

複雑な粗度形状をもつ粗面の粗度評価について (市街地を対象とした検討)

丸 山 敬

PARAMETERIZATION OF ROUGH, RANDOM SURFACE (A STUDY FOR URBAN AREA)

By *Takashi* MARUYAMA

Synopsis

The surface roughness configuration mainly affect the wind characteristics in the atmospheric boundary layer. The vertical distribution of mean wind speed over rough surface is shown by the exponent in power law or the roughness length, the zero plane displacement and the friction velocity in logarithmic law. The surface drag coefficient shows the drag of rough surface. Those parameters are necessary to calculate the velocity over the rough surface. In order to know the relation between those roughness parameters and the surface configuration, the parameterization of rough, random surface is discussed.

The roughness height, the roughness volume density, the roughness concentration, the effective roughness surface area density and the roughness surface area density function are examined for urban models and actual urban areas. Wind tunnel test is performed using a number of urban models and comparisons are made with the rough surface using cubic blocks. From the standpoint of the surface drag variation with the roughness concentration, the staggered arrayed cubic blocks is approximately equivalent to the urban model.

1. は じ め に

接地境界層内の気流性状を決定する要因として地表面の形状は最も重要なものである。地表面には植物や建物等、障害物が存在することが多く、一般に粗面とみなすことができる。粗面上に発達する乱流境界層内の平均風速の鉛直分布に関して、粗面の粗さの度合、すなわち粗度は、べき法則や対数法則が成り立つ範囲で、べき指数、粗度長、零面変位、摩擦速度等により表わされる。また、地表面付近で粗度要素の影響を直接受け、平均風速の鉛直分布がべき法則や対数法則で表せない層、すなわちキャノピー内の風速分布を計算する場合には、粗度を粗度要素の抗力係数として計算に取り込む¹⁾。このように、粗度を表すパラメータ（以後、粗度パラメータと呼ぶことにする）は種々の形で与えられる。

ある粗度形状を持った粗面上の気流性状を予測しようとする場合には、粗度パラメータと粗度形状の関係を知る必要がある。これまで、粗度要素が単純な幾何学形状を持つ場合について、粗度パラメータと粗度形

状に関する研究は数多くなされてきた。例えば、O'Loughlin ら²⁾は立方体を用いて、上方の気流性状と配列形状の関係を、Perry ら³⁾は正方形断面の2次元角柱を用いて、床面抗力および上方の気流性状と角柱の間隔の関係を、Marshall⁴⁾は円柱を用いて、床面抗力と配列形状の関係を求めた。さらに Wooding ら⁵⁾は、規則的な配列を用いた過去の実験例を調べ、粗面の受ける抗力が粗度要素の形状によってどのように変化するかをまとめた。また、Mulhearn ら⁶⁾は砂利を用いた粗面について実験を行った。これらの研究により、粗度パラメータと粗度要素の形状、密度、配列等の関係がある程度明らかにされている。しかし、粗度要素の形状が一定でない場合や、配列が不規則な場合の資料は少なく、特に、市街地のように複雑な形状をもつ粗面の場合には、粗度形状をどのような尺度で評価するかという問題も含めて、いまだに不明な点が多い。

本報では、市街地のような複雑な形状をもつ粗面において粗度形状を表すパラメータ（以後、形状パラメータと呼ぶことにする）を幾つか取り上げて考察を加えた。低層建物が分布する市街地を想定して製作した模型に対して、本報で取り上げた形状パラメータの値を求め、実際の市街地に対して求められた値との比較を行った。また、粗度パラメータとして地表面抗力を、形状パラメータとして有効粗度表面積率を取り上げ、市街地模型を用いた風洞実験結果から両者の関係を調べ、立方体粗度要素による実験結果⁷⁾との比較を行った。

2. 形状パラメータ

粗度要素の形状がすべて同じで、角柱や円柱のような単純な幾何学形状を持ち、分布形状も一様であるときには、粗度要素の高さ、幅、間隔、縦横比、密度等、形状パラメータの定義もしやすく、その値も明確に求めることができる。一方、粗度形状が一様でない場合には、どのような尺度を用いるかが問題となる。以下、市街地の場合を例に取り、これまでに用いられている形状パラメータを幾つか取り上げ、それらの定義、意味、問題点、研究者による呼び名の違い等について述べる。記号は Fig. 1 のように与え、 x 軸を風向方向に、 y 軸を風向直角水平方向に、 z 軸を鉛直方向にとる。

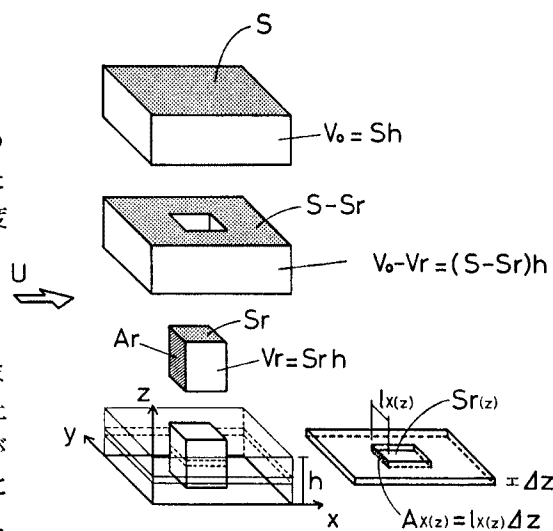


Fig. 1. Determination of variables.

