

市街地におけるキャノピー層内の 風速分布に関する風洞実験

丸 山 敬

WIND TUNNEL TEST ON THE WIND SPEED PROFILE IN AN URBAN CANOPY

By *Takashi MARUYAMA*

Synopsis

The roughness elements of urban areas are large in size and densely distributed. This makes the wind characteristic of turbulent boundary layer over urban areas different from that over a flat plane or open country areas. In the region near ground i.e. the urban canopy, in which the wind characteristic is directly affected by roughness elements, the wind velocity profile varies with the site and the distribution usually can not be shown by the logarithmic law and the power law. A series of wind tunnel tests using staggered arrayed blocks was performed in order to investigate the wind characteristic of the urban canopy. The wind velocity was evaluated as the spatially averaged mean value. The variation was examined on the fetch, the free stream velocity, the condition of the inlet flow and the density of roughness.

1. は じ め に

構造物等に加わる風圧力は風速の二乗に比例して大きくなるため、耐風設計における風荷重は風速分布をどの様に与えるかに大きく左右される。従来、この風速分布はべき法則あるいは対数法則によって表されることが多く、このときに現れるべき指数や粗度長等のパラメータは地表面粗度の形状、凹凸の程度に左右され、Davenport¹⁾、Counihan²⁾らが観測値より求めている。しかし、もともとべき法則や対数法則は平板や円管中の乱流境界層の速度分布を表すものとして求められたので、市街地のように地面粗度が大きくなってくると、地面付近で粗度の影響を直接受けるキャノピー層内の風速分布までも表すことは難しい。一方、このキャノピー層内の気流性状を知ることが市街地上空の乱流境界層の発達の様子を知る上で重要であると考えられる。本報では都市模型および立方体の粗度ブロックを用いて行った風洞実験により、市街地におけるキャノピー層内の気流性状を明らかにした。また、粗度要素および粗度による剝離領域を含めた風速の空間平均を考えることによりキャノピー層内の風速分布を評価し、吹送距離、基準風速、流入気流および粗度密度による風速分布の変化を調べた。

2. 市街地上空の気流性状

最初に、市街地のように粗度要素が大きく、その形状が複雑で、また密度が高い地面粗度上に発達する乱流境界層と平板上に発達する乱流境界層の気流性状を比較する。**Fig. 1**に以前筆者らが1/250の都市模型を使って行った実験結果³⁾を、また**Fig. 2**に何も敷かない風洞床面に発達した乱流境界層の気流状を示す。

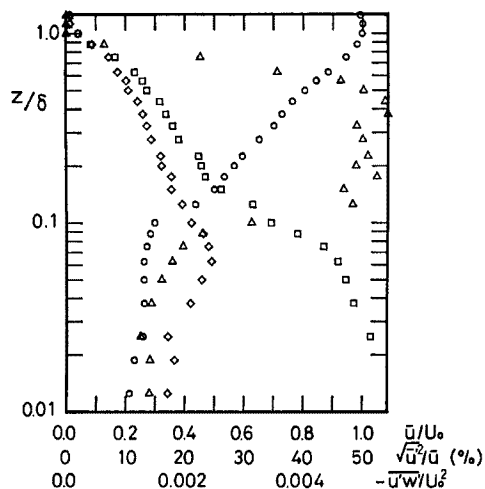


Fig. 1. Mean wind speed, intensity of turbulence and Reynolds shear stress profiles over urban model: ○ mean wind speed, □ intensity of turbulence (x-component), ◇ intensity of turbulence (z-component), △ Reynolds shear stress.

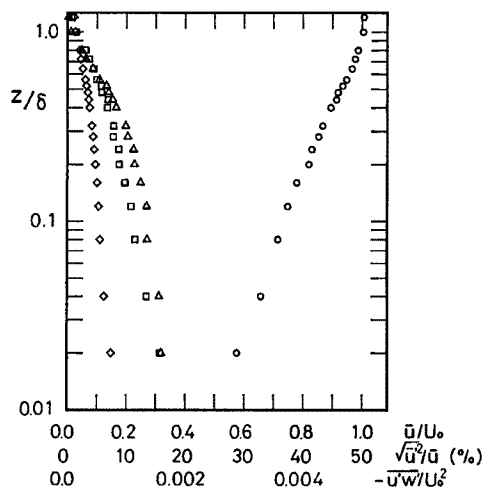


Fig. 2. Mean wind speed, intensity of turbulence and Reynolds shear stress profiles over flat plane: ○ mean wind speed, □ intensity of turbulence (x-component), ◇ intensity of turbulence (z-component), △ Reynolds shear stress.

図において、縦軸は床面からの高さ z を境界層厚 δ で無次元化した値を対数で、横軸は各高度の平均風速 u を基準風速 U_0 で無次元化した値を取ってある。都市模型の場合、境界層はその気流性状によって以下の3つの層に分けることができる。

一番上の層では風速分布は対数法則から外れる。Coles⁴⁾ はこのずれを、いわゆる 'wake funktion' によって表し、通常この層を wake region (伴流域) と呼ぶ。伴流域では乱れの強さおよび無次元化されたレイノルズ応力 ($-\overline{u'w'}/U_0^2$) の値は高度とともに減少する。また、風速分布の勾配は次に述べる対数域よりも大きくなっている。この様な対数分布からのずれは佐藤らによる東京タワー⁵⁾、花房らによる筑波⁶⁾ の例のように大気境界層中の観測結果にもみられる。これらの観測例において、対数分布からのずれが起り始める高度が観測地点周りの平均的な粗度の高さよりも十分に高いことを考えると、大気境界層中においても同様な対数分布からのずれが存在すると考えられる。

