

# 風洞床面の粗度の変化による気流の性状について (その2)

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 (II)

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

### Synopsis

In an effort to improve the understanding of wind flow in an urban environment, wind tunnel simulations were carried out using an urban model of 1/250 scale. The results from these simulations were compared with those derived from tests based upon the moderately rough surface flow generated by the uniformly distributed artificial grasses in the previous paper.

The results show that the boundary layer thickness increases with the fetch above both the urban model and the artificial grasses. Close to the ground surface, there is a layer in which mean wind speed and turbulence intensity distributions vary with the surface roughness and the fetch. In the case of the urban model, the lower layer occupies almost the half of the boundary layer. But in the case of the artificial grasses it occupies less than thirty percent. In the upper and lower layers of both cases, the distributions of the mean wind speed can be determined by graphing their respective logarithmic curves.

### 1. はじめに

風洞実験に際して、大気境界層に類似の境界層を風洞内に作り出すには、従来風洞床面に粗度を与える方法が多く用いられている。この床面粗度として、ブロック<sup>1)</sup>、石<sup>2)</sup>、あるいは板<sup>3)</sup>等を用いた場合の風洞内気流性状に関する研究は多い。一方、市街地上の大気境界層は複雑な形状をもった地表面粗度によって作り出されているので、風洞実験において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が、縮尺模型を粗度として与えた例<sup>4)</sup>は比較的少ない。

以上のような観点から、前報<sup>5)</sup>では人工芝およびある都市の1/250の縮尺模型を風洞床面に敷きつめ、風洞内気流性状の風速による変化を調べ比較した。又、人工芝については吹送距離にともなう境界層の発達の様子を調べた。本報ではこれに引き続き、市街地模型上の境界層が吹送距離にともなうように発達するかを調べ、その性状を明らかにした。

### 2. 実験方法

実験は前報<sup>5)</sup>と同様に、京都大学防災研究所内の境界層風洞で行った。この風洞は高さ2.0m、幅2.5m、長さ21.0mの測定部をもち、床面に縮尺1/250の市街地模型を敷きつめ、このときに生じる風洞内気流性状を熱線風速計を用いて測定した。測定方法の詳細は前報<sup>5)</sup>を参照されたい。Photo 1 に市街地模型の写真

