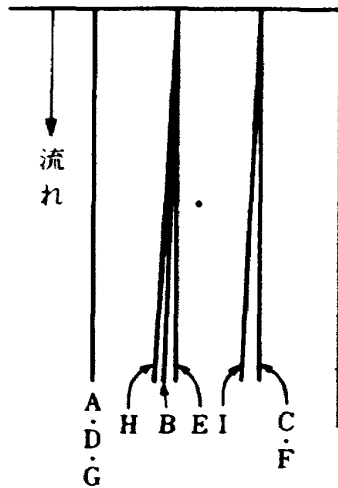
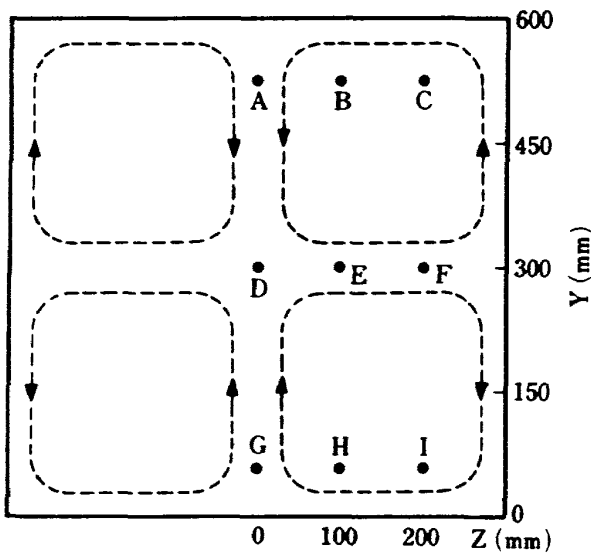
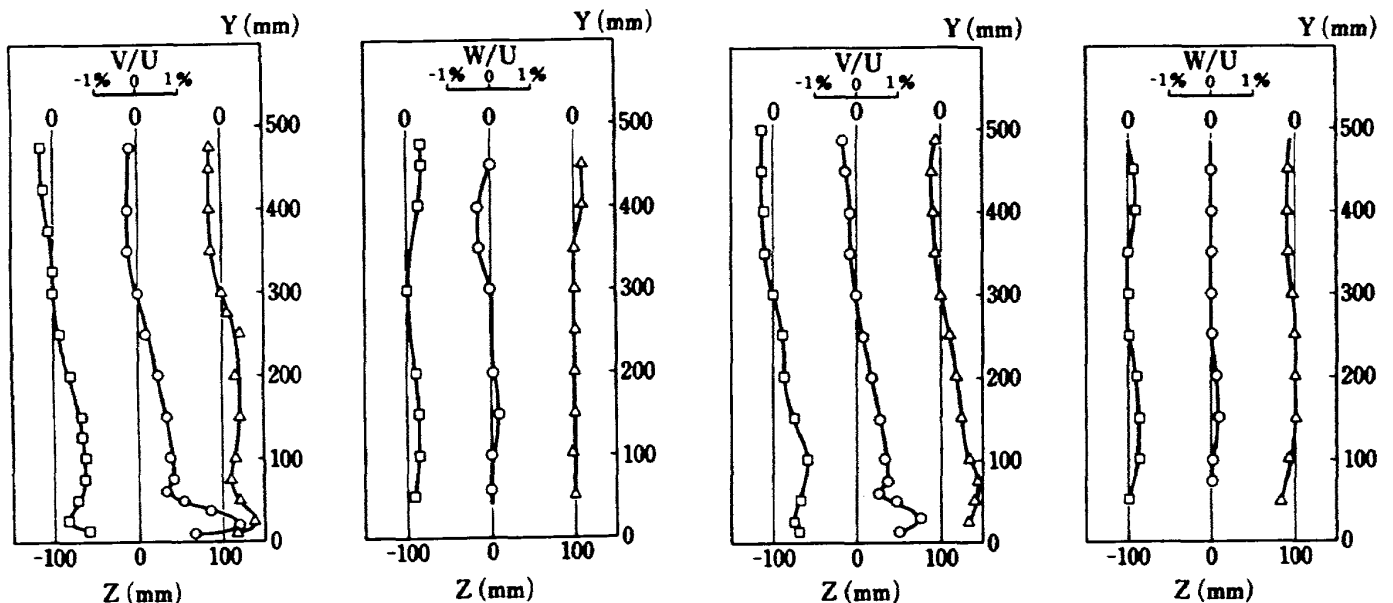


