

風洞床面の粗度の変化による気流の性状について

石崎潑雄・桂 順治・谷池義人・丸山 敬

WIND CHARACTERISTICS ABOVE THE VARIOUS ROUGHNESS IN THE BOUNDARY LAYER WIND TUNNEL

By *Hatsuo ISHIZAKI, Junji KATSURA, Yoshihito TANIKE*
and *Takashi MARUYAMA*

Synopsis

The flow characteristics above an urban model of 1/250 scale and artificial grasses are experimentally investigated in a wind tunnel.

The boundary layer thicknesses above the urban model and artificial grasses increase with the free-stream speed. There is a layer with variations in mean wind speed, turbulence intensity and the Reynolds shear stress close to the ground surface. The turbulent flow in the upper boundary layer has the following characteristics; the mean wind speed profiles can be shown by logarithmic curves, the distributions of turbulence intensity are similar independent of the free-stream speed and Reynolds shear stress decreases with height.

1. はじめに

耐風設計や新たに建てられる建築物周辺の風環境の変化を予測する上で、風洞実験は最も有効な方法の一つである。この風洞実験に際して、自然風に近い性状をもつ風を風洞内につくり出すことが要求されるが、その方法の一つとして、風洞床面に粗度を与える方法がある。この場合、建築の分野では対象が市街地となることが多いので粗い粗度を用いることになる。

これまで、粗い粗度により発達した境界層に関する研究は、Sadeh, Cermak & Kawatani¹⁾, Jensen & Frank²⁾, Mulhearn & Finnigan³⁾ 等が、木の模型やブロック、あるいは石を風洞床面にランダムに敷きつめて、また Cook⁴⁾, Iqbal & Khatri⁵⁾, Tileman, Reinhold & Marshall⁶⁾, 片山・後藤・堀⁷⁾ 等が、粗度を規則的に配置して行っている。しかし、市街地における大気境界層は複雑な形状をもった地面を吹いてくる結果として発達するので、地面付近の気流性状は地面粗度の形状や分布、密度等に左右されて変化すると考えられる。従って、風洞実験に際しては、できるだけ地表面と同様な粗度を与えることが望ましい。また風洞内に作られた境界層と、大気境界層の相似性を検討する場合には、実用上、平均風速の鉛直分布を対数法則あるいはべき法則にあてはめ、各法則におけるパラメータである粗度長やべき指数を合わせているのが現状である。ところが、Sadeh, Cermak & Kawatani¹⁾ 等が指摘しているように、粗度が粗い場合には平均風速の鉛直分布を対数法則で近似することが、特に床面付近で困難となる。このように、粗い粗度により発達した境界層においては、床面付近の気流性状も考慮した上で大気境界層との相似性を検討しなければならない。

地面付近の気流性状に関して、森林内や背の高い草原内のいわゆるキャノピー層における研究は多く行われているが、市街地におけるものは少ない。そこで本研究では都市および田園を代表する粗度の例として、市街地模型および人工芝を風洞床面に敷きつめたときに生じる風洞内の気流性状を調べ、床面粗度の風洞内気流性状に及ぼす影響を明らかにした。なお、風洞内において、自然風を再現させる範囲で、大気圧はほぼ一定の値をとると考えられる。従って実験に際しては風洞内の静圧が主流方向に一定となるようにしてある。

2. 実験方法

2.1 風洞

実験は京都大学防災研究所内の境界層風洞で行った。この風洞は単回路吹出型で、十分な吹送距離がとれるように測定部の長さは21mあり、内部の静圧を主流方向に一定にするために天井を上下することができる。風速は0.2m/sから25.0m/sまで連続的に変えることができ、風洞内に何も入れず、中心の風速が10.0m/sのときに測定部の風上側から2.0mの位置で、乱れの強さは非常に小さく0.4%以下である¹⁾。