伴流域の下には風速分布を対数法則で表すことのできる層がある。この対数域ではレイノルズ応力が高さ方向にはほぼ一定になっている。Fig. 2 に示すように平板上の境界層では、レイノルズ応力の分布が一定である範囲に10~20%の相違を容認すると、対数域の厚さは全境界層厚の20~30%となる。これに比べて市街地模型上の境界層では対数域が全境界層の約45~50%に達する。また、無次元化されたレイノルズ応力の大きさ ($-\overline{u'w'}/U_0^2$) も平板の場合に比べて大きい。これらは市街地等の粗い粗度上に発達する乱流境界層の特徴といえる。

対数域の下で風速分布は急に折れ曲がる。この折れ曲がりの生じる高さはその付近の粗度要素の平均的な高さに相当し、これより下がキャノピー層と考えられる。キャノピー層内の気流性状は局所的な粗度要素の形状や密度等に左右され、測定位置によりかなりの差がある。この市街地キャノピー層に関する自然風中の観測による研究は少ないが、それは測定地点の選定や観測機器等の問題だけではなく、前述のようにキャノピー層内の気流性状が粗度の影響を局所的に受け、観測結果の評価が難しいことに由来すると思われる。しかし、地面付近での乱れが各粗度要素からの剝離流等によって生じることを考えると、キャノピー層内の

気流性状は上部の対数域や伴流域の性状に影響を及ぼし、市街地上空の乱流境界層の発達の様子を知る上で重要であると考えられる。

3. 実験方法

実験は京都大学防災研究所構内の境界層風洞で行った。この風洞は単回路吹き出し型で、幅 2.5 m、長さ 21 m の測定部を持ち、天井高を 1.9 m から 2.4 m まで変えることができる。Fig. 3 に示すように測定胴床面に粗度を敷き、風速および測定位置を変えて測定を行った。実験に際し、測定胴内の静圧が一定となるように天井高を調節してある。なお、風洞の詳細は文献⁷⁾を参照されたい。座標系は Fig. 3 に示すように、主流方向に x 軸を、主流直角水平方向に y 軸を、鉛直方向に z 軸をとってある。また、粗度前縁からの距離を吹送距離 x_0 としている。

風速の測定はX型熱線風速計を用いて行い、 x および z 軸方向成分を求めた。熱線風速計からの出力はA/D変換し、波形解析機によって数値的に解析を行った。また、タンポポの種子で作った小さな風向計を用いて風向を調べた。

用いた粗度は Fig. 4 に示すような $3 \times 3 \times 3$ (cm) の立方体および $3 \times 3 \times 6$ (cm) の直方体を粗度

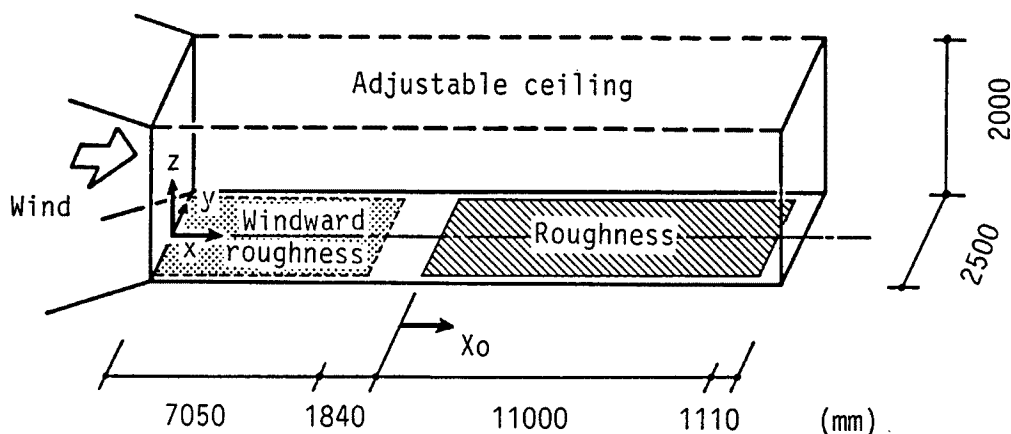


Fig. 3. Layout of roughness and coordinate system.

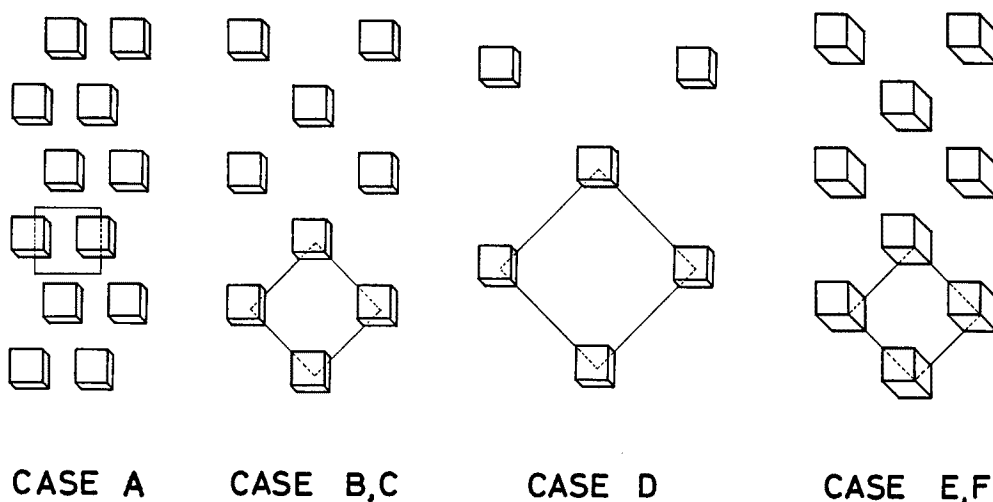


Fig. 4. Configuration of roughness.

