

東 北 大 学

高速力学研究所報告

第 54 卷 第 450 号

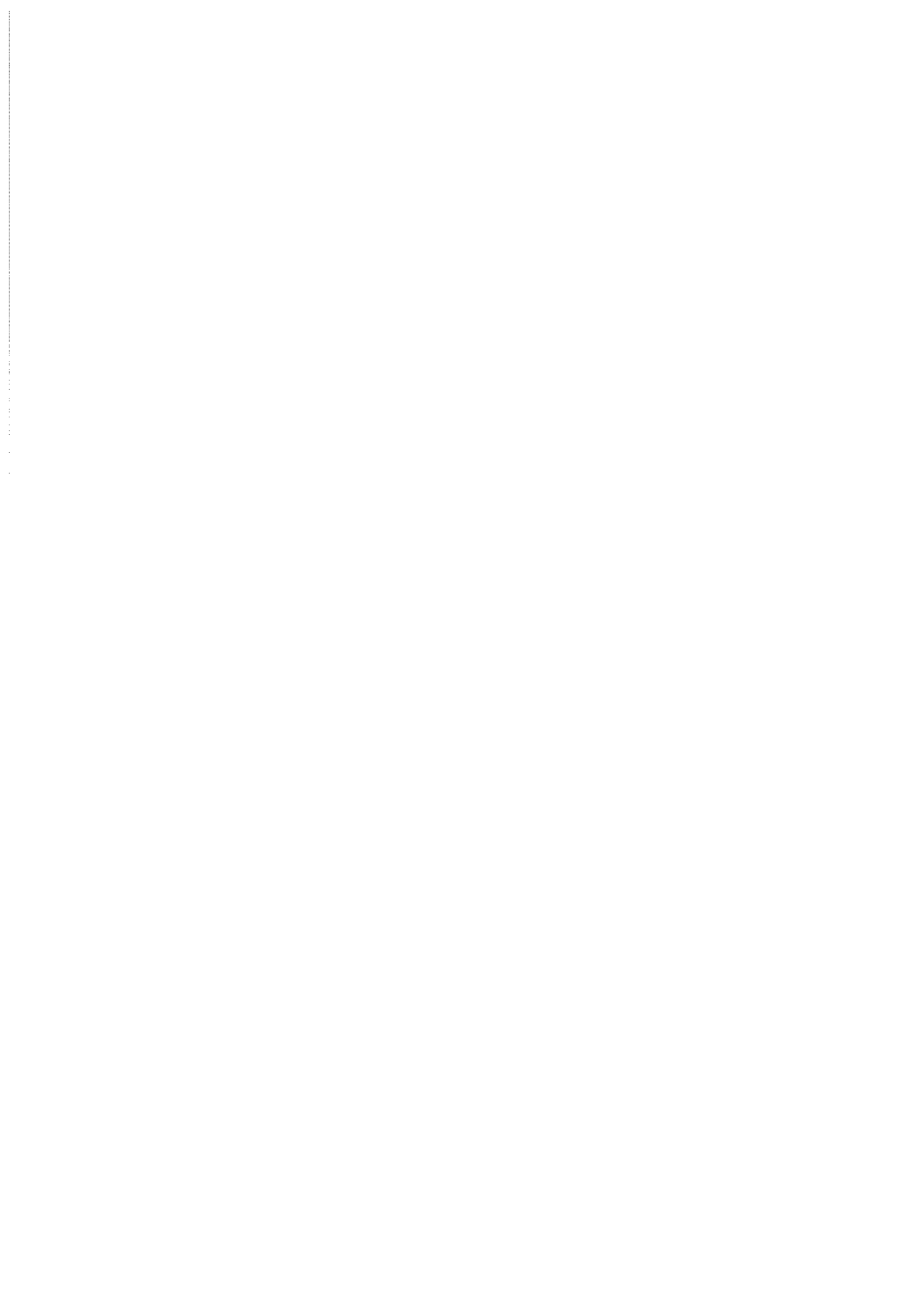
昭 和 60 年

東北大学高速力学研究所附属気流計測研究施設低乱熱伝達風洞の
各部性能について

.....伊藤英覚, 小林陵二, 大場利三郎, 谷 順二
増田英俊, 小浜泰昭, 今井 清

The Memoirs
of the
Institute of High Speed Mechanics,
Tōhoku University,
Sendai, Japan

(Mem. Inst. High Speed Mech., Tōhoku Univ.)
Vol. 54 (1985), No. 450



東北大学高速力学研究所附属気流計測研究 施設低乱熱伝達風洞の各部性能について¹

伊 藤 英 覚² 小 林 陵 二³
大 場 利 三 郎⁴ 谷 順 二⁵
増 田 英 俊⁶ 小 浜 泰 昭⁷
今 井 清⁸

摘 要

低乱風洞の設計方法の妥当性を検討し、あわせて設計資料を提供する目的で、高速力学研究所附属気流計測研究施設の低乱熱伝達風洞について、整流部、ディフューザ部、偏流部案内羽根列下流など風洞の代表的各断面における風速分布および乱れ強さ分布の測定を、測定部が密閉型の場合について実施し、風洞内の流動状況を解明した。このような測定は著者らの知見する範囲内で従来ほとんど実施されていないので、本実験結果は今後の風洞設計に貴重な資料を提供するものと考えられる。

1. 緒 言

東北大学高速力学研究所附属気流計測研究施設の低乱熱伝達風洞〔1〕⁹は、学内共同利用の大型低乱風洞設備として、各研究者によって主として流体工学・空力弾性学・熱流力学・海洋物理学等の各分野ならびにこれに関連する境界領域の研究・実験に現在盛んに使用されているが、その間隙を縫って、風洞各部構成要素の流体力学的性能を実験的に解明する目的で、風洞の代表的各断面における風速分布および乱れ強さ分布の測定を行った。風洞各断面の風速分布の測定は、1948年にRAE 4ft × 3ft 低乱風洞についてなされた記録〔2〕が存在するが、現在の低乱風洞の設計方法〔1, 3, 4〕の立場から見れば、風洞の形状が既に古く、しかも構成要素各部の乱れ強さ分布の測

-
1. 昭和60年3月31日、日本機械学会第62期通常総会講演会において講演。原稿受付 昭和60年4月30日。
 2. 東北大学教授、高速力学研究所勤務。
 3. 東北大学教授、高速力学研究所勤務(現在 工学部勤務)。
 - 4,5. 東北大学教授、高速力学研究所勤務。
 - 6,7. 東北大学助教授、高速力学研究所勤務。
 8. 東北大学助手、高速力学研究所勤務。
 9. 括弧内の数字は末尾の文献の番号を示す。

定は全くなされていない。一方、他所の低速風洞においては、かような実験的研究は著者らの知見する範囲内でほとんどなされていないようである。

本低乱熱伝達風洞の設計ならびに風洞性能の測定結果については既に報告〔1〕してあるが、さらに一步進めて、風洞構成要素各部における実際の流れ状況を解明することにより、本風洞の設計方法の妥当性を検討し、あわせて今後の低速風洞の設計に役立つ資料を提供することが望ましいとの見地から、附属気流計測研究施設運営委員会¹⁰(昭和 57 年 4 月から運営委員会に他部局選出の教官が加わったため、同年 6 月以降は同委員会の下部組織である高速力学研究所選出の教官のみで構成される運営委員会小委員会)は、本風洞の整流部内各断面ならびに第 1 ディフューザ、第 1 偏流部、送風機、第 2 ディフューザ、第 3 偏流部および第 4 偏流部のそれぞれの前後の計 13 個所の断面について、水平面内の風速分布および乱れ強さ分布の測定を行い、風洞内の流動状況を明らかにした。本風洞の測定部は密閉・開放両型式に交換可能であるが、実験は測定部が密閉型の場合について実施した。その理由は、測定部が開放型の場合には、自由噴流の境界面に発生する乱れが測定部中心まで及ぶため、測定部に十分な低乱流を実現し得ない〔1〕ことが自明であり、本風洞の基本設計が密閉型測定部の場合を対象としてなされているからである。

実験結果より、整流部における広角度ディフューザ、ハニカムおよび整流部金網の実際の作動状況が解明されたほか、送風機ハブの後流は第 3、第 4 偏流部を通過して広角度ディフューザ入口まで達し、この間に送風機で発生した強い乱れは徐々に減衰すること、および送風機の存在のため第 2 ディフューザ内の速度分布と乱れ強さ分布は第 1 ディフューザ内のそれとは全く相違したものとなること、ならびに偏流部案内羽根列の後流の及ぶ範囲などが明らかにされた。これらの実験結果は、今後の低速風洞の設計に貴重な資料を提供するばかりでなく、ウォーター・タンネルをはじめ各種流体機器の設計にも、有用な参考資料を提供するものと予想される。

2. 主 な 記 号

- A : 流路断面積
- c : 案内羽根の弦長
- D : 流路対辺距離
- K : 金網の抵抗係数

-
10. 委員長 伊藤英覚
 委 員 大場利三郎(昭和 58 年 4 月～昭和 60 年 3 月)
 “ 小林陵二
 “ 神山新一(昭和 56 年 6 月～昭和 58 年 3 月)
 “ 橋本弘之(昭和 54 年 5 月～昭和 56 年 5 月)
 “ 谷 順二
 “ 増田英俊
 “ 小浜泰昭(昭和 56 年 4 月～)
 以上、他部局選出の教官は記載から除く。

- l_w : 案内羽根後流の存続距離
 N : 送風機回転数
 p : 圧力
 P_M : 送風機入力
 Q : 風量
 Re_0^* : レイノルズ数, $U_0 D / \nu$
 u : 境界層内の時間平均速度
 u', v', w' : 変動速度の x, y, z 成分の瞬時値
 U, V, W : x, y, z 方向の時間平均速度成分
 U_m : 断面の平均風速
 U_0 : 測定部基準位置(A断面)の風軸中心における速度
 x : 流路中心軸に沿って下流方向に測った長さ
 y : 流路中心軸に直角に水平方向に測った長さ(回流する流路の外側方向を正とする)
 z : 流路中心軸から鉛直上方に測った長さ
 β : 整流部金網の開口面積比 $[(1 - d/l)^2]$, d は針金直径, l はメッシュ間隔
 δ : 境界層の厚さ
 δ^* : 境界層の排除厚さ
 λ : パワー係数, 式(2)
 ν : 動粘度
 ρ : 密度

3. 低乱熱伝達風洞の基本設計および実験方法の概要

3.1 基本設計の概要

低乱熱伝達風洞の性能諸元を第1表に、風洞各部の主要設計項目を第2表に示す。第1図は風洞平面図で、風洞の断面形は第2偏流部の若干上流から送風機出口に至る区間は円形であるが、他の断面はいずれも正八角形である。

低乱熱伝達風洞の基本設計の詳細は既報[1]のとおりである。単路回流型風洞の密閉型測定部に低乱流かつ一様な風速分布を実現するため、収縮ノズル、ディフューザ、偏流部など風洞内の各部で流れのはく離が生じないように流路を流体力学的に好適に設計すること、整流部にハニカムのほか目の細かい金網若干枚を設けて気流の乱れを十分に減衰すること、収縮ノズルの面積比を大きく選ぶことなどが考慮されている。

まず整流部のハニカムについては、第2表に示す寸法のアルミニウム・ハニカムを使用している。入手し得るハニカムの大きさに限度のあることから、対辺距離 3.5 m の流路全面にわたって

第 1 表 低乱熱伝達風洞性能諸元

型 式	単路回流型
測定部(密閉型)	長さ 3.5 m, 対辺距離 1.01 m 正八角形断面, 風速 5~70 m/s
測定部(開放型)	長さ 1.42 m, 第 2 ノズル出口対辺距離 0.81 m 正八角形断面, 風速 5~80 m/s
送 風 機	軸流 1 段, 前置および後置静翼付, 電動機直結型, 入口直径 1.54 m, 定格風量 53 m ³ /s, 圧力差 1.18 kPa (120 mmAq)
電 動 機	サイリスタ・レオナード方式, 定格回転数 1100 rpm, 出力 95 kW
風 洞 寸 法	長さ 26 m, 幅 9.5 m, 高さ 4.3 m

第 2 表 風洞各部の主要設計項目

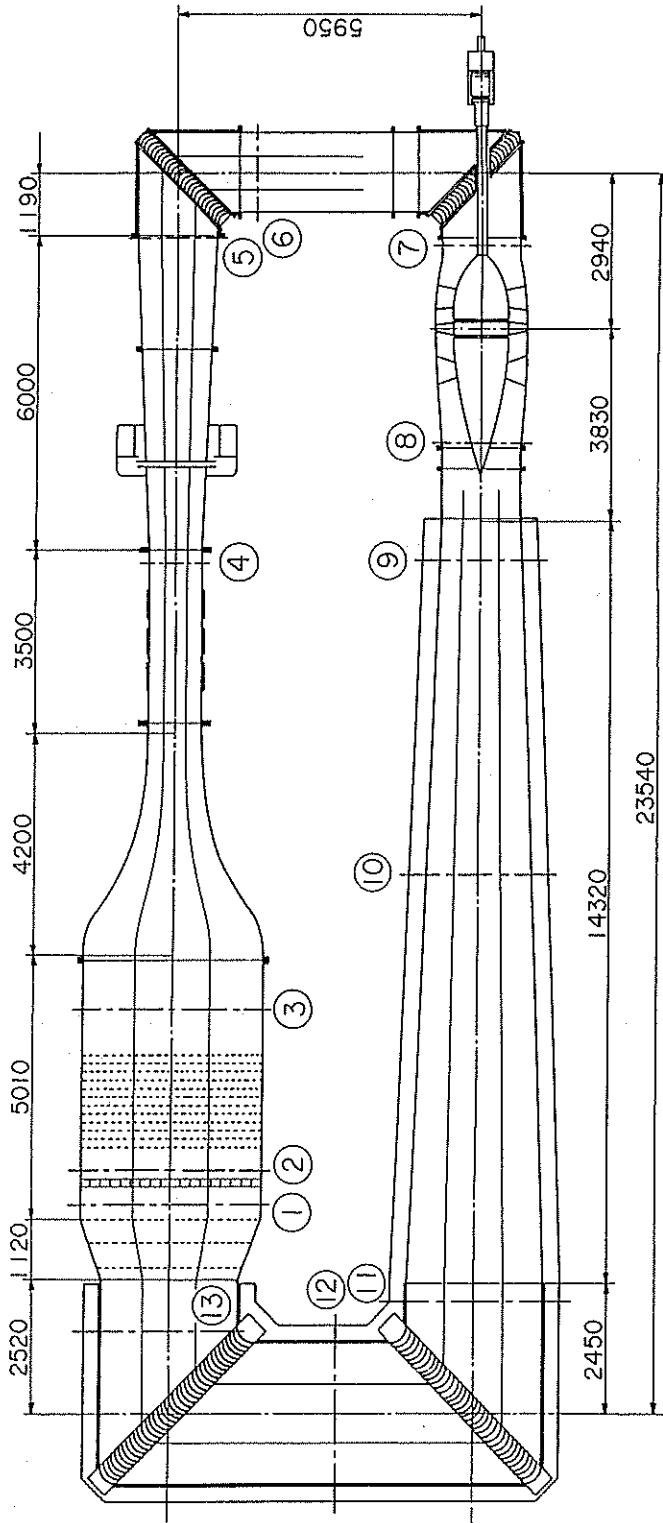
整流部金網	ステンレス鋼製織金網 12 枚, 20メッシュ, 線径 0.27 mm, 開口面積比 0.62
ハニカム	アルミニウム・ハニカム, 対辺距離 19 mm 正六角形断面, 長さ 150 mm, 肉厚 0.1 mm
ノズル絞り比	12.0
第 1 ディフューザ	面積比 2.32, 頂角 5°
第 2 ディフューザ	面積比 2.98, 頂角 4° 25'
第 1, 第 2 偏流部	羽根枚数 23 枚, 弦長 364 mm
第 3, 第 4 偏流部	羽根枚数 33 枚, 弦長 442 mm
広角度ディフューザ	面積比 1.73, 頂角 44° 46', ステンレス鋼製織金網 3 枚

一様なハニカム構造とすることは無理であり, 前縁および後縁を適当に丸めた厚さ 4.5 mm の補強板を水平方向に 1 本, 垂直方向に 5 本それぞれ等間隔に用いている。整流部金網については, 日本工業規格織金網〔5〕の中から, 金網の製作上の許容差を考慮し, 開口面積比 β が $\beta > 0.57$ の条件を常時満足し, しかも比較的抵抗係数の大きいステンレス鋼製織金網を 12 枚用いた。ハニカムの上流に用いた広角度ディフューザは, 流路断面の対辺距離を 2.66 m から 3.5 m まで拡大し, 整流部に用いたのと全く同一のステンレス鋼製織金網を流路軸に直角に等間隔に 3 枚配置してある〔1〕。上記織金網および広角度ディフューザの諸元を第 2 表に示す。

収縮ノズルの形状については, 周知のようにその入口および出口近傍に正の圧力こう配をほとんど生じないように注意深く設計する必要がある。本風洞の収縮ノズルの設計方法の詳細については既報〔6〕で述べてある。本風洞の収縮ノズルの面積比は 12.0, ノズルの軸長さは整流部対辺距離の 1.2 倍に選んである。

