

粗面乱流境界層用風洞の製作および性能

影山芳郎*・大坂英雄*・山田英巳*・平野孝典**

Wind Tunnel Design and Performance for Rough Wall
Turbulent Boundary Layer

Yoshiro KAGEYAMA, Hideo OSAKA, Hidemi YAMADA
and Takanori HIRANO

Abstract

A New Wind tunnel for rough wall turbulent boundary layer researches was designed and examined. The design or choice of the contraction, diffuser, honeycombs and screens is described in detail because of the strong influence of these components on tunnel performance. Measurements of mean velocity, wall shear stress, turbulence intensity and Reynolds stress are also described.

From the experimental results, it may be right to consider that this tunnel has an extensive usefulness for experimental researches for rough wall turbulent boundary layers.

1. まえがき

粗面乱流境界層に関する研究は、工学および工業上極めて重要な問題であり、境界層問題の大部分を占めた、いわば流体力学に関する諸問題のうち、最も基本的なものの一つである。

粗面乱流境界層は滑面のそれとは異なり、粗さ要素によって壁面近傍における混合距離あるいは渦動粘性係数が変化するため、普遍的壁法則の定数項が一定とならず、粗さパラメータにより変化することが知られている。また乱流問題がレイノルズ数のみに依存（極限では独立）することから、外力としての粗さによる効果も含めて考慮する必要がある点に滑面との大きな差がある。これを解明するためには、他の外的条件、例えば自由乱れが小さく wall turbulence と明白に区別がつくこと、十分大きなレイノルズ数であること、熱伝達を考慮しなくてよいことなどの点について、通常の程度かあるいはそれ以上に質の良い流れ場を作成して研究を遂行する必要がある。

これらのことを考慮して、著者らは粗面乱流境界層用風洞を設計、製作した。風洞はファンローダウン

型とし、測定部は十分大きいレイノルズ数 ($U \cdot x / \nu \sim 5 \times 10^6$ 程度) を得るために長さ 4 m とした。次に自由乱れを特に小さくするために、集合洞に 4 枚の金網と整流格子を挿入し、流れの均一性を保持しつつ、乱れ強さを小さくするよう考慮した。また測定部の側壁は十分大きくしてあり、急な逆圧力勾配の極めて大きい剝離を伴う流れ場の作成も可能である。ここでは、この風洞の設計要領、製作過程ならびに風洞特性について報告する。

記号

X : 平板前縁からの流れ方向距離

Y : 平板から垂直方向の距離

Z : X, Y に垂直方向の距離

U_1 : 主流速度

U : 境界層内速度の X 方向成分

u' : X 方向の変動速度

v' : Y 方向の変動速度

w' : Z 方向の変動速度

$-\overline{u'v'}, -\overline{u'w'}$: レイノルズ応力

τ_0 : 壁面摩擦応力

δ_{995} : 境界層厚さ

δ^* : 排除厚さ $\left(\int_0^{\delta_{995}} (1 - U/U_1) dY \right)$

θ : 運動量厚さ $\left(\int_0^{\delta_{995}} U/U_1 (1 - U/U_1) dY \right)$

* 機械工学科

** 大学院機械工学専攻

- H : 形状係数 (δ^*/θ)
- G : Clauser の形状係数 ($(H-1)/H\sqrt{C_f/2}$)
- C_f : 局所摩擦抵抗係数
- ν : 空気の動粘性係数

2. 基本計画

粗面乱流境界層特性を解明する目的で、中型境界層用風洞の設計、製作を行なった。この風洞の全体図を Fig. 1 に示す。できる限り広範囲にわたって測定が可能ないように、また研究室の面積を考慮して全長 9 m 程度とし、測定部は入口断面幅 0.5 m, 高さ 0.3 m および長さ 4 m 程度とした。単位レイノルズ数 U_i/ν は最大 $1.7 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ 程度、また風速は最大 25 m/s 程度とした*。以下基本計画に従って製作された風洞について仕様を述べる。

2.1 風洞本体

風洞本体は吹流し型、全長 9 m のもので、測定部絞り部、集合洞、拡がり部、接合部、送風機および電動機より構成されている。

まず絞り部について述べる。絞り部の形状の決定条件として、

- (1) 壁面に沿う流速分布が軸方向に減速域を持たな

い。

- (2) ノズル出口の流速分布が一様である。
- (3) ノズル全長が短い。
- (4) 算出方法が比較的簡単である。

の 4 条件を満足するものとして、島のノズル解析式¹⁾を採用しノズル形状を決定した。なお解析にあたり、絞り比 4.91 : 1, 絞り部入口断面 0.9 mW × 0.9 mH, 絞り部出口断面 0.5 mW × 0.33 mH とした。採用した島の解析式は、

$$Y/b = 1/2 + 1/2\pi \{ (a/b - 1)\theta + [\sqrt{2 \cdot \sqrt{a/b + 1}} - (a/b + 1)] \sin \theta \}$$

$$X/b = 1/2\pi \{ (a/b + 1) \tanh^{-1}(\cos \theta) - 1/2(a/b - 1) \ln 2(1 - \cos 2\theta) + [\sqrt{2 \cdot \sqrt{a/b + 1}} - (a/b + 1)] \cos \theta \}$$