要素としてベニヤ板上に千鳥配置したものである。実験は立方体粗度については密度を変えて（密度1/4, 1/8, 1/18, それぞれCASE A, CASE B, C, CASE Dに対応する）、直方体の粗度については密度 1/8(CASE E, F) について行った。密度1/8の場合については粗度の風上に $4.5 \times 4.5 \times 230$ (cm) の角柱を1 : 6の間隔に約 7 m 敷き詰めた2次元粗度を用いて、風上側の流入気流性状を変えて実験を行った。**Table 1** に、行った実験条件と対応するデータ名を示す。データ名の先頭のアルファベットはケース名に対応する。

Table 1.

Data name	Roughness density	Windward roughness	h(mm)	x_0	U_0 (m/s)	U_h (m/s)
A110	1/4	none	30	254h	10.3	2.29
B110	1/8	none	30	24h	11.0	4.43
B210	1/8	none	30	48h	10.6	4.11
B302	1/8	none	30	192h	2.03	0.545
B305	1/8	none	30	192h	5.17	1.51
B310	1/8	none	30	192h	10.4	3.39
B315	1/8	none	30	192h	15.7	5.00
B410	1/8	none	30	254h	10.5	3.47
C110	1/8	2D roughness	30	124h	10.0	3.07
C210	1/8	2D roughness	30	207h	10.9	3.41
D110	1/18	none	30	192h	10.5	4.80
D210	1/18	none	30	254h	10.5	4.85
E110	1/8	none	60	22h	10.7	3.21
E202	1/8	none	60	104h	2.06	0.448
E205	1/8	none	60	104h	5.04	1.44
E210	1/8	none	60	104h	10.8	3.29
E215	1/8	none	60	104h	15.3	4.51
F110	1/8	2D roughness	60	62h	10.3	2.70
F210	1/8	2D roughness	60	104h	10.4	2.69

Where h : roughness height,

x_0 : fetch (distance from the leading edge of roughness),

U_0 : free stream speed,

u_h : wind speed at the roughness height.

また、**Table. 1** に示した測定以外に、各ケース（A～F）について乱流境界層の発達の様子を見るため、対数領域以上の気流性状について種々の吹送距離で測定を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 風上側流入気流の性状

$x_0 = -940$ mm, $y = -130$ mm での風上側流入気流の性状を **Fig. 5** に示す。

Fig. 5a は、粗度の風上に何も置かない場合（CASE B）であり、境界層の厚さは約 170 mm, x および z 方向の乱れの強さは地面付近でそれぞれ15%, 8%に達する。また、無次元化されたレイノルズ応力 $(-\overline{u'w'}/U_0^2)$ の値は床面付近で約0.002となる。なお、CASE D, E の場合、風上側流入気流の性状はほとん

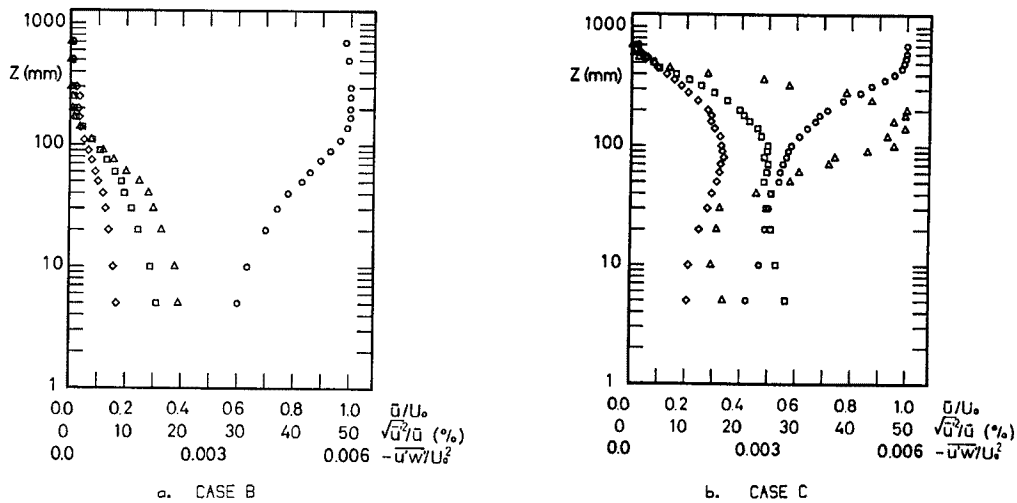


Fig. 5. Mean wind speed, intensity of turbulence and Reynolds shear stress profiles of inlet flow:

○ mean wind speed, □ intensity of turbulence (x-component),
◇ intensity of turbulence (z-component), △ Reynolds shear stress.