図9 刺しゅう糸（長さ約75cm）による吹口の
流れの観察

振れが観測された。しかし糸の振れ角は最大で 0.2° 程度であり、このZ方向の流れ成分を主流速度に換算するとおおよそ0.3%である。次に熱線風速計による定量測定を行った。その結果を図10に示す。Y、Z方向の速度成分をそれぞれV、Wとし、Vは底面から上向きを正とし、WはZと同符号とする。また各成分の値は $Y = 300\text{mm}$ 、 $Z = 0\text{mm}$ における値を基準に図示してある。V成分の分布はどちらの風速でも傾向は同じで、底面に近い一部の領域を除けば、主流速度の -0.3% から $+1\%$ の間にある。その符号は $Y = 300\text{mm}$ を境に上下で変化し、底面からは上向きに、天井内壁からは下向きの流れが存在していることを示している。この結果は図9に破線で示したような渦流の存在を示唆している。

一方W成分の大きさは、主流速度の $\pm 0.4\%$ 以内で、V成分に比べると小さい。図10の $Z = -100\text{mm}$ 、 $Y > 350\text{mm}$ の分布は図9の刺しゅう糸Bの振れと逆の関係にあるが、その大きさは高々0.2%である。この分布を除いた他の分布は図9の破線で示す渦流の方向と一致しているものの、あまり明確でない。

底面から50mmの間ではV成分は大きく、とくにその中央部で主流速度の2.5%に達している。そこでこの理由を調べるために、この近傍におけるVとW成分を詳しく測定した。風速が 10m/s で $X = 200\text{mm}$ における結果を図11に示す。矢印はV及びW



(a) 主流速度 $U = 10\text{m/s}$

(b) 主流速度 $U = 20\text{m/s}$

図10 V成分（Y方向）、W成分（Z方向）分布、 $X = 200\text{mm}$

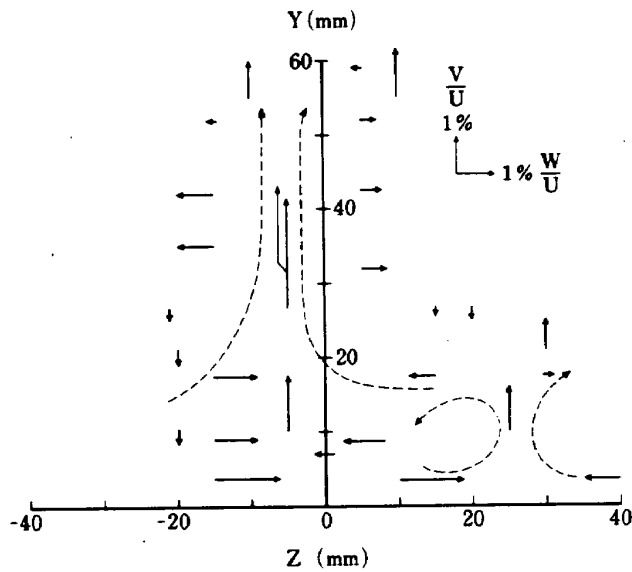


図 11 $U = 10\text{m/s}$, $X = 200\text{mm}$ における底面中央近傍の V , W 成分のベクトル表示

成分の大きさとその方向を示す。この結果から図中に破線で示すような流れが存在していることが判明した。風路中央からややずれた $Z = -5\text{mm}$ における正の V 成分は、負の V 成分に比べるとかなり大きく、流れはほとんど底面から上向きと考えてよい。およそ $Y = 25\text{mm}$, $Z = -5\text{mm}$ で V 成分は最大値をとり、主流速度の3%である。この図10の結果が示すように、底面から上向きの流れは50mmの高さでもまだ主流速度の1%程度ある。この高さは図7で示したようにここに発達している境界層の厚み(約4mm)の10倍以上に相当している。

