

新設の風工学研究用境界層風洞について

石崎 潑雄・桂 順治・谷池 義人

A BOUNDARY LAYER WIND TUNNEL EQUIPPED FOR WIND ENGINEERING RESEARCH

By *Hatsuo ISHIZAKI, Junji KATSURA and Yoshihito TANIKE*

Synopsis

A new wind tunnel with open-circuit configuration designed specifically for structural aerodynamics study is described and its performance is reviewed. It has a working section of 2.5 m wide, 2 m high and 21 m long with the maximum windspeed of 25 m/s provided by the 170 kw variable speed electric motor. The wind tunnel has some special apparatuses to simulate the atmospheric boundary layer. On the upstream floor of the working section, various combinations of flow processing devices can easily be installed. The ceiling of the working section is movable vertically and independently every one meter length to adjust the static pressure uniform in the tunnel. The working section is equipped by a 4-component traversing mechanism which allows the remote control of positioning of sensing probes. The special features of the tunnel are : (1) non-turbulent wind in the upstream, (2) uniformity of the wind speed and pressure, (3) feasibility of the wind control and the ceiling adjustment, (4) the attached automatic system for measurements and (5) quietness around the tunnel.

1. ま え が き

近年、超高層ビルや長大吊り橋などの建設が盛んになるにつれて、風に対する構造物の安全性を検討することが、ますます重要になってきた。このような構造物の耐風設計を行う場合に、従来どおりの考え方では、安全性や経済性に関して不明確な点が多く、新しい合理的な耐風設計法を早急に実現する必要がある。また、構造物の建設される風環境の面からも、従来のように構造物が平地に建っているという仮定では十分でなく、地形あるいは周囲の環境などによる気流の変化についても考慮しなければならない。この分野の研究において、周囲の環境を含め自然風を再現するような風洞で模型実験を行うことは、きわめて有効な問題解決の手段であり、また、このような模型実験を除いては、研究の発展も難しい。

したがって、このような実験を行うことのできる境界層風洞実験装置の設置を要望していたが、幸いなことに、昭和54年度からその設置のための予算が認められ、昭和56年3月に完成した。本報は、この新設された境界層風洞の特徴と性能を指摘し、さらにその気流特性について調べた結果にもとづいて、研究上の有効性について述べたものである。

2. 境界層風洞実験装置

2.1 概 要

本境界層風洞とそれを収める建屋は、京都大学防災研究所構内に建てられており、その概略を Fig. 1 に示す。本風洞は単回路吹出型、いわゆるエッフェル型の風洞である。測定部の出口から吹き出た流れは、実験室内を循環し、風上側の送風機にもどり、再び測定部に送りこまれるようになっている。

