

複雑な粗度形状をもつ粗面の粗度評価について
(その2: 数値計算におけるラフネスパラメータの検討)

丸山 敬

PARAMETERIZATION OF ROUGH, RANDOM SURFACE
(EVALUATION OF ROUGHNESS PARAMETERS FOR NUMERICAL CALCULATIONS)

By *Takashi* MARUYAMA

Synopsis

Evaluation of roughness parameters was performed in order to simulate the turbulent boundary layers over rough, random surfaces such as urban areas. The variation of roughness parameters for the turbulence model against the roughness volume density was examined for staggered arrayed cubic blocks. A number of calculations were carried out to simulate the turbulent boundary layers over various city models using the values of roughness parameters for the cubic blocks. Fairly good agreements between numerical results and experimental data shows the applicability of the roughness parameters for staggered arrayed cubic blocks to the urban areas.

1. はじめに

前報¹⁾では、市街地のような複雑な形状をもつ粗面に関して、粗度形状を表すパラメータを幾つか取り上げて考察を加え、市街地模型と立方体粗度要素による風洞実験結果との比較から、平均的な市街地における地表面抗力係数は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とを明らかにした。本報ではこれらの結果をふまえ、市街地上に発達する乱流境界層の数値計算を行う場合に、千鳥状配列立方体粗度要素の実験結果を、どのように応用できるかについて検討する。

2. 数値計算

市街地のような複雑な形状をもつ粗面上の気流性状を予測するには、粗度形状をなんらかの形で計算に取り込む必要がある。ここで用いた乱流モデルは、粗度形状を抵抗係数および長さスケール（以下、これらをラフネスパラメータと呼ぶ）で計算に取り込むことができ、粗度要素の体積変化を取り扱える $k-\epsilon$ 2 方程式乱流モデル²⁾である。方程式系は2次元の流れ場について以下のように与えられる。

[連続の式]

$$\frac{\partial GU_i}{\partial x_i} = 0$$

[平均流の輸送方程式]

$$G \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial G U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial G P}{\partial x_j} - \frac{\partial G \overline{U_i U_j}}{\partial x_j} - G F_{\pi}$$

[k の輸送方程式]

$$G \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial G U_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial G k}{\partial x_j} \right) + G(S - \varepsilon + F_k)$$

[ε の輸送方程式]

$$G \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial G U_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial G \varepsilon}{\partial x_j} \right) + G \frac{\varepsilon}{k} (C_{1E} S - C_{2E} \varepsilon + F_E)$$

ここで、

$$S = -\overline{U_i U_j} \frac{1}{G} \frac{\partial G U_i}{\partial x_j}$$

$$\overline{U_i U_j} = -\frac{\nu_t}{G} \left(\frac{\partial G U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial G U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k$$

$$F_{\pi} = \frac{C_{fi} a_{xi} U_i |U_i|}{2}$$

$$F_k = U_i F_{\pi}$$

$$F_E = \frac{C_{pE} k^{3/2}}{L}$$

$$C_D = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{1E} = 1.44, C_{2E} = 1.92$$

ただし、 $i, j = 1, 2$, $x_1 = x$: 主流方向, $x_2 = z$: 鉛直方向, $U_1 = U$, $U_2 = W$ で、添字の繰り返しは総和をとり、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。各変数および係数の意味は以下の通りである。

- U_i : 単位流体体積あたりの x_i 軸方向時間平均風速
- P : 単位流体体積あたりの時間平均圧力
- k : 単位流体体積あたりの時間平均乱流エネルギー
- ε : 単位流体体積あたりの時間平均エネルギー消散率
- t : 時間
- ρ : 空気密度
- ν_t : 渦動粘性係数 ($= C_D k^2 / \varepsilon$)
- G : 単位空間あたりの流体体積
- L : 粗度要素の水平断面における平均周長の $1/4$
- a_{xi} : $\frac{1}{4} \frac{\text{単位空間あたりの粗度要素の壁面面積}}{\text{単位空間あたりの流体体積}}$
- C_{fi}, C_{pE} : ラフネスパラメータ