このような上向きの流れの発生原因として、種子田らは図9に示すような4つの渦の作用と解釈した。風胴壁に沿った境界層の厚みは一様でなく、下向きの流れが発生している領域では境界層は薄く、逆に上向きの流れが発生している領域ではその厚みは増したと報告している。種子田らと境界層の定義が若干異なるが、本測定部においても、図9, 10および11の結果から、同種の渦流が存在していると解釈してよさそうである。また $Z = 25\text{mm}$ にも主流速度の1%程度であるが、上向きの流れが生じている。

図8の(b), (c)および(d)で、たとえば $\Delta U/U = 0$ の等速度線が断面中央の上下方向から中心に向かってゆがんでいるのは、この4つの渦の作用のためではないかと考えられる。

測定部断面内の4つの渦に誘起されて生じている

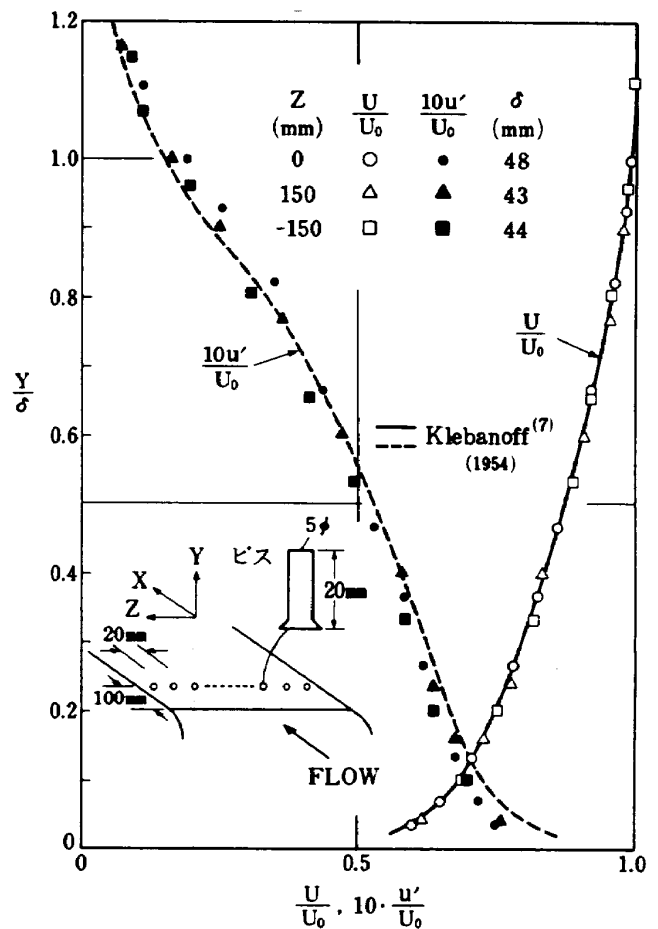


図 12 底面上に発達する乱流境界層の平均速度と変動の強度分布 ($U_0 = 10\text{m/s}$, $X = 1450\text{mm}$)