であり、本風洞の場合、

高さ方向 : $b = 330/2, a = 900/2, a/b = 11/30$

横方向 : $b = 500/2, a = 900/2, a/b = 5/9$

である。なお a は絞り部入口断面の高さであり、 b は絞り部出口断面の高さである。この計算結果から、絞り部入口断面 0.9 mW × 0.9 mH, 絞り部出口断面 0.5 mW × 0.33 mH, 絞り比 4.91 : 1, 長さ 1.04 m とし、厚さ 3.2 mm の鋼板で製作した。なお、詳細な断面形状

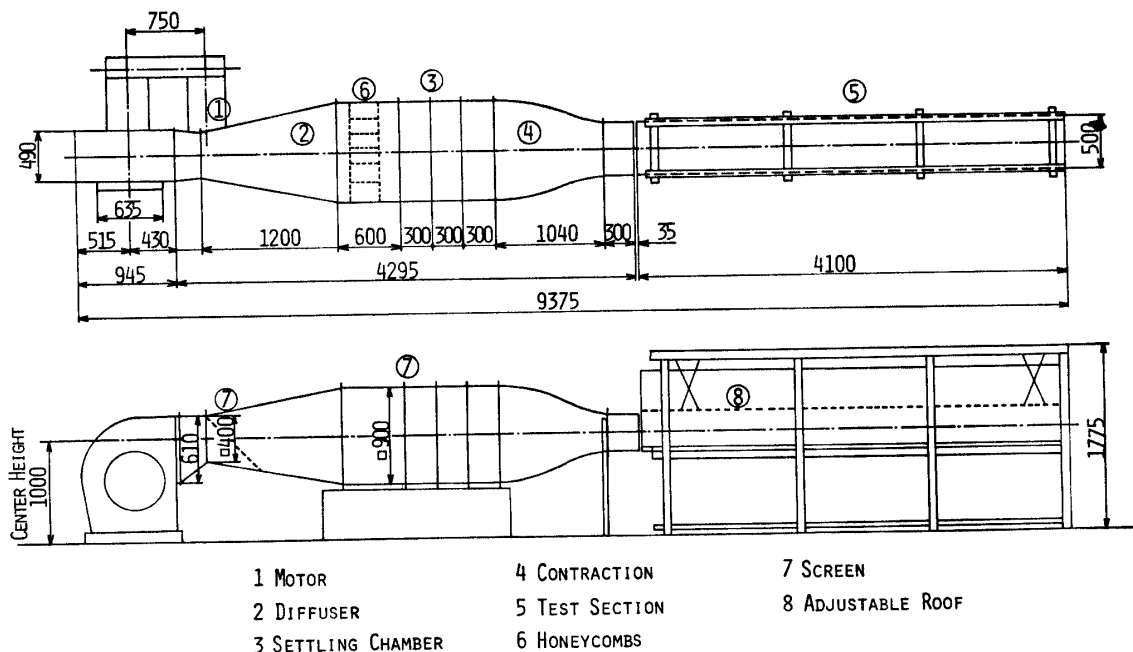


Fig. 1 Rough wall turbulent boundary layer wind tunnel

* 基本特性の測定の後、改良が施され、単位レイノルズ数が約 2.4×10^6 程度、風速は最大 35 m/s 程度に容量の増大化が図られた。

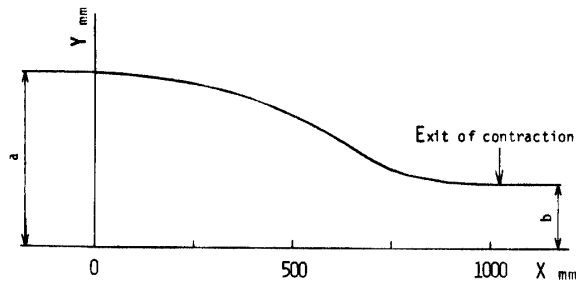


Table 1 Contraction and its profile

X mm	Y mm	X mm	Y mm
0	450.0	560	316.2
40	447.3	600	292.9
80	442.8	640	266.8
120	438.3	680	239.4
160	433.8	720	214.8
200	427.4	760	196.7
240	421.1	800	184.9
280	413.2	840	177.3
320	404.6	880	172.6
360	394.6	920	169.3
400	383.0	960	167.3
440	369.7	1000	166.1
480	354.4	1040	165.0
520	336.6		

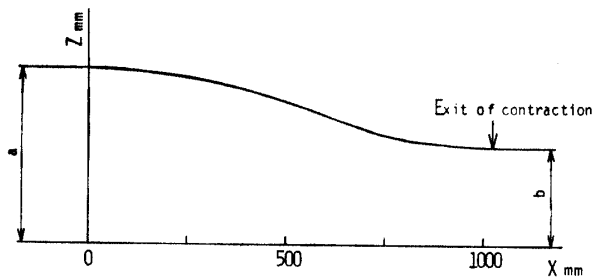


Table 2 Contraction and its profile

X mm	Z mm	X mm	Z mm
0	450.0	560	347.2
40	449.0	600	331.9
80	447.9	640	316.3
120	443.9	680	301.9
160	439.3	720	288.7
200	434.6	760	278.2
240	428.8	800	270.2
280	422.4	840	264.2
320	415.2	880	259.7
360	406.9	920	256.3
400	397.4	960	253.7
440	386.8	1000	251.8
480	374.8	1040	250.0
520	361.6		