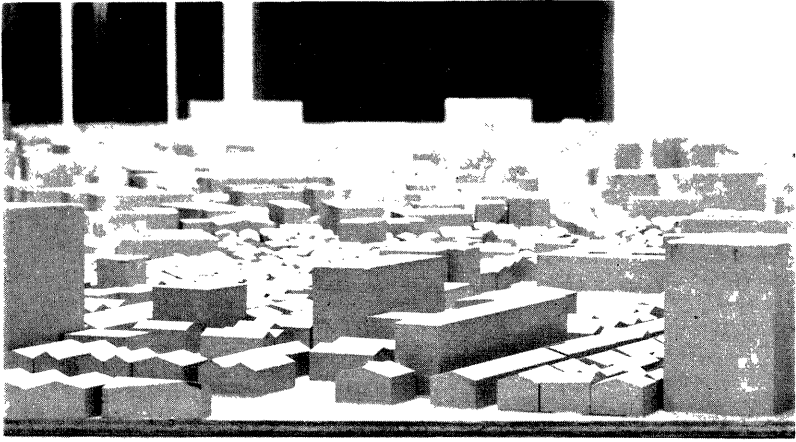


Photo. 1 Urban model

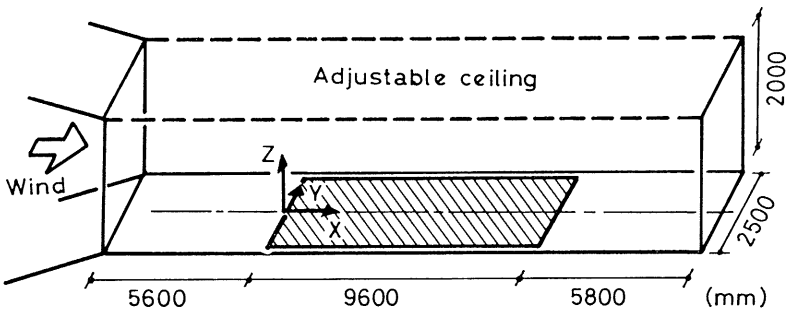


Fig. 1 Layout and coordinates

を、Fig. 1 に配置を示す。座標系は Fig. 1 に示すように、粗度の風上側前線中央から風向主流方向に  $x$  軸を、 $x$  軸に水平直角方向に  $y$  軸を、地面板から鉛直上方に  $z$  軸をとっている。又、各測定位置における境界層外部の一樣流の平均風速を基準風速  $U_0$  とする。測定は基準風速  $U_0=10.0 \text{ m/s}$  について、吹送距離  $x=1.2, 2.4, 4.65, 7.2, 9.6 \text{ m}$  の位置で行った。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 境界層の発達

$U_0=10.0 \text{ m/s}$  の場合に、平均風速  $\bar{u}$  の鉛直分布が吹送距離  $x$  によって変化する様子を Fig. 2(a)~(e) に示す。又、ここでは1, 2階建ての住宅あるいは4, 5階建ての団地(模型上でそれぞれ  $20\sim 30 \text{ mm}$ ,  $55\sim 60 \text{ mm}$  に相等する。)が主に建ち並ぶ地域の風下で、かつ風上側に特に高い建物のない測定点 ( $y=0.0 \text{ m}$ ) での境界層の厚さを、この市街地模型上に発達する境界層の厚さとする。なお、境界層の厚さ  $\delta$  は、平均風

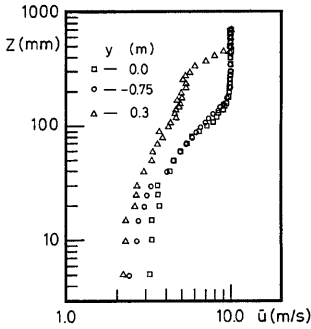


Fig. 2 (a) Mean speed profiles at various locations:  $U=10.0$  m/s,  $x=1.2$  m

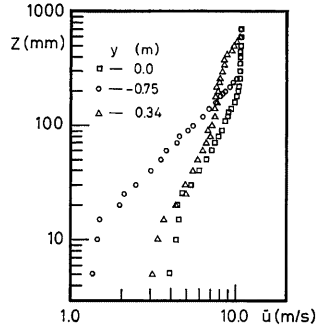


Fig. 2 (b) Mean speed profiles at various locations:  $U=10.0$  m/s,  $x=2.4$  m

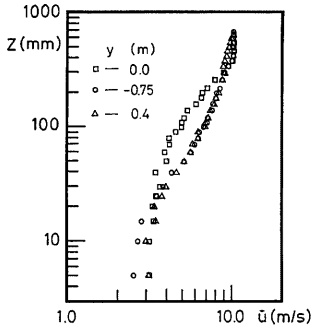


Fig. 2 (c) Mean speed profiles at various locations:  $U=10.0$  m/s,  $x=4.65$  m

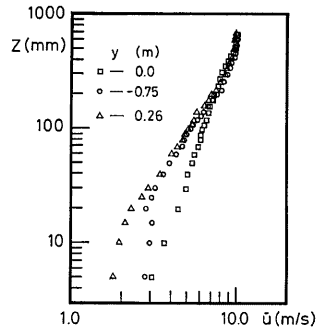


Fig. 2 (d) Mean speed profiles at various locations:  $U=10.0$  m/s,  $x=7.2$  m

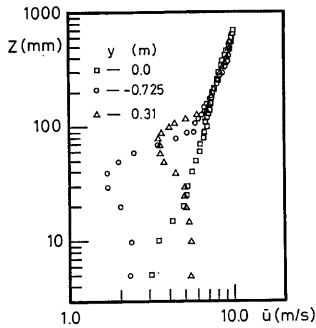


Fig. 2 (e) Mean speed profiles at various locations:  $U=10.0$  m/s,  $x=9.6$  m

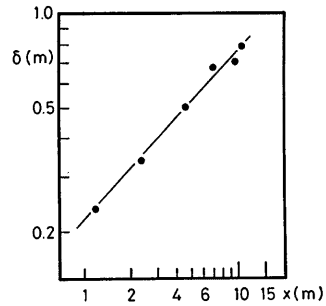


Fig. 3 Growth of boundary layer:  $U=10.0$  m/s,  $y=0.0$  m

速  $\bar{u}$  が基準風速  $U_0$  の99%に達する高度としている。**Fig. 2(a)~(e)** より、吹送距離  $x$  と、境界層厚  $\delta$  の関係を求め、**Fig. 3** に示す。これより  $x$  と  $\delta$  の間に次の実験式が得られ、図中に実線で示す。