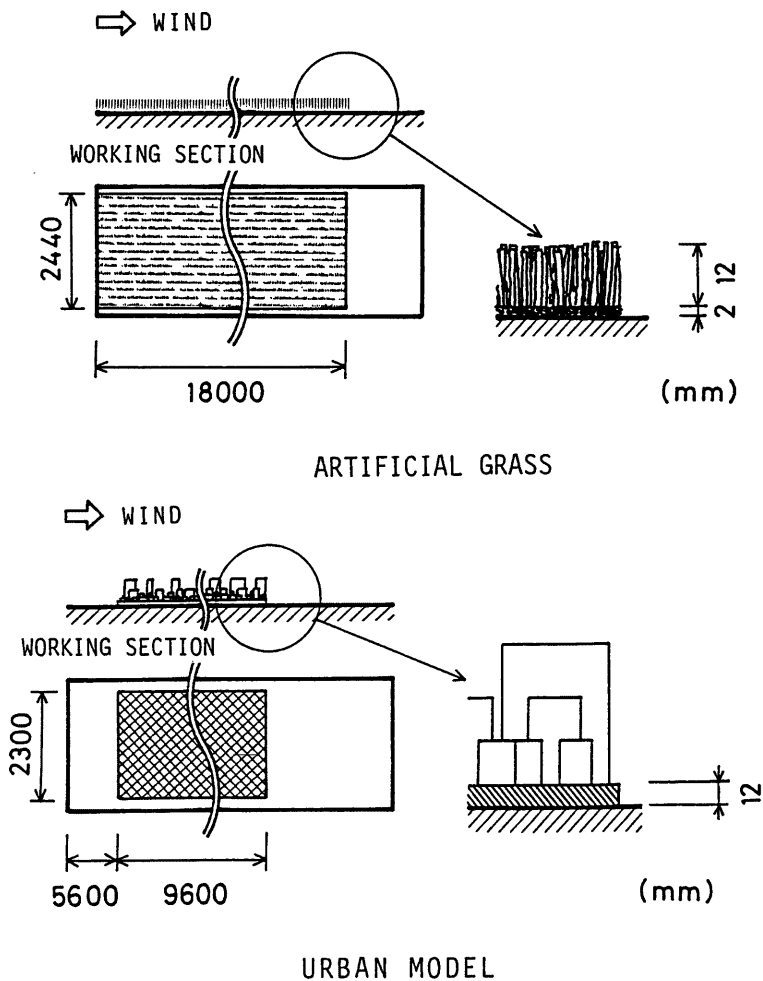


Fig. 1 Schematic roughness configuration and layout

2.2 粗 度

実験に使用した粗度は市街地模型と人工芝の2種類で、その形状および寸法を Fig. 1 に示す。

市街地模型は木製で、ある都市の一部を厚さ 12mm の合板上に縮尺 1/250 で再現してある。実験に際しては模型の載った合板をボルトで風洞床面に固定した。人工芝は毛足が 12mm のナイロン製で、実験時には両面接着テープで風洞床面に密着した。



Photo 1 Layout of 1/250 scale urban model



Photo 2 Layout of artificial grasses

2.3 配置および座標系

市街地模型は測定部風上側前縁から 5.6m 風下の位置より、幅 2.3m、長さ 9.6m にわたって敷きつめた。人工芝は測定部風上側前縁より、幅 2.44m、長さ 18.0m にわたって敷きつめた。その様子を Photo 1, 2 に示す。

座標系は Fig. 2 に示す通り、粗度の風上側前縁から主流方向に x 軸を、 x 軸に水平直角方向に y 軸をとる。また市街地模型については風下側後縁からの距離を x_1 とする。 z 軸は市街地模型の場合床面から、人工芝の場合その根本からそれぞれ鉛直上方にとる。

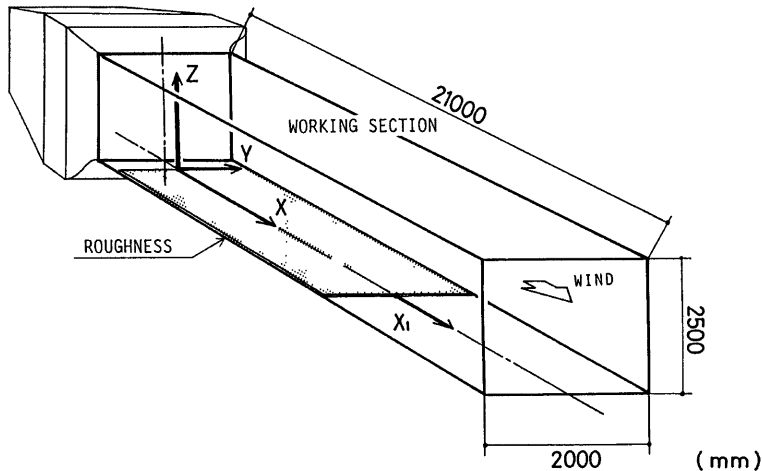


Fig. 2 Coordinates system of working section

測定部の天井高は、実験時の測定部内の静圧が各粗度に対して風洞断面の中央で、 x 軸方向に一定となるように調節した。

2.4 測定装置および解析方法

風速の測定は熱線風速計により行い、出力は測定と同時にデータレコーダに記録した。解析は波形解析機を用いて行い、熱線風速計からの出力を A/D 変換し、すべて数値処理している。測定に際して温度補償プローブによって測定部の温度変化を同時に測定し、温度補正を行った。また測定開始前にピトー管で求めた風速により熱線風速計の検定を行っている。Fig. 3 に測定装置および解析方法のブロック図を示す。