本風洞の特徴としては、1) 測定部内の乱れの強さが0.4%以下で非常に乱れが小さいこと、2) 建屋の内壁

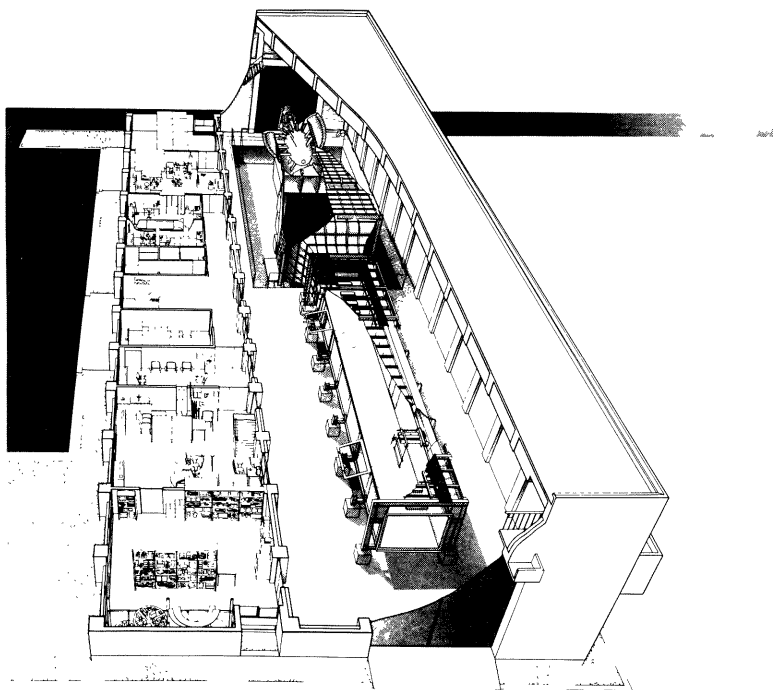


Fig. 1 Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory

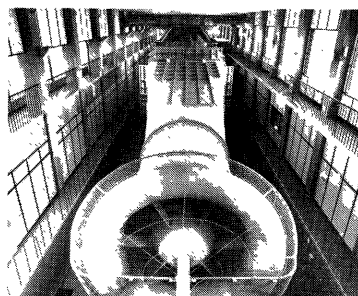
に吸音材を使用しているために、風洞運転時の実験室内の騒音が低いこと、3) 測定部が21mと長いために、種々の大気乱流境界層を作り出しやすいこと、4) 測定部の天井を上下に動かして、測定部内の静圧を一定に保つことができること、等があげられる。

2.2 風洞の諸元

本風洞の形状と寸法を Photo. 1 (a, b) と Fig. 2 に、風洞各部の各称を Fig. 3 に示す。また、風洞の諸元及び性能は Table 1 に示すとおりである。



(a)



(b)

Photo. 1 Outside of Boundary Layer Wind Tunnel

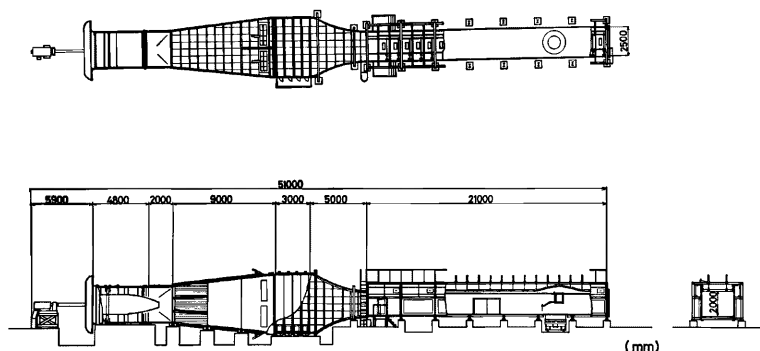


Fig. 2 Boundary Layer Wind Tunnel

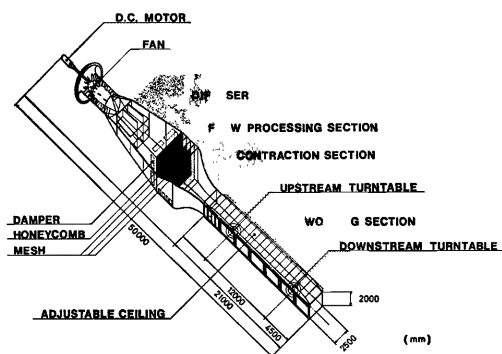


Fig. 3 General arrangement of Boundary Layer Wind Tunnel

Table. 1 Characteristics and performances of Boundary Layer Wind Tunnel

Wind Tunnel	Type	Boundary Layer Wind Tunnel with Open-circuit Configuration
	Total Length	51 m
	Working Section	2.5 m Wide, 2 m High, 21m Long
	Wind Velocity	0.2~25 m/s
	Turbulence Intensity	Less than 0.4 %
Motor	Contraction Ratio	1 : 5
	Type	Thyristor Leonard System
	Power	170 kw
	Revolution	10~500 r. p. m
Fan	Type	ASM Type with Horizontal Axis
	Diameter	3 m ϕ (14 Fans)
	Capacity	125 m ³ /s
	Total Pressure	95 mm Aq