密閉型測定部は対辺距離 1.01 m で, 断面に二次流れの発生を防ぐため正八角形断面とし, また流路軸方向の静圧こう配を極力少なくするため, 斜面にテーパ(フィリット)を設けることにより境界層の排除厚さの補正〔1〕を行っている。したがって測定部の断面は正八角形からわずかに変形している。

ディフューザにおける流れのはく離は, 測定部の流れに激しい非定常性をもたらす〔7〕から,



第1図 低乱熱伝達風洞平面図と風速分布および乱れ強さ分布の測定断面
1～13: 測定断面

その頂角および面積比の選定〔4〕は重要である。本風洞の第1ディフューザは頂角 5° 、面積比2.32、第2ディフューザは頂角 $4^\circ 25'$ 、面積比2.98である。第1ディフューザは鋼板製であるが、第2ディフューザは屋外となるため鉄筋コンクリート製で、内面をなめらかに仕上げた後、ビニール系塗料で塗装してある。

各偏流部の案内羽根には、鋼板を円弧に曲げ、その前縁および後縁に短い直線部分を備えた薄翼〔8〕を多数使用した。すなわち、厚さ3.2 mmの鋼板を中心角 86° の円弧に曲げ、弦長の0.1倍の長さの直線部を前縁および後縁に備えた薄翼を、流入角 4° 、流出角 0° に配置した。節弦比は0.25で、羽根枚数は第1および第2偏流部においては23枚、第3および第4偏流部においては33枚である。各偏流部の内側および外側の風洞壁は、案内羽根形状に合わせて丸めてある。なお第3および第4偏流部の案内羽根列には、流路軸を含む水平面内に1本のクロス・ブレイシングが取付けてある。

送風機は単段軸流送風機で、特に低騒音の風洞用送風機として設計したもので、その諸元を第1表に示す。送風機ハブは流線形で、その全長は最大直径の3.8倍、ハブ比は0.6であり、ケーシングとハブの間の流路面積は風洞用送風機としての注意〔4〕に従っている。羽根枚数は、動翼は11枚、前置静翼は13枚、後置静翼は9枚であり、なお、流線形ハブの後端附近には4枚のステータ翼がある。直流電動機は定格出力95 kWで、回転速度制御範囲は0～1100 rpmである。

騒音対策としては、風洞内の音圧レベルを下げる目的で、下記(a)、(b)の個所を厚さ25 mmのウレタンフォームで内張りし、その表面は流路内面と面一としてある。

(a) 第2ディフューザ出口より第3、第4偏流部を経て広角度ディフューザ入口に至るコンクリート・ダクトの歩道を除く内面全体。

(b) 第1偏流部および第2偏流部の鋼板製ダクトの内面全体。

3.2 実験方法の概要

本風洞は、設計時に風洞壁の各個所にプローブ挿入口を用意し、風洞内各断面の風速分布および乱れ強さ分布の測定が可能ないようにしてある。本報においては、測定部を密閉型とし、測定部風速をほぼ60 m/sの一定値に保ち、上記の各プローブ挿入口を用いて、第1図に示す計13箇所(測定部については報告済み〔1])の各断面について、流路中心軸を含む水平面内の風速分布および乱れ強さ分布の測定を行った。ただし整流部においては空間的な制約のため、中心軸より0.11 D 上方の水平面内で実施した。ここに D は流路対辺距離である。トラバースを実施した風洞各断面の寸法を第3表に示す。なお密閉型測定部風速分布については、前報〔1〕で省略した下流側2断面の風速分布を追加し、また測定部壁面境界層の速度分布および乱れ強さ分布の測定を行って、附録に記載した。

風速分布および乱れ強さ分布の測定にはDISA 55M型熱線流速計を使用し、風洞内の気流温度の緩慢な変化が測定値に影響を及ぼさないように、I型およびX型プローブともに温度補償回路付熱線を使用した。測定に際しては、風洞側壁に左右対称に設けたプローブ挿入口に、翼形ある

第3表 トラバースを実施した風洞各断面の寸法

No.	測定場所	断面形状	対辺距離 (または直径) D, m	断面積 A, m^2	平均風速 $U_m, m/s$	距離 ¹ x, m	距離 x の 起 点	
1	広角度ディフューザ出口直後	正八角形	3.50	10.15	4.95	0.279	広角度ディフューザ出口金網	
2	ハニカム下流	〃	3.50	10.15	4.95	0.160	ハニカム出口	
3	整流部金網下流	〃	3.50	10.15	4.95	0.869	整流部最終金網	
4	第1ディフューザ入口直前 (測定部出口直前)	疑似正八角形	1.01	0.864	57.9	-0.248	測定部出口	
5	第1ディフューザ出口 (第1偏流部入口)	正八角形	1.54	1.957	25.6	-0.033	第1ディフューザ出口	
6	第1偏流部の下流	〃	1.54	1.965	25.5	1.54	案内羽根列の中心	
7	送風機入口	同心円	ケーシング	1.54	1.840	27.2	-1.56	羽根中心面
			主軸	0.170				
8	送風機出口	〃	ケーシング	1.555	1.781	28.1	2.20	羽根中心面
			ハブ	0.387				
9	第2ディフューザ入口直後	正八角形	1.58	2.08	23.8	0.57	第2ディフューザ入口	
10	第2ディフューザ中央部	〃	2.05	3.49	14.3	6.57	第2ディフューザ入口	
11	第2ディフューザ出口直後 (第3偏流部入口直後)	〃	2.66	5.86	8.55	0.33	第2ディフューザ出口	
12	第3偏流部と第4偏流部の 中間	〃	2.66	5.86	8.56	2.72	第3偏流部案内羽根列の中心	
13	第4偏流部下流(広角度ディフューザ上流)	〃	2.66	5.86	8.56	1.54	第4偏流部案内羽根列の中心	

1. 距離 x は下流方向を正, 上流方向を負とする。

いは円形断面のトラバース管を流路を貫通させて固定し, その内部にプローブ・サポートを装着した円管を通して, 風洞外部から後者を撓動させた。この際熱線プローブの受感部はトラバース管の影響が及ばないように十分前方に突出し, またトラバース管にはプローブの移動が可能なように母線に平行にスリットを設けてある。流路を横切るトラバース管については, 第2ディフューザ入口から整流部下流に至る区間は流路幅が大きく, 流速が低いため引抜鋼管を使用した, 他の風洞断面は流路幅が狭く高1.5 m程度までであり, かつ流速が比較的高いため, 翼形断面を使用した。一方, 送風機前後の風速分布および乱れ強さ分布の測定には, 先端に熱線を取付けた片持ちの翼形断面のプローブ・サポートを流路内に挿入し, ケーシングから送風機回転軸またはハブに至る区間をトラバースさせた。

測定に際しては, 熱線プローブ出力の周波数分析を随時実施し, 熱線プローブおよびトラバース管の空力振動が乱れ強さの測定値に影響を及ぼさないように特に注意した。また, 測定部壁面に成長する境界層の遷移点の位置が不規則に変動することをさける目的で, 収縮ノズル出口から測って上流側 $1.19 D$ (ここに D は測定部対辺距離) の断面に, 直径 0.75 mm のトリップワイヤが

全周にわたって取付けてある〔1〕。なお実験期間中、マンホールをはじめ風洞各部からの空気洩れを随時チェックし、空気洩れの生じていない状態で実験を実施した。

以下、実験結果を表わす各図面において、座標軸は右手系であり、 x は流路中心軸に沿って下流方向に測った長さ、 y は流路中心軸から水平方向に測った長さで、回流する流路の外側方向が正であり、 z は鉛直上方に測った長さである。なお、図面はいずれも下流側から上流側を見た図である。

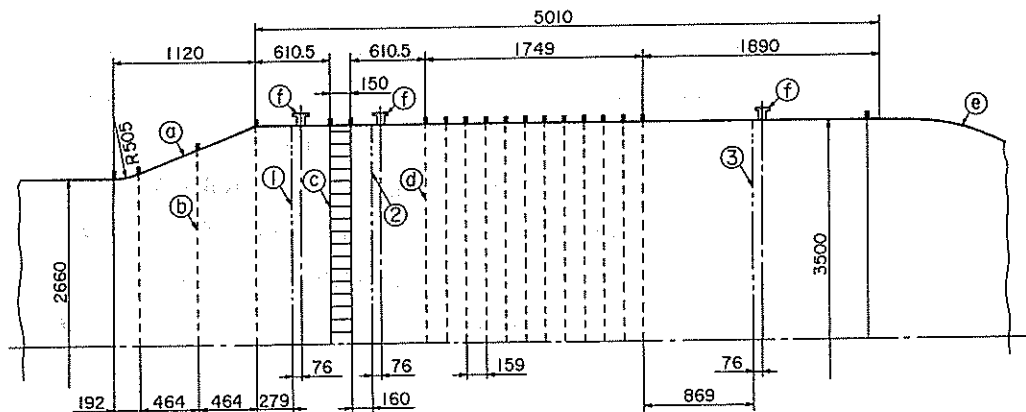
4. 整 流 部

4.1 整流部の構造

風洞各部のうちでも整流部は、風洞測定部に風速分布の一様性および低乱れ度を実現するために特に重要な機能を果たすことが期待される部分である。第1図に示すように、気流は第4偏流部を過ぎ、広角度ディフューザを通ったのち、ハニカムおよび整流部金網を経て、収縮ノズルおよび測定部に至る。第2図に、広角度ディフューザおよび整流部の構造と風速分布および乱れ強さ分布を測定したトラバース位置を示している。構造上の主要設計項目は第2表のとおりであり、その基本設計の詳細は既報〔1〕に説明している。広角度ディフューザは、風洞設計に際して収縮ノズルの面積比を大きくとり、併せて整流部の風速を低く選ぶことによって整流部金網の抵抗を減少させるために設ける必要があった。広角度ディフューザ出口における流れの状態を知ること、それがハニカムに対する流入条件となるので、極めて重要である。

4.2 実験方法

整流部における熱線プローブ受感部のトラバース位置は、第2図に番号1～3で示すように、



第2図 広角度ディフューザと整流部の構造およびトラバース位置

- | | | |
|------------------------|--------------------|--------------|
| a. 広角度ディフューザ | b. 広角度ディフューザ用金網 | c. ハニカム |
| d. 整流部金網 | e. 収縮ノズル | f. トラバース管挿入口 |
| 1. 広角度ディフューザ出口のトラバース位置 | 2. ハニカム下流のトラバース位置 | |
| | 3. 整流部金網下流のトラバース位置 | |

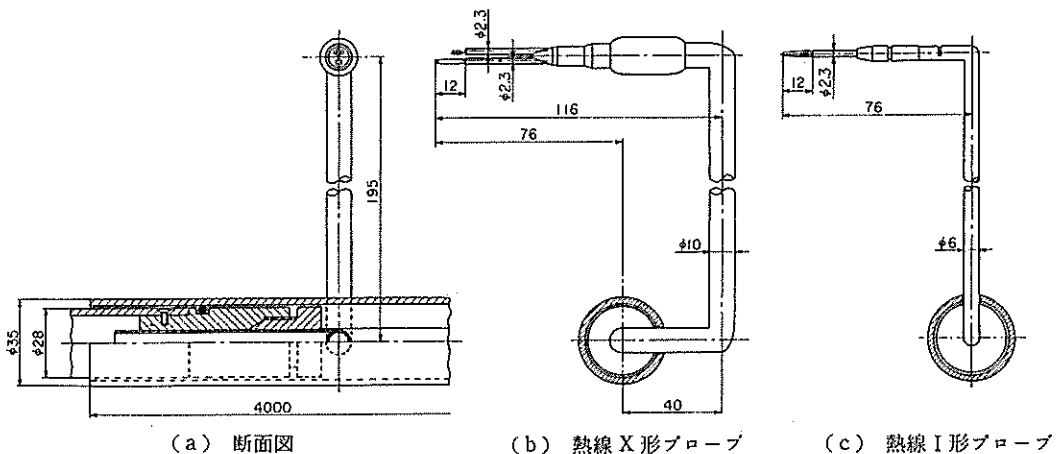
広角度ディフューザ出口の金網から下流に 279 mm の位置, ハニカム出口の下流 160 mm の位置 ($x/d = 8.4$, x はセル出口からの距離, d はセルの対辺距離) および整流部金網 12 枚のうち最も下流の金網から下流に 869 mm の位置の 3 箇所である。以下, それらの位置をそれぞれ, 広角度ディフューザ出口, ハニカム下流および整流部金網下流と略称する。

実験は, 上記 3 箇所における横断面内に I 型または X 型熱線プローブを挿入し, これを水平方向にトラバースして行われた。空間的な制限から, これらの断面における風速分布および乱れ強さ分布の測定は, 流路中心軸を含む水平面より $0.056 D$ 上方の水平面内で実施した。ここに D は流路対辺距離である。トラバース装置の詳細を第 3 図に示している。外径 35 mm のトラバース管は引抜鋼管製で, 整流部の各トラバース位置の両側壁に設けたトラバース孔を貫通して取付けられる。トラバース管の中心軸は風軸中心を通り y 軸に平行である。熱線のプローブ・サポートは, 図中に示すように, I 型熱線プローブ用と X 型熱線プローブ用で形状が異なっている。いずれも外径 28 mm の引抜鋼管製内筒に固定し, 外部からの操作により外径 35 mm トラバース管のスリットに沿ってガイドされ, 水平方向に移動する。熱線プローブの特性に及ぼすプローブ・サポートおよびトラバース管の影響を除くため, 熱線プローブの受感部は, 図に示すように, 熱線プローブの形式によらず, いずれもトラバース管中心から上方に 195 mm, 上流方向に 76 mm 突出した位置になるように設計されている。第 2 図の 1, 2 および 3 の断面は, 熱線プローブの位置を表わす。

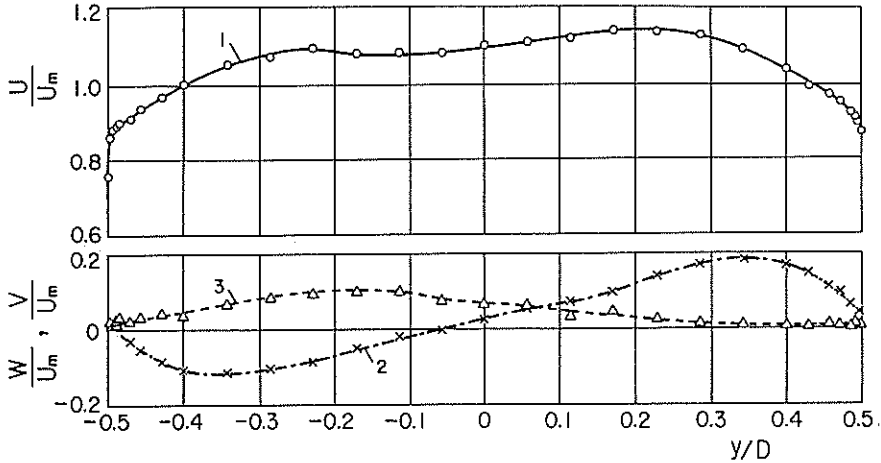
x, y, z 軸方向の時間平均速度成分をそれぞれ U, V, W , 乱れによる速度変動成分を u', v', w' とする。

4.3 風速分布

第 4 図は, 広角度ディフューザ出口における 3 軸方向の時間平均速度成分 U, V, W の分布である。いずれも断面内の平均風速 U_m に対する比として示している。平均風速 U_m は, 密閉型測定



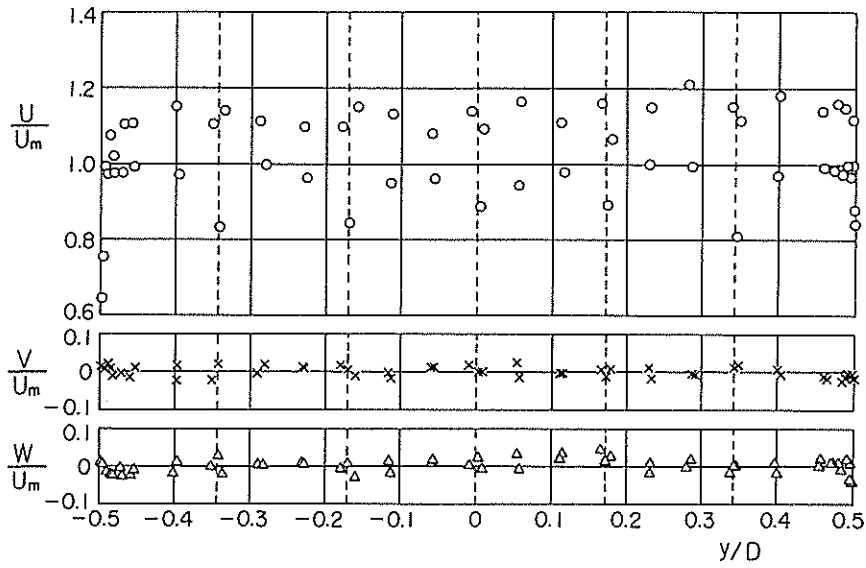
第 3 図 整流部で使用したトラバース装置



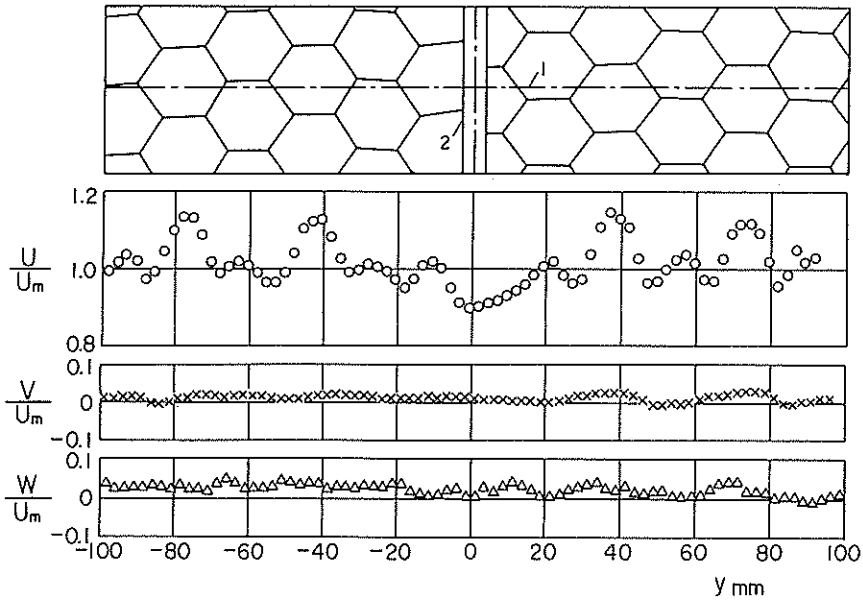
第4図 広角度ディフューザ出口の風速分布. $D = 3.5\text{ m}$, $U_m = 4.95\text{ m/s}$
 1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m