寸法を Table. 1 および Table. 2 に示す。

集合胴は厚さ 20 mm の合板製で、0.9 mW×0.9 mH×0.6 mL の合板枠 1 組と、0.9 mW×0.9 mH×0.3 mL

の合板枠 3 組で構成されている。なお、金網は古屋ら²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾の実験データによる最適開口比 0.57 に基づいて市販の金網 13 メッシュ (開口比 0.62) を使用し、集合胴接合部に 4 枚設置してあり、取り換えが可能になっている。また整流格子は集合胴の最上流部に設置されており、これは厚さ 0.4 mm の亜鉛びき鉄板で 150 mmW×150 mmH×300 mmL の正方形断面格子を作り、さらにその格子の中に厚さ 0.4 mm のケント紙で 30 mmW×30 mmH×240 mmL の格子を組み込んだものである。

拡がり部は厚さ 20 mm の合板製で、拡がり部入口断面は 0.4 mW×0.4 mH であり、出口断面は集合胴最上流断面と一致させるために同一寸法 0.9 mW×0.9 mH とした。また拡がり部長さを 1.2 m としたので、拡がり角は片側 11.77 度となった。

接合部は厚さ 20 mm の合板製で、0.49 mW×0.59 mH の矩形断面より 0.4 mW×0.4 mH の正方形断面へと変化している。長さは 0.255 m とした。内壁は滑らかで、空気の洩れがないように仕上げられている。

送風機は測定部の風速が 20 m/s 程度出すことのできる容量のものとして、朝日工機製作所 (株) 製のものを使用した。その仕用を述べると、型式型番 SC4, 吐出方向 AS-1, 風量 345 m³/min, 静風圧 40 mmAg, 回転数 715 r.p.m., 電動機出力 7.5 kw である。

モーターは風速を任意に変えられる点を考慮して、明電舎 (株) 製の SF モーターを使用した。その仕様は、出力 5.5 kw, 回転数 2250 r.p.m., 電圧 AC220V, 電流 19.9A である。

2.2 測定部

測定部形状を Fig. 2 に示す。測定部は大気開放型で、測定部入口は 0.5 mW×0.3 mH の矩形断面、支柱高さ 1.7 m, 幅 0.5 m, 最大測定長 4 m を有し、支柱最上部には移動装置用レールが流れ方向に設置されている。

上壁面は可視化観察が可能ないように厚さ 10 mm の透明アクリル樹脂板で作製され、500 mmW×190 mmL の矩形板 20 枚から構成されている。その上流側は流れに対する影響を考慮してシャープエッジ形状に仕上げられている。また、圧力勾配を自由に変わることが可能ないように各屋根板は独立に可変できる可撓屋根とした。各屋根板の間を測定用スリットとして利用している。

測定平板はできる限り滑らかである必要から厚さ 5 mm, 幅 0.5 m, 長さ 4.1 m のアルミニウム平板とした。前縁は流れが滑らかに流入するように 30 度のシャープエッジに成形されている。また絞り部および平行部か

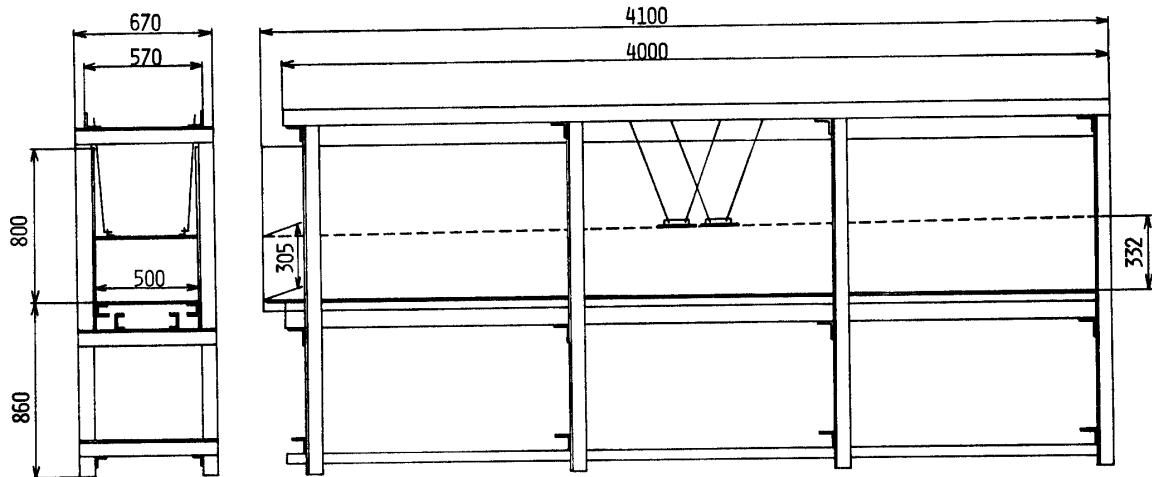


Fig. 2 Working section

らの境界層の流入を除くために、平板前縁部は平行部出口下面より約 30 mm 上側に、そして圧力を大気圧に解放することで静圧の一定化を促進するために平行部出口よりも 35 mm 下流に配置されている。この部分の詳細を Fig. 3 に示す。平板には $Z = -125, 25, 175$ mm の 3 断面内、 $X = 300 \sim 3700$ mm の 33 箇所に $\phi 0.8$ の静圧孔が設けられている。