ど変わらなかったが、CASE A では床面付近で平均風速が少し早くなり、それにともなう乱れの強さも小さくなった。

風上に2次元粗度を敷き詰めた場合の測定結果 (CASE C) を Fig. 5 b に示す。接近流は粗度の風上に何も置かない場合に比べて乱れたものとなり境界層の厚さも $z=550$ mm におよんでいる。 x および z 方向の乱れの強さは地面付近でそれぞれ28%, 10%に達し、無次元化されたレイノルズ応力 ($-u'w'/U_0^2$) の値は $z=140\sim 200$ mm で最大値0.0060をとる。粗度の高さを2倍にした場合 (CASE F) には、床面付近で平均風速が少し早くなり、それにともなう乱れの強さも小さくなっている。また、無次元化されたレイノルズ力 ($-u'w'/U_0^2$) の値は $z=50$ mm 以下で負の値を持つ。

4.2 粗度上に発達した乱流境界層内の気流性状

十分発達した乱流境界層の1例 (CASE B410) を Fig. 6 に示す。測定位置は粗度要素間の中央, Fig. 7 a. で○印で示す位置である。図において縦軸は高度を対数でとっている。この場合、平均風速の分布は $z=40\sim 140$ mm で直線分布し (対数域)、その上下に伴流域とキャノピー層がそれぞれ存在する。主流 (x 軸) 方向の乱れの強さはキャノピー層内では30%を越え、 z 軸方向の乱れの強さはキャノピー層内で20%を越える。レイノルズ応力は床面付近では高度と共に増加し、 $z=30$ mm で最大値を取った後減少し、 $z=40\sim 140$ mm ではほぼ一定値をとる。それより上層では高度とともに減少している。他のケースにおける実験結果においても乱流境界層は地面に近い方から、キャノピー層、対数領域、伴流域に分けて考えることができる。最下層のキャノピー層の気流性状については4.3以後で詳しく述べることにし、ここでは対数領域における平均風速分布に式(1)に示す対数法則

$$\frac{u}{U_0} = \frac{u^*}{\kappa U_0} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = A \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで u^* : 摩擦速度

κ : カルマン定数 (=0.4)

z_0 : 粗度長

$$A = u^*/\kappa U_0 = 2.5 \cdot u^*/U_0$$

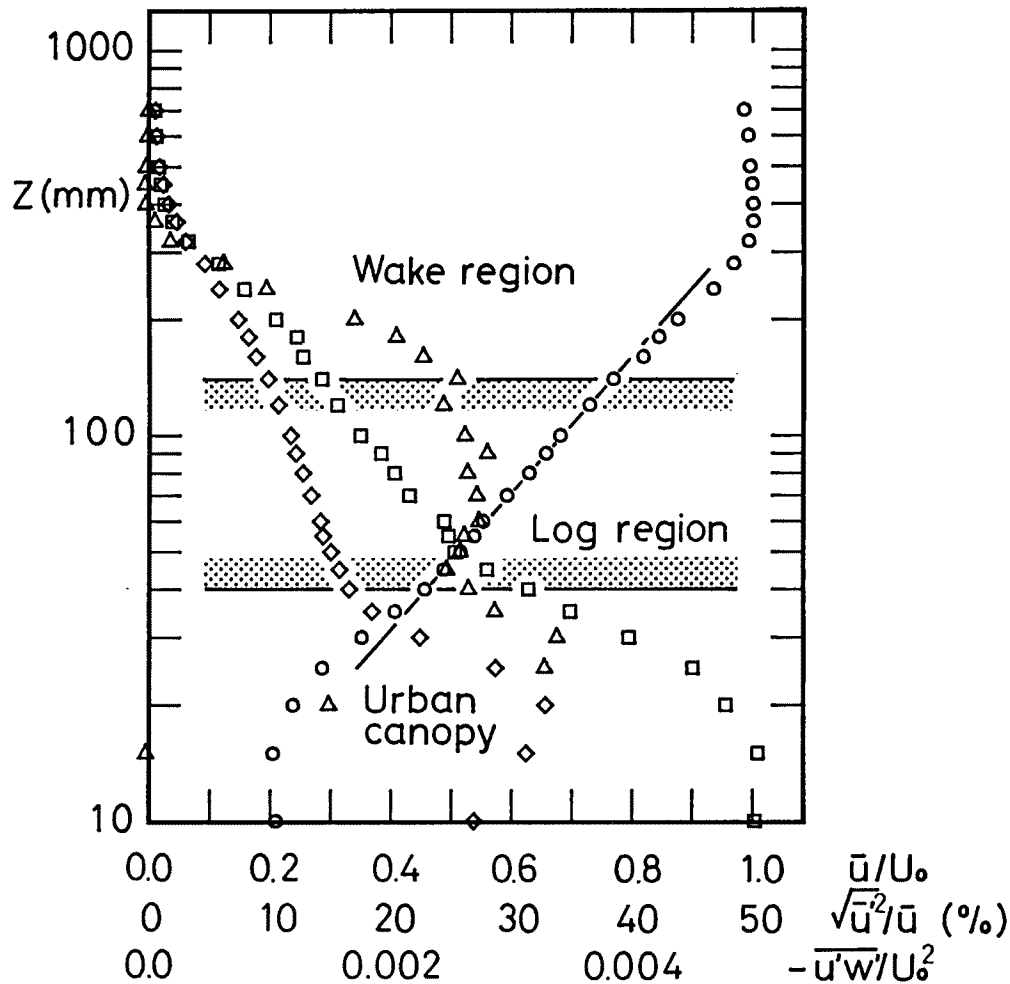


Fig. 6. Mean wind speed, intensity of turbulence and Reynolds shear stress profiles of inlet flow (CASE B410):

○ mean wind speed, □ intensity of turbulence (x-component),
◇ intensity of turbulence (z-component), △ Reynolds shear stress.