2.5 測定

測定は市街地模型において、吹送距離 $x=10.9\text{m}$ ($x_1=1.3\text{m}$) の位置で基準風速 $U_0=2.0, 5.0, 10.0, 15.0\text{ m/s}$ について、 $x=9.6\text{m}$ ($x_1=0.1\text{m}$) の位置で $U_0=5.0, 10.0\text{ m/s}$ について行った。人工芝においては、 $x=16.5\text{m}$ の位置で $U_0=2.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0\text{ m/s}$ について、また $U_0=5.0, 10.0\text{ m/s}$ については、 $x=4.0, 8.0, 12.0, 16.5\text{m}$ の位置で測定を行った。人工芝における、 $x=4.0, 8.0, 12.0, 16.5\text{m}$ の位置での平均風速および乱れの強さの測定は I 型プローブを用いて行い、その他についてはすべて X 型プローブによって測定を行った。なおここでは粗度の風上側前縁からの距離を吹送距離 x 、境界層外部の一様流の平均風速を基準風速 U_0 としている。

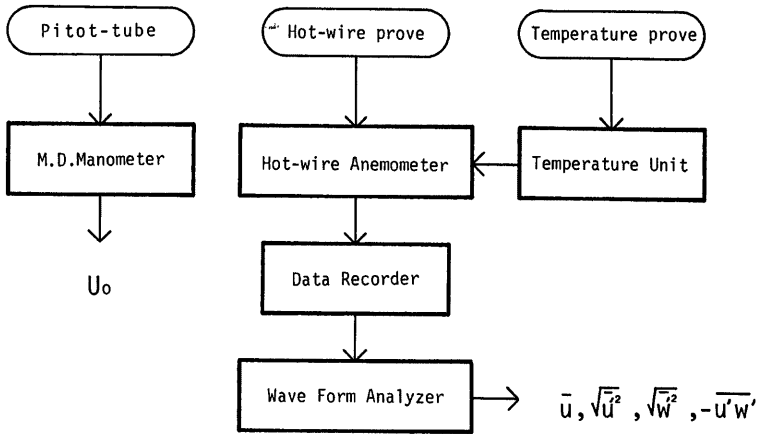


Fig. 3 Block diagram of analysis

3. 実験結果と考察

3.1 境界層の発達

ここでは平均風速 $\bar{u}$ が基準風速 U_0 の99%になる高度を境界層の厚さ δ と定義する。市街地模型については吹送距離 $x=10.9\text{m}$ ($x_1=1.3\text{m}$)、人工芝については $x=16.5\text{m}$ における δ と U_0 の関係を Fig. 4 に示す。市街地模型、人工芝ともに基準風速の増加にともなって境界層の厚さは増加している。また市街地模型の場合の方が吹送距離が短いにもかかわらず、同じ基準風速に対して境界層の厚さは大きくなる。今回行った実験の範囲で、次の実験式が得られた。

$$\text{市街地模型: } \delta = 0.69 \cdot U_0^{0.63} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{人工芝: } \delta = 0.36 \cdot U_0^{0.13} \dots\dots\dots (2)$$

一般に管の内部や平板上に発達する境界層では物体の表面があまり粗くない場合、基準風速の増加にともなってその厚さは減少する⁹⁾。一方、今回の実験結果より、市街地模型や人工芝によって発達した境界層の場合には、これが逆の傾向になっている。

次に人工芝について、 x と δ との関係を、 $U_0=5.0, 10.0\text{m/s}$ の場合について Fig. 5 に示す。境界層の厚さは吹送距離の増加にともなって厚くなる。今回行った実験の範囲で、次の実験式が得られた。

$$U_0=5.0\text{m/s: } \delta = 0.086 \cdot x^{0.60} \dots\dots\dots (3)$$

$$U_0=10.0\text{m/s: } \delta = 0.091 \cdot x^{0.60} \dots\dots\dots (4)$$

このように同一の粗度であっても、基準風速および吹送距離によって境界層の厚さは変化する。

3.2 境界層内の気流性状

(1) 平均風速の鉛直分布

市街地模型について、 $x=10.9\text{m}$ ($x_1=1.3\text{m}$) における平均風速の鉛直分布を Fig. 6 に示す。図の縦軸には高度 z を境界層厚 δ で割った値を対数目盛で、横軸には平均風速 $\bar{u}$ を基準風速 U_0 で割った値をとっている。グラフは $z/\delta=0.2$ 付近で折れ曲り、上層では U_0 の値によらず分布がほぼ同じで、式(5)で近似できる。

$$\frac{\bar{u}}{U_0} = 0.23 \ln \left(\frac{z}{\delta} \right) \dots\dots\dots (5)$$