$$\delta = 0.207 x^{0.56} \dots \dots \dots (1)$$

前報<sup>2)</sup> より、人工芝上に発達する境界層の厚さは吹送距離の0.6乗に比例して増加し、市街地模型の場合とはほぼ同様である。

市街地模型の場合、粗度要素の形状、密度が一様ではなく、**Fig. 2(a)~(e)** に示されるように測定位置によって平均風速の鉛直分布は異ってくる。たとえば、 $x=1.2\text{ m}$ 、 $y=0.3\text{ m}$  では、 $z=500\text{ mm}$  ぐらいから風速の減少が見られるが、これは、この測定点の風上側にかなり大きな建物（模型上で、見つけ幅  $450\text{ mm}$ 、高さ  $200\text{ mm}$ ）があるためである。この建物による後流の影響は  $x=4.65\text{ m}$  ぐらいまで残っていることが**Fig. 2(c)** からわかる。以上のように、市街地模型において吹送距離が短い間は境界層厚に対する粗度の高さの割合が大きく、平均風速の鉛直分布形状も局所的な粗度要素の影響を受けて変化することになる。一方、 $x=7.2\text{ m}$  以上では境界層厚  $\delta$  も  $600\text{ mm}$  をこえ、粗度に対して十分な高さをもつことから、平均風速の鉛直分布の形状は境界層内の上層部において、 $y$  の位置によらずほぼ同様な分布を示すようになる。ただし、地面付近では吹送距離が十分大きくなって粗度要素の影響を受けるため、下層部における平均風速の鉛直分布は依然として局所的に変化している。たとえば、 $x=9.6\text{ m}$ 、 $y=-0.725, 0.31\text{ m}$  の測定点は比較的高い建物（模型上で  $80\sim 120\text{ mm}$ ）の間の路上に位置している。このような場所では、**Fig. 2(e)** に見られるように、平均風速は高度の低下とともに一旦急激に減少し、再び増加するような分布をしている。

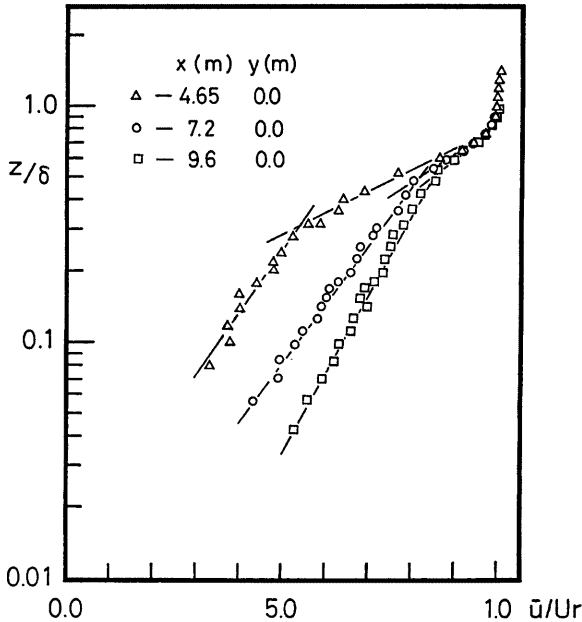


Fig. 4 Mean speed profiles at various locations:  $U=10.0\text{ m/s}$ ,  $y=0.0\text{ m}$

Table 1  $z_0$ ,  $A$ , and  $z_0/\delta$  for lower and upper mean speed profiles above urban model

Location	x	(m)	4.65	7.2	9.6
		y	(m)	0.0	0.0
lower	$z_{0l}$	(mm)	5.9	3.0	0.4
	$A_l$		0.16	0.17	0.13
upper	$z_{0u}$	(mm)	50.0	35.0	20.0
	$A_u$		0.4	0.36	0.29
	$z_{0u}/\delta$		0.100	0.052	0.033

The roughness lengths,  $z_0$ , and the coefficients,  $A$ , were obtained by fitting the mean speed profile data to the equation (2); where  $A=2.5 u^*/U_0$ ,  $u^*$  is friction velocity.