局所的に強い上向きの流れが、底面に発達する境界層に及ぼす影響を調べた。図12に示すように吹口より100mm下流の Z 方向に三次元粗さとして長さ20mm, 直径5mmの皿ビスを20mm間隔で並べ、流れの遷移を促進させた。また図12は風速が10m/sの場合で、粗さより1.35m下流の $Z = 0, 150\text{mm}$, -150mm の3点における Y 方向の主流方向平均速度と速度変動の強度分布を示す。境界層厚さは $Z = 0, 150\text{mm}$ および -150mm でそれぞれ約48mm, 43mmおよび44mmであり、 Y 方向の距離はこれらの値で無次元化してある。図中の実線と破線は完全に発達した乱流境界層の平均速度と変動の強度分布⁽⁷⁾を示す。 Z 方向のそれぞれ3点における平均速度ならびに変動の強度分布は局所的にはほぼ乱流境界層が形成されているといえる。しかし底面中央では上向きの流れによって境界層の発達を促進され、その厚みは Z 方向に不均一になっている。 $Z = 0$ における境界層厚は図中の表に示すように $Z = \pm 150\text{mm}$ の

2点における厚みより約10%厚い。この方向の厚みを均一にする一つの試みとして、粗さを先より小さく、直径4mm、高さ10mmの皿ビスを3列千鳥状に並べ、同様な測定を行った。その結果、粗さ要素が1列の場合に比べ境界層厚に若干の違いはあるものの分布形状の差は認められなかった。そこで粗さ要素の下流500mmで、 $Z=0$ と100mmにおける速度変動の強度分布がほぼ一致するように底面中央部近傍のビスを適当に間引いた。しかしその下流で流れは再び3次元性を示し、粗さから1.35m下流で $Z=0$ における境界層厚は約48mm、 $Z=+100$ mmでは約43mmであった。

3.4 残留速度変動

(1) 測定法

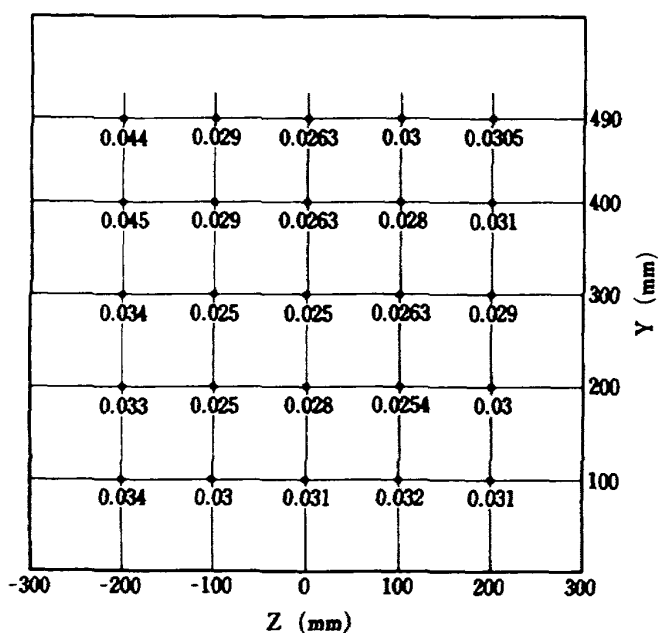
風胴の残留速度変動のように、変動の強度が小さい場合の計測に定温度方式の熱線風速計を用いるこ

とがむづかしいことはすでに指摘⁽⁸⁾されている。ここでは風胴の残留速度変動の計測に文献(8)で試作されている定電流型の風速計を用いた。この風速計の速度変動に対する振幅応答特性は風速20m/sでは、6dB減衰点が約5kHz、このときの出力雑音は風速換算値で0.005%以下である。主流方向の速度変動 u には、I型プローブを用いた。主流に直角な Y 、 Z 方向の変動 v と w については、主流に対し45°傾斜した熱線を主流に平行な軸を中心に水平面から90°ずつ回転を加えて4回測定を行った。その結果、得られた変動の実効値 $(u+v)'$ 、 $(u-v)'$ 及び $(u+w)'$ 、 $(u-w)'$ を、すでにI型プローブで得た u' を用いて v' と w' に分離した。