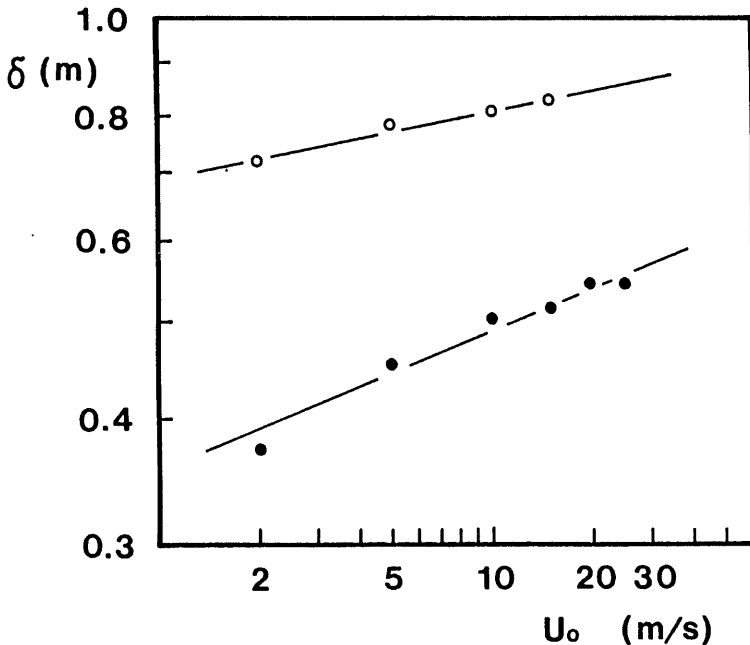


Fig. 4 Growth of boundary layer: ○, above urban model $x_1=10.9$ m ($x=1.3$ m); ●, above artificial grasses, $x=16.5$ m

下層では U_0 の大きさにより分布にばらつきが見られるが、高さ方向の変化は上層よりもおだやかである。このような“折れ曲り”は、粗い面からなめらかな面に移る際に見られるもので¹⁰⁾、市街地模型の後縁から 1.3 m 離れる間に、なめらかな風洞床面の影響を受けていると考えられる。そこで、この影響を除くために、市街地模型の後縁から 0.1 m ($x=9.7$ m) の位置で、 $U_0=5.0, 10.0$ m/s について測定を行った。その結果を Fig. 7 に示す。 $z/\delta=0.35$ 以上で分布は直線にのり、式 (5) で近似できる。分布が直線からはずれる下層においては、高さ方向の変化は一定でなく複雑な分布をしている。以上のように、市街地模型上に発達した境界層は速度分布の異なる 2 つの層からなり、上層では平均風速の鉛直分布が境界層厚 δ を変数に含んだ対数法則で近似できる。また下層では床面粗度の形状、基準風速の大きさ等に左右されて複雑な分布をする。これより、市街地のように地表面粗度が粗く、複雑な形状をもった場所の地面付近では、粗度長 z_0 を地面粗度の種類を代表する値として与え、平均風速の鉛直分布を求める従来の対数法則の適用がむずかしいと考えられる。また、 $x=10.9$ m の場合と、 $x=9.7$ m の場合を比較すると、市街地模型の後縁から 1.3 m 離れる間に、平均風速の鉛直分布は床面付近でかなり変化することがわかる。従って、風洞実験に際しては、風上側の粗度を模型の十分そばまで与える必要がある。もちろん対象となる建物の模型は、その周囲を含めて、できるだけ忠実に再現することはいうまでもない。

次に人工芝について、各吹送距離 x における平均風速の鉛直分布を Fig. 8, 9 に示す。グラフは吹送距離によらずほぼ同じ分布を示す上層と、そうでない下層にわかれる。 $x=8.0$ m 以上では、上層の範囲が $z/\delta=0.2$ 以上とほぼ一定になることから、境界層は十分発達していると考えられる。そこで $x=16.5$ m における平均風速の鉛直分布の U_0 による変化を見ると、Fig. 10 のようになる。ここでは、 $0.7 > z/\delta > 0.2$ の範囲で