2.1 粗度の高さ： h

市街地における主な粗度要素は建築物であり、建物の高さが h に相当する。このとき、建物の高さは一定ではないので h の定義が問題となる。例えば、建物高さの平均値 h_{mean} や最大値 h_{max} が挙げられる。建物近傍では、風速分布が建物の影響を受けて局所的に変化し、一様でない。また、風速の時空間平均値についても建物高さ付近で分布形状の変化が大きいため、 h の定義としては建物高さの最大値の方が適していると考えられる。ただし、周辺の建物に比べてとびぬけて高い建物が孤立して存在するときには、これを孤立建物として無視すべきであろう。しかし、このような高層建物がどの程度建て込んできたときに、高層建物の高さを h と見なすかは検討すべき課題である。

2.2 粗度体積密度： $\rho_r(z)$

高さ z における単位体積あたりの粗度体積を表し、地表面面積 S 、平均化を行う層の厚さ Δz および高さ z における粗度要素の水平断面積 $S_r(z)$ により式(1)のように定義される。

$$\rho_r(z) = \frac{S_r(z)dz}{Sdz} = \frac{S_r(z)}{S} \dots\dots\dots(1)$$

ここでは $\rho_r(z)$ を粗度体積密度と呼ぶ。地上における $\rho_r(z)$ の値、

$$\rho_r(0) = \frac{S_r(0)}{S} \dots\dots\dots(2)$$

を Counihan⁸⁾ は element density, 亀井ら⁹⁾ は建築密度, 大熊ら^{10,11)} は平面密度と呼んでいる。高さ方向に粗度形状が変化しないときには、平均化体積 V_0 および粗度要素の体積 V_r を用いて、

$$\rho_r(z) = \rho_r(0) = \frac{V_r}{V_0} \dots\dots\dots(3)$$

となる。単位体積あたりの粗度体積を表わす形状パラメータとしては、この他に平均化体積 V_0 を $10(\text{m}) \times S(\text{m}^2)$ として求める、

$$\gamma = \frac{V_r}{10S} \dots\dots\dots(4)$$

が挙げられ、亀井ら⁹⁾ は密集度、田村ら¹²⁾ は建物密度と呼んでいる。流体の占める割合という観点からは、

$$G(z) = 1 - \rho_r(z) = \frac{S - S_r(z)}{S} \dots\dots\dots(5)$$

とする定義があり、村上ら¹³⁾、平岡ら¹⁴⁾は G を有効体積と呼んでいる。

2.3 有効粗度表面積率： λ

単位面積に存在する粗度要素の風向方向見つけ面積を表し、粗度要素の風向方向見つけ面積 A_r と地表面面積 S を用いて式(6)のように定義する。

$$\lambda = \frac{A_r}{S} \dots\dots\dots(6)$$

これは面積平均値で、高さ方向の粗度形状の変化を扱うことはできない。O'Loughlin ら²⁾、Marshall⁴⁾ は lateral cover, Wooding ら⁵⁾ は roughness concentration と呼んでいるが、ここでは有効粗度表面積率と呼ぶことにする。市街地のように複雑な形状を持つ粗面では、各粗度要素の形状や向きが一定ではないので、粗度要素の表面積に対する風向方向の見つけ面積の割合 ξ が問題となり、 A_r は粗度表面積 A を用いて、

$$A_r = \xi A \dots\dots\dots(7)$$

と表す。 ξ の値は、例えば、円柱の場合 $\xi = 2h/(2h+r)$ (h : 高さ, r : 半径), 立方体の場合 $\xi = 1/5 \sim \sqrt{2}/5$, 平板の場合 $\xi = 0 \sim 1/2$ となる。また、 $\xi = 1$ としたときの λ の値、すなわち A/S は単位面積に存在する粗度要素の表面積を表すので、粗度表面積率と呼ぶことにする。

地表面が上空の流れから受ける抗力 F_r は、通常、地表面剪断応力 τ_w 、地表面抗力係数 C_r 、基準速度圧 Q により、

$$F_r = \tau_w S = C_r Q S \dots\dots\dots(8)$$

と定義される。ここで、 Q は空気密度 ρ 、基準風速 U_0 を用いて、

$$Q = \frac{1}{2} \rho U_0^2 \dots\dots\dots(9)$$

である。式(8)の中で、粗度パラメータは C_r である。従って、 C_r と粗度形状の関係がわかれば、粗度形状から地表面抗力 F_r を求めることができる。地表面抗力 F_r は各粗度要素に働く抗力 f_r と、地表面に働く摩擦力 f_s の合力で、

$$F_r = \sum f_r + f_s \dots\dots\dots(10)$$

となる。粗面において f_s の値は小さい⁷⁾ ので、 F_r は主に式(10)の右辺第1項、すなわち各粗度要素に働く抗力の合計で決まる。各粗度要素に働く抗力 f_r は、通常、各粗度要素の風向方向見つけ面積 a_r および抗力