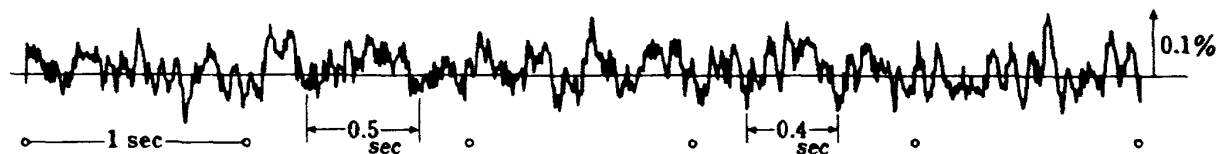
変動の実効値は、横河ヒューレット・パカード社の実効値計3400Aで計測した。

(2) 測定結果

風速20m/sで $X=500$ mmにおける測定部断面格子点における主流方向速度変動の実効値(乱れ強度)を図13(a)に示す。同図(b)は $Y=300$ mm、 $Z=0$ における変動波形 u の1例である。一般に速度変動は壁面に近い領域より、断面中心部の方が幾分小さい。この格子点における平均値はおよそ0.03%である。図13(b)の波形の強度は0.025%であるが、振幅が0.1%にも達する成分も含まれている。図中に示したように変動波形には0.4秒~0.5秒の周期をもつ低周波成分も含まれている。しかし実効値計の入力感度帯域は10Hz以上であるから上記の低周波変動に対しては感度が低下し、真の実効値は0.025%の値より大きいはずである。また変動波形には少なくとも1秒から5秒の長周期変動は観測されない。このことから回流式風胴にしばしばみられる脈動は発生していないと思われる。風速が10m/sと25m/sについても同様な波形観測から長周期成分は検出され



(a) 断面格子点における主流速度 U に対する乱れ強度 u' 各値は $\frac{u'}{U}$ (%)



(b) $Y=300$ mm, $Z=0$ mmにおける主流方向変動波形 $\frac{u'}{U}=0.025\%$

図13 $U=20$ m/s, $X=500$ mmにおける主流速度変動の強度と変動波形

表Ⅱ $X = 500\text{mm}$ の風路中央点における各方向の乱れ強度
()内の値は改造前の2次元測定部内の乱れ強度

U (m/s)	$\frac{u'}{U}$ %	$\frac{v'}{U}$ %	$\frac{w'}{U}$ %	$\frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})}}{U}$ %
10	0.025 (0.036)	0.012	0.016	0.0185
20	0.025 (0.031)	0.020	0.029	0.0249
25	0.029 (0.035)	0.032	0.030	0.0304

なかった。またこれらの風速については、風路断面中心に限り u' 、 v' および w' も測定した。その結果を表Ⅱにまとめた。風速の増大とともに、速度変動の大きさも増大し、 X 方向よりは Y 、 Z 方向の変動の増大が目立つ。しかしいずれも最大約0.03%である。改造前の2次元測定部断面中心における主流方向の乱れ強度も比較のため示した。いずれの風速についても乱れの低減は達せられている。

5. 結 論

今回の計器用風洞の改造は、乱流境界層や模型実験もできる汎用度の高い風洞にすることを目的とした。

このために測定部断面形状を $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ から $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ に広げ、その長さも 1m から 2.7m に延長した。また流れの計測用に3方向に移動可能な装置を用意した。気流特性改善のために、縮流筒は左右、上下対称な正弦曲線を用い、集合筒の延長、風路の振動、共振を防ぐ隙間の設置や、測定部下流とベルマウスの間を大気に開放し、その間隔を脈動の除去調節代とするなどの対策を施した。3次元測定部は縮流筒も含めて既存の2次元用測定部と交換な構造にしてある。

3次元測定部の気流特性試験の結果は次の通りである。

① 吹口の風速範囲は $1\text{m/s} \sim 28\text{m/s}$ 、常用 $5\text{m/s} \sim 25\text{m/s}$ である。