Table 2  $z_0$ ,  $A$ , and  $z_0/\delta$  for lower and upper mean speed profiles above artificial grasses

Location	x	(m)	4.0	8.0	12.0	16.5
		y	(m)			
lower	$z_{0l}$	(mm)	—	4.0	2.9	3.1
	$A_l$		—	0.21	0.18	0.18
upper	$z_{0u}$	(mm)	9.1	8.8	10.3	7.9
	$A_u$		0.34	0.28	0.26	0.23
	$z_{0u}/\delta$		0.044	0.028	0.025	0.016

The roughness lengths,  $z_0$ , and the coefficients,  $A$ , were obtained by fitting the mean speed profile data to the equation (2); where  $A=2.5 u^*/U_0$ ,  $u^*$  is friction velocity.

### 3.2 境界層内の気流性状

#### (1) 平均風速の鉛直分布

境界層内部の気流性状の変化を見るために、高さを境界層厚で、平均風速を基準風速でそれぞれ割り、無次元化して比較する。 $y=0.0\text{ m}$  における平均風速の鉛直分布を Fig. 4 に示す。図において、縦軸は  $z/\delta$  を対数目盛りでとってある。図より、分布形状は  $z/\delta=0.5$  付近で折れ曲がり、上層および下層は直線で近似できる。上層、下層ともに吹送距離により分布形状は変化し、その勾配は吹送距離とともに大きくなる。なお、前報<sup>5)</sup> より人工芝の場合、同様な折れ曲がりには約  $z/\delta=0.3$  で見られる。平均風速の鉛直分布を式(2)で近似したとき(図中に実線で示す)の上層および下層での勾配  $A$ 、粗度長  $z_0$  の値を Table 1 に示す。

$$\frac{\bar{u}}{U_0} = \frac{2.5 \cdot u^*}{U_0} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) = A \cdot \ln \left( \frac{z/\delta}{z_0/\delta} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここで  $u^*$  は摩擦速度、 $z_0$  は粗度長である。

表で、 $z_{0l}$ ,  $A_l$  は下層における値を、 $z_{0u}$ ,  $A_u$  は上層における値を示す。なお上層については  $z_{0u}/\delta$  の値も求めている。表より、 $z_0$ ,  $A$  は上層下層ともに吹送距離が長くなると減少する。前報<sup>5)</sup> より、人工芝においても平均風速の分布形状によって境界層を上・下2層に分けて考えることができた。そこで市街地模型と

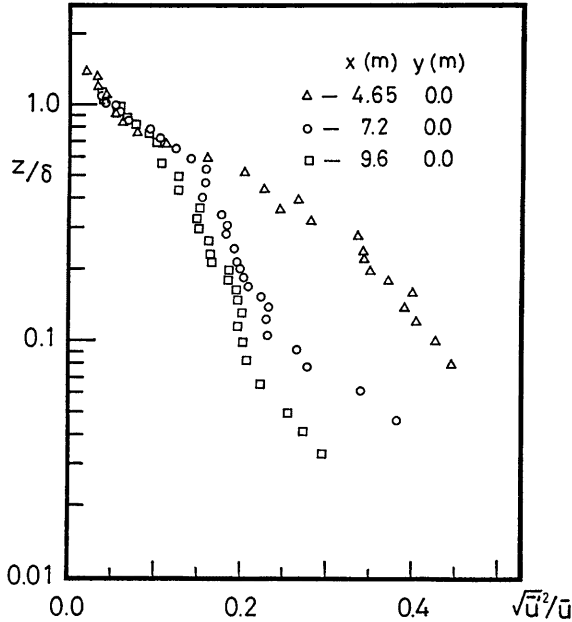


Fig. 5 Turbulence intensity profiles at various locations:  $U=10.0$  m/s,  $y=0.0$  m