本風洞は、風上から電動機、送風機、拡散胴、整流胴、縮流胴、測定胴（測定部）の順に構成されている。

電動機は、サイリスタレオナード方式の直流モーターで、その最大出力は170 kwである。モーターの回転数は、10~500 r. p. mの範囲内で連続的に変えられる。また、モーターの回転は、14枚の羽根をもつ直径3 mの送風機に直結されている。送風機によって送りこまれる風量は最大125m³/sで、そのときの全圧は95 mmAqである。

拡散胴（DIFFUSER）の側壁には、8枚のダンパーを設け、必要に応じてダンパーを開放し、内部の風を風洞外に放出することによって、測定部内の風速をできるだけ低くすることができる。

整流胴（FLOW PROCESSING SECTION）の断面は、一辺5 mの正方形で、その中にハニカム型の整流格子（直径2.2 cm、長さ14 cm、厚さ0.2 mm）と3枚の金網（メッシュ間隔0.7 mm、厚さ0.1 mm）を、75 cm間隔で風上から順に設けた。ここで整流された乱

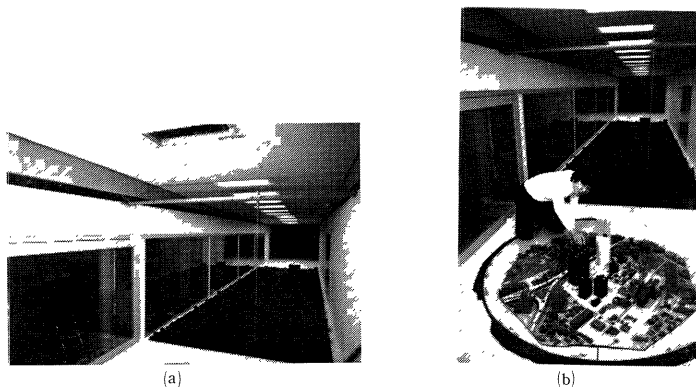


Photo. 2 Inside of the working section

れの非常に小さい風は、縮流制 (CONTRACTION SECTION) で加速され、測定部へ送り出される。このときの縮流比は1 : 5である。

測定部 (WORKING SECTION) の長さは21 mで、その断面は幅2.5 m、高さ2 mの長方形である。測定部の架構は鉄骨であるが、天井、床、及び一方の側壁は合板で作り、他方の側壁には板ガラスを用いた (Photo. 2 (a, b) 参照)。測定部内の風速は、拡散制のダンパーを閉じた状態で、0.5 m/s から 25 m/s まで連続的に変えることができる。さらにダンパーを開放することによって、風速を0.2 m/s まで下げることができる。

測定部の風上側と風下側には、直径2 mのターンテーブルがあり、風上側のターンテーブルでは一様流中の基礎的な実験が、風下側のターンテーブルでは本風洞の本来の目的である乱流境界層流中での応用的な実験が行われる。測定部の天井は21枚のパネル板で構成されており、基準の高さから上方へ40 cm、下方へ10 cm 動かすことができる。この操作により、境界層の発達によって生じる静圧勾配を、測定部内ではほぼ一定に保てるようにしてある。

2.3 室内の環境

風洞を収めている建物は、R. C 造の平屋であり、風洞実験室と研究棟とは、単によって仕切られている。風洞実験室内の壁面全体に厚さ5 cmのグラスウールを貼り付けて、室内の騒音を低減した。風速20 m/s 時の室内の騒音レベルは、モーター付近で88 dB(A)、風下側のターンテーブル付近で75 dB(A)、研究棟の計測室内で44 dB(A)、建物の玄関で45 dB(A) 程度であった。