部基準位置 A 断面〔1〕で測定された壁面境界層の速度分布から排除厚さ δ^* を求め、排除厚さの補正を行って求めた風量(附録参照)を整流部断面積で除して求めている。図において主流方向の速度成分 U の分布が風軸に対し水平方向に対称になっていないのは、広角度ディフューザ上流にある第4偏流部の曲りの影響であろう。ただし、この風速分布の偏りは、本風洞の建設に先立って製作された小型低乱風洞の場合〔9〕には流路の内側に偏っていたことと異なっており、偏流部の設計に際して今後留意すべき点であると思われる。いずれにせよ速度成分 U の分布から明らかのように、両側壁付近に逆流領域が存在せず、風速分布は広角度ディフューザ出口のものとしては良好であって、広角度ディフューザの設計が妥当であったと言える。なお、 U 分布における中央部のわずかな凹みは、後述の送風機ハブの後流と推定される。図において、水平方向(y 方向)の速度成分 V が y の負の領域で負、正の領域で正になっていて、いずれも側壁方向に向っているのは、広角度ディフューザによる広がりの影響が測定位置でもまだ残っていることを示している。 z 軸方向の速度成分 W はわずかながら上向き(正方向)の傾向が認められるが、この理由の一つにトラバース断面が流路中心軸より $0.056 D$ 上方に位置することが挙げられる。

第5図は、ハニカム下流の風速分布である。図において、主流方向に垂直な速度成分 V および W はほとんど存在しないことが注目される。それらをハニカムに流入する前の第4図の V および W と対比すればわかるように、ハニカムを通過することによって主流に垂直方向の速度成分はほとんど除去されている。一方、主流方向の速度成分 U は、第5図に示すように、 y 方向のトラバース位置によって著しく変化する。それらの測定値のうち U/U_m が特に小さく、その値が $0.8 \sim 0.9$ となる位置は、ハニカムを整流部内に支持するため垂直方向に設けられている厚さ 4.5 mm の5枚の補強板〔1〕の位置と一致しており、明らかに補強板の後流に相当する。その他の測定値が位置によって変化する理由を調べるため、 $-100\text{ mm} \leq y \leq 100\text{ mm}$ の 200 mm の範囲について特に詳細な測定を行った。その結果を第6図に示す。上方の図は、水平に移動する熱線プロ



第5図 ハニカム下流の風速分布, $D = 3.5 \text{ m}$, $U_m = 4.95 \text{ m/s}$
破線: 補強板挿入位置



第6図 ハニカム下流の風速分布(風軸中心附近の詳細測定), $U_m = 4.94 \text{ m/s}$
1. トラバース線 2. 補強板

ープの軌跡と, 厚さ 0.1 mm , 正六角形断面のハニカムの個々のセルとの位置関係を実測して示したものである。図の U 分布に現れる凹凸と対比すると, 各セルの表面に近いほど U は小さく, セルの中央に近いほど U は大になっており, したがって, これらの U 分布の位置による変化は,

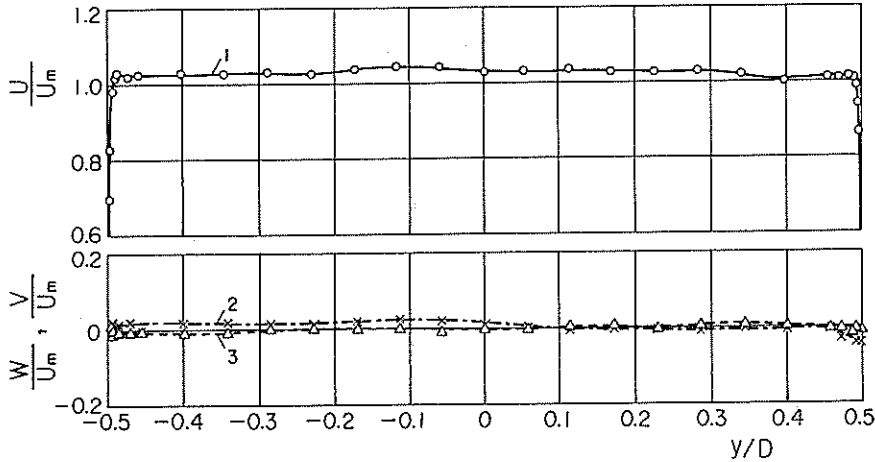
セル表面に発達する境界層の後流によるものである。

第 7 図は、整流部金網下流の風速分布を測定した結果である。主流方向速度成分 U の分布の様子は良好であり、ハニカムの後流は全く消失している。また V と W 成分は無視できる程度に小さく、第 6 図と比較すると、整流部金網が十分な整流効果を示していると言える。

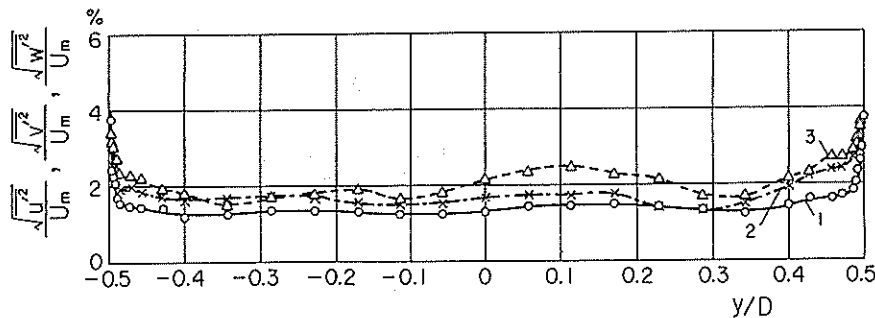
4.4 乱れ強さ分布

次に、前節の風速分布に対応する乱れ強さ分布の測定結果を示す。第 8 図に、広角度ディフューザ出口における 3 軸方向速度変動成分 u' , v' , w' の RMS 値を平均風速 U_m で無次元化して示した。側壁近くを除けば、 $\sqrt{u'^2}/U_m$ が約 1.4%, $\sqrt{v'^2}/U_m$ が約 1.7%, $\sqrt{w'^2}/U_m$ が約 1.7~2.4% になっている。

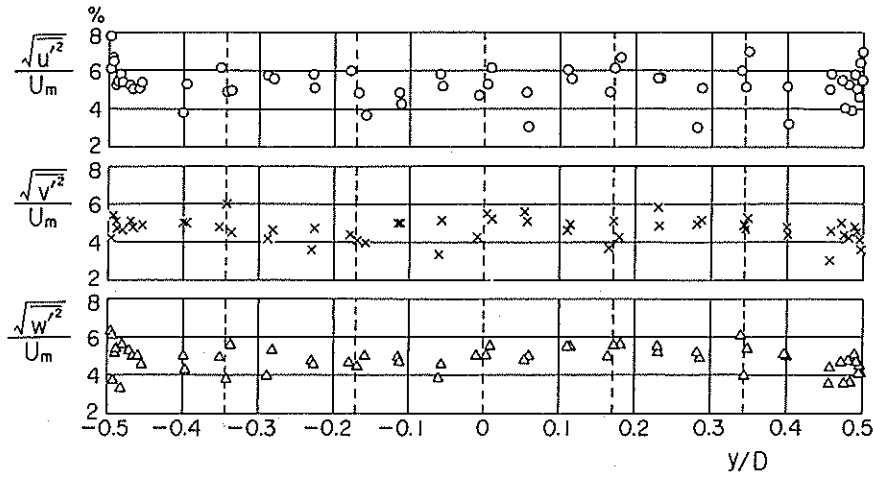
第 9 図は、ハニカム下流における乱れ強さの分布であり、また第 10 図は $-100 \text{ mm} \leq y \leq 100 \text{ mm}$ の範囲を特に詳細に測定した結果である。前節の第 5 図および第 6 図で説明したように、ハ



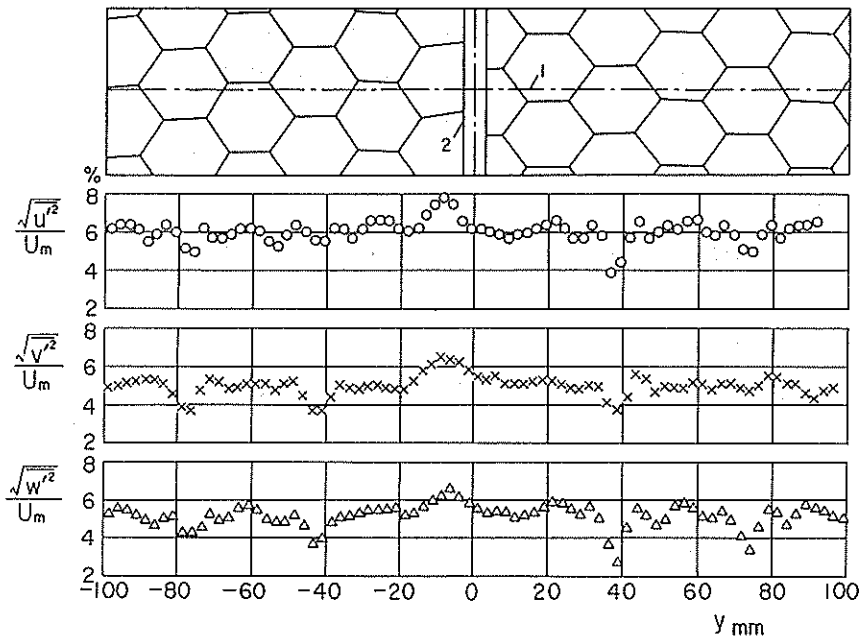
第 7 図 整流部金網下流の風速分布。 $D = 3.5 \text{ m}$, $U_m = 4.95 \text{ m/s}$
1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m



第 8 図 広角度ディフューザ出口の乱れ強さ分布。 $D = 3.5 \text{ m}$, $U_m = 4.95 \text{ m/s}$
1. $\sqrt{u'^2}/U_m$ 2. $\sqrt{v'^2}/U_m$ 3. $\sqrt{w'^2}/U_m$



第9図 ハニカム下流の乱れ強さ分布, $D = 3.5\text{ m}$, $U_m = 4.95\text{ m/s}$
破線: 補強板挿入位置



第10図 ハニカム下流の乱れ強さ分布(風軸中心附近の詳細測定), $U_m = 4.94\text{ m/s}$
1. トラバース線 2. 補強板

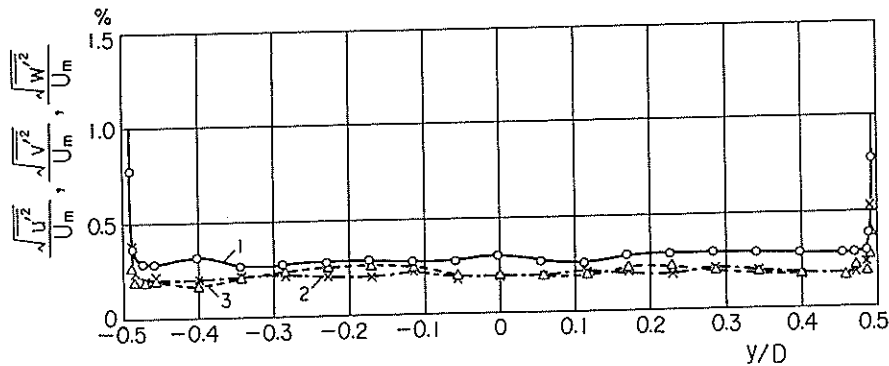
ニカム下流の測定位置はハニカムの多数のセルの後流になっているため, 乱れ強さはハニカム上流よりむしろ増大し, $\frac{\sqrt{u'^2}}{U_m}$ が約6%程度に, $\frac{\sqrt{v'^2}}{U_m}$ および $\frac{\sqrt{w'^2}}{U_m}$ がほぼ同じ大きさで約5%程度に達している。したがって, 整流部内にハニカムを設けることは, 前節で述べたように主流に垂直方向の時間平均速度成分を除去する効果があるので, 旋回流や大規模な乱れを抑制

することが期待される[4]が、反面、セルの後流が形成されて、セルのピッチに相当する空間的な速度変動と、それに伴う新たな乱れを発生することに留意する必要がある。本風洞においては、第4図に示した広角度ディフューザ出口の速度成分 V , W がハニカム下流において第5図のように消滅していることから、ハニカムは本来の機能を果しているといえることができる。

第11図は、整流部金網下流における乱れ強さの分布である。整流部金網によって上流にあった約5%ないし6%の乱れは、それぞれ0.2%ないし0.3%にまで減衰していることがわかる。その減衰の割合は1/25ないし1/20程度である。第2表に示すように、整流部金網は20メッシュ、線径0.27mm、開口面積比0.62のステンレス鋼製織金網で、これを159mm間隔に12枚配列している。1枚の金網の抵抗係数を $K (= \Delta p / (\rho U_m^2 / 2))$ 、 Δp は損失圧力、 ρ は流体の密度)として、1枚の金網を通過することに気流の乱れ強さが減衰する割合をDrydenとSchubauer[1, 10]によって $1/\sqrt{1+K}$ とすれば、 K をWiegardtの半経験式[1, 11]から求めると $U_m = 5 \text{ m/s}$ のとき $K = 1.14$ になるから、金網1枚当りの減衰は0.68である。 n 枚の金網に対して $1/(1+K)^{n/2}$ 法則を適用すると、上記の乱れ強さの減衰1/25 ~ 1/20は8枚の金網を設けた場合に相当する。1枚当りの乱れの減衰を実測していないので、ここに使用している12枚の金網のうち何枚が有効に働いているかは明らかでないが、整流部金網下流において金網上流の乱れは十分に減衰しており、第2図の3の測定位置で測定された乱れ強さの大部分は最終金網自身から発生する乱れによるものと考えられる。同様のことは、小型低乱風洞における詳細な実験によって確かめられている[9]。

本風洞は、風洞測定部に0.02%の低い乱れ強さを実現するという設計当初の目標を達成しているが、12枚の整流部金網をそれぞれ個別に取出して金網の清浄や張替ができる構造になっているので、将来、より適切な金網を選定し配列することも計画することができる。その際には、上記の測定結果は参考資料の一つになるであろう。

つぎに、測定部風速60m/sのとき、密閉型測定部基準位置風軸中心における乱れ強さ $[(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/3]^{1/2}/U_0$ は0.020%であり[1]、一方、第11図に示すように整流部金網下流のそれは



第11図 整流部金網下流の乱れ強さ分布. $D = 3.5 \text{ m}$, $U_m = 4.95 \text{ m/s}$
 1. $\sqrt{\overline{u'^2}}/U_m$ 2. $\sqrt{\overline{v'^2}}/U_m$ 3. $\sqrt{\overline{w'^2}}/U_m$

0.24%であるから、面積比12の収縮ノズルを通過すること、および乱れの自然減衰により、整流部金網下流から測定部基準位置に至るまでに乱れ強さは前者における値の約1/12に減衰したことがわかる。一方、BatchelorとProudmanの理論[12]によれば、面積比12の収縮ノズルを用いたとき、ノズル出口の乱れ強さは入口における値の約1/5に減衰[1]することになるから、本風洞においては上記区間における乱れの自然減衰の作用が大きいことがわかる。

5. 第1ディフューザおよび第1偏流部

5.1 第1ディフューザおよび第1偏流部の構造

第1ディフューザは全長6m、入口対辺距離1.01m、出口対辺距離1.54mで、頂角および面積比は第2表に記載してある。密閉型測定部に沿って設けたフィリットのため、入口断面は正八角形からわずかに変形しているが、出口断面は正八角形である。また、測定部の圧力をほぼ大気圧と等しくするため、ディフューザ入口から1.55mの距離の全周に沿ってブリーザが設けられており、密閉型測定部の場合のスリット幅は20mmである。さらに、第1ディフューザ出口には、線径1.9mm、網目間隔50mmの防護金網が取付けてある。第1ディフューザに続く第1偏流部には、鋼板を曲げて製作した弦長364mmの薄翼23枚がコーナーの対角線に沿って等間隔に設けられ、流れを直角に曲げている。構造の詳細は既報[1]に述べてある。