式中 a_x, a_y, G, L の値については、粗度形状がわかればそれに対応する値が決まるので、各粗度形状に対応する値を与えればよい。一方、ラフネスパラメータ C_{fs}, C_{pE} はモデル化により現れたパラメータであるから、なんらかの方法で各粗度形状に対応する値を求めなければならない。ここでは、3章に示すように、計算結果が実験結果を最も良く再現するようにラフネスパラメータの最適化を行う。計算は、Fig. 1に示すような風洞内に設置されたラフネス上に発達する乱流境界層を解析対象とし、領域 ABCDEF について計算を行う。図において AB, CD および EF の部分は滑面、BC の部分が粗面で、 x 軸を粗面の風上側前縁から流れ方向に、 z 軸を床面から鉛直上方にとる。計算は SMAC 法によって行い、変数は staggered mesh 系に取り、時間に関して 2 次精度の Adams-Bashforth スキーム、空間に関して 2 次精度の中心差分（ただし、 k, ε に関して移流項は風上差分）を用いた。計算の詳細は文献 3）を参照されたい。

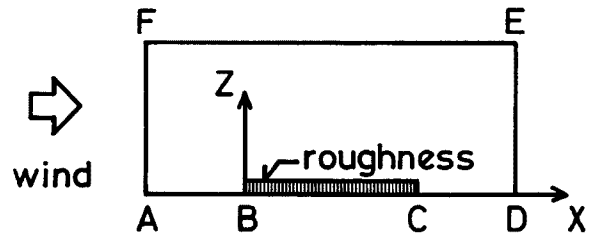


Fig. 1. Domain of calculation.

3. 千鳥状配列立方体粗度要素に対するラフネスパラメータの値

市街地のような複雑な形状をもつ粗面では、粗度形状や粗度要素の体積が一様でなく、空間的に変化するので、種々の市街地に対するラフネスパラメータの値を実験結果との比較により直接求めることは困難である。前報¹⁾で明らかにしたように、平均的な市街地における地表面抗力は立方体粗度要素を千鳥状に配置した粗面とはほぼ同様な変化をするので、まず、立方体粗度要素のように一様な形状をもつ粗面に対してラフネスパラメータの値を求め、それが、市街地の様な複雑な形状をもつ粗面における数値計算に応用できるかどうかについて検討する。

ここでは、ある高さにおける粗度の体積密度 $\rho_r (= 1 - G)$ の空間平均値を評価基準として取り上げ、立方体粗度要素を用いた実験結果と計算結果の比較により、種々の粗度体積密度に対するラフネスパラメータの最適値を決定する。文献 4) より、Fig. 2 に示す様に、立方体粗度要素を千鳥状に配置したときには、粗度要素の一辺と x 軸方向との風向角 α が 45° のときに床面抗力係数 C_r が最も大きくなり、 0° のときに床面抗力係数は最も小さくなる。また、任意配列は風向角が 45° の千鳥配列の場合とほぼ同じ性状を示すので、数値計算は、種々の粗度体積密度に対して、風向角が 45° と 0° の 2 つの場合について行った。ラフネスパラメータの最適値は、実験により求めた床面抗力係数の値と、計算により求めた床面抗力係数の値が一致するように決定する。その際、幾つかの場合について U および k の計算結果を測定結果と比較したが、計算結果は実験値を良く再現していた。

得られたラフネスパラメータの粗度体積密度に対する変化を Fig. 3 に示す。風向角 0° の場合は $\rho_r = 0.45$ 以上で、風向角が 45° の場合は $\rho_r = 0.50$ 以上でラフネスパラメータの最適値を求めることができなかった。これは、粗度体積密度が大きくなるとラフネス内と上空の流れの間に運動エネルギーの交換が十分に行われなくなり、ラフネス内で流れが循環したり、床面付近で流れが淀んだいわゆる目づまり状態になって、空間内に抵抗物体が均等に存在すると仮定して導かれた本乱流モデルが適用できなくなると考えられる。