また、風速10 m/s 時の実験室内の温度上昇は、Fig. 4 に示すとおりである。これによると、風洞を4時間動かして、2°C程度の温度上昇しか見られなかった。

これらの結果、実験室内の騒音及び温度上昇はいずれも小さく、風洞実験を行う上でまったく支障がないものと思われる。

2.4 計測装置

研究棟内から風下側のターンテーブルとトラバース装置を見わたせる位置に、計測室を設けた。風洞実験室の床下と計測室の床下とは、フリーアクセスでつながっている。そのために種々の計測ケーブルが通ってすみ、電気的なノイズを防ぐ工夫がなされている。

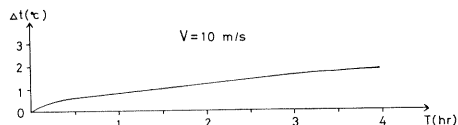


Fig. 4 The temperature rise in the laboratory

計測室には、ミニコンピューター PANAFACOM U-1400 とパーソナルコンピューター PC-9800を設置し、ターンテーブルとトラバース装置の制御、多点切り換え式（96点）の圧力変換器の自動測定、及び実験データの収録とオンライン解析等を行っている。

風下側のターンテーブルの諸元を **Table 2** に示す。ターンテーブルは測定部の風上端から 4.5 m と 16.5 m 離れた位置にあり、これらの位置の床面には深さ 60 cm のピットが掘ってある。これにより実験模型の搬入及び据え付けなどの作業がしやすくなっている。風上側のターンテーブルの回転は手動であるが、風下側では自動であり、その性能は **Table 2** に示すとおりである。

トラバース装置の諸元を **Table 3** に示す。その X, Y, Z 軸を、それぞれ風向方向、風向直角水平方向、風向直角垂直方向にとった。また、 θ は Z 軸まわりの回転角を示す。トラバース装置の移動範囲は、測定部のほぼ全域にわたっている。X 方向の移動の際にはケーブルの処理が問題になるが、ここでは **Fig. 2** の断面図に示すように壁面の外側にケーブルを収める戸袋（風洞内の風が外に漏れないように気密性を保つ）を設けて、ケーブルの存在によって風洞内の気流が乱されないように工夫した。

3. 風洞気流の性質

3.1 一様流の性質

測定部の座標を **Fig. 5** に示す。座標軸の原点 ($X=0$, $Y=0$, $Z=0$ mm) を測定部の前端の床面中央にとった。測定部内に何も入れない状態で、風洞内の気流特性を調べた。平均風速はピトー管で、変動風速は定温度型の熱線風速計で測定した。

i) 風上側の測定部の気流特性

$X=2000$, $Y=0$, $Z=900$ mm の位置での、平均風速とモーターの回転数 (r. p. m) との関係を **Fig. 6** 示す。図中の一

Table. 2 Performances of the turntable

Diameter	2 m
Rotation Range	0°~360°
Rotative Velocity	2°/s
Accuracy	±1°/360°
Detection of Angle	Potentiometer
Vertical Motion	0~500 mm

Table. 3 Performances of the traverse system

Coordinates	X	Y	Z	θ
Performances				
Covering Range	Moving Range 18m Measuring Range 3.5m	1.7 m	0.7 m	±180°
Accuracy	±1.0 mm/m	±0.5mm/FS	±0.5mm/FS	±1°
Moving Velocity	100 mm/s	20 mm/s	20 mm/s	1°/s
Motor	Pulse Motor			

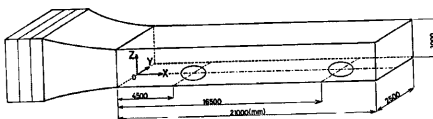


Fig. 5 A coordinate of the working section

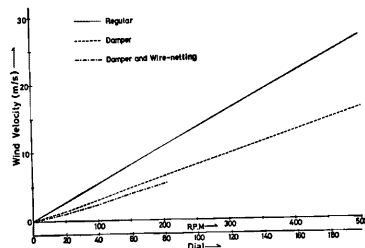


Fig. 6 Wind velocity versus rotation of D. C. motor

線は通常使用のとき, 線はダンパーを開放したとき, - - - - 線はダンパーを開放し, 測定部の出口 ($X=21000$ mm) に金網を取り付けたとき, の風速と回転数との関係である。Fig. 7 は同じ位置での平均風速と風の乱れの強さとの関係を示す。乱れの強さは, 一般的に風速の増加につれて減少する傾向にあるが, ここでもその傾向がうかがわれる。また, 10m/s 以下の低風域においても, 乱れの強さは 0.5%以下になり,