5.2 実験方法

流路断面の風速分布および乱れ強さ分布の測定は、第1図に示すつぎの3断面について実施した。これらの断面は、熱線プローブの位置を表わす。

(1) 第1ディフューザ入口直前、すなわち測定部出口より248mm(=0.246D、ここにDは測定部対辺距離)上流の断面。

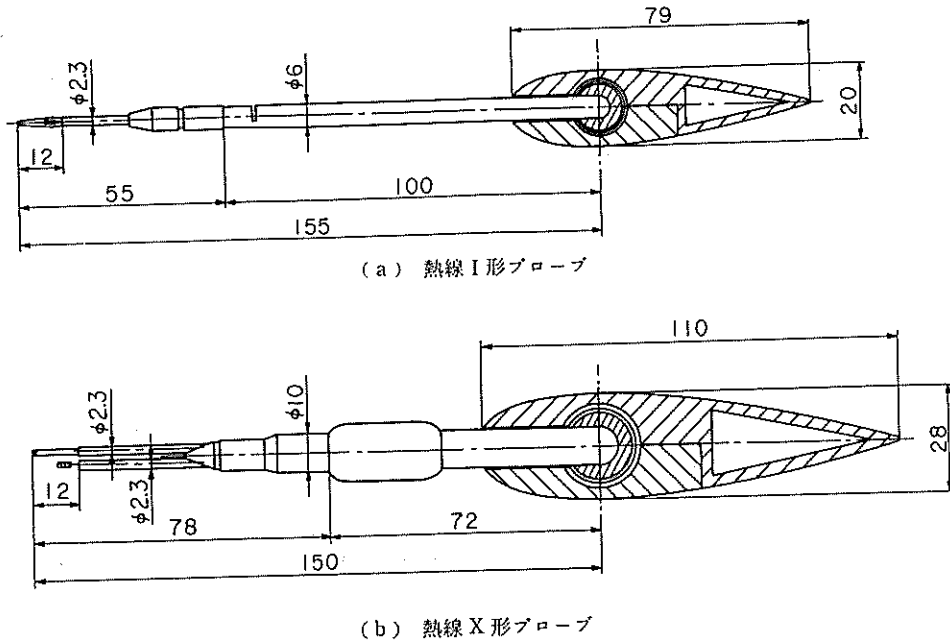
(2) 第1ディフューザ出口すなわち第1偏流部入口より33mm(=0.02D、ここにDは第1ディフューザ出口対辺距離)上流の断面。

(3) 第1偏流部出口より347mm下流、すなわち第1偏流部案内羽根列の中心より1537mm(=1.00D、ここにDは第1偏流部対辺距離)下流の断面。

測定はいずれも流路中心軸を含む水平面内で実施したが、流速が比較的高いため、熱線プローブのトラバースには第12図(a)、(b)に示す翼形を流路を横切って取付け、翼形内部に設けた円形断面のトラバース管を移動させた。翼形の前面には、プローブ・サポートの摺動用スリットが全幅にわたって設けてある。

5.3 風速分布

第1ディフューザ入口直前(すなわち測定部出口直前)の流路軸方向の時間平均風速分布 U/U_m 、および乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U_m$ の分布を第13図に示す。ここにDは測定部流路幅である。図によれば第1ディフューザに流入する風速分布はきわめて一様である。なお、断面内の速度成分V、



第 12 図 第 1 ディフューザおよび第 1 偏流部で使したトラバース装置

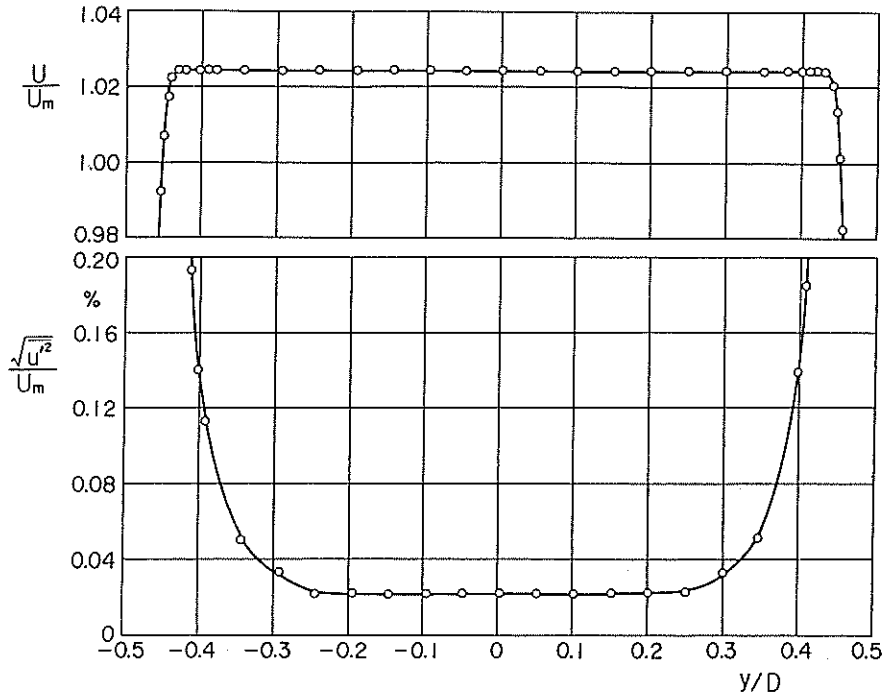
W および変動速度成分の RMS 値 $\sqrt{v'^2}$, $\sqrt{w'^2}$ の分布は, この場合風速が高いため熱線ステムの振動を防止し得ず, 測定していない。

第 1 ディフューザ出口における風速の 3 成分 U, V, W の分布を第 14 図に示す。流路軸方向速度成分 U/U_m の分布についていえば, 境界層厚さは約 $0.22D$ (D は測定断面の対辺距離) に達するが, 境界層外側ポテンシャルコアの速度分布はきわめて一様であり, また速度分布は中心軸に関して対称である。一方, 水平面内の速度成分 V は流路外側では $V > 0$, 内側では $V < 0$ であって, 流路幅の拡大に応じて壁面方向に向わずかな速度成分が存在することを示す。垂直方向速度成分 W は, 断面にわたり実験誤差の範囲内で 0 である。以上のように, 第 1 ディフューザ内の風速分布はきわめて良好な状態にあり, 第 1 ディフューザの設計は好適であったといえる。

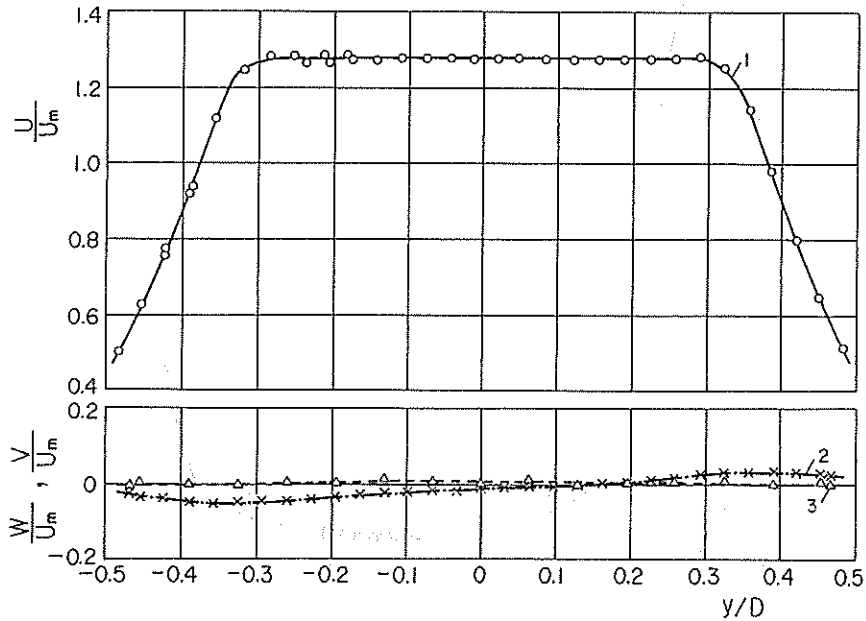
第 15 図は第 1 偏流部下流における水平面内の風速分布であり, 境界層厚さは流路外側で約 $0.28D$, 内側で約 $0.24D$ で, 若干非対称な分布を示す。しかし, 境界層外側では一様な速度分布であることから, 内側壁と比較し表面に沿った距離の長い曲りの外側で境界層の成長が著しいものと考えられる。

5.4 乱れ強さ分布

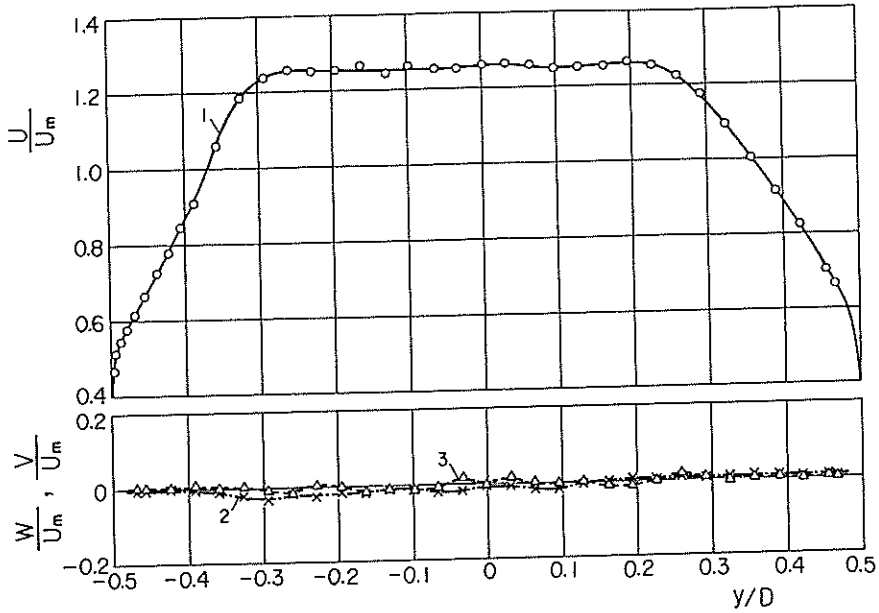
第 1 ディフューザ入口直前すなわち測定部出口直前における流路軸方向の乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U_m$ の分布を第 13 図に示す。 $-0.25 \leq y/D \leq 0.25$ の流路中央部で $\sqrt{u'^2}/U_m$ は約 0.02% であり, 以後側壁に近づくほど乱れ強さは増加している。次に第 1 ディフューザ出口すなわち防護金網直前における乱れ強さの成分 $\sqrt{u'^2}/U_m$, $\sqrt{v'^2}/U_m$, $\sqrt{w'^2}/U_m$ の分布を第 16 図に示す。乱れ強さの 3



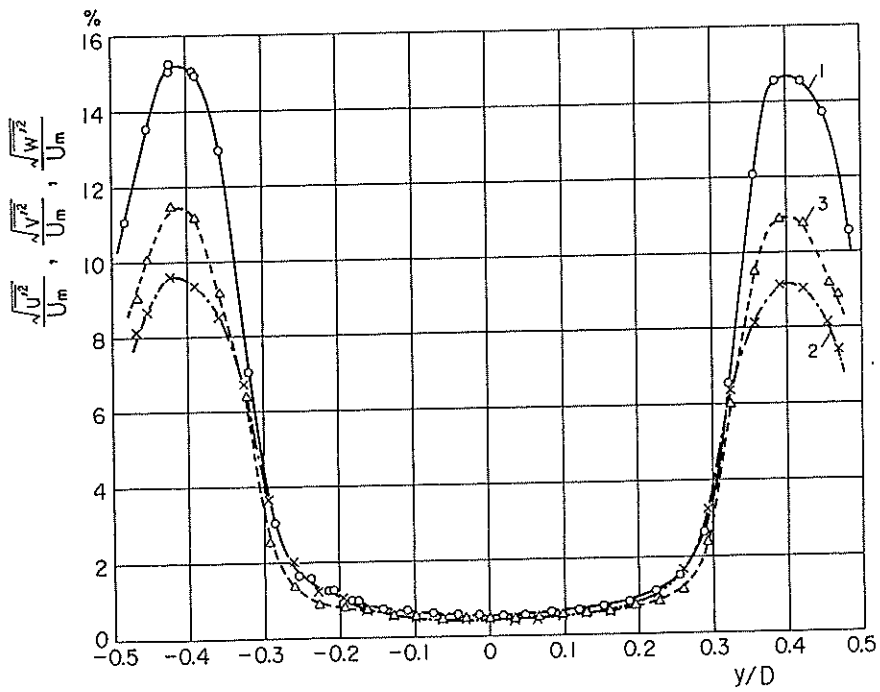
第13図 第1ディフューザ入口直前(測定部出口直前)における風速分布 U/U_m および乱れ強さ分布 $\sqrt{u'^2}/U_m$, $D = 1.01 \text{ m}$, $U_m = 57.9 \text{ m/s}$



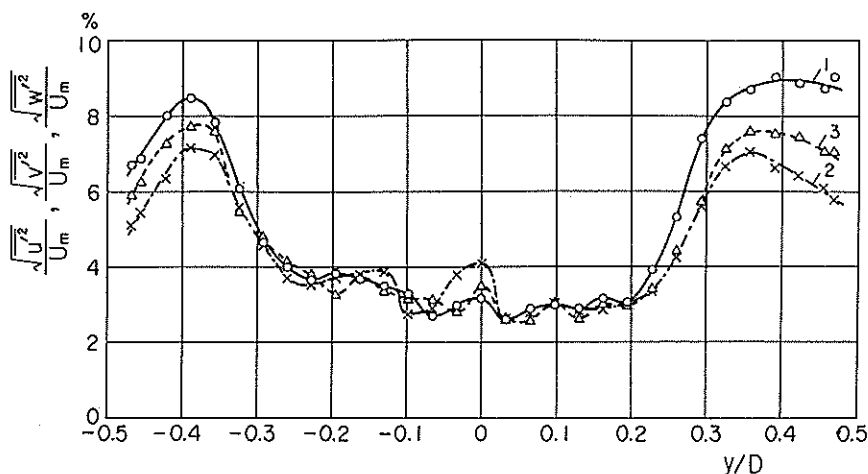
第14図 第1ディフューザ出口における水平面内の風速分布, $D = 1.54 \text{ m}$, $U_m = 25.6 \text{ m/s}$
 1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m



第 15 図 第 1 偏流部下流における水平面内の風速分布, $D = 1.54 \text{ m}$, $U_m = 25.5 \text{ m/s}$
 1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m



第 16 図 第 1 ディフューザ出口における水平面内の乱れ強さ分布, $D = 1.54 \text{ m}$, $U_m = 25.6 \text{ m/s}$
 1. $\sqrt{u'^2}/U_m$ 2. $\sqrt{v'^2}/U_m$ 3. $\sqrt{w'^2}/U_m$



第17図 第1偏流部下流における水平面内の乱れ強さ分布, $D = 1.54 \text{ m}$, $U_m = 25.5 \text{ m/s}$
 1. $\sqrt{u'^2}/U_m$ 2. $\sqrt{v'^2}/U_m$ 3. $\sqrt{w'^2}/U_m$

成分は, 境界層内の壁から約 $0.09D$ の距離でそれぞれ極大値に達し, その大きさの順位は平板境界層と同様に $\sqrt{u'^2}/U_m > \sqrt{w'^2}/U_m > \sqrt{v'^2}/U_m$ であって, $\sqrt{u'^2}/U_m$ の極大値は約15%程度に達する。境界層の外側では乱れ強さは次第に減少し, 流路中央部における乱れ強さは約0.05%である。

第17図に第1偏流部下流における水平面内の乱れ強さ分布を示す。第16図と比較すれば直ちにわかるように, 防護金網および案内羽根列を通過することによって流路中央部の乱れ強さはかなり増大し, 2.5%から4%程度となる。第15図に示すように境界層厚さが内外壁で相違するため, これに対応して乱れ強さの分布も流路中心軸に関して非対称である。境界層内の乱れ強さの極大値は, 第1ディフューザ出口における値に比較してかなり小さく, $\sqrt{u'^2}/U_m$ のピーク値は流路内側で8.5%, 外側で9%である。なお流路中央部で乱れ強さの3成分が小さい波状を呈する理由は不明である。

6. 送風機入口および出口

6.1 送風機とその上下流のダクトの構造

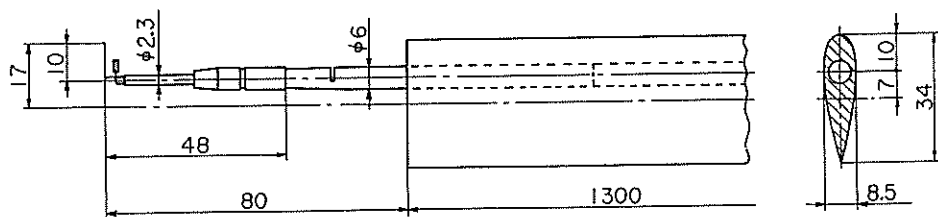
既報〔1〕でこの構造については詳述した。軸流1段の前置および後置静翼をもつ送風機は風洞用〔4〕に特に設計製作された低騒音の送風機で, その入口直径 D_i は 1.54 m , 定格風量は $53 \text{ m}^3/\text{s}$ であり, 第1図に示すように, その入口は第2偏流部に, また, 出口は第2ディフューザに接続している。下流から見て時計まわり方向に回転する 170 mm 直径の主軸は, 第2偏流部を貫通して直流電動機に直結されている。

6.2 実験方法

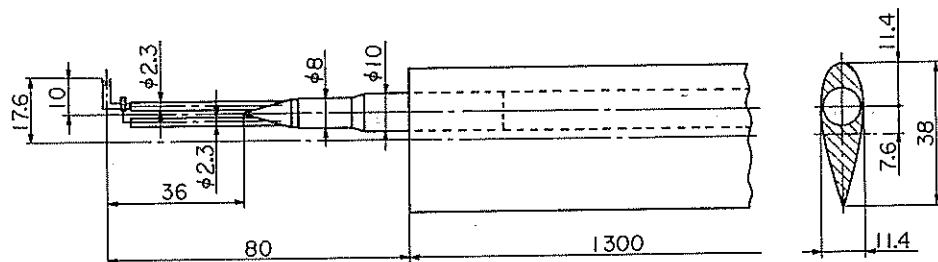
送風機入口, 出口の風速分布および乱れ強さ分布の測定は, 羽根中心面上流 1.56 m ($x/D_i = 1.01$, x は羽根中心面より上流に測った距離) および下流 2.20 m ($x/D_i = 1.43$) の円形測定断面において, 風軸を含む水平面内について行った. 第 18 図には, 風速分布および乱れ強さ分布の測定に用いたトラバース装置の詳細を示す.