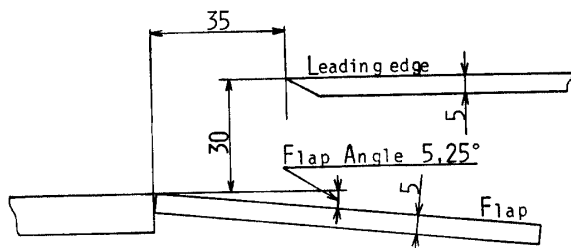


Fig. 3 Leading edge

側壁は、可視化観察が可能となるように厚さ 10 mm の透明アクリル樹脂板で作製されており、測定作業の簡単化のため Z の負側の側壁面を開き窓形式にし自由に開閉できるようになっている。また Z の正側の側壁面には、 $y = 65, 165, 265$ mm の 3 断面内、 $X = 300 \sim 3700$ mm の 33 箇所の位置に $\phi 0.8$ の静圧孔が設けられている。

3. 風洞特性

3.1 実験方法および条件

絞り部出口断面内速度分布については断面内の 204 点を、またフラップ効果については $Z = 0$ mm 断面をピトー管で測定した。測定平板および側壁上の静圧分布は前述した静圧孔より測定した。ここで流れ方向の

静圧分布を $\pm 0.5\%$ 以内で一定とした後、以下の測定を行なった。

まず横方向速度分布および壁面摩擦応力の測定は、 $Z = 0 \sim \pm 180$ mm の範囲を $X = 268, 1060, 2060$ および 3065 mm の各断面について、全圧管およびプレストン管を用いて行なった。次に Y 方向の速度分布については、 $Z = 0$ mm 断面で $X = 268, 1060, 2060$ および 3065 mm の 4 断面について調べた。ただし本文中では代表断面として $X = 2060$ mm 断面についてのみ述べる。乱れ強さ成分およびレイノルズ応力は、 X 型熱線プローブによる定温度型熱線風速計を用いて測定した。

以上の測定は単位レイノルズ数 $U_1/\nu = 1 \times 10^6$ 一定のもとで行ない、境界層特性はトリッピングワイヤーを設置していない場合およびトリッピングワイヤーとして $\phi 3, \phi 5$ および $\phi 6.85$ の丸棒を設置した場合について調べられた。

3.2 絞り部出口特性

金網（開口比 $\beta = 0.62$ ）を送風機出口に 1 枚、集合胴に 4 枚設置した場合を条件 1 とする。Fig. 4 にこの場合の出口特性を示す。大略、上半面が速く下半面が遅い傾向にあり、また $\pm 1\%$ 以上の速度変動がある。これを是正するために、条件 1 に加えて、拡がり部に金網を 45° 傾けて設置した。この場合を条件 2 とする。Fig. 5 はこの結果を示したものである。外縁付近に少し速度の速い傾向が見られるが、速度分布の空間的変動はほぼ全範囲にわたり $0 \sim \pm 0.5\%$ 以内の変動におさまっており一様であると考えてよい。また I 型プローブを用いた熱線流速計の測定による乱れ強さは 0.3% 以内で乱れ強さの小さい質の良い一様流が得られている。

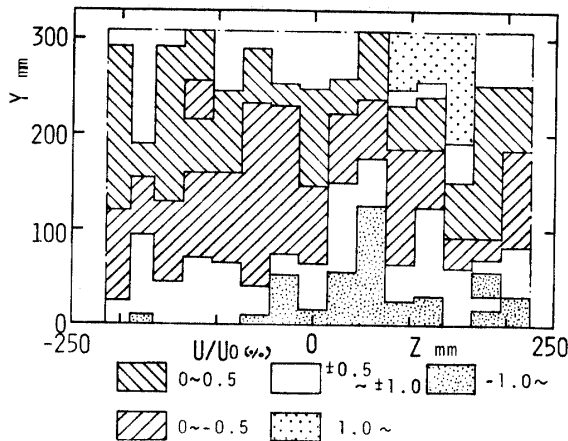


Fig. 4 Velocity distribution at contraction exit

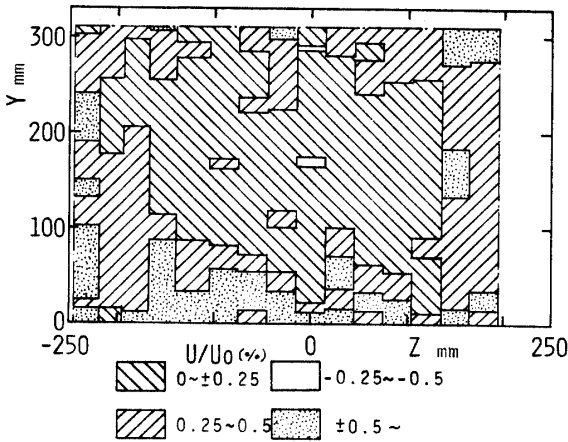


Fig. 5 Velocity distribution at contraction exit

3.3 フラップ効果

測定部を絞り部出口より約 35 mm 下流に設置し、零圧力勾配に屋根を調整後、絞り部出口において $Z=0, \pm 150$ mm の 3 断面について Y 方向速度分布を測定した。これを Fig. 6 に示す。測定平板前縁付近の流れが滑らかに流入しないことによる影響で $y=0\sim 110$ mm の範囲にわたって速度損失が生じている。その最大値は $y=30$ mm 付近でほぼ 3% となっている。これを是正するために、絞り部出口平行部下面に長さ