人工芝を比較するために、人工芝においても上層、下層における  $z_0$ ,  $A$  の値が吹送距離によってどのように変化するかを求め、Table 2 に示した。表中の  $z_{0l}$ ,  $A_l$  および  $z_{0u}$ ,  $A_u$  は Table 1 の場合と同じく、それぞれ、下層、上層における値を示す。Table 1 と Table 2 をくらべると、上層においては市街地模型、人工芝共に  $A$ ,  $z_0/\delta$  の値が吹送距離の増加とともに減少している。又、 $z_0$ ,  $z_0/\delta$  の値は市街地模型の場合よりも人工芝の方が大きい。一方、下層における  $z_0$ ,  $A$  の値は、人工芝の場合にはあまり変化が見られないうが、市街地模型では吹送距離の増加とともに減少し、 $x=9.6$  m 以上では人工芝よりも小さな値となる。

## (2) 乱れの強さの鉛直分布

Fig. 5 に  $y=0.0$  m における乱れの強さの鉛直分布を示す。平均風速の鉛直分布と同様に縦軸には  $z/\delta$  を対数目盛りで、横軸には乱れの強さ  $\sqrt{u'^2}/\bar{u}$  をとってある。図より約  $z/\delta=0.6$  以上では吹送距離の違いによらずほぼ同様な分布を示す。下層では同じ  $z/\delta$  の高度において、吹送距離の増加とともに乱れの強さは小さくなっている。

## 4. む す び

本研究では市街地模型上に境界層がどのように発達するかを明らかにし、人工芝との比較を行った。結果を以下にまとめる。

- (1) 境界層の厚さは吹送距離の0.56乗に比例して厚くなる。
- (2) 吹送距離が短かく、境界層厚に対して粗度の高さが占める割合が大きい時には、平均風速の鉛直分布

形状は局所的な粗度の影響を受けて変化する。

- (3) 境界層は上下2つの層に分けて考えられる。上層におよび下層に、近似的に対数法則が適用できるが、平均風速の分布勾配は上層と下層では異なる。
- (4) 上層において、平均風速の鉛直分布に対数法則を適用すると、粗度長と境界層の厚さの比は吹送距離の増加とともに減少する。
- (5) 下層では局所的な粗度の影響が大きく、測定位置によって平均風速および乱れの鉛直分布形状が変化する。粗度の中心線上での平均風速の鉛直分布形状について対数法則を適用すると、粗度長は吹送距離の増加とともに減少する。
- (6) 境界層中において下層の占める割合は、市街地模型上では約半分に達するが、人工芝上では約0.3である。

前報<sup>5)</sup>と本報によって、市街地模型および人工芝上の境界層の発達の様子、そして基準風速による境界層内の気流性状の変化について明らかにすることができた。その結果、境界層は気流性状の異なる上、下2層に分けて考えられること。平均風速の鉛直分布に対数法則を適用した場合、粗度長は粗度の形状だけでは決らず、吹送距離や風速によっても変化することがわかった。今後の課題としては、粗度長を支配する要因を明らかにすること、ここで明らかになった性状について、大気境界層内での検証を行うこと。たとえば、境界層は平均風速の分布形状の異なる上層、下層に分けられるのか、もし分けられるとすれば、地表面粗度の影響の大きい下層の及ぶ高度はどのぐらいか、等が挙げられよう。

#### 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。

#### 参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Mulhearn, P.J. and J.J. Finnigan: Turbulent Flow over a Very Rough, Random Surface, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 15, 1978, pp. 109-132.
- 3) 片山忠久・後藤 慈・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.
- 4) 木の模型による例として，Sadch, W. Z., J. E. Cermak and T. Kawatani: Flow over High Roughness Elements, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 1, 1971, pp. 321-344.
- 5) 石崎澄雄・柱 順治・谷池義人・丸山 敬：風洞床面の粗度の変化による気流の性状について，京都大学防災研究所年報，第27号 B-1, 1984, pp. 249-260.