② $20\text{m/s} \sim 25\text{m/s}$ の範囲で2時間程度の運転時間では気流温度は一定にならない。その温度特性

は室温変化に影響される。

③ 底面に沿う静圧分布は 500mm から 2500mm の範囲では動圧換算でおよそ $\pm 1\%$ 以内である。

④ 風路内壁に発達する境界層を除いて、風速を 10m/s から 25m/s に限れば、風速分布の一様性は 500mm と 2000mm 下流で $\pm 0.5\%$ 以内である。

⑤ 500mm の位置での主流の偏りは、左右より上下に大きい。境界層を除いた領域では 0.5° 以内である。この偏りは吹口に生じている4つの大きな渦が原因で、この渦によって底面中央上には主流速度の3%にも達する上向きの流れが生じ、その影響は底面からおよそ 60mm にも及ぶ。この2次流れは安定であり、底面に沿う境界層の発達に影響を及ぼし、上向きの流れが生じている底面中央が厚くなる。

⑥ 主流方向の残留速度変動の乱れ強度は0.03%以内で、それと直角方向の乱れ強度は風速が増すにつれて増大するが、およそ0.03%以内である。

⑦ 主流の速度変動の観察から、 $10\text{m/s} \sim 25\text{m/s}$ の範囲では、脈動は生じていない。

謝 辞

本風洞の改造に際しては、多くの助言と御教示を頂いた東大境界研の佐藤浩教授に厚く感謝いたします。

また風洞本体の改造にはみずほ製作所(有)、移動装置の製作取付には村重製作所(株)にそれぞれ御協力を頂き、ここに深甚なる謝意を表します。

付録 定温度型熱線風速計の温度補償

Bearman が提案した

$$E_c^2 = \left\{ 1 - \frac{\alpha}{a_w} (T - T_a) \right\}^{-1} \cdot E^2$$

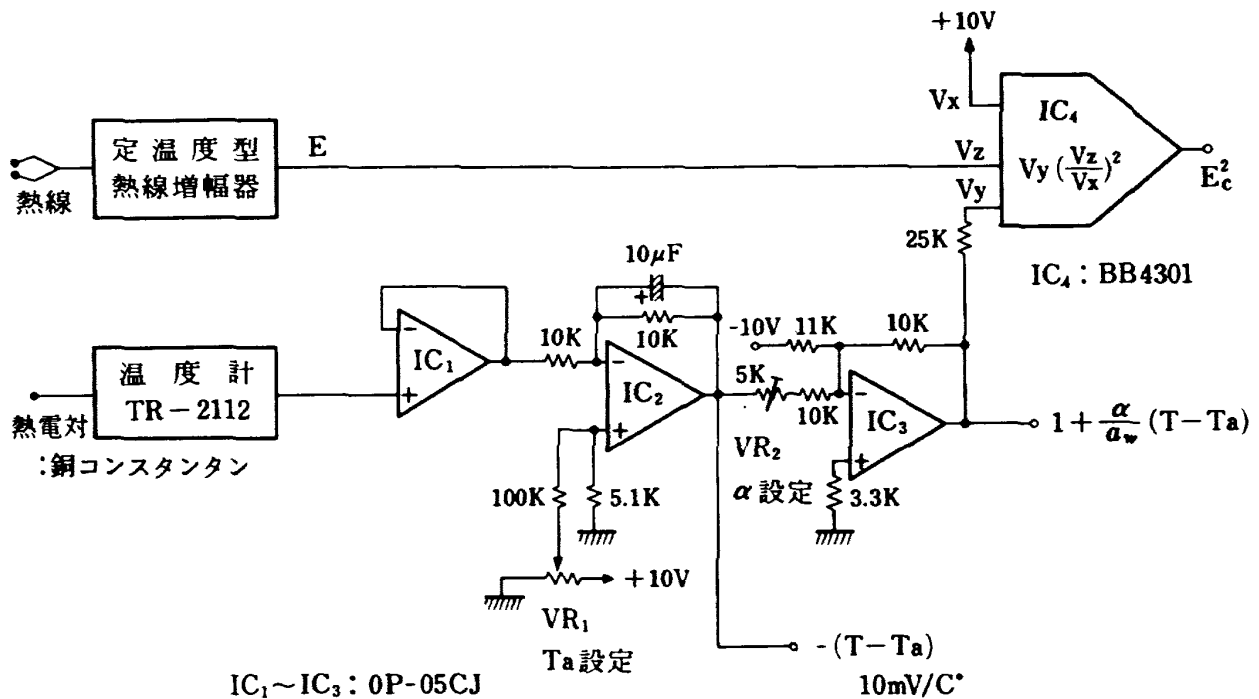
なる関係を用いれば熱線風速計の温度補償された出力 E_c を得ることができる。ここに E は熱線ブリッジ印加電圧、 T_a と T は基準となる温度と気流温度、 a_w は過熱比、 α は熱線の温度係数である。 T_a を実験開始時の気流温度にとれば、図6に示したように実験中に数度の温度上昇はあるが、 a_w は 0.6、熱線がタングステンなら α は $0.0036/^\circ\text{C}$ 程度であるから $\frac{\alpha}{a_w} (T - T_a) \ll 1$ とみなしてよい。したがって上式を近似的に