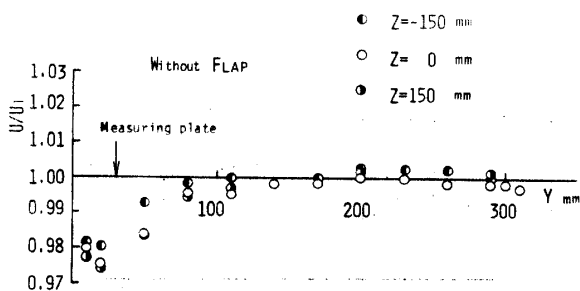


Fig. 6 Flap effect

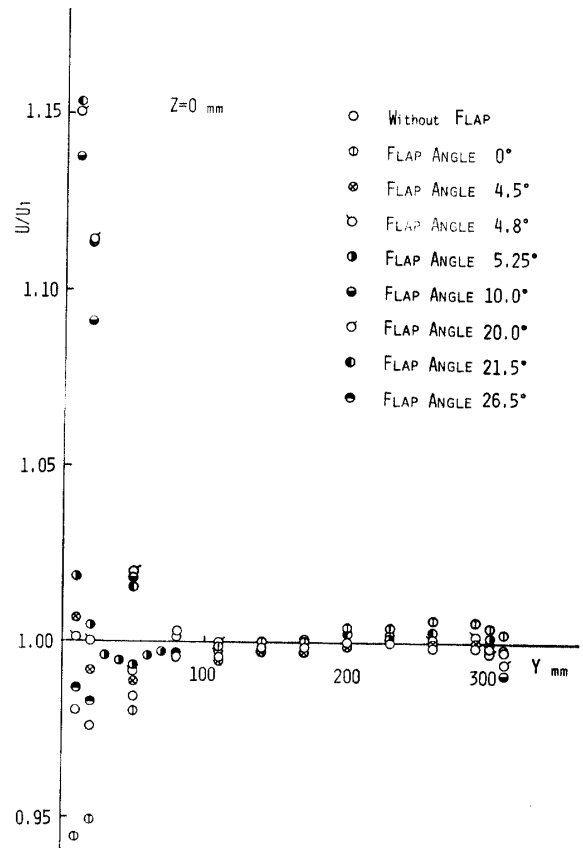


Fig. 7 Flap effect

100 mm のフラップを取り付けた。Fig. 7 にフラップ角度 8 種類およびフラップなしの場合における Y 方向速度分布を示す。フラップ角 26.5° では最大速度損失は $Y=30$ mm 付近で約 2% である。次にフラップ角 21.5° および 20° では、逆に $Y=10$ mm で 17% 程度中心速度より速くなっている。これは気流がフラップ上流端で剝離した後方で再付着するために流路が狭められたためであると考えられる。なおこの場合には、図には示していないが、気流がフラップに付着したり離れたりする不安定な状態にあることが予想される。次にフラップ角度を 10° としたが、 21.5° および 20° と同様の傾向を示した。フラップ角 0° の場合には、 $Y=10$ および 80 mm の間で大きな速度勾配が認められ、また $Y=30$ mm 付近に損失のピークの無い傾向が見られた。以上より適当なフラップ角度が 2° と 10° の間にあると考えて、フラップ角 4.5° および 4.8° について測定した。この場合には両者とも同じ傾向を示し、最大損失位置が $Y=50$ mm 付近に移動している。これはフラップによる効果と測定平板前縁の流れに抗する効果が合成された結果であると考えられる。次にフラップ角 5.25° について同様の測定をした結果、 $Y=50$ mm 付近で 0.7% 程度の速度損失があったが、この

付近の速度損失の山は小さく、また $Y=100\text{ mm}$ 以上ではほとんど中心速度と一致している。

以上の測定より、前縁高さ付近の速度分布、中心付近の速度分布の一様性、フラップに付着する気流の安定性などを考慮して、フラップ角度 5.25° に決定し以後の実験を行なった。

これらの測定、種々の操作の結果、本風洞は速度分布が一様な、かつ乱れの小さい良好な特性を有することが確認され、境界層用風洞として十分使用可能であることがわかった。

4. 零圧力勾配乱流境界層特性

最も基本的でかつ測定データの豊富な例である圧力勾配のない平板境界層の特性が、従来得られている結果とほぼ同様の結果を示すかどうかについて調べた。

4.1 横方向特性

$X=268, 1060, 2060$ および 3065 mm 断面の境界層内横方向速度分布を Fig. 8~Fig. 11 に示す。どの断面についても境界層外端ではほぼ一様な分布を呈して