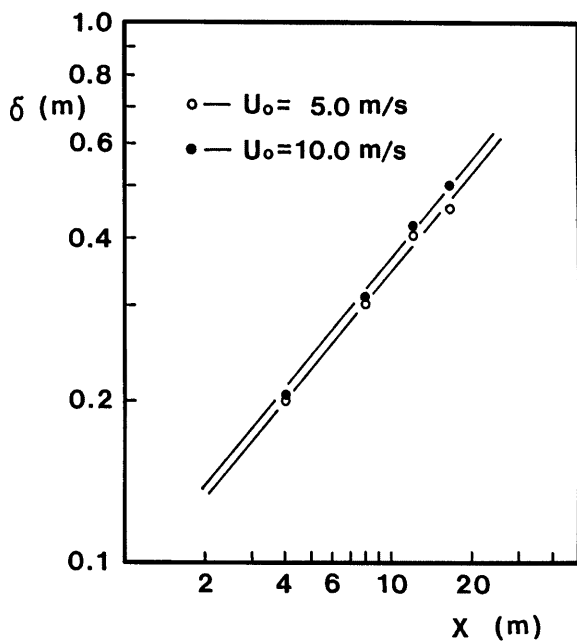


Fig. 5 Growth of boundary layer above artificial grasses

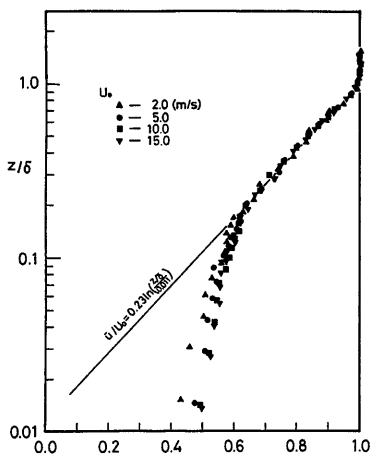


Fig. 6 Mean wind speed profiles above urban model: $x = 10.9$ m ($x_1 = 1.3$ m)

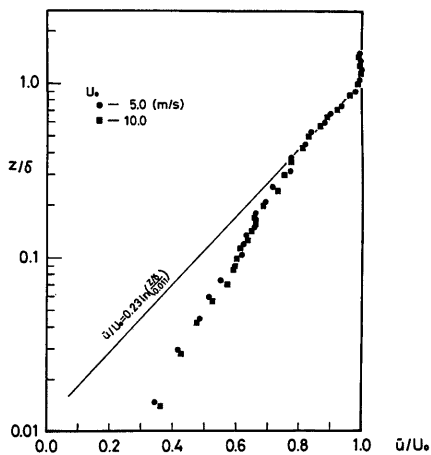


Fig. 7 Mean wind speed profiles above urban model: $x = 0.7$ m ($x_1 = 0.1$ m)

ほぼ一つの直線にのり，式(6)で近似できる。

$$\frac{\bar{u}}{U_0} = 0.24 \ln \left(\frac{z/\delta}{0.015} \right) \dots\dots\dots (6)$$

下層では分布が直線からはずれ， U_0 の値によってばらつく。

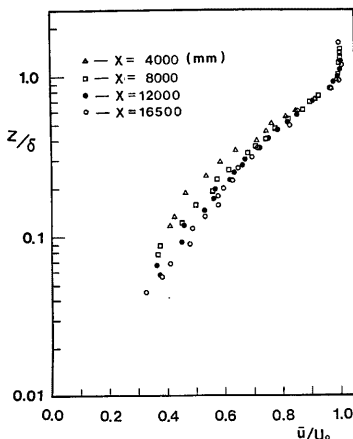


Fig. 8 Mean wind speed profiles above artificial grasses: $U_0 = 5.0$ m/s

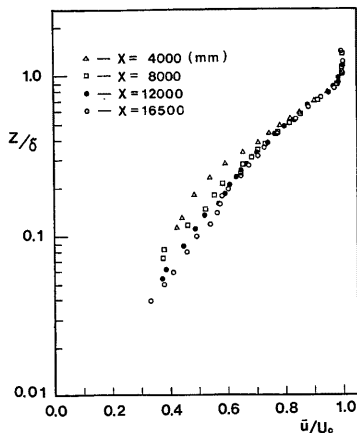


Fig. 9 Mean wind speed profiles above artificial grasses: $U_0 = 10.0$ m/s

以上，市街地模型および人工芝の上に発達した境界層内の平均風速の鉛直分布を比較すると，両者とも境界層厚を変数に含んだ対数法則で近似できる上層と，基準風速や吹送距離によって変化する下層にわかれる。そして市街地模型と人工芝の場合では粗度の形状が異なるにもかかわらず，上層における平均風速の鉛直分布は，ほぼ同じ式で近似できることが見いだされた。