および、式(2)に示すべき法則

$$\frac{u}{u_{10}} = \left(\frac{z}{z_0} \right)^{1/n} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 z_{10} : 基準高度 (ここでは $z=60$ mm とした)

u_{10} : $z=z_{10}$ における平均風速

$1/n$: べき指数

を当てはめた場合の粗度長、比例係数Aおよび、べき指数を **Table. 2** に示す。測定位置はいずれも $x_0=6210$ mm で、 $h=30$ mm に対して $x_0=207h$ 、 $h=60$ mm に対して $x_0=104h$ であり、境界層は十分発達している。

Table. 2 より、対数領域の平均風速分布について以下のことがわかる。

1) 立方体粗度 ($h=30$ mm) の場合、密度1/4と1/8はほぼ同様な風速分布となる。密度1/18のとき、風速分布は滑らかな粗度上の風速分布に近づき、粗度長、比例係数およびべき指数は密度1/4および1/8の場合

Table 2.

CASE	Roughness density	Windward roughness	$h(\text{mm})$	$z_0(\text{mm})$	z_0/h	A	$1/n$
A	1/4	none	30	7.54	.251	.244	.461
B	1/8	none	30	8.00	.267	.245	.446
C	1/8	2D roughness	30	8.95	.298	.242	.465
D	1/18	none	30	5.28	.176	.238	.378
E	1/8	none	60	23.7	.395	.335	.657
F	1/8	2D roughness	60	21.0	.350	.280	.612

よりも小さくなる。

2) 同じ密度 (1/8) でも、粗度の高さによって風速分布は変化し、粗度が高くなるほど粗度長、比例係数およびべき指数は増加する。

3) 風上側の流入気流の性状が変わっても、風速分布はあまり変化しない。

4.3 キャノピー層内の気流性状

キャノピー層内の気流性状の1例 (CASE B410) を Fig. 7 に示す。Fig. 7 a は平均風速の分布, Fig. 7 b は x 軸方向の乱れの強さの分布, Fig. 7 c は z 軸方向の乱れの強さの分布, Fig. 7 d はレイノルズ応力の分布を示す。粗度要素の配列形状および測定位置は Fig. 7 a に示すとおりで、図中の各シンボルは測定位置と対応している。Fig. 8 には $z=20\text{ mm}$ での風向分布を示す。図中の矢印は風向のみを示しており、ベクトル表示ではない。平均風向の定まらなかった点は○印で示し、Fig. 7 中の黒塗りのシンボルに対応する。

Fig. 7 より、気流性状は $z=45\text{ mm}$ 以上で測定位置によらずほぼ同様な分布を示すが、これより下では測定位置により変化することがわかる。各気流性状はその分布形状から、粗度要素のすぐ後ろの測定位置 4、上流に粗度要素のない測定位置 2 および 5、そして測定位置 1 および 6 の 3 つのグループに分けられる。上流および下流に粗度要素が存在する測定位置 1、4、6 では粗度の高さ $z=30\text{ mm}$ 以下で乱れの強さが大きく、 x 軸方向および z 軸方向の乱れの強さはそれぞれ 35%、25% を越える。また、風向の測定から測定位置 1、4、5、6 では床面付近に平均風向の定まらない点が存在し、粗度による剝離領域を示すものと考えられる。Fig. 7 d より、レイノルズ応力は平均風向が定まらない点では負になっている。これは、剝離領域内で平均風速の x 軸方向成分が負になっている可能性を示しているものと考えられる。

このようにキャノピー層内では流れが空間的に不均一であるばかりでなく、粗度によって生じた剝離領域を含み、気流性状は複雑なものとなる。特に、剝離領域内では乱れが大きくかつ風向が常に変動するので、X 型熱線風速計による測定誤差は非常に大きくなり正確な気流性状を測定することが困難である⁸⁾。また、剝離領域内では平均的な風向が上空の流れと逆向き、すなわち、平均風速の x 軸方向成分が負になっていると予想される場所がある。

そこで、キャノピー層内の風速分布を評価するために、各高度で風速の空間平均を取る。その際、平均風向の定まらない部分 (Fig. 8 の斜線で示す部分) は剝離領域であると考え、この領域内で平均流の流線が閉じていることを考慮して、空間平均値を零とみなしている。つまり、Fig. 7 中黒塗りの点は空間平均に際して零と見なされる。上述の仮定に従って求めた空間平均風速分布を Fig. 9 から Fig. 12 に示す。図中縦軸は粗度の高さ h で、横軸は $z=h$ における風速 u_h で無次元化してある。Fig. 9～Fig. 12 より、空間平均風速分布は粗度の高さ h 以下で対数分布とは異なる分布を示し、曲線の変曲点はおおむね $z=h$ にあることがわかる。従って、粗度の影響が直接及ぶ範囲は粗度の高さまでとみなすことができ、空間平均速度分布を考える限りキャノピー層厚は粗度の高さと同じと考えられる。また、剝離領域の範囲の取り方に

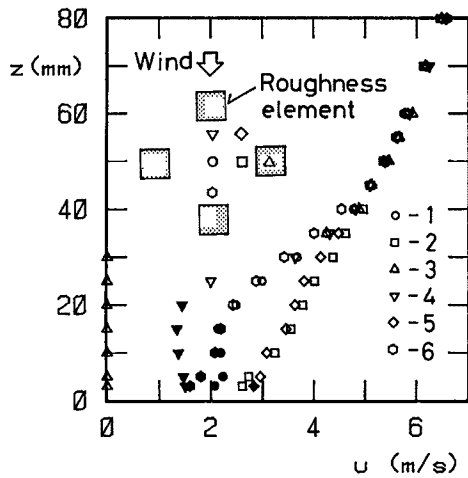


Fig. 7a. Mean wind speed profiles at various locations (CASE B410).