4. 市街地模型による実験結果との比較

計算との比較に用いた実験は前報¹⁾と同じで、Fig. 4 に示す様に、不規則な街路を持つ場合 (caseA),

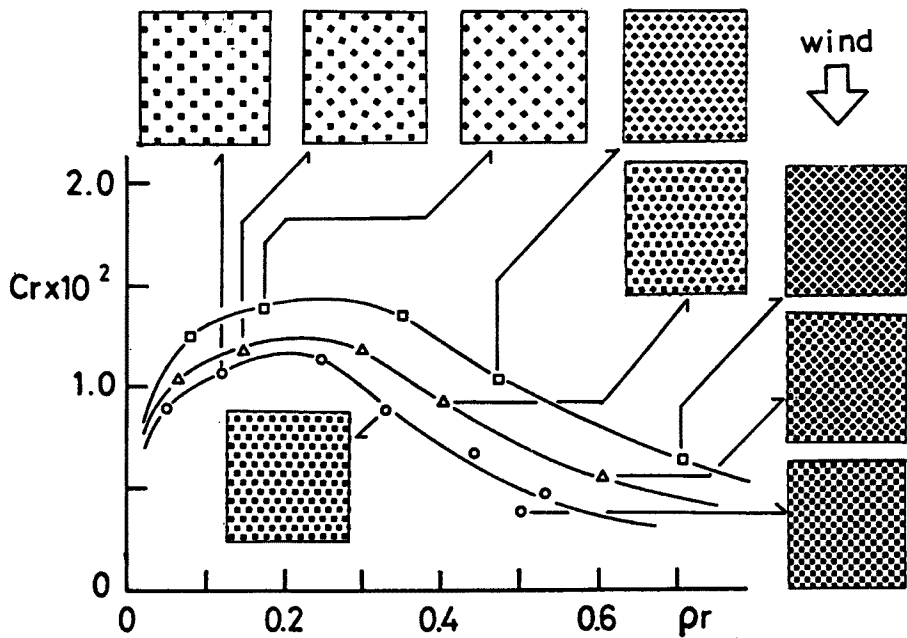


Fig. 2. Variation of drag coefficient of rough surface, C_r with roughness density, ρ_r .

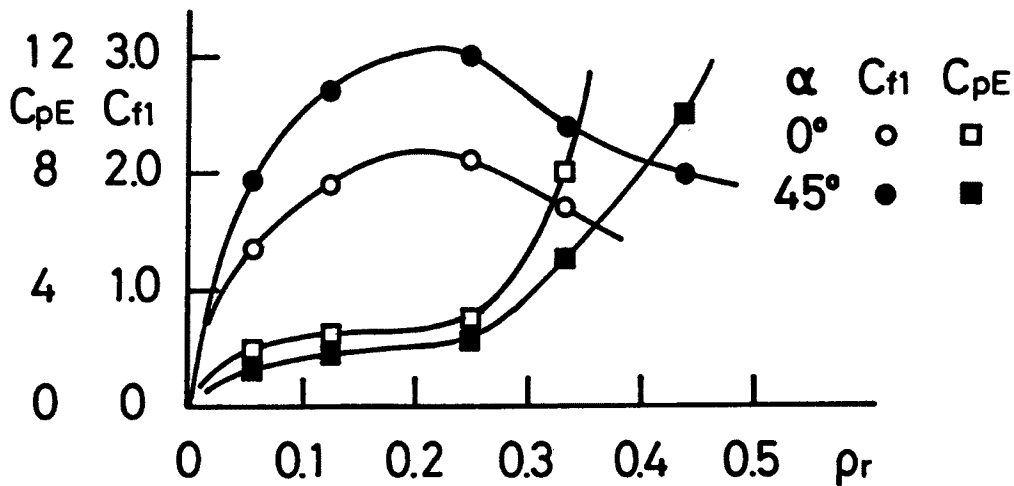


Fig. 3. Variation of roughness parameters, C_{f1} and C_{pE} with roughness density, ρ_r .

格子状の街路を持ち、街路が風向と 45° で交わる場合 (caseB)、格子状の街路を持ち、街路が風向に直交する場合 (caseC) 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) ずつ変化させた合計9種類の市街地模型を用いた実験である。これらの模型に対して、千鳥状配列立方体粗度要素の場合に対して求められたラフネスパラメータを用いた計算を行う。計算に際して、 a_x, G, L の値は各市街地模型の粗度形状に対応した値を高さ方向に変化させて与え、 a_z は0.0とする。 C_{f1}, C_{pE} の値は $\alpha = 0^\circ$ および 45° についてそれぞれ対応する値を用いて計算を行った。なお、今回比較した市街地模型の場合、粗度体積密度 ρ_r が0.45以上になることはなかったため、千鳥状配列立方体粗度要素に対して得られたラフネスパラメータの値をそのまま使えた。実験と計算結果の比較は、床面抗力係数と粗面上の U および k の分布について行った。