6.3 風速分布および乱れ強さ分布

第 19 図ならびに第 20 図には, 送風機入口(すなわち第 2 偏流部出口)の測定断面の水平面内に

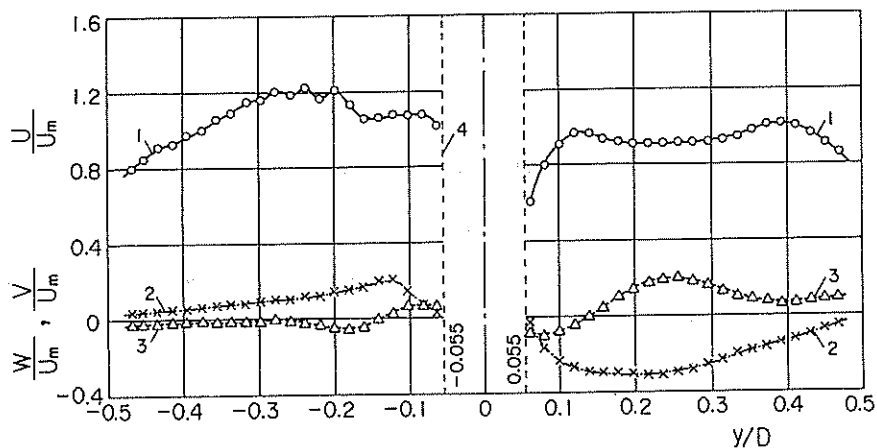


(a) 熱線 I 形プローブ

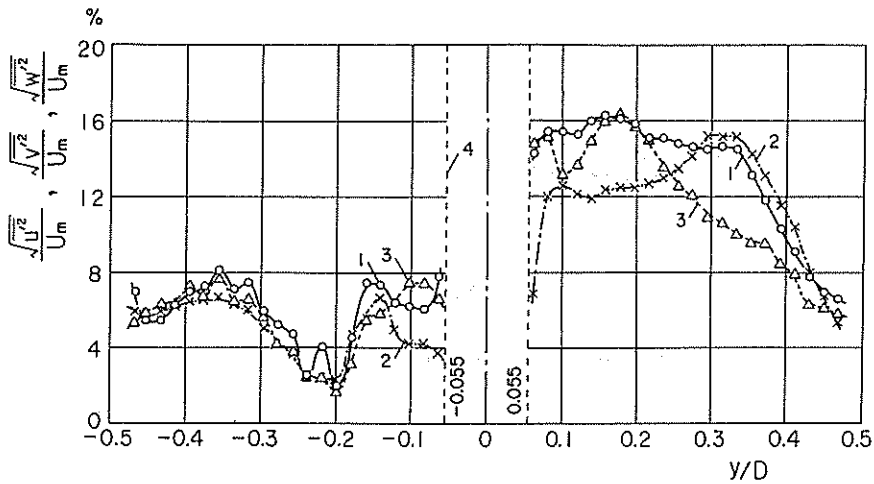


(b) 熱線 X 形プローブ

第 18 図 送風機入口・出口断面の測定に使用したトラバース用システム



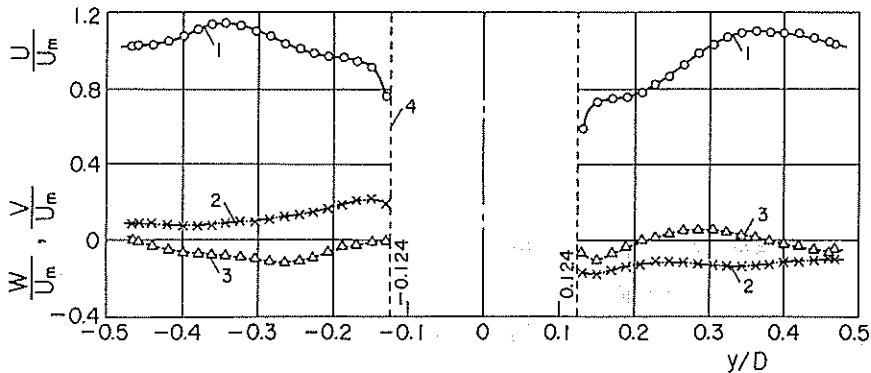
第 19 図 送風機入口における流路中心軸を含む水平面内の風速分布. $D = 1.54$ m, $U_m = 27.2$ m/s
1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m 4. 送風機主軸



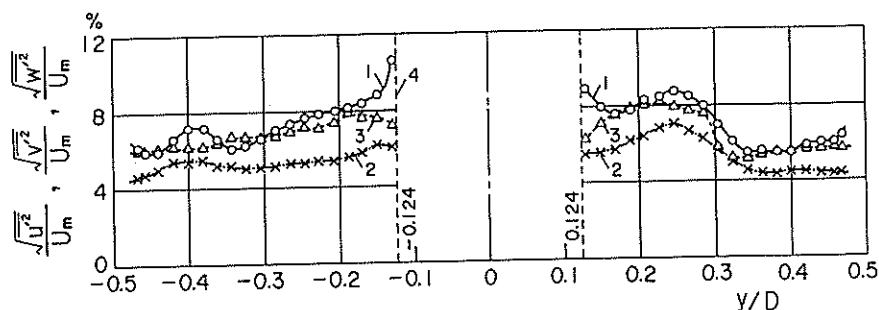
第 20 図 送風機入口における流路中心軸を含む水平面内の乱れ強さ分布, $D = 1.54 \text{ m}$, $U_m = 27.2 \text{ m/s}$
 1. $\sqrt{u'^2}/U_m$ 2. $\sqrt{v'^2}/U_m$ 3. $\sqrt{w'^2}/U_m$ 4. 送風機主軸

における, 時間平均風速ならびに乱れ強さの x, y, z 成分, すなわち, $U/U_m, V/U_m, W/U_m$ ならびに $\sqrt{u'^2}/U_m, \sqrt{v'^2}/U_m, \sqrt{w'^2}/U_m$ の分布を示す. ここに, $U_m (= 27.2 \text{ m/s})$ および D は, それぞれこの断面の平均風速およびケーシングの直径である.

期待されたように, 送風機に流入する x 方向速度成分 U は, 送風機主軸および壁面境界層の影響が顕著になる $|y/D| < 0.1$ および $|y/D| > 0.4$ のそれを除外したポテンシャルコアの部分ではほぼ一様になっていると言える〔2〕. 次に, y 方向速度成分 V が若干半径方向内向きとなることが注目される. これは, $y > 0$ の平面では主軸の後流により, また, $y < 0$ の平面では第 2 偏流部の偏流作用が若干弱いためであろう. また, $0.055 < y/D < 0.14$ では $W/U_m < 0$, そして $-0.055 > y/D > -0.14$ では $W/U_m > 0$ となり, 主軸の回転に伴う旋回流が認められる. さらに, 乱れ分布においては, 主軸の後流にはほぼ入る $y > 0$ の平面では, 乱れ強さは他所(送風機出



第 21 図 送風機出口における流路中心軸を含む水平面内の風速分布, $D = 1.555 \text{ m}$, $U_m = 28.1 \text{ m/s}$
 1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m 4. 送風機ハブ



第 22 図 送風機出口における流路中心軸を含む水平面内の乱れ強さ分布. $D = 1.555 \text{ m}$, $U_m = 28.1 \text{ m/s}$
 1. $\sqrt{u'^2}/U_m$ 2. $\sqrt{v'^2}/U_m$ 3. $\sqrt{w'^2}/U_m$ 4. 送風機ハブ

口のものを含む)のそれらの約 2 倍と著大で, かつその成分にはかなりの異方性が現われている。

次に, 第 21 図ならびに第 22 図には, 送風機出口の U/U_m , V/U_m , W/U_m ならびに $\sqrt{u'^2}/U_m$, $\sqrt{v'^2}/U_m$, $\sqrt{w'^2}/U_m$ の分布を示す. まず, U/U_m の分布より, この測定断面には未だハブの一部が残存していることから当然のことかも知れないが, $|y/D| < 0.3$ にわたりハブの影響が認められる. しかし, V および W は U に比し十分小さい. なお, ここでも V は半径方向内向きとなるが, これは流路が総体的に内向きとなっているので当然とも言えよう. さらに, $0.2 < |y/D| < 0.4$ に主軸の回転方向と逆方向の弱い旋回流の徴候も認められる。

7. 第 2 ディフューザ

7.1 第 2 ディフューザの構造

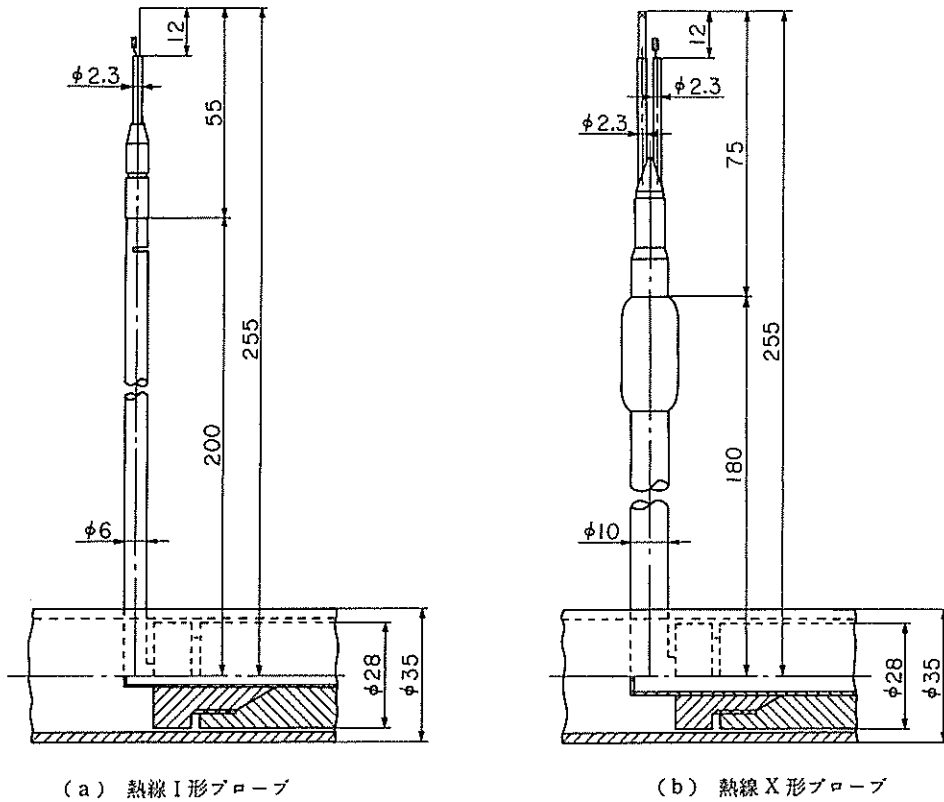
既報[1]のように第 2 ディフューザは正八角形断面で, 全長 14.32 m, 入口対辺距離 1.54 m, 出口対辺距離 2.66 m の鉄筋コンクリート製で, 頂角および面積比は第 2 表に掲げてある. 年間を通じての気温の変化による風洞全体の膨張・収縮を考慮し, ディフューザのほぼ中央の断面にスリットを設け, 伸縮材を挿入することによって風洞全体の伸縮を受け持たせている. この部分の流路内面はステンレス鋼板で面一にしてあるが, 年間を通じての伸縮のため塗装がはげて, 若干の凹凸は避けられなかった。

7.2 実験方法

第 2 ディフューザにおける風速分布および乱れ強さ分布の測定は, 第 1 図に示す次の 3 断面について, 流路中心軸を含む水平面内で実施した。

(1) 第 2 ディフューザ入口直後, すなわちディフューザ入口から測って $0.57 \text{ m} [= 0.04L, L (= 14.32 \text{ m})$ は第 2 ディフューザの全長] 下流の断面。

(2) 第 2 ディフューザのほぼ中央部, すなわちディフューザ入口から $6.57 \text{ m} (= 0.46L)$ 下流の断面。



(a) 熱線 I 形プローブ

(b) 熱線 X 形プローブ

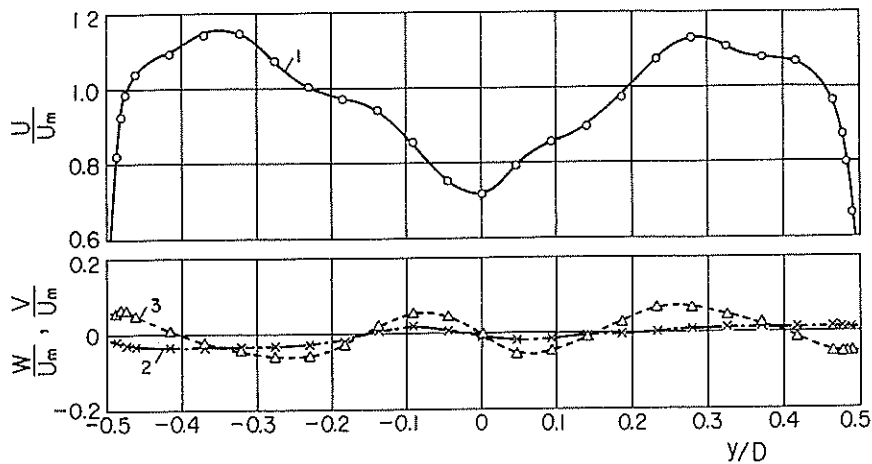
第 23 図 第 2 ディフューザおよび第 3, 第 4 偏流部で使用したトラバース装置

(3) 第 2 ディフューザ出口直後, すなわちディフューザ入口から $14.65 \text{ m} (= 1.02 L)$ 下流の断面.

風速分布および乱れ強さ分布の測定に用いたトラバース装置の詳細を第 23 図に示す. トラバース管は整流部に用いた装置と同様であるが, 整流部と異なり流路軸方向の空間的な制限がないので, トラバース管のスリットを前方に向け, 熱線プローブのステムをまっすぐ前方に突き出すことによって, 流路中心軸を含む水平面内をトラバースした. 流路を横切って固定したトラバース管が速度および乱れ強さの測定値に影響を及ぼさないように, 熱線プローブのステムは十分長くしてある. 上記トラバース断面のディフューザ入口からの距離は, プローブ先端の位置を表わす.