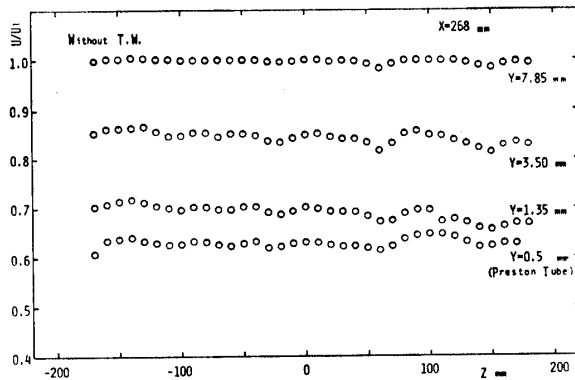


Fig. 8 Spanwise velocity distribution in boundary layer

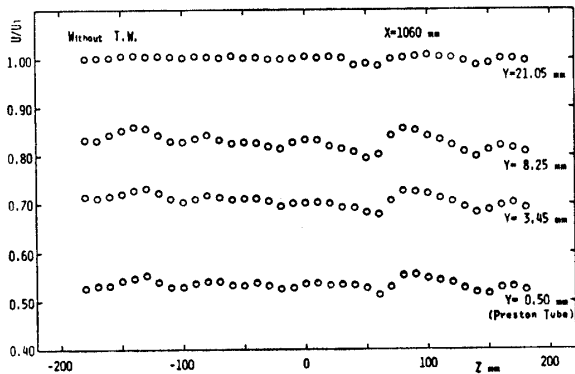


Fig. 9 Spanwise velocity distribution in boundary layer

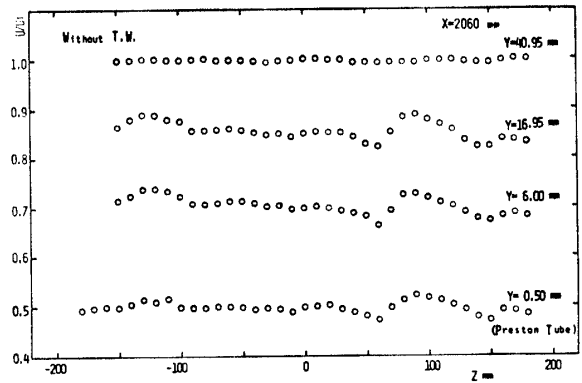


Fig. 10 Spanwise velocity distribution in boundary layer

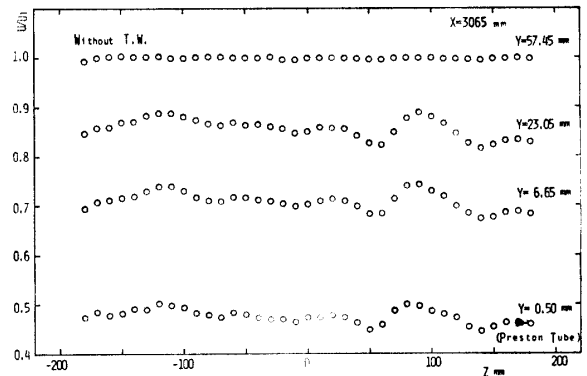


Fig. 11 Spanwise velocity distribution in boundary layer

いるが、境界層内では大きな横方向変動が見られる。この横方向変動の波長はほぼ 120 mm 程度で、山の位置は $Z = -120, 90\text{ mm}$ 、および谷の位置は $Z = -90, 60\text{ mm}$ の位置に現われている。また、上流で生じた変動の傾向が下流に安定して維持されていることがわかる。その大きさは、境界層の内層に向かうにつれ、また下流に向かうほど増加する傾向が見られる。

次に上述した4断面における壁面摩擦応力の横方向分布を Fig. 12 に示す。 τ_0 の値自身は下流に向かうほど小さくなっているが、その横方向変動は速度分布と同じ傾向を示している。