係数 C_D によって,

$$f_r = C_D Q a_r \quad \dots\dots\dots (11)$$

と表され, 形状パラメータ a_r を含む。

単位面積あたりの地表面抗力, すなわち F_r/S は式(8)より地表面剪断応力 τ_w に等しい。 τ_w は流れ方向の静圧勾配が零のとき, 粗度要素のすぐ上の層でレイノルズ応力 $-\rho \overline{u'w'}$ と釣合って,

$$\tau_w = -\rho \overline{u'w'} \quad \dots\dots\dots (12)$$

の関係があり, 上空の気流性状を左右する。 τ_w は式(8), (10), (11)より,

$$\tau_w = \frac{\sum (C_D Q a_r) + f_s}{S} \quad \dots\dots\dots (13)$$

とも表せる。このとき, 抗力係数の面積平均値を C'_D とし, $f_s=0$ とみなすと,

$$\tau_w = C'_D Q \frac{\sum a_r}{S} = C'_D Q \frac{A_r}{S} = C'_D Q \lambda \quad \dots\dots\dots (14)$$

となって, τ_w は C'_D および λ によって表される。式(8), (14)より,

$$C_r = C'_D \lambda \quad \dots\dots\dots (15)$$

の関係があるので, 粗度パラメータ C_r は形状パラメータ λ に依存する。

2.4 有効粗度表面積密度: $a_x(z)$

流体単位体積あたりに存在する粗度要素の風向方向見つけ面積を表し, 地表面面積 S , 平均化を行う層の厚さ Δz , 高さ z における粗度要素の水平断面積 $S_r(z)$, 粗度要素の風向方向見つけ面積 $A_x(z)$, あるいは粗度要素の見つけ幅 $l_x(z)$, によって式(16)のように定義する。

$$a_x(z) = \frac{A_x(z)}{(S - S_r(z))\Delta z} = \frac{l_x(z)}{S - S_r(z)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

鵜野ら¹⁵⁾は建物表面積密度と呼んでいるが, ここでは有効粗度表面積密度と呼ぶ。

$a_x(z)$ は高さ z における流体単位体積が粗度要素から受ける風向方向の力 $F_x(z)$ を表すときに用いられ, 風向方向の抗力係数 $C_{rx}(z)$ および高さ z における速度圧 $q(z) = \rho U^2(z)/2$ により,

$$F_x(z) = \frac{C_{rx}(z)q(z)A_x(z)}{(S - S_r(z))\Delta z} = C_{rx}(z)q(z)a_x(z) \quad \dots\dots\dots (17)$$

と表せ, キャノピー内の風速分布を計算するときに用いられる。なお, $a_x(z)$ は植物キャノピーでは葉面積密度と呼ばれる。このとき, 葉の体積は無視されるので,

$$a_x(z) = \frac{A_x(z)}{S\Delta z} = \frac{l_x(z)}{S} \quad \dots\dots\dots (18)$$

と定義される。キャノピー内で $Z = z/h$ とすると, $a_x(Z)$ の鉛直分布は密度関係 $\hat{a}(Z)$ を用いて

$$a_x(Z) = \xi a_t \hat{a}(Z) \quad \dots\dots\dots (19)$$

と表わせる。ここで, a_t は,

$$a_t = \frac{A}{(Sh - V_r)} \quad \dots\dots\dots (20)$$

と定義され, 粗度表面積密度と呼ぶ。このとき, 式(6), (19), (20)より,

$$a_x(Z) = \frac{A_r}{(Sh - V_r)} \hat{a}(Z) \quad \dots\dots\dots (21)$$

である。また, $\hat{a}(Z)$ は

$$\int_0^1 \hat{a}(Z) dZ = 1 \quad \dots\dots\dots (22)$$

の性質を持ち, Kondo ら¹⁶⁾は $\hat{a}(Z)$ を,

$$\bar{a}(z) = \alpha_m (1 - z) \exp \left[-\frac{z}{2} (z - 2\beta) \right] \dots\dots\dots (23)$$

という形で与えている。ここで、 α_m は式(22)を満たすための規格化定数、 β の値は粗度形状に合わせて決定する。

3. 市街地模型による風洞実験

粗度形状と上空の気流性状との関係を調べるために、市街地模型を用いて風洞実験を行った。用いた市街地模型について、2章で取り上げた形状パラメータの値を調べ、実際の市街地に対して求められた値との比較を行う。