整流された非常に乱れの少ない流れが作られている。

測定部の前縁から 2 m 風下側の断面内 ($X = 2000$ mm) の平均風速分布を Fig. 8 (a, b) に, 同じく風の乱れの強さの分布を Fig. 9 (a, b) に示す。風速 5 m/s 時の結果を a 図に, 10 m/s 時の結果を b 図に示す。なお, 風速分布は断面内の風速の平均値を 0 とし, それからのばらつきをパーセントで表示したものである。平均風速のばらつきは, いずれも $\pm 0.6\%$ 以下で

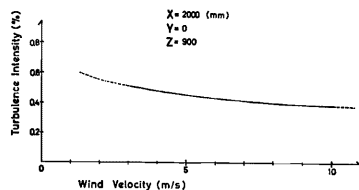
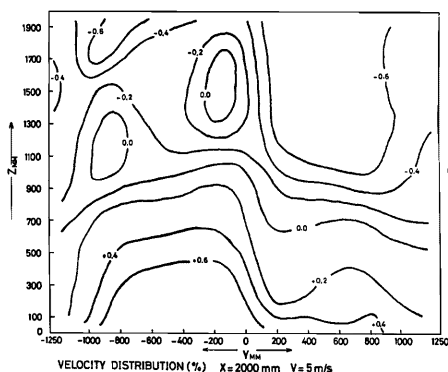
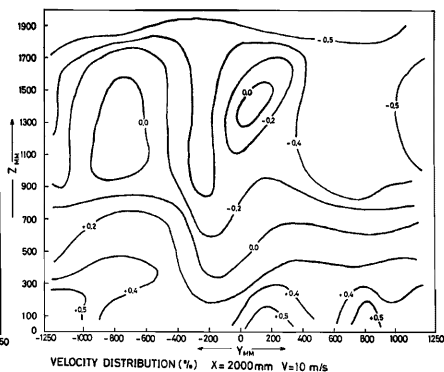


Fig. 7 Turbulence intensity versus wind velocity

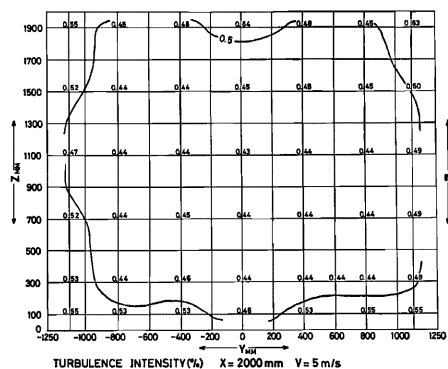


(a) ($V=5$ m/s)

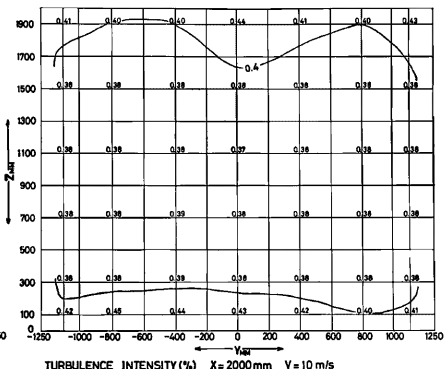


(b) ($V=10$ m/s)

Fig. 8 Velocity distributions across the upstream working section



(a) ($V=5$ m/s)



(b) ($V=10$ m/s)