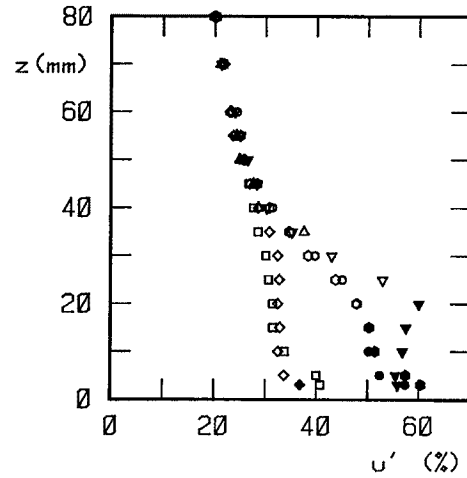


Fig. 7b. X-component turbulence intensity profiles at various locations (CASE B410).

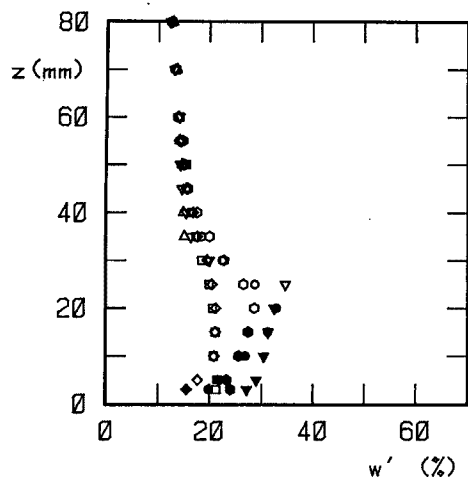


Fig. 7c. Z-component turbulence intensity profiles at various locations (CASE B410).

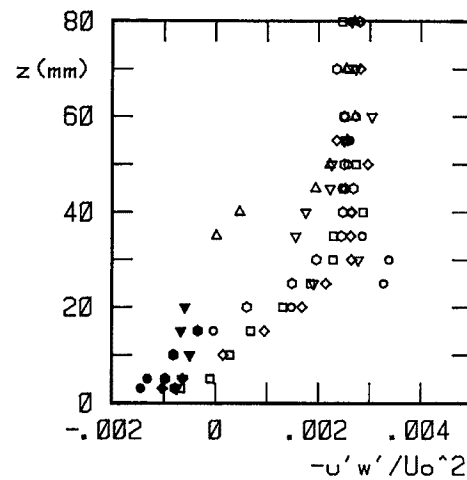


Fig. 7d. Reynolds shear stress profiles at various locations (CASE B410).

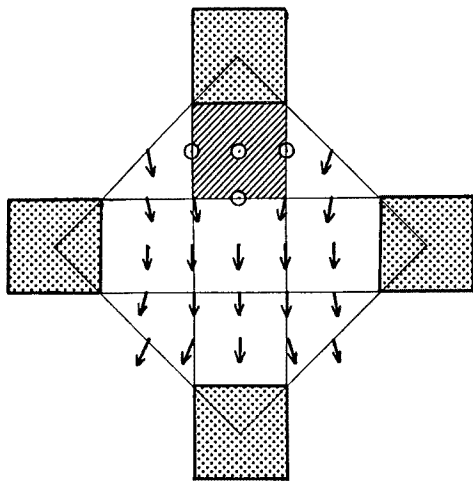
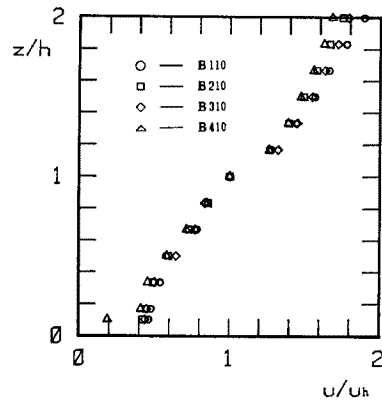
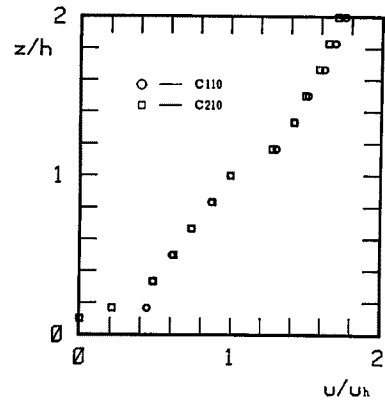


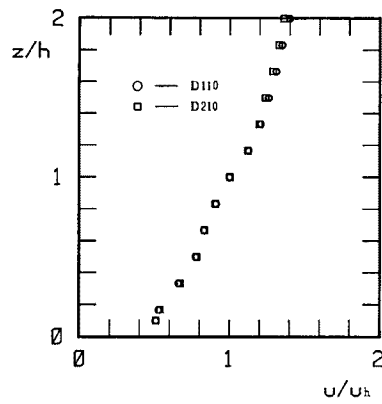
Fig. 8. Mean wind direction at $z=20$ mm (CASE B410).