3.1 実験概要

実験は京都大学防災研究所構内の境界層風洞で行った。**Fig. 2** に示すように測定胴床面にラフネスを敷き、測定部に市街地模型を置いたときの抗力、風速、速度圧および静圧を測定した。模型の設置状況を**Photo. 1**に示す。測定に際し、天井高は一定（2 m）とした。なお、風洞の詳細は文献¹⁷⁾を参照されたい。座標系は図中に示すように、測定胴前縁中央床面から風向方向に x 軸を、風向直角水平方向に y 軸を、鉛直方向に z 軸をとる。また、斜線で示す測定部の前後には **Fig. 3** に示すような千鳥状の配列形状を持つラフネスを敷き詰め、乱流境界層を発達させた。測定部に **Fig. 3** と同じラフネスを与えたときの流入気流性

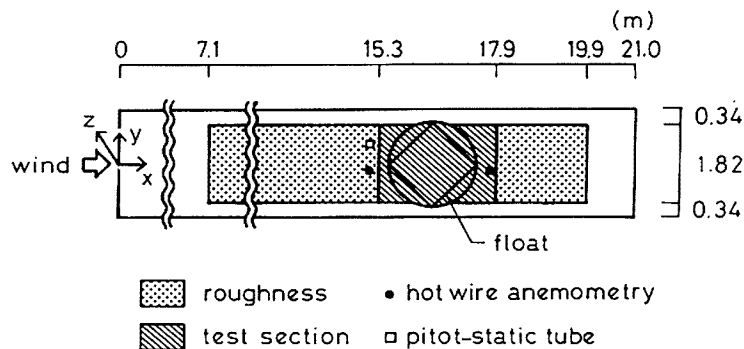


Fig. 2. Experimental arrangement.



Photo. 1. Setup of the urban model.

状を Fig. 4 に、測定胴内の静圧分布を Fig. 5 に示す。床面抗力は測定部に設置したフロートの上に市街地模型を載せ、フロートに加わる力を歪センサーにより直接測定した。風速の測定にはX型熱線風速計を用い、 x および y 軸方向の風速成分を求めた。基準速度圧 Q は測定部前縁、境界層上部 ($x=15.1$ m, $y=-.155$ m, $z=.70$ m) に設置したピトー管により求め、実験時の基準風速 U_0 は約 10 m/s とした。静圧分布は測定胴壁面、高さ 1.2 m に開けた測定孔と実験室内の静圧との差により求めた。今回用いた市街地模型に対して、流入気流性状および測定胴内の静圧分布はほとんど変化しなかった。なお、測定の詳細については文献⁷⁾を参照されたい。

3.2 市街地模型

実験に用いた市街地模型には1～3階建ての低層建物が分布する市街地を想定し、縮尺 1/200 で木製の模型を製作した。Photo. 2 a～i に示すように、不規則な街路を持つ場合 (CASE A)、格子状の街路を持ち、街路が風向と 45° で交わる場合 (CASE B)、格子状の街路を持ち、街路が風向に直交する場合 (CASE C)

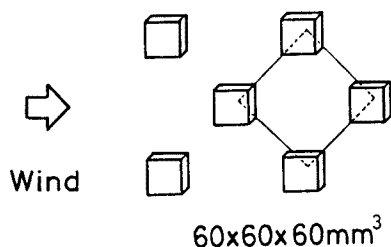


Fig. 3. Configuration of roughness.

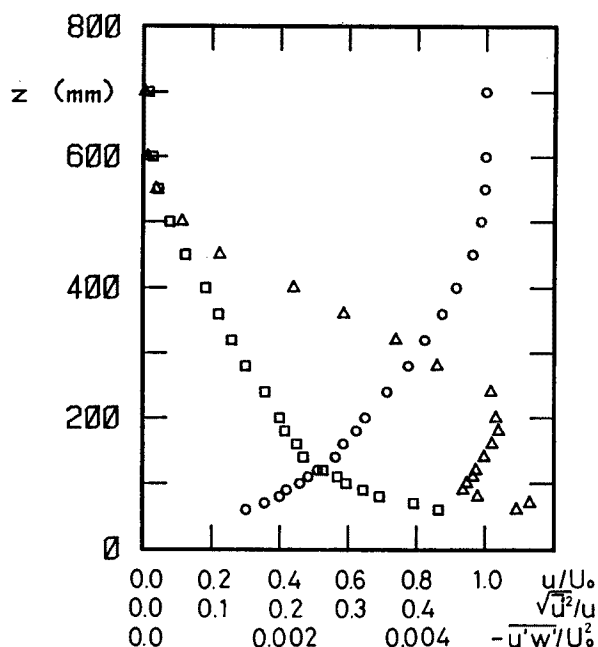


Fig. 4. Wind characteristics of approach flow at $x=15.1$ m, $y=-0.155$ m: $\circ$, u/U_0 ; $\square$, $\sqrt{u'^2}/u$; $\triangle$, $-u'w'/U_0^2$.

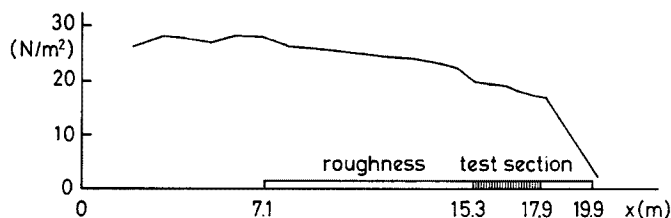


Fig. 5. Distribution of static pressure in the working section.