7.3 風速分布

第 2 ディフューザ入口直後の風速分布を第 24 図に示す. 各速度成分は, 断面の平均風速 U_m で除して無次元化してある. 図によれば, 流路軸方向速度成分 U に送風機ハブの後流が明りょうに認められ, 中心軸上における風速は平均風速の約 0.7 倍である. 一方, 水平方向速度成分 V はほぼ 0 に近い. 垂直方向速度成分 W は, ディフューザ中心軸に関し点対称の分布を示し, 送風機出口で観察された旋回流がディフューザ入口においても存続することを示す. この旋回流は, 下流

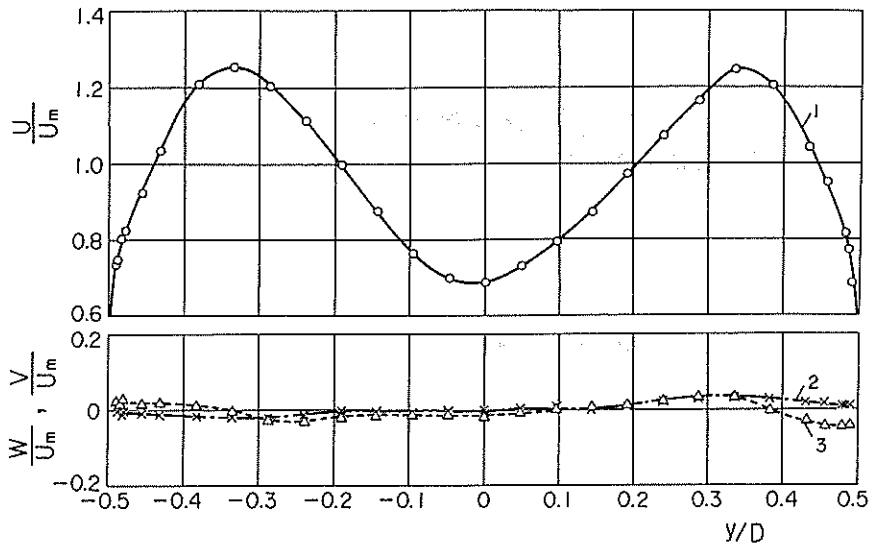


第 24 図 第 2 ディフューザ入口直後における水平面内の風速分布, $D = 1.58 \text{ m}$, $U_m = 23.8 \text{ m/s}$
 1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m

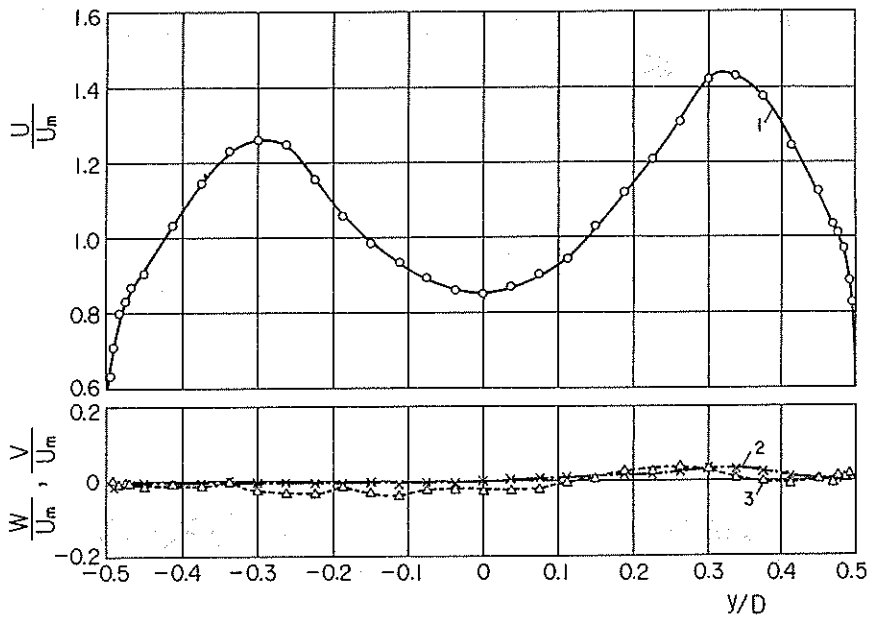
側より上流側に向かって $|y|/D < 0.15$ では時計まわり, $0.15 < |y|/D < 0.4$ では反時計まわり, $|y|/D > 0.4$ ではふたたび時計まわりであって, 旋回流の速度成分 W の極大値は断面平均風速の 0.06 倍程度である。送風機主軸の回転方向は, 下流側から見て時計まわりであることはさきに述べた。

第 25 図は第 2 ディフューザのほぼ中央断面の風速分布である。送風機ハブの後流は, 流路軸方向風速分布に依然として明りょうに認められ, 中心軸上の風速はディフューザ入口と同じく平均風速の約 0.7 倍である。しかし, 風速分布曲線における左右のピークは, ディフューザ入口におけるそれと比較してかなりとがっており, 流路の拡大の影響が顕著に認められる。断面内の速度成分 V および W は, 実験誤差の範囲内ではほぼ 0 に近い。 $y > 0$ で $V > 0$, $y < 0$ で $V < 0$ であることは, 流路の拡大のため左右の側壁に向う流れが存在することを示す。また垂直方向速度成分 W の分布から, 旋回流成分はディフューザ入口と比較して非常に減衰していることがわかる。

第 26 図にディフューザ出口直後の風速分布を示す。流路軸方向風速分布 U/U_m については, 流路外側のピークが内側のそれに比較して増大し, 風速分布は中心軸に関し非対称となるが, 流れのはく離は認められない。中心軸上の風速は, 平均風速の約 0.85 倍である。断面内の速度成分 V および W は, 実験誤差の範囲内ではほぼ 0 に近い。なお $y > 0$ で $V > 0$ であることは, 外側壁に向う弱い流れの存在することを示す。なお英国 RAE 4 ft \times 3 ft 低乱風洞における第 2 ディフューザ出口直前の風速分布の測定結果〔2〕においても, 送風機ハブの後流は第 2 ディフューザ出口で明りょうに認められ, また最大速度は流路の外側寄りで観察されている。これは本報の結果と定性的に同様である。また, ウォーター・タンネルの模型実験〔13〕においても, ディフューザ直後に偏流部が存在するとき, ディフューザ出口の水平面内の速度分布曲線は流路の外側に片寄っている。



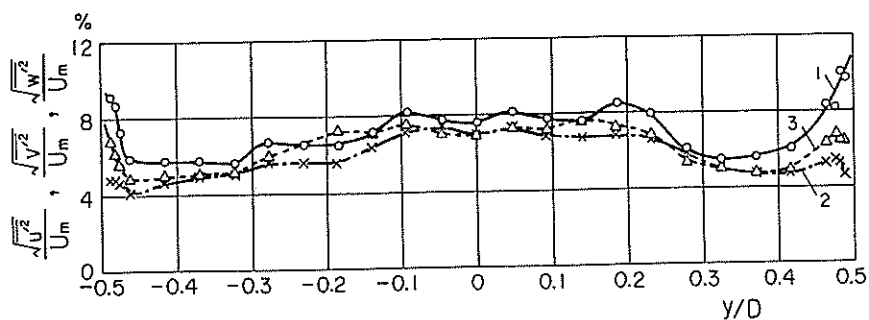
第25図 第2ディフューザ中央部における水平面内の風速分布, $D = 2.05 \text{ m}$, $U_m = 14.3 \text{ m/s}$
 1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m



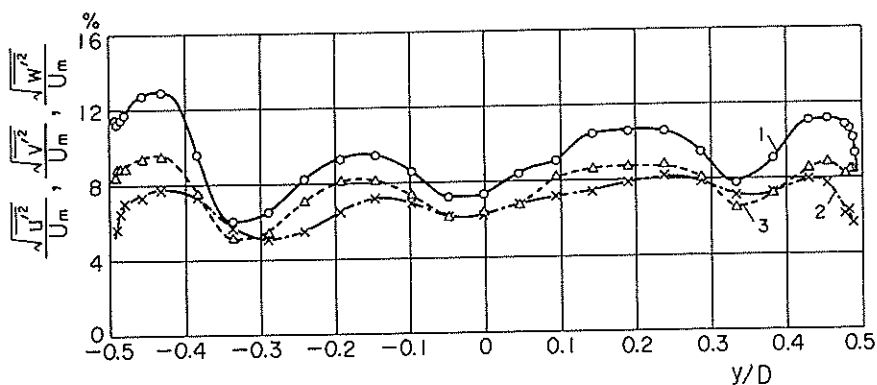
第26図 第2ディフューザ出口直後における水平面内の風速分布, $D = 2.66 \text{ m}$, $U_m = 8.55 \text{ m/s}$
 1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m

7.4 乱れ強さ分布

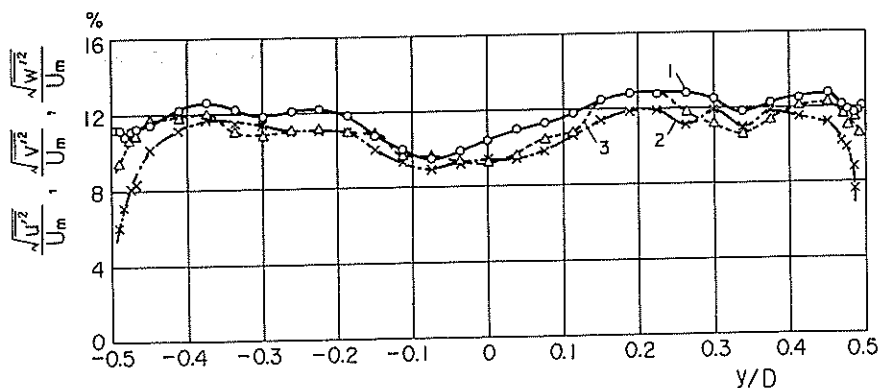
前記風速分布に対応する第2ディフューザ内の乱れ強さ分布を第27図から第29図までに掲げる。いずれも変動速度成分のRMS値を各断面の平均風速 U_m で除して無次元化して示してある。



第 27 図 第 2 ディフューザ入口直後における水平面内の乱れ強さ分布, $D = 1.58 \text{ m}$, $U_m = 23.8 \text{ m/s}$
 1. $\sqrt{u^2}/U_m$ 2. $\sqrt{v^2}/U_m$ 3. $\sqrt{w^2}/U_m$



第 28 図 第 2 ディフューザ中央部における水平面内の乱れ強さ分布, $D = 2.05 \text{ m}$, $U_m = 14.3 \text{ m/s}$
 1. $\sqrt{u^2}/U_m$ 2. $\sqrt{v^2}/U_m$ 3. $\sqrt{w^2}/U_m$



第 29 図 第 2 ディフューザ出口直後における水平面内の乱れ強さ分布, $D = 2.66 \text{ m}$, $U_m = 8.55 \text{ m/s}$
 1. $\sqrt{u^2}/U_m$ 2. $\sqrt{v^2}/U_m$ 3. $\sqrt{w^2}/U_m$

まず第 27 図は第 2 ディフューザ入口直後の乱れ強さ分布で, 送風機後流の領域で乱れ強さは増大し, その影響は境界層の外側まで及んでいる. 流路中央部で $\sqrt{u'^2}/U_m$ は約 8%, $\sqrt{v'^2}/U_m$ および $\sqrt{w'^2}/U_m$ は約 7% である.

第 28 図は第 2 ディフューザのほぼ中央の断面における乱れ強さ分布で, 第 25 図の風速分布と対応させて直ちに知れるように, 風速分布の極大値に対応する $y/D = \pm 0.34$ の近傍, および流路のほぼ中央附近で乱れ強さの 3 成分はそれぞれ極小値をとる. また流路断面にわたってほぼ $\sqrt{u'^2} > \sqrt{w'^2} > \sqrt{v'^2}$ である. 送風機ハブの後流の範囲内では, 中心軸に関し流路の外側の方が内側よりも乱れ強さが若干増加し, ここで $\sqrt{u'^2}/U_m$ は最大約 11% に達する.

第 29 図は第 2 ディフューザ出口直後の乱れ強さ分布である. 第 28 図に見られる乱れ強さ分布の左右の極小値はほぼ消滅し, 流路中心軸よりわずかに内側寄りに乱れ強さの弱い谷が認められる. なお第 28 図と比較し, 全断面にわたって乱れは等方性に近づいている. 乱れ強さは第 2 ディフューザ入口および中間部に比較してさらに増加し, 中心軸に関し流路外側寄りで $\sqrt{u'^2}/U_m$ は最大約 13% にまで達する.

以上の結果を第 1 ディフューザ内の乱れ強さ分布と比較すれば明らかなように, 上流に送風機が存在することによって, 第 2 ディフューザ内の乱れ強さ分布は前者のそれとは全く相違したものとなり, 気流の乱れは第 2 ディフューザ内全領域にわたって顕著であることがわかる.

8. 第 3 および第 4 偏流部

8.1 第 3 および第 4 偏流部の構造

既報〔1〕で述べたように, 第 2 ディフューザ出口から広角度ディフューザ入口に至る区間である第 3 および第 4 偏流部は, 対辺距離 2.66 m の正八角形断面であり, 第 2 ディフューザと同様に屋外となるため, 厚い鉄筋コンクリート製である. 案内羽根には, 厚さ 3.2 mm の鋼板を曲げて製作した弦長 442 mm の薄翼がそれぞれ 33 枚づつ用いられている. なお前述のように, 第 3 および第 4 偏流部は歩道を除く内面全体を厚さ 25 mm のウレタンフォームで内張りしてある.

8.2 実験方法

断面の風速分布および乱れ強さ分布の測定は, 第 1 図に示す下記の 2 断面について, 流路中心軸を含む水平面内で実施した.

(1) 第 3 および第 4 偏流部のほぼ中央, すなわち第 3 偏流部案内羽根列の中心より 2.72 m (= 1.02 D , ここに D は第 3 偏流部対辺距離) 下流の断面.

(2) 第 4 偏流部案内羽根列の中心より 1.54 m (= 0.58 D , ここに D は第 4 偏流部対辺距離) 下流の断面, すなわち広角度ディフューザ入口金網より 1.17 m (= 0.44 D) 上流の断面.

断面のトラバースには, 第 2 ディフューザにおけると同様に, 第 23 図に示すトラバース装置を使用した.

8.3 風速分布

第 3 偏流部と第 4 偏流部のほぼ中間の断面における風速分布を第 30 図に示す。流路軸方向の速度成分 U/U_m についていえば、第 26 図に示す第 2 ディフューザ出口直後のそれと比較して、流路の左右に見られる風速分布のピーク値は減少し、風速分布は若干平坦化しているが、送風機ハブの後流は依然として存在する。断面内の速度成分 V/U_m , W/U_m は、実験誤差の範囲内でほとんど 0 に近い。

第 31 図は第 4 偏流部案内羽根列後方の流路中心軸を含む水平面内の風速分布である。送風機ハブの後流はこの断面においても認められ、流路軸方向の風速分布 U/U_m は流路中央付近で極小値 0.9 となる。かように送風機ハブの後流が第 4 偏流部下流まで達することは、RAE 4 ft × 3 ft 低乱風洞においても観察されている〔2〕。つぎに流路内側寄りでは、各案内羽根の後流が認められる。図中に破線で示す縦線は、各案内羽根の後縁の位置の射影を示す。 U/U_m の極小値は、それぞれ後縁の位置に対応していることがわかる。なお最も内側に位置する案内羽根については、測定面と交差するため、プローブがつかえてトラバースが不可能であった。流路軸に垂直な速度成分については、流路の外側半分では V/U_m , W/U_m は実験誤差の範囲内で 0 であるが、流路の内側では内側壁に近づくほど各案内羽根の後流の影響が顕著である。

各案内羽根の後流が存続する距離は、次のようにして求められる。流路軸方向風速分布 U/U_m に案内羽根の影響が認められる範囲は $y/D < -0.16$, すなわち内側壁から測って $0.34D$ の距離までである。案内羽根の翼列軸は流路軸と 45° で交わり、内側の風洞壁は案内羽根の形状に合わせて丸めてあるから、上記距離は案内羽根の後縁から測った後流の下流方向への存続距離に等しい。この距離を l_w , 案内羽根の弦長を c とすれば、 $D = 2660$ mm, $c = 442$ mm を考慮して、

$$\frac{l_w}{c} = \frac{l_w}{D} \cdot \frac{D}{c} \approx 2.0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

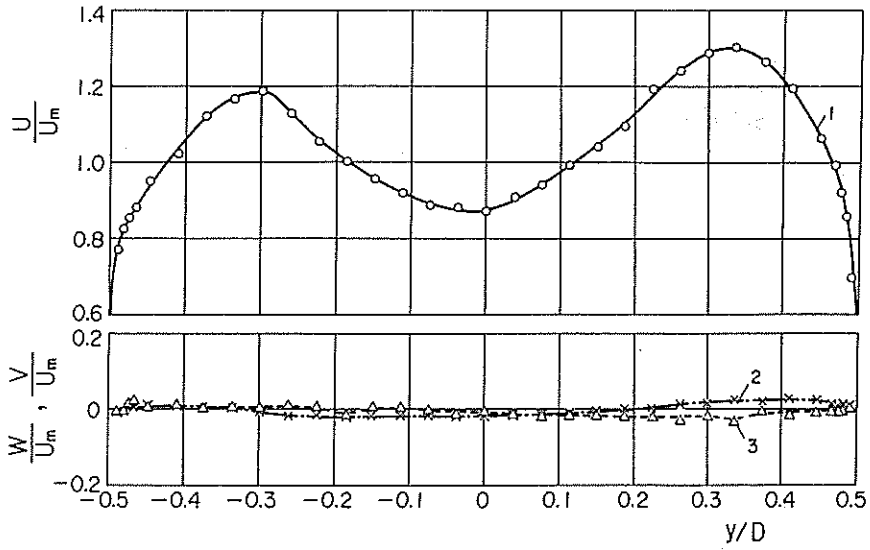
となる。ゆえに本風洞に用いた案内羽根においては、案内羽根の後流はその後縁から測って弦長の約 2 倍下流まで存続することがわかる。