(2) 乱れの強さの鉛直分布

市街地模型により発達した境界層内の乱れの強さについて，Fig. 11, 12 にそれぞれ， $x = 10.9$ m ($x_1 = 1.3$ m)， $x = 9.7$ m ($x_1 = 0.1$ m) における鉛直分布を示す。図で縦軸には高度を境界層厚で割った値を，横軸には乱れの強さをとってある。

$x = 10.9$ m の場合，乱れの強さの鉛直分布は $U_0 = 2.0$ m/s のときを除いて基準風速の違いによらずほぼ相似になり， $z/\delta = 0.2$ 以下ではほぼ一定値（約20%）をとる。 $U_0 = 2.0$ m/s のときには，乱れの強さが全高度わたって他の場合よりも大きな値をとり， $z/\delta = 0.2$ 以下でも床面に近づくにつれて増加し，床面付近では30%をこえる。

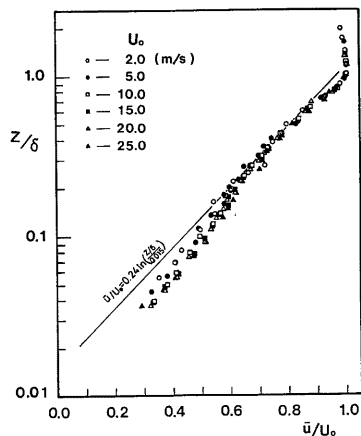


Fig. 10 Mean wind speed profiles above artificial grasses: $x = 16.5$ m

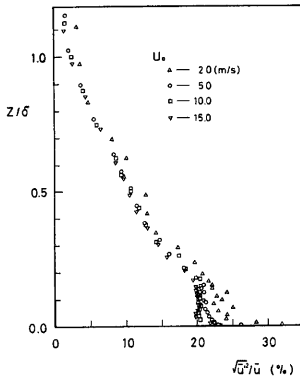


Fig. 11 Turbulence intensity profiles above urban model: $x=10.9$ m ($x_1=1.3$ m).

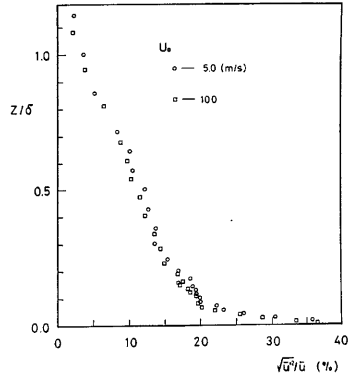


Fig. 12 Turbulence intensity profiles above urban model: $x=9.7$ m ($x_1=0.1$).

$x=9.7$ m の場合、 $U_0=5.0$ m/s と 10.0 m/s における乱れの強さの鉛直分布はほぼ相似になる。 $z/\delta=0.1$ 付近から分布の勾配が変わり、床面に近づくにつれて急激に増加する。床面付近では35~40%になる。

$x=10.9$ m と 9.7 m の場合をくらべると、乱れの強さの鉛直分布は床面付近で明らかに異なったものとなっている。これはなめらかな床面の影響と考えられる。

人工芝により発達した境界層内の乱れの強さについて、Fig. 13, 14 にそれぞれ、 $U_0=5.0$ m/s, 10.0 m/s の場合の鉛直分布を示す。乱れの強さの鉛直分布は基準風速によらず $z/\delta=0.3$ 以上ではほぼ相似になる。それ以下の高度では吹送距離が長いほど乱れの強さは小さくなるが、 $x=12.0$ m と 16.0 m では分布の形状にほとんど差がない。また床面付近では30%をこえる。

次に基準風速の違いによる変化をみるために、 $x=16.5$ m における各基準風速に対する乱れの強さの鉛直分布を Fig. 15 に示す。この場合 $z/\delta=0.4$ 以上では基準風速によらず乱れの強さの鉛直分布はほぼ相似になる。それ以下の高度では乱れの強さの増加の割合が高度の減少とともに大きくなっており、床面付近で30~

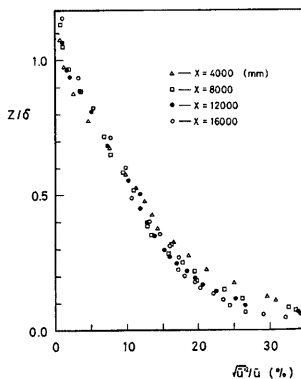


Fig. 13 Turbulence intensity profiles above artificial grasses: $U_0=5.0$ m/s.