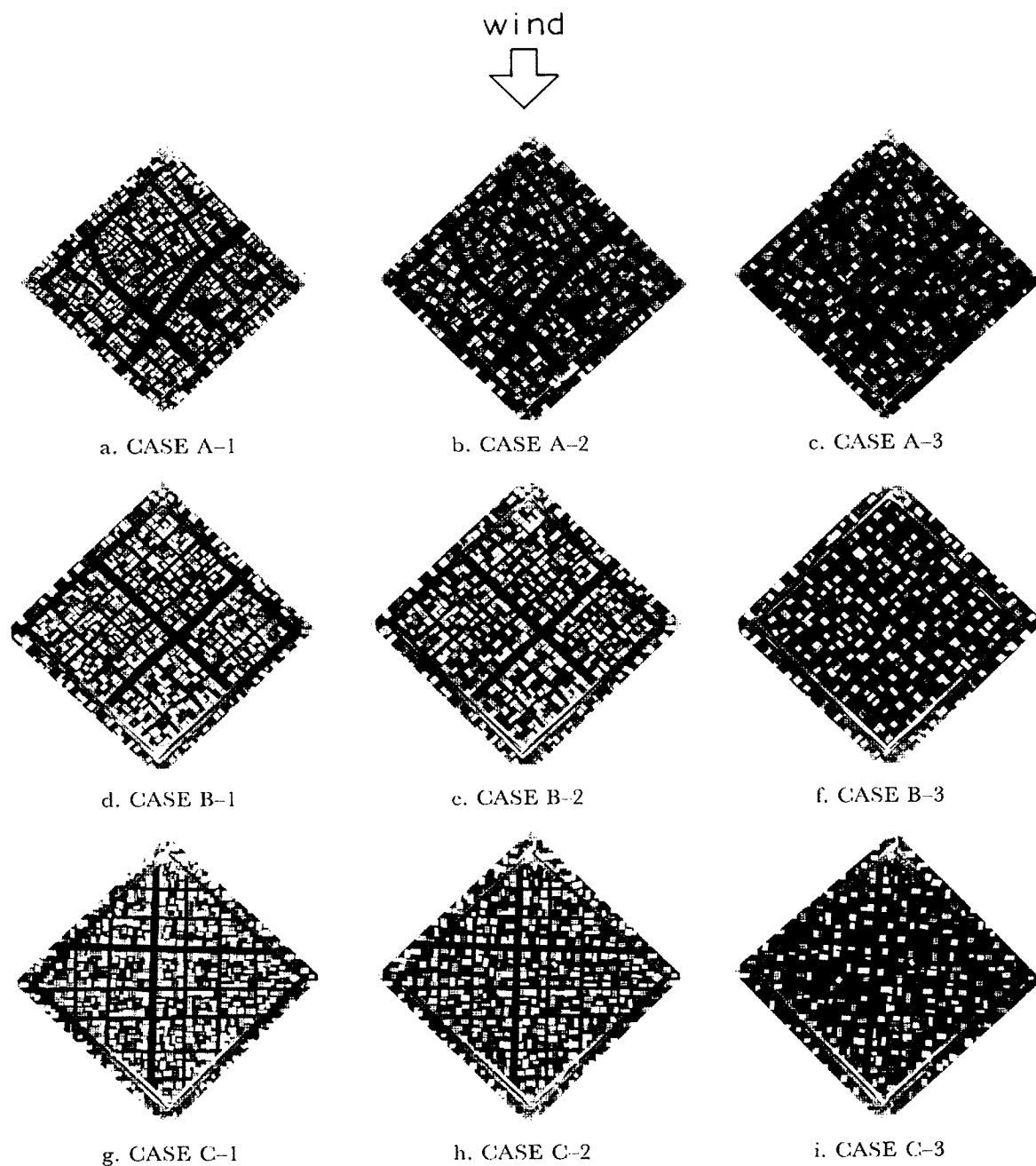


Photo. 2. Configuration of urban models.

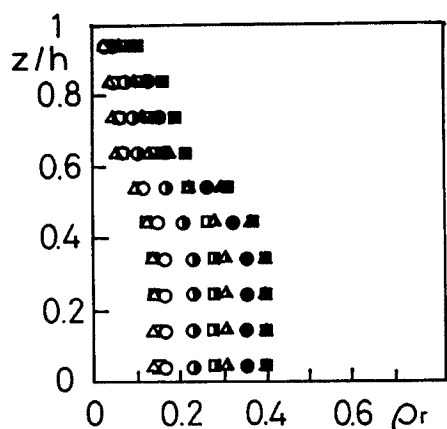
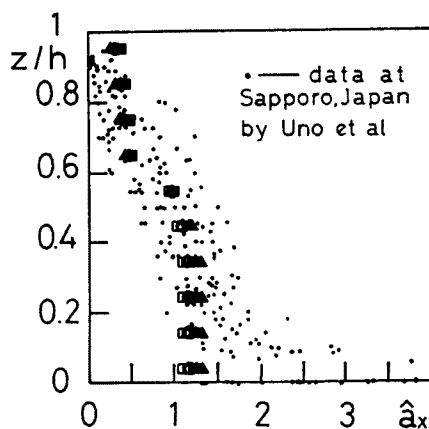
の3ケースについて、それぞれ建物の密度を3種類（1：密，2：並，3：疎）ずつ変化させて実験を行った。市街地模型を載せたフロートは，風向直角方向の抗力成分も測定できるように，センサーの測定軸を風向に対して 45° の方向に向けた。実験を行った9種類の模型について，2で挙げた各形状パラメータの値を求め，**Table 1**に示す。 ξ の値は建物が全方位にまんべんなく向いているとして，平均的な見つけ面積を求めている。以下，各パラメータの値について詳しく見てみる。