次に $X=2050\text{ mm}$ 断面における乱れ強さおよびレ

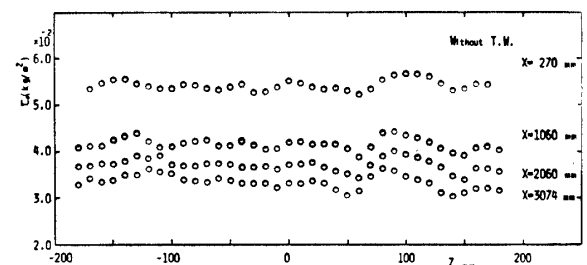


Fig. 12 Spanwise distribution of wall shear stress

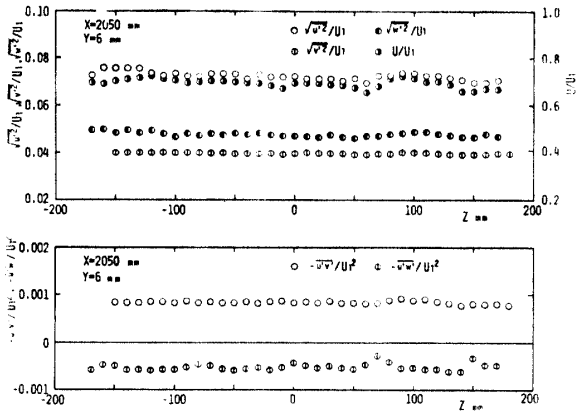


Fig. 13 Spanwise distribution of turbulence intensity and Reynolds stress

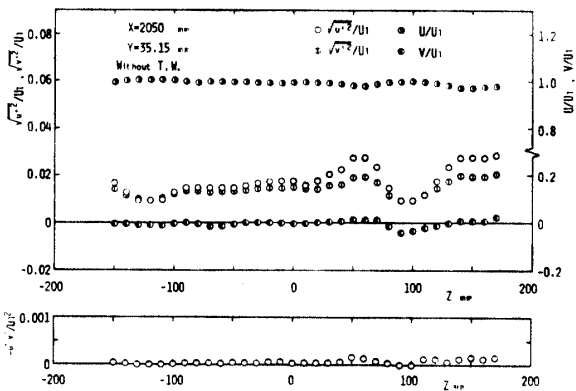


Fig. 14 Spanwise distribution of turbulence intensity and Reynolds stress

イノルズ応力の横方向分布を $Y=6\text{ mm}$ および $Y=35.15\text{ mm}$ について各々 Fig. 13 および Fig. 14 に示す。 $Y=6\text{ mm}$ では $\sqrt{u'^2}/U_1$ は横方向速度変動に対応した変動を、また $\sqrt{v'^2}/U_1$, $\sqrt{w'^2}/U_1$ および $-u'v'/U_1^2$ についても Z の正側でその変動の傾向が見られる。 $Y=35.15\text{ mm}$ では $\sqrt{u'^2}/U_1$ と $\sqrt{v'^2}/U_1$ に大きな横方向変動が現われており、速度変動の山と谷の位置に逆対応して谷と山が見られ、両者には負の相関があるように思われる。またレイノルズ応力 $-u'v'/U_1^2$ についても乱れ強さと同じ分布傾向を示している。

以上のように、主流がほぼ一様であるにも拘らず、境界層内に横方向変動が生じた原因として、(1) 逆圧力勾配がある場合、(2) ゲルトラー渦が存在する場合、(3) 遷移の影響、(4) 主流の不安定性、などが考えられる。これらの原因の中、本実験では圧力勾配を零に調整したので(1)の原因は考えられない。そこで(2)および(3)を検討するためにトリッピングワイヤーを設置してトリッピングワイヤーを設置しない場合と同様の測定を行なった結果を Fig. 15~Fig. 17 に

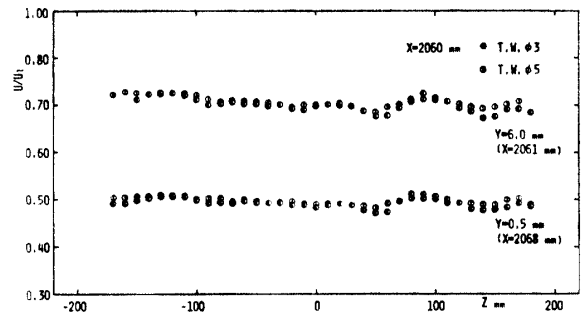


Fig. 15 Spanwise velocity distribution in boundary layer

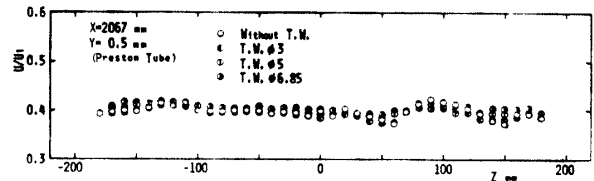


Fig. 16 Spanwise velocity distribution in boundary layer

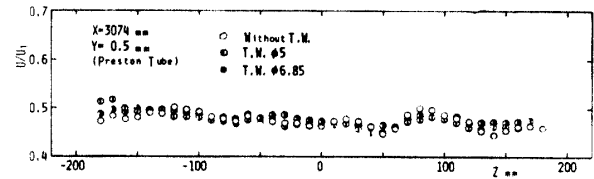


Fig. 17 Spanwise velocity distribution in boundary layer

示す。 Fig. 15 は $X=2060\text{ mm}$ 断面内 $Y=0.5$ および 6 mm について横方向速度分布を示したものの、また Fig. 16, Fig. 17 は $Y=0.5\text{ mm}$ における横方向速度分布を各々 $X=2067\text{ mm}$ および $X=3074\text{ mm}$ 断面について示したものである。これらの結果より、横方向変動はトリッピングワイヤーのない場合と比較して、トリッピングワイヤーの径が大きくなるほど小さくなっているが、依然として残っていることがわかる。従って(2)および(3)の原因ではないと予想される。

次に絞り部側壁からのゲルトラー渦の流入を考慮して、測定部側壁に $\phi 5$ のトリッピングワイヤーを設置して同様の測定を行なった結果、トリッピングワイヤーなしの場合と全く同じ傾向を示した。

以上の結果から、境界層内横方向変動は主流の不安定性から生じているものと考えるのが適当である。

4.2 中心特性

$Z=0\text{ mm}$ 断面の Y 方向速度分布を流れ方向に測定した結果、 $X=1075\text{ mm}$ 断面以降では $H=1.4$ となり十分発達した乱流境界層の分布を呈していると考えら