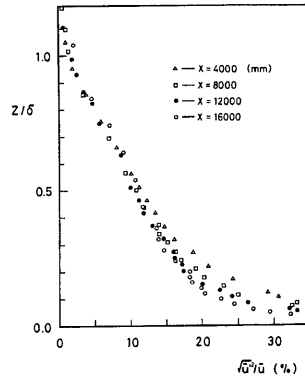


Fig. 14 Turbulence intensity profiles above artificial grasses: $U_0=10.0$ m/s.

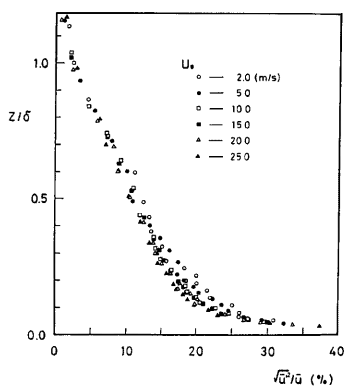


Fig. 15 Turbulence intensity profiles above artificial grasses: $x=16.5$ m

40%に達する。また基準風速が大きいほど乱れの強さは小さい。

以上、市街地模型および人工芝の上に発達した境界層内の乱れの強さの鉛直分布を比較すると、(1)で述べた平均風速の鉛直分布が対数法則で近似できる上層においては、粗度の違いによらず乱れの強さの鉛直分布はほぼ相似になっている。また下層においては、粗度の違い、基準風速および吹送距離の変化にともなって、乱れの強さの鉛直分布も異っている。

(3) レイノルズ応力の鉛直分布

市街地模型により発達した境界層内のレイノルズ応力について、Fig. 16, 17にそれぞれ、 $x=10.9$ m ($x_1=1.3$ m), $x=9.7$ m ($x_1=0.1$ m) における鉛直分布を示す。ここではレイノルズ応力は基準風速および空気密度で割って無次元化し、 $-\overline{u'w'}/U_0^2$ で扱っている。図で縦軸には高度を境界層厚で割った値を対数目盛で、横軸には $-\overline{u'w'}/U_0^2$ をとってある。

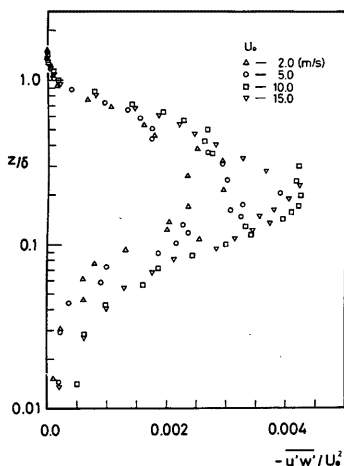


Fig. 16 Reynolds shear stress profiles above urban model: $x=10.9$ m ($x_1=1.3$ m)

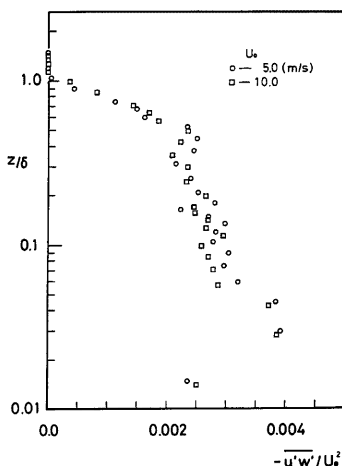


Fig. 17 Reynolds shear stress profiles above urban model: $x=9.7$ m ($x_1=0.1$ m)

$x=10.9$ m の場合、 $-\overline{u'w'}/U_0^2$ の値は床面から高さとともに増加し、 $z/\delta=0.2$ 付近で最大値をとったあと減少する。この最大値をとる高度は、平均風速の鉛直分布における“折れ曲り”の部分に相当する。また基準風速の値が大きいほど $-\overline{u'w'}/U_0^2$ の値は全高度にわたって大きくなっている。

$x=9.7$ m の場合、 $-\overline{u'w'}/U_0^2$ の値は、 $z/\delta=0.03$ 付近で最大値をとったあと、高さとともに減少する。ただし、 $0.06 < z/\delta < 0.5$ の範囲では減少の割合はわずかである。