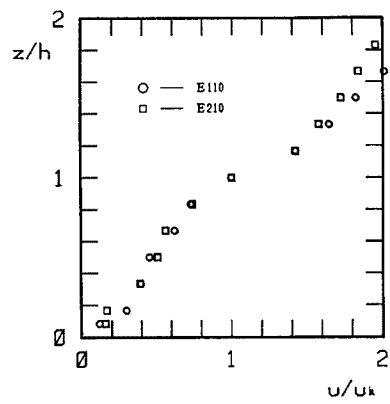
a. CASE B



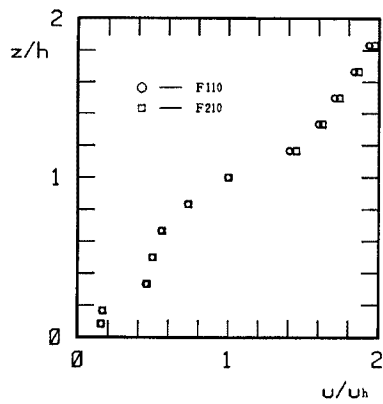
b. CASE C



c. CASE D



d. CASE E



e. CASE F

Fig. 9. Variation of space mean wind speed profiles with fetch.

よって風速分布形状が変わり、その結果、地面付近で風速分布のばらつきが大きくなると考えられる。 $z=h$ 以下での空間平均速度分布の、吹送距離、基準風速、接近流および粗度密度による変化を次にまとめる。

4.3.1 吹送距離による変化

風速分布の吹送距離による変化を **Fig. 9** に示す。図より、基準風速や接近流、粗度密度が異なっても風速分布は吹送距離によってほとんど変化しない。ただし、**Fig. 9 a** より CASE B ($h=30$ mm, 密度 $1/8$) の場合には地面付近で少しばらつきが見られる。

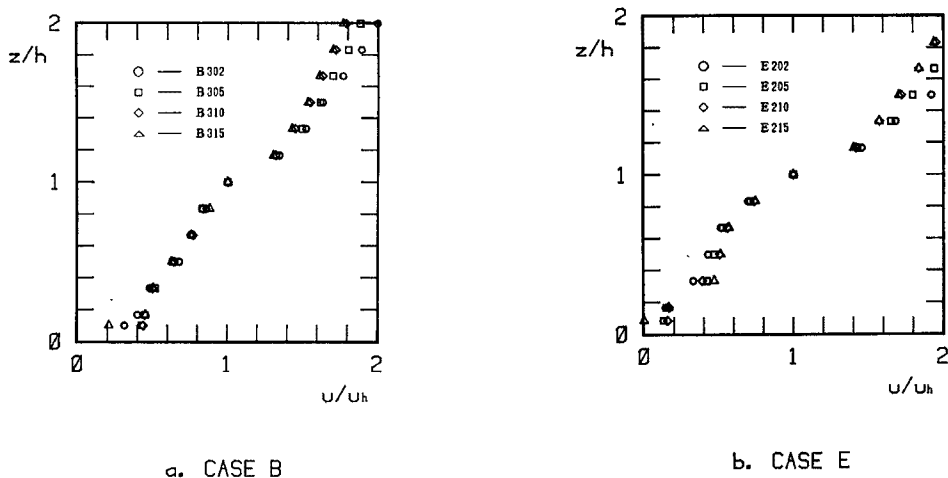


Fig. 10. Variation of space mean wind speed profiles with free stream speed.

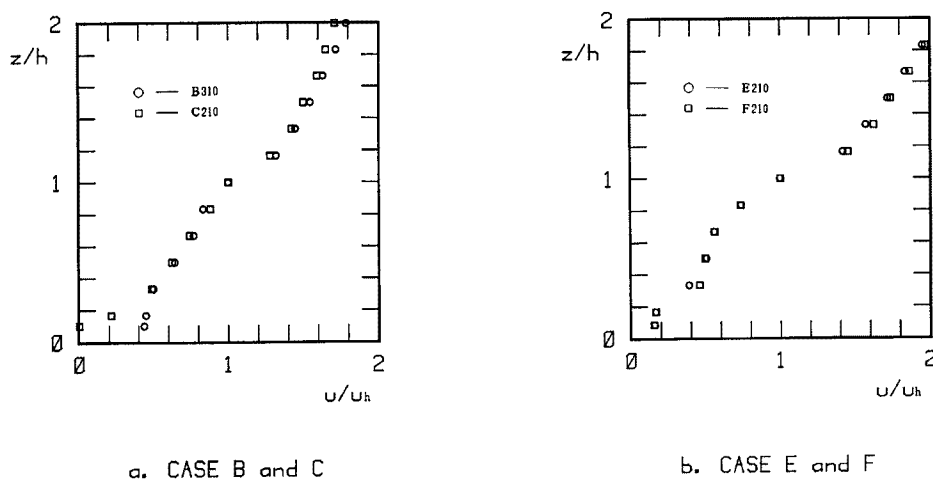


Fig. 11. Variation of space mean wind speed profiles with inlet flow.