なお第 4 図からわかるように、送風機ハブの後流は広角度ディフューザ出口においてほとんど消滅している。

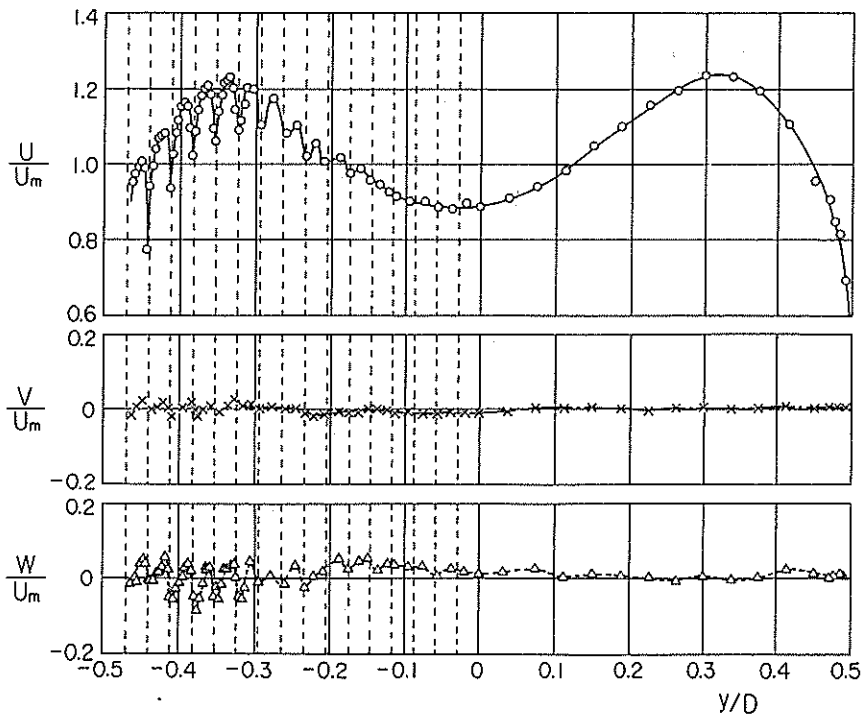
8.4 乱れ強さ分布

第 32 図は、第 3 偏流部と第 4 偏流部のほぼ中間の断面における乱れ強さ分布で、第 30 図の風速分布に対応する。第 29 図に示す第 2 ディフューザ出口直後の乱れ強さ分布と比較すれば、乱れ強さは断面にわたって約 1/2 程度まで自然減衰している。また、乱れ強さの 3 成分を互いに比較すれば、断面にわたって $\sqrt{u'^2} > \sqrt{w'^2} > \sqrt{v'^2}$ となっている。

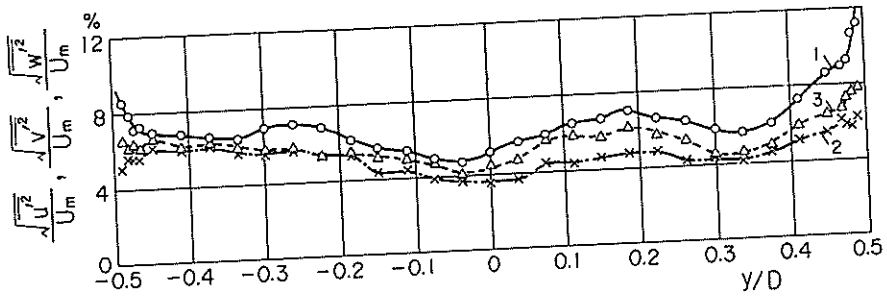
第 33 図は第 4 偏流部の案内羽根列後方の乱れ強さ分布である。第 32 図に示す第 3 偏流部と第 4 偏流部の中間のそれと比較して、案内羽根の後流の影響が消滅した流路の外側半分において、乱れ強さはさらに減衰して等方性に近づき、境界層の外側で乱れ強さは約 4% 程度である。一方、



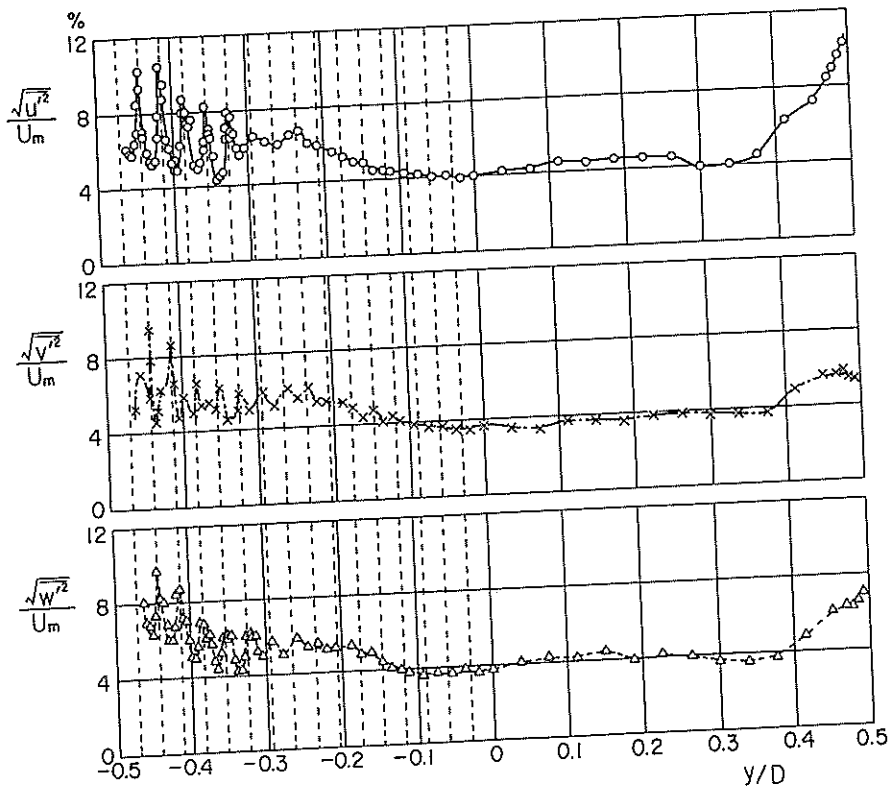
第 30 図 第 3 偏流部と第 4 偏流部の中間の断面における水平面内の風速分布, $D = 2.66 \text{ m}$, $U_m = 8.56 \text{ m/s}$
 1. U/U_m 2. V/U_m 3. W/U_m



第 31 図 第 4 偏流部の案内羽根列下流における水平面内の風速分布, $D = 2.66 \text{ m}$, $U_m = 8.56 \text{ m/s}$



第 32 図 第 3 偏流部と第 4 偏流部の中間の断面における水平面内の乱れ強さ分布. $D=2.66$ m, $U_m=8.56$ m/s
 1. $\sqrt{u'^2}/U_m$ 2. $\sqrt{v'^2}/U_m$ 3. $\sqrt{w'^2}/U_m$



第 33 図 第 4 偏流部の案内羽根列下流における水平面内の乱れ強さ分布. $D=2.66$ m, $U_m=8.56$ m/s

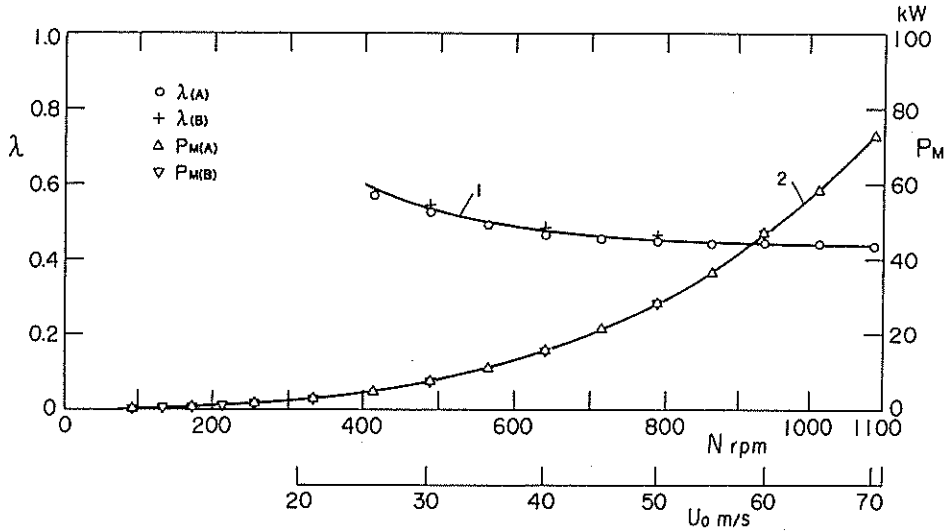
流路の内側では, 各案内羽根の後縁の後方で乱れ強さの 3 成分はそれぞれ極大値を示している。

前述の第 8 図に示す広角度ディフューザ出口直後の乱れ強さ分布と比較すれば, 上記第 4 偏流部下流の乱れ強さは広角度ディフューザを通過することにより 1/2 以下に減衰し, 一方, 乱れは等方性に近い状態から異方性となることがわかる。

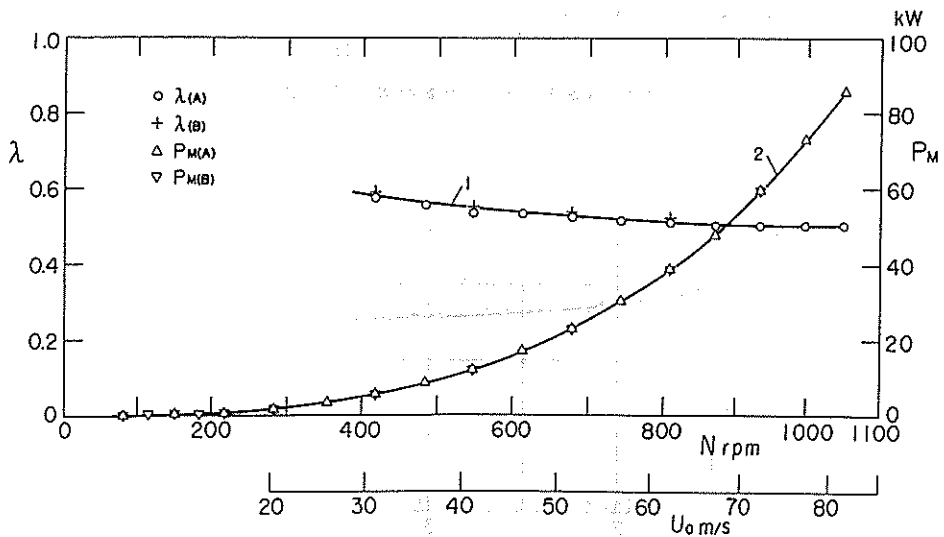
9. パワー係数

パワー係数 λ は次式で定義される,

$$\lambda = \frac{P_M}{\frac{1}{2} \rho U_0^3 A} \quad \dots\dots\dots (2)$$



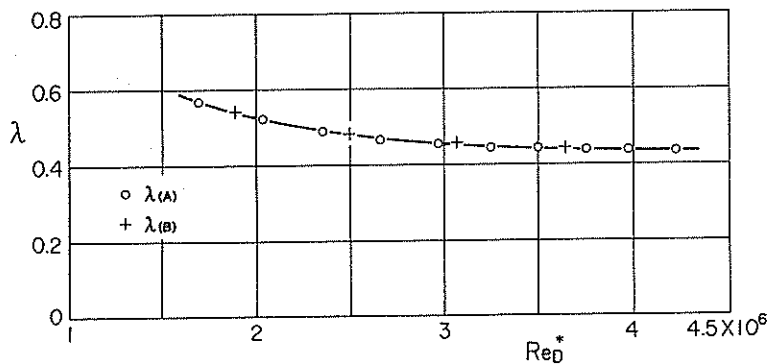
第34図 パワー係数および送風機入力(密閉型測定部)
 添字(A)は回転数上昇方向, (B)は回転数下降方向での測定値を示す(以下同様).
 1. パワー係数 λ 2. 送風機入力 P_M



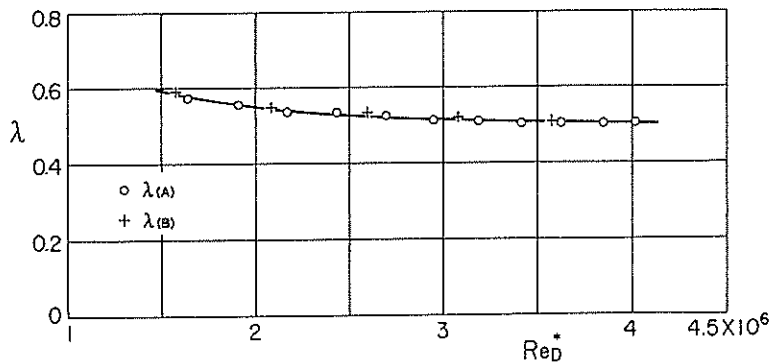
第35図 パワー係数および送風機入力(開放型測定部)
 1. パワー係数 λ 2. 送風機入力 P_M

ここに A は密閉型測定部の場合には測定部基準位置の流路断面積, 開放型測定部の場合には第 2 ノズルの出口断面積である〔1〕.

電動機出力 (= 送風機入力), 測定部基準位置の風速 U_0 および気流温度の測定によって求めた本風洞のパワー係数を, 送風機入力 P_M との関連で, 送風機回転数または風速について第 34 図(密閉型測定部)および第 35 図(開放型測定部)に示した. なお, 測定は初めに回転数上昇方向(添字 A)で, 次に折返し回転数下降方向(添字 B)の順に, かつ任意の速度で定常状態を保って行われた. 図のごとくパワー係数は風速の増加とともに逐次減少し, 他の風洞の場合と同様な傾向〔2〕で変化する. ただし $\lambda_{(A)}$ と $\lambda_{(B)}$ は, 第 34 図と第 35 図に示したように低風速部でわずかな差が生じる. パワー係数の測定値は密閉型測定部で約 $0.57 \sim 0.44$ ($U_0 \cong 25 \sim 70$ m/s), 開放型測定部で約 $0.58 \sim 0.51$ ($U_0 \cong 31 \sim 81$ m/s)であった. パワー係数をレイノルズ数 Re_D^* との関係で表したのが第 36 図(密閉型測定部)と第 37 図(開放型測定部)である. ここに Re_D^* の長さには, 密閉型測定部の場合には測定部対辺距離が, 開放型測定部の場合には第 2 ノズルの出口対辺距離が用いられている. Re_D^* で整理すると, 図のように $\lambda_{(A)}$ と $\lambda_{(B)}$ は一つの曲線上にきれいにプロットされる.



第 36 図 パワー係数とレイノルズ数の関係(密閉型測定部)



第 37 図 パワー係数とレイノルズ数の関係(開放型測定部)

10. 結 論

東北大学高速力学研究所附属気流計測研究施設の低乱熱伝達風洞について、風洞の代表的各断面における風速分布および乱れ強さ分布の測定を、測定部が密閉型の場合について実施し、次の結果を得た。

(1) 本風洞の整流部金網前後における乱れ強さの減衰は $1/25 \sim 1/20$ 程度であり、Dryden と Schubauer の減衰法則によれば 8 枚の金網を設けた場合に相当する。

(2) 本風洞の整流部金網下流から収縮ノズルを経て測定部基準位置に至るまでに、乱れ強さは整流部金網下流における値の約 $1/12$ に減衰する。この値は、収縮ノズルによる乱れ強さの減衰に関する Batchelor と Proudman の理論値の $1/2$ 以下であり、上記区間における乱れの自然減衰の作用が大きいことを示す。

(3) 本風洞の第 1 ディフューザ出口における境界層厚さは約 $0.2D$ である。境界層内の乱れ強さの 3 成分の極大値は、それぞれ壁から約 $0.09D$ の距離にあり、その大きさの順位は平板境界層と同様に $\sqrt{u'^2} > \sqrt{w'^2} > \sqrt{v'^2}$ である。

(4) 送風機入口においては、流路を横切る主軸の後流内で、乱れ強さは最大 16% 程度にまで達する。また、主軸の回転と同一方向の速度成分をもつ主軸まわりの境界層の厚さは、主軸半径の約 1.5 倍まで達する。

(5) 送風機の存在により、第 2 ディフューザ内の風速分布および乱れ強さ分布は、第 1 ディフューザ内のそれとは全く相違する。第 2 ディフューザ内で気流の乱れ強さは次第に増加し、第 2 ディフューザ出口における乱れ強さは断面にわたり 9% ~ 13% 程度となる。また第 2 ディフューザ入口で観察された弱い旋回流は、第 2 ディフューザ内で消滅する。

(6) 送風機ハブの後流は、第 2 ディフューザおよび第 3、第 4 偏流部を通過して広角度ディフューザ入口まで達するが、広角度ディフューザ出口においてほとんど消滅する。

(7) 前記第 2 ディフューザ出口における乱れ強さは、断面積の一定な第 3、第 4 偏流部において次第に減衰し、広角度ディフューザ入口で乱れ強さは約 4% となる。

(8) 広角度ディフューザを通過すると乱れ強さは減衰する。本風洞の広角度ディフューザ出口においては、乱れ強さは上流における値の $1/2$ 以下となる。

(9) 本風洞に用いた案内羽根の後流は、その後縁から測って弦長の約 2 倍下流まで存続する。

(10) ハニカムは、主流に垂直方向の速度成分を除去する目的に対し効果が大きい。各セルの後流に相当する空間的な速度変動と、新たな乱れを発生する。ちなみに、本風洞のハニカム下流の乱れ強さは、5% ないし 6% 程度である。

(11) 密閉型測定部において、壁面境界層内の乱れ強さが一様流における値と一致するまでに必要な壁面からの距離は、境界層厚さに比較して大きく、本報におけるごとき乱れ強さ約 0.02% の低乱風洞においては、上記距離は境界層厚さの約 6 倍である。

(12) 本風洞は、風洞構成要素各部に流れのはく離を生ずることなく、前報[1]の結果と合わ

せて, その設計はきわめて良好であったと言える。

謝 辞

本研究にあたり, 附属気流計測研究施設運営委員会委員として有益な助言を寄せられた神山新一教授および橋本弘之教授に厚く感謝の意を表す。また本研究には終始研究所技官太田福雄君の助力があった。なお図面の作成には本研究所助手宇角元亨君, 技術補佐員星 敦子君および佐藤恵美君の助力があった。実験に必要な工作には, 本研究所附属工場の諸氏の助力があった。さらに本風洞のパワー係数の測定には, 風洞の製作を担当した株式会社荏原製作所および直流電動機の製作を担当した株式会社明電社の技術者諸氏の助力があった。ここに附記して謝意を表す。

文 献

- [1] 伊藤・ほか 13 名 : 東北大学高速力学研究所附属気流計測研究施設低乱熱伝達風洞設備および風洞性能について, 速研報告, 第 44 卷(1980), 93 - 151 頁.
- [2] *H. B. Squire and K. G. Winter* : The Royal Aircraft Establishment 4 ft × 3 ft Experimental Low Turbulence Wind Tunnel. Part I. — General Flow Characteristics, A. R. C., R. & M., No. 2690 (1948).
- [3] 伊藤・小林 : 低乱風洞の設計方法, ターボ機械, 第 9 卷(1981), 211 - 218 頁.
- [4] *P. Bradshaw and R. C. Pankhurst* : The Design of Low-Speed Wind Tunnels, Progress in Aeronautical Sciences, Vol. 5 (1964), pp. 1 - 69.
- [5] 日本規格協会 : 織金網, JIS G 3555 (1977).
- [6] 小林 : 風洞用収縮ノズルの設計について, 速研報告, 第 46 卷(1981), 17-37 頁.
- [7] *D. C. MacPhail, J. G. Ross and E. C. Brown* : The No. 2, 11 $\frac{1}{2}$ -ft. × 8 $\frac{1}{2}$ -ft. Wind Tunnel at the Royal Aircraft Establishment, Farnborough, A. R. C., R. & M., No. 2424(1945).
- [8] *C. Salter* : Experiments on Thin Turning Vanes, A. R. C., R. & M., No. 2469 (1946).
- [9] 小浜・小林・伊藤 : 小型低乱風洞の性能測定結果について, 速研報告, 第 48 卷(1982), 119 - 142 頁.
- [10] *H. L. Dryden and G. B. Schubauer* : The Use of Damping Screens for the Reduction of Wind-Tunnel Turbulence, J. Aero. Sci., Vol. 14(1947), pp. 221-228.
- [11] *K. E. G. Wieghardt* : On the Resistance of Screens, Aero. Quart., Vol. 4

(1953), pp. 186 - 192.