$$E_c^2 = \left\{ 1 + \frac{\alpha}{a_w} (T - T_a) \right\} E^2$$

としてもその誤差は2次の微小量である。この式に基づいて構成した補償回路を付図1に示す。

簡単に回路説明すると、TR-2112は気流温度を計測するタケダ理研社製の温度計で、その感度は $10\text{ mV}/^\circ\text{C}$ である。 IC_1 はバッファアンプ、 IC_2 は引算器で実験開始時の気流温度 T_a を VR_1 で設定する。上式の中括弧内の定数1を -10 V に対応させ、反転加算器 IC_3 に入力する。 a_w は定数であるが、 α は一般には材質が同じであっても $\pm 10\%$ 程度のばらつきはあるから、 α を実験的に決定する必要がある。このための調整器を VR_2 とする。

指数演算を行う IC_4 に、熱線増幅器の出力 E と温度補正係数に比例した IC_3 の出力をそれぞれ入力すれば、その出力は E_c^2 に比例する。次に校正風洞を用いて風速一定条件で気流温度を色々変化させ IC_4 の出力電圧の変化が最も小さくなるよう、可変抵抗器 VR_2 で調整すればよい。本回路の場合、気流温度 10°C の変化に対し、出力の変化分は 10 m/s の風速に換算して、最大 0.4% であった。



付図1 定温度型熱線風速計の温度補償回路

参 考 文 献

- 1) Bossel, H. H.; Computation of Axisymmetric Contractions, AIAAJ, vol. 7, pp. 2017-2020 (1969).
- 2) Chmielewski, G. E.; Boundary-Layer Considerations in the Design of Aerodynamic Contractions, J. Aircraft vol. 11, pp. 435-438 (1974).
- 3) Mikhail, M. N.; Optimum Design of Wind Tunnel Contractions, AIAAJ. vol. 7, pp. 471-477 (1979)
- 4) 谷一郎他著：流体力学実験法，岩波書店 p.26 (1977).
- 5) Bearman, P. W.; Corrections for the Effect of Ambient Temperature Drift on Hot-Wire Measurements in Incompressible Flow, DISA Information No. 11, pp. 25-30.
- 6) 種子田，深町：風洞測定部に発生する渦，九大応力研報告，第 36 号，pp.39-48 (1972).
- 7) Klebanoff, P. S.; Characteristics of Turbulence in a Boundary Layer with Zero Pressure Gradient, NACATN 3178, (1954).
- 8) 高木正平：定電流型低雑音熱線風速計の試作研究，NAL 報告 TR- 697 (1982).

航空宇宙技術研究所資料472号

昭和57年9月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(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