h ：建物高さの平均値は最大値の0.718～0.752である。

ξ ：全粗度表面積に対する風向方向の見つけ面積の割合 ξ は0.270～0.273である。

Table 1

Case	Symbol	h_{mean} (m)	h_{max} (m)	ξ	λ	A/S	$\rho_r(0)$	r	$a_t(1/\text{m})$
A-1	●	.0367	.0500	.273	.510	1.867	.365	.263	37.3
B-1	▲	.0359	.0500	.271	.541	1.998	.403	.285	40.0
C-1	■	.0375	.0500	.272	.575	2.118	.410	.305	42.4
A-2	○	.0364	.0500	.272	.326	1.197	.239	.171	23.9
B-2	△	.0360	.0500	.271	.424	1.567	.315	.223	31.3
C-2	□	.0376	.0500	.271	.396	1.461	.287	.214	29.2
A-3	○	.0362	.0500	.272	.236	0.867	.174	.124	17.3
B-3	△	.0359	.0500	.270	.194	0.717	.144	.102	14.3
C-3	□	.0374	.0500	.270	.195	0.724	.145	.108	14.5

Fig. 6. Profiles of roughness volume density, ρ_r , in the urban canopy; see symbols in Table 1.Fig. 7. Profiles of roughness surface area density function, $\hat{a}_x$, in the urban canopy; see symbols in Table 1.

λ : 有効粗度表面積率 λ の値は0.194~0.575である。

A/S : 粗度表面積率 A/S の値は0.717~2.118である。

ρ_r : 粗度体積密度 ρ_r の鉛直分布を求め、Fig. 6 に示す。模型では植物や自動車等、建物以外の障害物を再現していないために、地表面付近で ρ_r の値が鉛直方向に一定となっている。実際の市街地では地表面に近づくにつれて ρ_r はなめらかに増加すると考えられる。

$\rho_r(0)$: 地上における ρ_r の値 $\rho_r(0)$ は0.144~0.410である。亀井ら⁹⁾が1973年度の税務統計資料により求めた値は東京23区で0.104~0.342である。大熊ら¹⁰⁾による1985年の調査では、住居地域(市川)で0.191, 商業地域(新宿, 八重州, 丸の内)で0.373~0.462である。

r : 平均化体積を $10S$ としたときの ρ_r の値, r は0.102~0.305である。亀井ら⁹⁾によれば東京23区で0.048~0.260, 田村ら¹²⁾が1980年前後の市街地(函館, 上野, 松本, 日田)の航空写真より求めた値は、植物も含め0.123~0.212である。

a_x : $h(=h_{\text{max}}), S, V_r$ および A_r で無次元化した密度関数 $\hat{a}_x$ の形で a_x の鉛直分布を求め、鶴野ら¹⁵⁾が札幌の中心部で求めた値とともに Fig. 7 に示す。 ρ_r と同様に模型では、植物や自動車等、建物以外の障害物を再現していないために、地表面付近で $\hat{a}_x$ の値が鉛直方向に一定になっている。また、 $\hat{a}_x$ は3ケースともほぼ同じ分布を示す。一方、札幌における実測は街の中心部で行っており、3階以上の建物が建つ地域の

データも含まれている。そのため、 a_x の分布形状には多少ばらつきがあるが全体としてはなめらかで、地表面に近づくにつれて増加している。

$a_t: h=h_{\max}$ として求めた粗度表面積密度 a_t は 14.3~42.4(l/m) である。

このように、今回用いた市街地模型は、各パラメータに関して実際の市街地の値をほぼカバーしていることがわかる。

4. 実験結果と考察

フロートによる x および y 軸方向の抗力の測定結果から、 y 軸方向の抗力成分は、CASE A で x 軸方向の5.5%以下、CASE B で7.2%以下、CASE C で11.5%以下であり、市街地模型には主に風向方向の抗力が働いていることがわかった。