- [12] *G. K. Batchelor and I. Proudman* : The Effect of Rapid Distortion of a Fluid in Turbulent Motion, *Quart. J. Mech. Appl. Math.*, Vol. 7(1954), pp. 83 - 103.
- [13] *J. F. Ripken* : Design Studies for a Closed-Jet Water Tunnel, St. Anthony Falls Hyd. Lab., Univ. Minnesota, Technical Paper No. 9, Ser. B (1951).
- [14] *P. S. Klebanoff* : Characteristics of Turbulence in a Boundary Layer With Zero Pressure Gradient, NACA TR, No. 1247(1955).

附録 1. 密閉型測定部の風速分布(補遺)

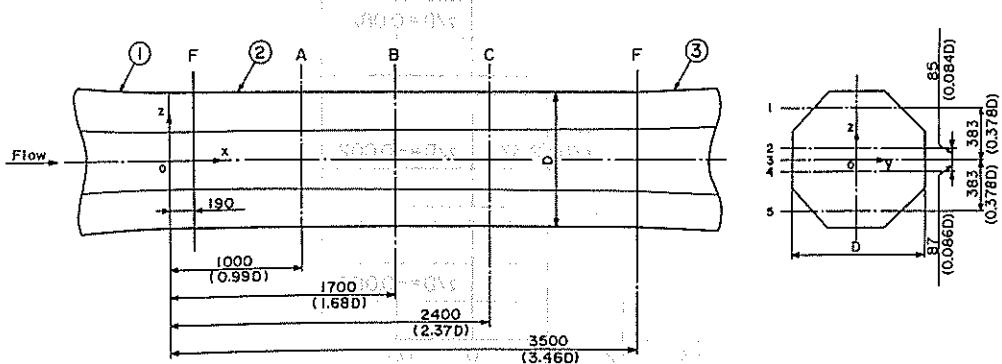
1.1 測定部の寸法および測定方法

密閉型測定部基準断面の風速分布および乱れ強さ分布については既に報告してある〔1〕。本報では、前報で省略した代表的な他の断面の風速分布について述べる。第 38 図に測定断面の寸法を示す。すなわち、上流から順に A, B, C 断面とし、前報〔1〕で省略した B, C 断面の上から下へ順に 1, 2, 3, 4, 5 の水平面を Y 方向にトラバースして風速分布を測定した。測定に際しては外径 6 mm のプラントル型標準ピトー管を翼型ステムの中央に取付け、ステムの両端を観測窓用盲板に通して、水平方向に移動させた。一方、壁面近傍の速度分布を精度良く測定するには熱線流速計を用い、熱線プローブを L 型プローブ・サポートに取付けて使用した。

1.2 風速分布

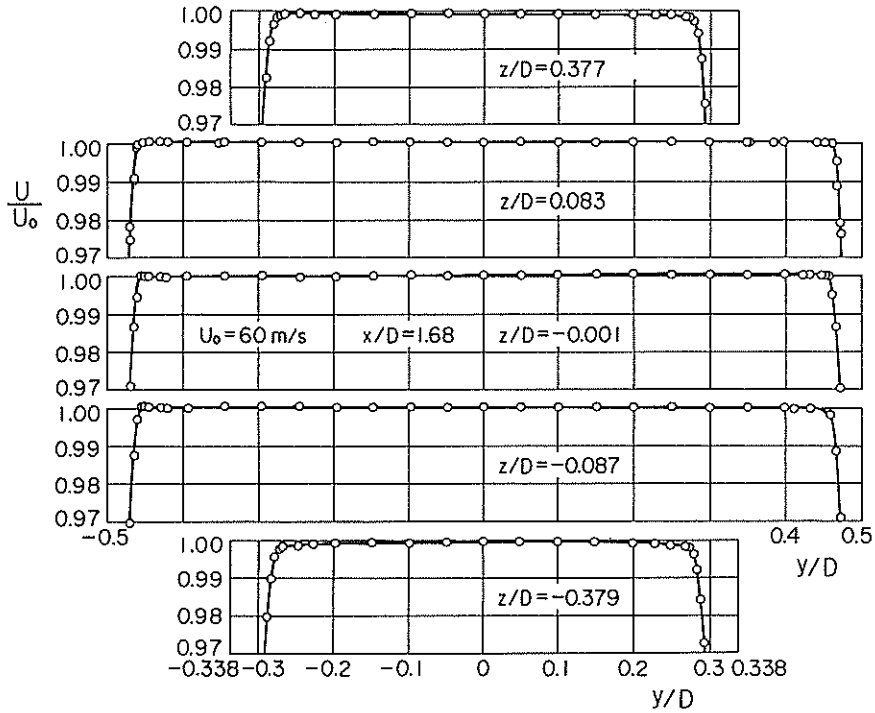
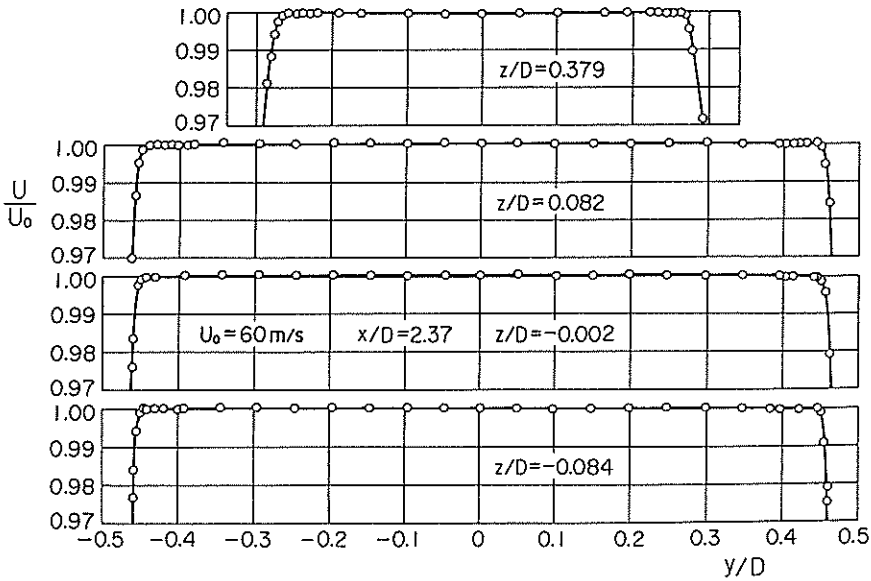
第 39 図は B 断面内の風速分布で、A 断面の風軸中心における風速 $U_0 = 60$ m/s の場合について測定している。図において風速 U は上記 U_0 で無次元化して示した。風速分布は $\pm 0.1\%$ 以内の偏差であり、A 断面とはほぼ同程度のきわめて一様な分布をしているといえる。

第 40 図は C 断面内の風速分布の測定結果である。最下部のトラバース位置 5 の測定結果がな



第 38 図 密閉型測定部(寸法単位 mm, $D = 1011$ mm)とトラバース位置(右側図は B 断面の寸法を示す)

1. 収縮ノズル 2. 密閉型測定部 3. 第 1 ディフューザ
A, B, C: 測定断面 F: フランジ 1, 2, 3, 4, 5: 水平トラバース位置

第 39 図 密閉型測定部の風速分布, B 断面, $x/D = 1.68$, $U_0 = 60$ m/s第 40 図 密閉型測定部の風速分布, C 断面, $x/D = 2.37$, $U_0 = 60$ m/s

いのは、この位置に強度上観測窓がなく、したがってトラバース孔を開けることが好ましくないためである。4 箇所をトラバースした結果は、やはりきわめて様な風速分布を示している。

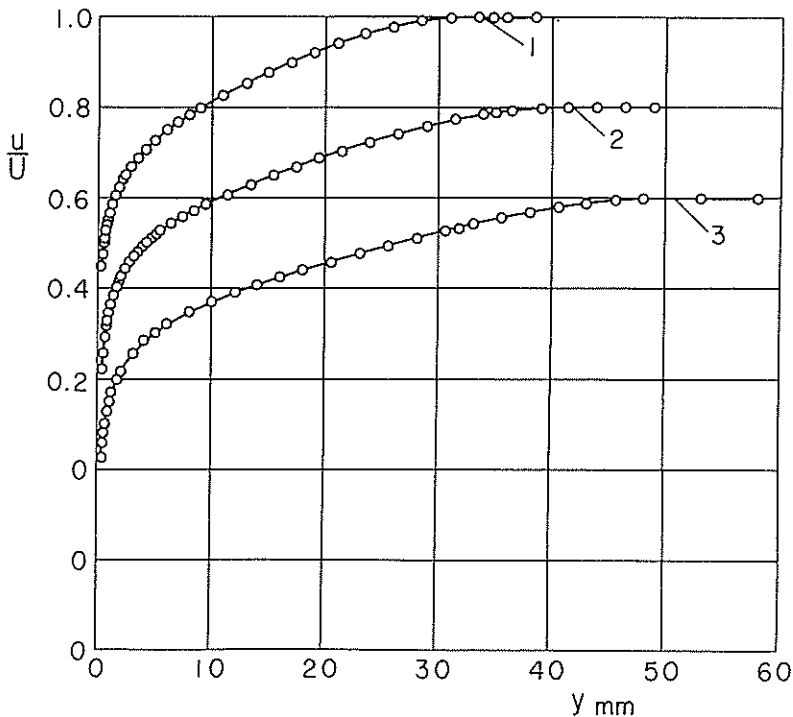
以上のように、B, C 断面の風速分布および既報〔1〕で述べた A 断面の風速分布の測定結果から、本風洞密閉型測定部全体の風速分布はきわめて良好であると言える。

附録 2. 測定部壁面の境界層と風量の計算

2.1 測定部壁面の境界層内の速度分布と風量

密閉型測定部壁面の境界層内の速度分布の測定は、第 38 図に示す A, B, C 各断面の風軸中心を含む水平面内で実施した。熱線プローブの位置は、A, B, C 断面よりそれぞれ 76 mm 上流である。測定部 A 断面の風軸中心上の速度 U_0 がほぼ 60 m/s の場合について、上記各断面の境界層内の速度分布を測定した結果を第 41 図に示す。ここに U は境界層の外縁速度、 u は境界層内の速度である。図示の速度分布は、直径 0.75 mm のトリップワイヤを収縮ノズル出口から上流に $1.19D$ の位置に取付けた状態〔1〕で測定されている。図より、このときの測定部壁面の乱流境界層の厚さは、A 断面で約 30 mm, B 断面で約 40 mm, C 断面で約 50 mm であることがわかる。

境界層の排除厚さは断面にわたって一定との仮定の下に、風洞内を循環する風量 Q は近似的につぎの式から求められる。



第 41 図 密閉型測定部壁面の境界層内の速度分布, $U_0 = 59.6$ m/s
1. A 断面 2. B 断面 3. C 断面

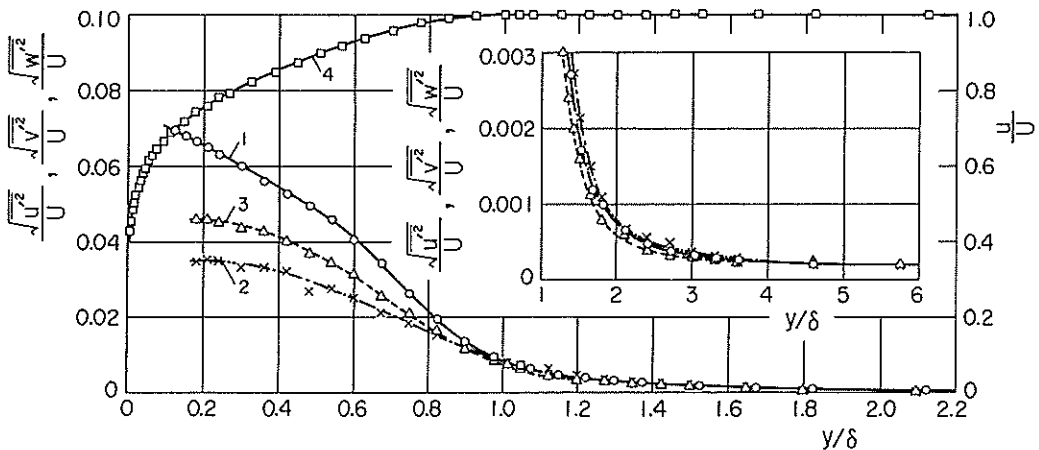
$$Q = U_0(A - \Delta A) \dots\dots\dots(3)$$

ここに U_0 は風軸中心上の速度, A は流路断面積, ΔA は境界層によって排除された断面積である¹¹. ちなみに第 41 図に示す A 断面の速度分布について排除厚さ δ^* を求めると, $\delta^* = 4.51 \text{ mm}$ となる.

2.2 測定部壁面の境界層内の乱れ強さ分布

測定部 A 断面の風軸中心上の速度 U_0 が 30 m/s の場合について, A 断面の壁面境界層内の乱れ強さ分布を測定した結果を第 42 図に示す. ここに横軸 $\delta (= 33.4 \text{ mm})$ は速度分布曲線のこう配から求めた境界層厚さである. 境界層内における乱れ強さの 3 成分の分布状態は, Klebanoff [14] の測定結果と定性的に一致している.

注目すべきは本風洞におけるごとき乱れ強さ約 0.02% の低乱流においては, 乱れ強さの 3 成分が境界層外側の一様流における値に一致するまでに必要な距離が, 境界層厚さに比較してはるかに大きいことである. このことは, 前報 [1] において密閉型測定部の風速分布および乱れ強さ分布が流路中央部における値から外れ始める位置が, 両者で著しく相違することからも容易に推定できる. 本実験結果によれば, 乱れ強さが一様流における値と一致するために必要な壁面からの距離は, 図に示すように境界層厚さの約 6 倍である.



第 42 図 密閉型測定部 A 断面の境界層内の乱れ強さ分布, $U_0 = 30.0 \text{ m/s}$
 1. $\sqrt{u^2}/U$ 2. $\sqrt{v^2}/U$ 3. $\sqrt{w^2}/U$ 4. u/U

11. 測定部断面の形状は, フィリットのため正八角形から若干変形している. 八角形の相隣る二辺の長さを l_1 , l_2 , 対応する対辺距離を D_1 , D_2 , 境界層の排除厚さを δ^* とすれば

$$A = D_1 l_1 + D_2 l_2 \dots\dots\dots(4)$$

$$A - \Delta A = \left(1 - 2 \frac{\delta^*}{D_1}\right)^2 D_1 l_1 + \left(1 - 2 \frac{\delta^*}{D_2}\right)^2 D_2 l_2 \dots\dots\dots(5)$$

東北大学 高速力学研究所報告

第 54 卷

昭和 60 年 8 月 8 日 印刷

昭和 60 年 8 月 13 日 発行

編集者 東北大学 高速力学研究所長

発行者 伊 藤 英 覚

仙台市片平二丁目 1 番 1 号

電 話 (27) 6 2 3 2 番

印刷所 株式会社 今野印刷所

仙台市六丁の目西町 4 番 5 号

電 話 (代表) (88) 6 1 2 3 番

印刷者 今 野 智 吉

【非売品】