Fig. 9 Turbulence intensity distributions across the upstream working section

あり、全断面にわたり均一な速度をもつ風が作られている。また、断面内の風速の均一性は、風速が増加するとさらに良好になる。風の乱れの強さの分布も、全断面にわたってはほぼ一様となり、風速 5 m/s 時では 0.5% 未満に、10 m/s 時では 0.4% 未満になる。

これらの結果から、風上側の測定部では、全断面にわたり風速が均一でかつ乱れの非常に小さい流れが作られているために、一様流中の基礎的な実験を行う上で非常に良い気流状態になっている。

ii) 風下側の測定部の気流特性

次に、風下側のターンテーブル位置 ($X=16500$ mm) での断面内の平均風速分布を **Fig. 10. a** に、乱れの強さの分布を **Fig. 10. b** に示す。この位置では、風洞断面の 60~70% の領域において、風速はほぼ均一（風速のばらつきは $\pm 1\%$ 以内）になり、乱れの強さもほぼ一様（1% 未満）になるが、床、側壁、及び天井付近においては、次の **Fig. 11 (a, b)** に見られるように、境界層が発達してくるために、風速は低くなり、乱れの強さも大きくなる。

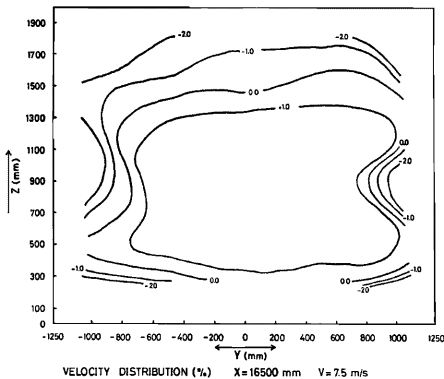


Fig. 10-a Velocity distribution across the downstream working section

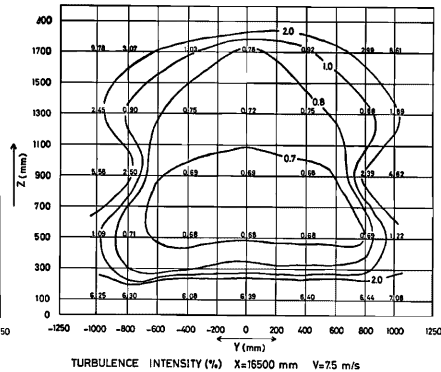


Fig. 10-b Turbulence intensity distribution across the downstream working section

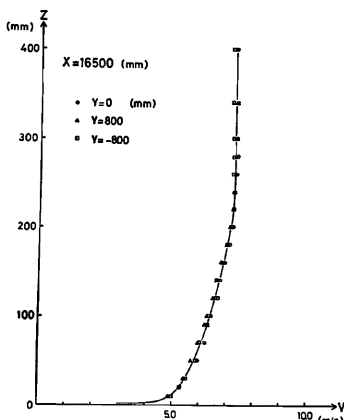


Fig. 11-a Profiles of the wind velocity

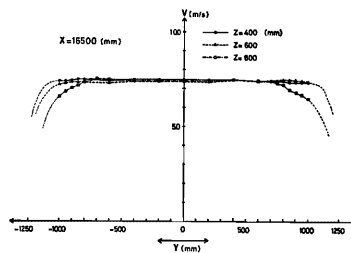


Fig. 11-b Wind velocity distributions along the horizontal direction

Fig. 11. a は、風下側のターンテーブルの中央及びそれから Y 方向へ ± 800 mm 離れた地点での、高さ方向の平均風速分布を、Fig. 11. b は、3 種類の高さ ($Z=400, 600, 800$ mm) での、Y 方向の平均風速分布をそれぞれ示す。風洞内の壁面近くでは、空気粘性による剪断応力によって風速は低くなり、境界層が発達する。境界層の発達には風下に向うにつれて大きくなり、測定部の前縁から 16.5 m 離れた壁面上では、その厚さは床面、側面ともに 20 cm 程度になる。