4.3.2 基準風速による変化

風速分布の基準風速による変化を **Fig. 10** に示す。**Fig. 10 a** より CASE B ($h=30$ mm, 密度 $1/8$) の場合、基準風速による変化はほとんど無い。**Fig. 10 b** より CASE E ($h=60$ mm, 密度 $1/8$) の場合、風速分布は地面付近で少し変化し、基準風速の増加にともなう u/u_h の値も大きくなる傾向があるが、これが有為な変化であるかどうかについてはさらに検討する必要があると思われる。

4.3.3 風上側の流入気流による変化

風速分布の風上側の流入気流による変化を Fig. 11 に示す。図より風速分布は風上側の流入気流の性状によってほとんど変化しない。

4.3.4 粗度密度による変化

風速分布の粗度密度による変化を Fig. 12 に示す。図より風速分布は粗度密度により変化し、粗度密度が高くなるほど同高度での u/u_h の値は小さくなって、キャノピー層上部で高さ方向の風速変化が大きくなる。また粗度の高さによっても風速分布は変化し、粗度の高さが高くなるほど u/u_h の値は小さくなり、粗度密度が高くなるのと同じ効果を示す。

5. む す び

都市模型を用いた風洞実験により、市街地上に発達する乱流境界層はその気流性状から、伴流域、対数域、そして粗度の影響を直接受けるキャノピー層という3つの層に分けられることがわかった。このうち最も地面に近い層、すなわちキャノピー層内の気流性状を調べるため粗度ブロックを用いた風洞実験が行われた。得られた測定結果より、各高度で風速の空間平均を考えることによりキャノピー層内の風速分布を評価した。以下に得られた結果をまとめる。

1) 空間平均された風速分布は粗度の高さ以下で、それより上層の対数分布とは異なる分布を示し、風速分布曲線の変曲点はおおむね粗度の高さに一致する。従って、粗度の影響が直接及ぶ範囲は、粗度の高さまでとみなせ、空間平均速度分布を考える限りキャノピー層厚は粗度の高さと同じと考えられる。

2) キャノピー層内では粗度による剥離流のため地面付近で平均風向が定まらない点が存在する。このような点では乱れが大きく、測定誤差が非常に大きくなる。また、測定されたレイノルズ応力の値から平均風速の主流方向成分が負になっている点があると予想される。

3) 吹送距離の違いや、風上側の流入気流性状の変化によって、キャノピー層内の風速分布はほとんど変化しない。

4) 立方体ブロックでは基準風速の変化によってキャノピー層内の風速分布はほとんど変化しない。

5) キャノピー層内の風速分布は粗度密度により変化する。このとき粗度高さの風速で無次元化された風速は、粗度密度が高くなるほど小さくなる。また、キャノピー層上部で高さ方向の風速変化が大きくなる。

6) 粗度の高さによっても風速分布は変化し、粗度が高くなる時粗度高さの風速で無次元化された風速は小さくなり、粗度密度が高くなるのと同じ効果を示す。

以上、市街地におけるキャノピー層内の風速分布を実験的に調べたが、理論的考察による検討が今後の課題である。

謝 辞

本研究を行うに当たり、京都大学名誉教授石崎潑雄先生、京都大学防災研究所桂順治教授および谷池義人助教授には適切な御助言を頂きました。また、防災研究所羽野淳介技官および杉政和光技官には、実験装置の製作ならびに実験を手伝って頂きました。これらの御厚意に対して深く感謝の意を表します。

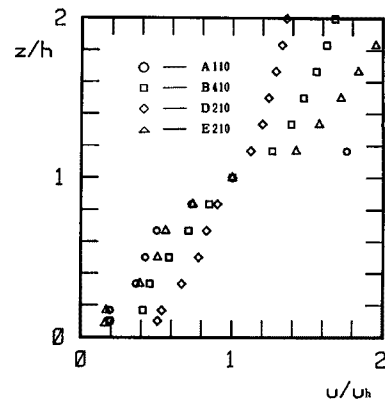


Fig. 12. Variation of space mean wind speed profiles with roughness density and height (CASE A, B, D and E).

参 考 文 献

- 1) Davenport, A. G.: The dependence of wind loads on meteorological parameters. Paper 2, Conference on Wind Loads on Buildings, Univ. Toronto Press, Tronto.
- 2) Counihan, J.: Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972, Atmospheric Environment vol. 9, 1975, pp. 871-905.
- 3) 石崎潑雄・桂順 治・谷池義人・丸山 敬：地表面粗度の違いによる境界層気流性状の変化に関する風洞実験，第8回風工学シンポジウム，1984，pp. 91-98.
- 4) Coles, D.: The Law of the wake in the turbulent boundary layer, J. Fluid Mech. Vol. 1. part 4, 1967, pp. 741-773.
- 5) 佐藤 鑑他：環境工学における市街地風の変動とその影響に関する研究—1（市街地上の性状その1），日本建築学会論文報告集，Vol. 188, 1971, pp. 27-63.
- 6) 花房龍雄・藤谷徳之助：強風時の境界層の構造について，第7回風工学シンポジウム，1985，pp. 12-30.
- 7) 石崎潑雄・桂順 治・谷池義人：新設の風工学用境界送風洞について，京都大学防災研究所年報，Vol. 56 B-1, 1983, pp. 313-355.
- 8) Tutu, N. K. and R. Chevray: Cross-wire anemometry in high intensity turbulence, J. Fluid Mech., Vol. 71, Part 4, 1975, pp. 785-800.