人工芝により発達した境界層内のレイノルズ応力について、Fig. 18 に $x=16.5$ m における鉛直分布を示

す。この場合 $z/\delta=0.3$ までは $-\overline{u'w'}/U_0^2$ の値はほぼ一定値をとり、それ以上の高度では高さとともに減少する。

以上のようにレイノルズ応力の分布から見ると、市街地模型および人工芝によって発達した境界層は、おおざっぱに見て、乱れの構造の異なる2つの層に分かれている。この2つの層の境界は、平均風速の鉛直分布における“折れ曲り”部分に相当している。また上層では、 $-\overline{u'w'}/U_0^2$ の値は高さとともに減少する。

4. む す び

本研究では市街地および田園を代表する粗度として、市街地模型および人工芝を選び、風洞内気流性状に及ぼす床面粗度の影響を明らかにした。

実験結果を以下にまとめる。

(1) 境界層の厚さ

市街地模型上の境界層の厚さは、基準風速とともに多少増加する。人工芝上の境界層の厚さは、基準風速および吹送距離とともに増加する。また、吹送距離および基準風速が同程度ならば、境界層の厚さは市街地模型上の方が人工芝の場合よりも厚くなる。

(2) 境界層内の気流性状

床面付近には、平均風速、乱れの強さおよびレイノルズ応力の鉛直分布が、粗度の形状、吹送距離および基準風速により変化する層が存在する。この層が境界層内で占める割合は、人工芝の場合よりも都市模型の方が大きい。

上層において、平均風速の鉛直分布は対数法則で近似でき、乱れの強さの鉛直分布は基準風速によらず相似性を保つ。また、レイノルズ応力は床面に近づくにつれて増加する。

市街地模型における境界層の厚さと吹送距離の関係や、乱れのスケール、スペクトル等、境界層内気流の乱れの構造等に関して、今回の実験では扱わなかったので、今後、これらの点に関しても明らかにしてゆきたい。また、観測例との対応もこれからの課題であろう。

謝 辞

本研究の実験にあたり、多くの御協力を得た、羽野淳介技官および杉政和光技官に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Sadeh, W. Z., J. E. Cermak and T. Kawatani: Flow over High Roughness Elements, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 1, 1971, pp. 321-344.
- 2) Jensen, M. and N. Frank: Model-Scale Tests in Turbulent Wind, Part I, The Danish Technical Press, Copenhagen, 1965, pp. 1-96.
- 3) Mulhearn, P. J. and J. J. Finnigan: Turbulent Flow over a Very Rough, Random Surface, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 15, 1978, pp. 109-132.
- 4) Cook, N. J.: On Simulating the Lower Third of the Urban Adiabatic Boundary Layer in a Wind Tunnel, Atmospheric Environment Rergamon Press, Vol. 7, 1973, pp. 691-705.

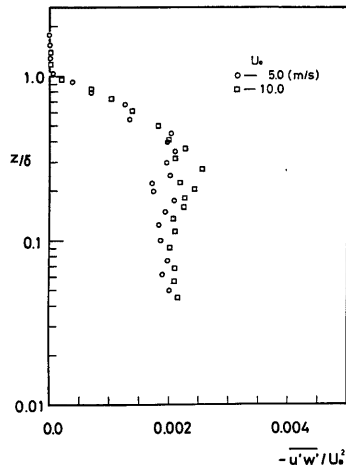


Fig. 18 Reynolds shear stress profiles above artificial grasses: $x=16.5$ m.

- 5) Iqbal, M. and A. K. Khatri: A Study of the Roughness Effects of Multiple Windbreaks, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 11, 1977, pp. 187-203.
- 6) Tieleman, H. W., T. A. Reinhold and R. D. Marshall: On the Wind-Tunnel Simulation of the Atmospheric Surface Layer for the Study of Wind Loads on Low-Rise Buildings, Journal of Industrial Aerodynamics, Vol. 3, 1978, pp. 21-38.
- 7) 片山忠久・後藤 滋・堀 寛：市街地上の接地境界層の形成に関する 風洞実験，日本建築学会論文報告集，第293号，1980，pp. 97-104.
- 8) 石崎澄雄・桂 順治・谷池義人：新設の風工学研究用境界層風洞について，京大防災研年報，第26号 B-1，1983，pp. 313-322.
- 9) たとえば，谷一郎：流れ学第3版，岩波書店，1981，pp. 111-159.
- 10) Mulhearn, P. J.: A Wind-Tunnel Boundary-Layer Study of the Effects of a Surface Roughness Change: Rough to Smooth, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 15, 1978, pp. 3-30.