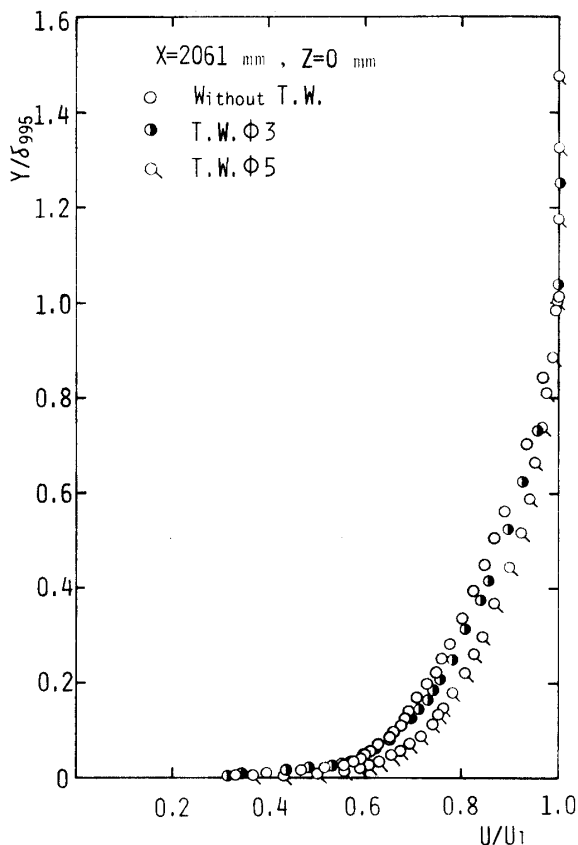


Fig. 18 Velocity distribution in boundary layer

れるので、代表断面として $X=2060$ mm 断面について述べる。

Fig. 18 に、境界層内速度分布を示す。トリッピングワイヤーなしおよび $\phi 3$ の場合には $1/6$ 乗則、 $\phi 5$ の場合には $1/7$ 乗則と同程度の分布を示している。またプレストン管による方法、Ludwig-Tillmann 法⁶⁾ および Clauser-Chart 法⁷⁾⁸⁾ の3種により壁法則表示した結果、どの場合も壁法則によく従っていることがわかった。

次に、乱れ強さおよびレイノルズ応力分布を、各々

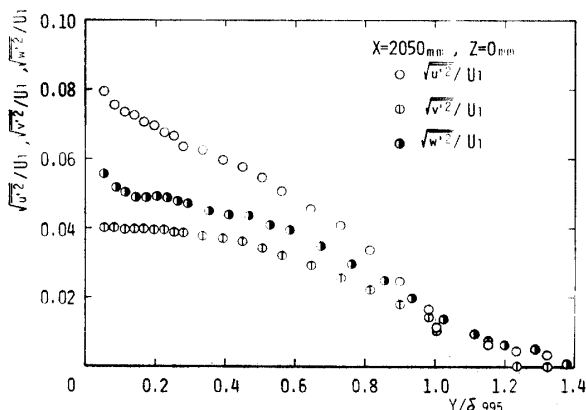


Fig. 19 Turbulence intensity distribution

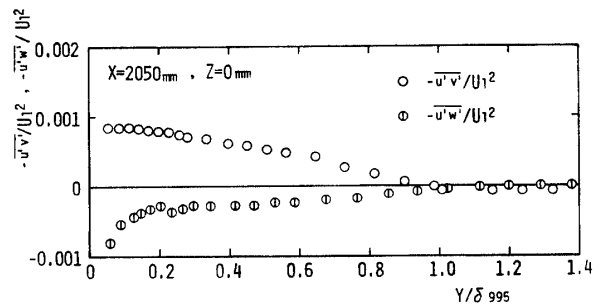


Fig. 20 Reynolds stress distribution

Fig. 19 と Fig. 20 に示す。Klebanoff の測定値と比較すると、どの分布もよく似た傾向を示している。ただし、 $\sqrt{u'^2}/U_1$ の値は全領域にわたって少し大きく、 $\sqrt{v'^2}/U_1$ と $\sqrt{w'^2}/U_1$ は $Y/\delta_{995}=0.5$ 付近以上から大きめの値をとるようである。 $-\overline{u'v'}/U_1^2$ の値は $Y/\delta_{995}=0.6$ 付近以下では小さめとなっている。また $Y/\delta_{995}=1.0$ 以上ではほぼ零となっており、剪断乱流となっていないことがわかる。

これらの結果から、従来得られている零圧力勾配下の平板境界層特性が、本実験の場合も得られていると考えられる。

5. あとがき

粗面乱流境界層の研究に主眼を置き設計、製作された低乱流境界層用風洞についてこれまで行なった特性試験の結果、本風洞は十分広範囲な実験資料を提供することが可能であるという結論に達した。主なものを掲げると、風洞性能に関しては次の結果が得られた。

- イ) 絞り部出口特性は、平均速度については $\pm 0.5\%$ 以内で一様、また乱れ強さは 0.3% 以内で十分小さく良好である。
- ロ) 単位レイノルズ数については最大 $1.67 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$ (流速 $0 \sim 25 \text{ m/s}$) まで可能である。

次に零圧力勾配下の平板乱流境界層の実験に関しては次の結果が得られた。

- イ) 境界層内横方向速度分布において、擬周期的横方向変動が現われており、下流方向に安定して維持されている。この横方向変動は主流の不安定性によるものと考えられる。
- ロ) $X=1050$ mm 以降では十分発達した通常の乱流境界層が得られている。

終わりに、本研究の遂行にあたり、適切なる助言を与えられた岐阜高専の古屋善正校長ならびに名古屋大学、中村育雄助教授に感謝の意を表します。また装置

作成, 測定およびデータ整理に当って終始御協力を頂きました昭和53年度卒研究生の三好俊二君ならびに吉武和博君にも深謝致します。

参 考 文 献

1) 島 : 東北大速研報告, **17**, 164 (1961/1962)

2) 古屋, 大坂 : 機論, **40**, 3045 (1974)

3) 古屋ら : 機論, **40**, 3054 (1974)

4) 古屋ら : 機論, **41**, 3497 (1975)

5) 大坂ら : 機論, **42**, 2081 (1976)

6) Ludwig-Tillmann : NACA T.M., No. 1285 (1950)

7) Sarnecki, A. J. : 例えば Thompson, B. G. J., Rep. & Mem., ARC, No. 3463 (1965)

8) Clauser, F.H. : J. Aeron. Sci., **21**, 91 (1954)

(昭和54年4月16日 受理)