ここでは、2.3節の考察より、粗度パラメータとして抗力係数 C_r を、形状パラメータとして有効粗度表面積率 λ を取り上げ、両者の関係を調べてみる。実験より求めた C_r と λ の関係を Fig. 8 に示す。図には同じ条件で行った立方体粗度要素による実験結果⁷⁾の範囲も示してある。図より、市街地模型における C_r の値は、建物の分布が疎で λ の値が小さいときに街路形状の影響が大きく、ばらつきも大きい。街路が風向に直交する CASE C の場合に C_r の値はもっとも小さくなり、格子状に配置した立方体粗度要素の実験結果の範囲に入っている。 λ の値が大きくなると、街路形状による差は小さくなっていく。建物が密に建て込んできた場合、すなわち、 $\lambda > 0.5$ で立方体粗度の結果よりも少し大きくなる。全体の傾向としては、立方体粗度要素を千鳥状に配置したときとほぼ同様な範囲に納まることがわかる。市街地における地表面形状は複雑で種々の形状があるが、平均的な市街地を想定して抗力係数と有効粗度表面積率の関係を考える限り、上述の実験結果は、立方体粗度要素のような単純な形状をもつ粗面で市街地をほぼ代表できることを示している。

市街地上の気流性状を計算により求めようとする場合、キャノピー内における空気と粗度要素間の力の釣合や、粗度要素の存在によって鉛直方向に変化する粗度体積密度を取り扱わねばならない。このとき、粗度形状が決まると、2章で挙げた各形状パラメータの値は決まるので、あとは粗度パラメータである抗力係数の値がわかればよい。上述のように、抗力係数と有効粗度表面積率の関係に関しては、立方体粗度要素を千鳥状に配置した粗面がほぼ市街地模型の代わりに使えるので、千鳥状に配置した立方体粗度によって求めた抗力係数を用いても、平均的な市街地の結果と大差はないと考えられる。さらに、3章で示したように、今回用いた市街地模型のもつ形状パラメータの値は実際の市街地の値をほぼカバーしているので、その範囲内で実際の市街地上の気流性状の計算に応用できると考えられる。

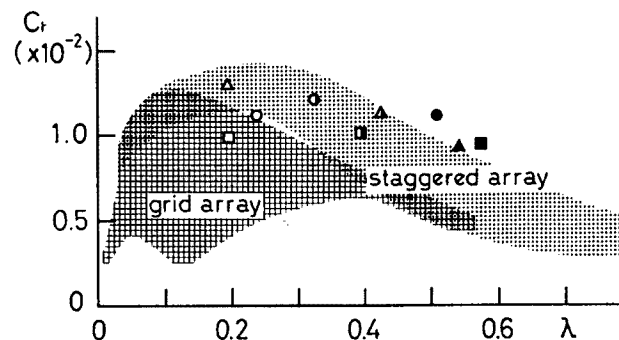


Fig. 8. Variation of surface drag coefficient of urban model, C_r , with roughness concentration, λ ; see symbols in Table 1.

5. ま と め

市街地のような複雑な形状をもつ粗面に対して、これまでに用いられている形状パラメータを幾つか取り上げ、考察を加えた。各パラメータの値を風洞実験で用いた市街地模型に対して求め、実際の市街地における値と比較した。また、粗度パラメータとして地表面抗力係数 C_r を、形状パラメータとして有効粗度表面積率 λ を取り上げ、市街地模型における両者の関係を風洞実験により調べ、立方体粗度要素との比較を行った。結果を以下にまとめる。

① 市街地模型のもつ形状パラメータは実際の市街地の値をほぼカバーしている。

② 市街地模型のもつ地表面抗力係数 C_r は有効粗度表面積率 λ に対して、立方体粗度要素を千鳥状に配置した粗面とほぼ同様な変化をする。

これらの結果から、各形状パラメータが今回調べた範囲内にあるような、平均的な市街地における地表面抗力係数 C_r と有効粗度表面積率 λ は、千鳥状配置立方体粗度とほぼ同様な関係をもっていると考えられる。従って、実際の市街地上空における気流性状の予測に、千鳥配置立方体粗度による実験結果の応用が期待できる。

謝 辞

本研究を行うに当たり、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。

参 考 文 献

- 1) 丸山 敬・石崎潑雄：市街地キャノピー内の時空間平均風速の鉛直分布に関する実験的研究（千鳥状に配置した立方体粗度要素による検討），日本建築学会構造系論文報告集第394号，1988. 12, pp. 60-65.
- 2) O'Loughlin, E.M. and V.S.S. Annambhotla: Flow phenomena near rough boundaries, Journal of Hydraulic Research, Vol. 7, No. 2, 1969, pp. 231-250.
- 3) Perry, A.E., W.H. Schofield and P.N. Joubert: Rough Wall Turbulent Boundary Layers, J. Fluid Mech. Vol. 37, 1969, pp. 383-413.
- 4) Marshall, J.K.: Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution, Agricultural Meteorology Vol. 8, 1971, pp. 269-292.
- 5) Wooding, R.A., E.F. Bradley and J.K. Marshall: Drag Due to Regular Arrays of Roughness Elements of Varying Geometry, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 5, 1973, pp. 285-308.
- 6) Mulhearn, P.J. and J.J. Finnigan: Turbulent flow over a very rough, random surface, Boundary-Layer Meteorology Vol. 15, 1978, pp. 109-132.
- 7) 丸山 敬：粗度要素の配置形状による床面抗力の変化に関する風洞実験，京都大学防災研究所年報，第32号 B-1, 1989. 4, pp. 421-437.
- 8) Counihan, J.: Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements, Atmospheric environment pergamon press, Vol. 5, 1971, pp. 637-642.
- 9) 亀井 勇・丸田栄蔵：風速の垂直分布における粗度パラメータに対する3次元的粗度密度の適応について，第4回耐風シンポ，1976, pp. 53-59.