3.2 乱流境界層の性質

測定部の風上側に、実際の市街地の約 1/250 の縮尺模型を 10 m にわたって敷きつめて、これを地表面粗度 (いわゆるラフネス) として乱流境界層を作った (Photo. 2 (a, b) 参照)。

i) 測定部の静圧勾配

市街地模型を敷いたときの測定部内の速度圧と静圧を、ピトー管を用いて測定し、それらの変化の様子を Fig. 12 (a, b, c) に示す。a 図は X 方向、b 図は Y 方向、c 図は Z 方向の P_0 と ΔP_s の変化 (但し a 図は ΔP_s のみ) を示す。ここで P_0 は速度圧を、 ΔP_s は測定部内の静圧から実験室内の静圧を引いた値を示す。吹き出し型の境界層風洞においては、測定部内の静圧は出口付近を除き実験室内の静圧より高くなるために、 ΔP_s は常に正になる。

天井を平にした状態で X 方向の静圧 ΔP_s (風洞断面のほぼ中央で測定) の変化を調べると、a 図の上段の実線のように、風上側と風下側の静圧に大きな差が見られる。これに対し、測定部の天井を a 図の下段に示すように変化させると、 ΔP_s の変化は a 図の上段の破線のようにになる。地表面を吹く自然風の静圧は、

構造物レベルではほぼ一定であるので、風洞実験においても測定部内の静圧を一定に保つ必要がある。本風洞を用いると、境界層の発達によって測定部内に生じる静圧勾配を、天井を上下させることによって一定にすることができた。

風下側のターンテーブル付近 ($X=15000$ mm) の断面内においては、b, c 図に示すように静圧 ΔP_s の変化はほとんど見られない。Prandtl の境界層理論¹⁾によれば、層流境界層内で静圧は一定になるが、このことは乱流境界層内においても成り立つことが実験的に確かめられた。また、c 図において、天井を調節すると速度圧 P_0 が小さ

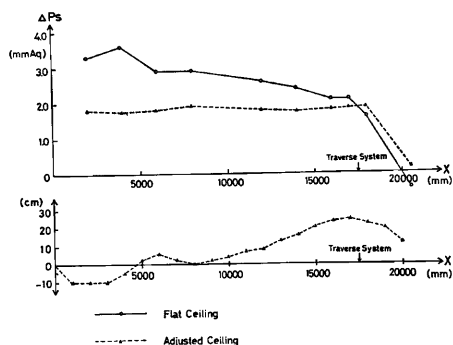


Fig. 12-a Static pressure along the flow direction

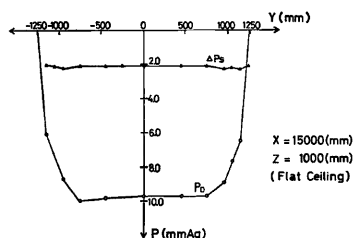


Fig. 12-b Static and dynamic pressure distributions along the horizontal direction

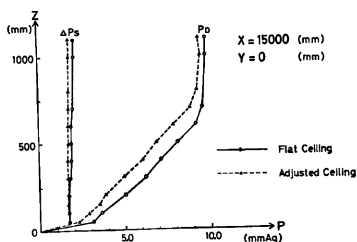


Fig. 12-c Static and dynamic pressure distribution along the vertical direction

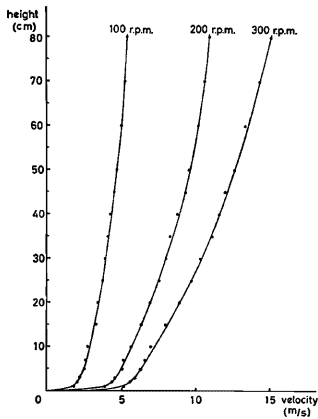


Fig. 13-a Profiles of the wind velocity with the roughness blocks at the upstream working section