- 10) 大熊武司・丸川比佐夫・小林啓人・宮下康一：市街地を対象とした乱流境界層の研究—その1，二次元フラネスによる検討—，日本建築学会大会学術講演梗概集，1985，pp. 687-688.
- 11) 大熊武司・丸川比佐夫・宮下康一：市街地を対象とした乱流境界層の研究—その2，三次元ラフネスによる検討—，日本建築学会大会学術講演梗概集，1986，pp. 123-124.
- 12) 田村幸雄・須田健一・松井源吾：設計基準風速についての一考察（建物密度の経年変化を考慮した年最大風速の均質化），日本建築学会論文報告集，第400号，1989. 6，pp. 101-111.
- 13) 村上周三・加藤信介・B.E. ロンダー・鈴木啓泰：層流型クリーンルーム内の気流性状・汚染質拡散性状に関する研究（その6）—床グレーチングの通風抵抗を考慮した新しい $k-\epsilon$ 型乱流モデルの提案—，生産研究，Vol. 40，No. 1，1988. 1，pp. 67-70.
- 14) 平岡久司・丸山 敬・中村泰人・桂 順治：植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究 その1 乱流モデルの作成，日本建築学会計画系論文報告集第406号，1989. 12，pp. 1-9.
- 15) 鵜野伊津志・植田洋匡・若松伸司・中村 晃：乱流モデルによる夜間都市境界層形成機構の検討，衛生工学研究論文集，Vol. 24，1988，pp. 125-137.
- 16) Kondo, J. and S. Akashi: Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontal homogeneous canopy layers, Boundary-Layer Meteorology, Vol. 10, 1976, pp. 255-272.
- 17) 石崎滋雄・桂 順治・谷池義人：新設の風工学用境界層風洞について，京都大学防災研究所年報，Vol. 26 B-1，1983，pp. 313-322.

記 号

A ：粗度表面積 (m^2)

A_r ：粗度要素の風向方向見つけ面積 $= l_x(z) dz$ (m^2)

$A_x(z)$ ：高さ z における粗度要素の風向方向見つけ面積 (m^2)

A/S ：粗度表面積率 (1)

$\hat{a}_x(z)$ ：密度関数 (1)

a_r ：各粗度要素の風向方向見つけ面積 (m^2)

a_i ：粗度表面積密度 ($1/\text{m}$)

$a_x(z)$ ：有効粗度表面積密度 ($1/\text{m}$)

G_r ：地表面抗力係数 (1)

C_D ：各粗度要素の抗力係数 (1)

G'_D ：粗度要素の抗力係数の面積平均値 (1)

$G_{rx}(z)$ ：高さ z における風向方向の抗力係数 (1)

F_r ：地表面抗力 (N)

$F_x(z)$ ：高さ z において流体単位体積が粗度要素から受ける風向方向の力 (N/m^3)

f_r ：粗度要素1個に働く抗力 (N)

f_s ：地表面に働く摩擦力 (N)

$G(z)$ ：有効体積 (1)

h ：粗度の高さ (m)

h_{mean} ：建物高さの平均値 (m)

h_{max} ：建物高さの最大値 (m)

$l_x(z)$ ：高さ z における粗度要素の見つけ幅 (m)

Q ： U_0 を基準とした速度圧 (N/m^2)

- $q(z)$: 高さ z における速度圧 (N/m^2)
 S : 地表面面積 (m^2)
 $S_r(z)$: 高さ z における粗度要素の水平断面積 (m^2)
 U_0 : 基準風速 (m/s)
 V_0 : 平均化体積 (m^3)
 V_r : 粗度要素の体積 (m^3)
 x : 測定胴前縁からの主流方向距離 (m)
 y : 測定胴の中心線からの直角水平方向距離 (m)
 Z : キャノピー内における無次元高さ $= z/h$ (1)
 z : 高さ (m)
 Δz : 平均化を行う層の厚さ (m)
 α_m : 規格化定数 (1)
 β : 係数 (1)
 $\gamma: V_r/10 S$: Roughness 密度, 建物密度 (1)
 λ : 有効粗度表面積率: roughness concentration (1)
 ξ : 風向方向見つけ面積の粗度面積に対する割合 (1)
 ρ : 空気密度 (kg/m^3)
 $\rho_r(z)$: 高さ z における粗度体積密度 (1)
 $-\rho \overline{u'w'}$: レイノルズ応力 (N/m^2)
 τ_w : 地表面剪断応力 (N/m^2)