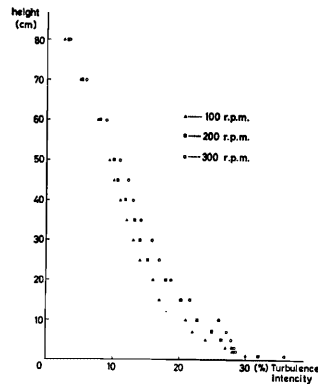


Fig. 13-b Turbulence intensity distributions along the vertical direction

くなるが、これは天井を上げたために断面積が増大し、その内で風速が低下するためであろう。

ii) 風下側のターンテーブル付近の乱流境界層

X方向の静圧勾配を一定に保った状態で、風下側のターンテーブル付近 ($X=15000$ mm) の乱流境界層の性質を調べた。境界層上の一般流の風速で約 5 m/s から約 15 m/s までの風のプロフィールを Fig. 13. a に示す。図中の100, 200, 300r. p. m は、それぞれの風速時のモーターの回転数である。この風速勾配を次式で示す巾法則で近似すると、巾指数 α はいずれも約 0.35 になり、都市上空の風のプロフィール ($\alpha=0.3\sim 0.5$)²⁾ に相当する。また、このときの境界層の厚さは約 1 m であった。

$$V_z/V_0 = (Z/Z_0)^\alpha \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V_z は高さ Z での風速、 V_0 は基準高さ Z_0 での風速を示す。

乱れの強さの高さ方向の分布を Fig. 13. b に示す。乱れの強さは高さとともに減少し、その値は地面上 5 cm で 28%、10 cm で 22%、20 cm で 18%、30 cm で 15%、50 cm で 10% 程度となり、都市上空に吹く風の乱れに匹敵する。また、Fig. 13. c は、モーターの回転数が 200 r. p. m のときの風向方向の乱れのスケール L_x をあらわしたものである。 L_x は、地面上 10~60 cm の高さで約 20 cm となった。したがって、風洞実験用模型として、1/300~1/500 程度の縮尺模型を採用すれば、境界層の厚さは実際には 300~500 m、風向方向の乱れのスケールは 60~100 m に相当し、都市に吹く自然風をよく近似していることがわかる。

これらの結果から、本風洞によって作った乱流境界層の基本的な性質、すなわち風のプロフィール、乱れの強さ、乱れのスケール、及び静圧勾配を、実際に都市を吹く自然風と一致させることができ、風洞内に自然風を再現できることがわかった。

4. む す び

京都大学防災研究所に新設された境界層風洞の性能とその気流特性について調べた。その結果を以下に記

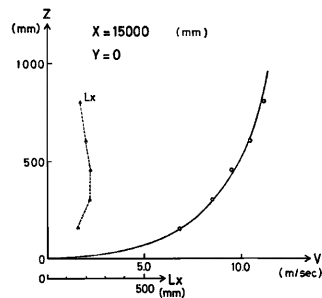


Fig. 13-c Turbulence scale along the flow direction

す。

- 1) 風洞運転時の実験室内の騒音及び温度上昇はいずれも小さく、非常に良い実験環境が得られた。
- 2) ターンテーブル、トラバース装置等の計測装置がコンピューターによってオンラインで制御することができ、風洞実験の精度と能率が向上した。
- 3) 測定部の風上側においては、断面内の風速分布が均一で、風の乱れも非常に小さくなることから、一様流中の基礎的な実験を行う上で、非常に良い気流状態が得られた。
- 4) 測定部（幅2.5m、高さ2m、長さ21m）の風上側に市街地模型を敷き詰め、さらに測定部の天井を調節することによって、都市に吹く自然風を風洞内に精度よく再現することができた。

参 考 文 献

- 1) 谷一郎；流れ学，岩波書店，1967，pp.91～126.
- 2) 石崎潑雄；耐風工学，朝倉書店，1977，pp.35～37.