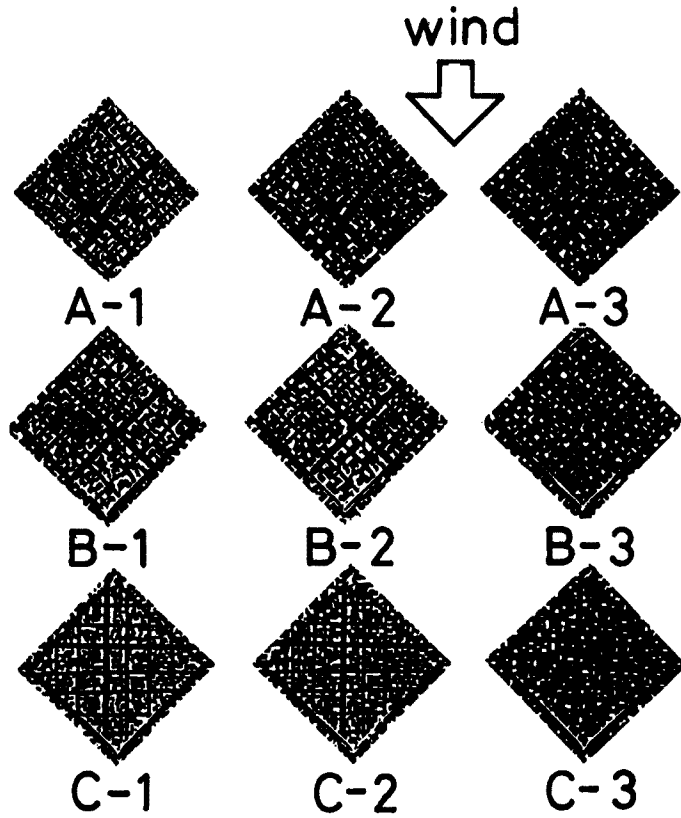


Fig. 4. Configurations of city model.

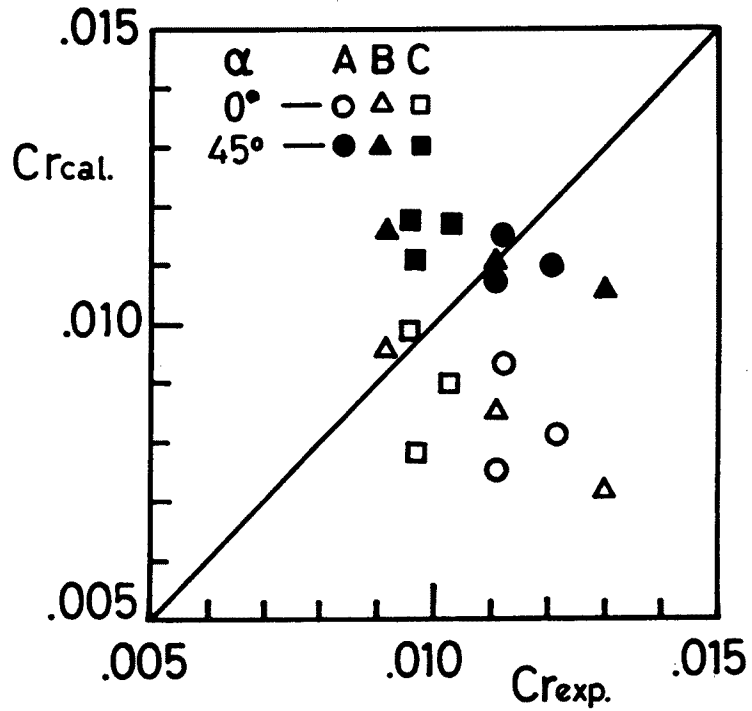
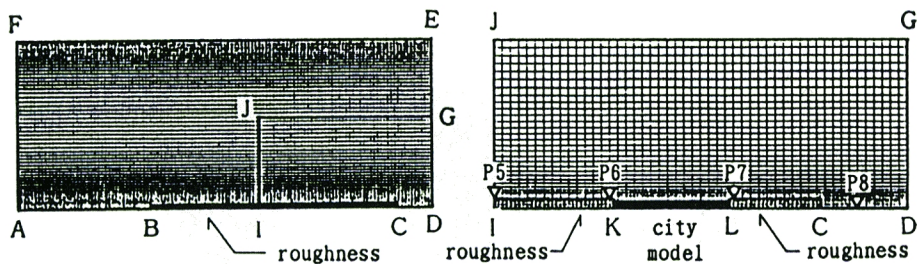


Fig. 5. Comparison of drag coefficients between calculations and experiments. Calculations: $C_{r_{cal}}$; experiments: $C_{r_{exp}}$.



Mesh discretization

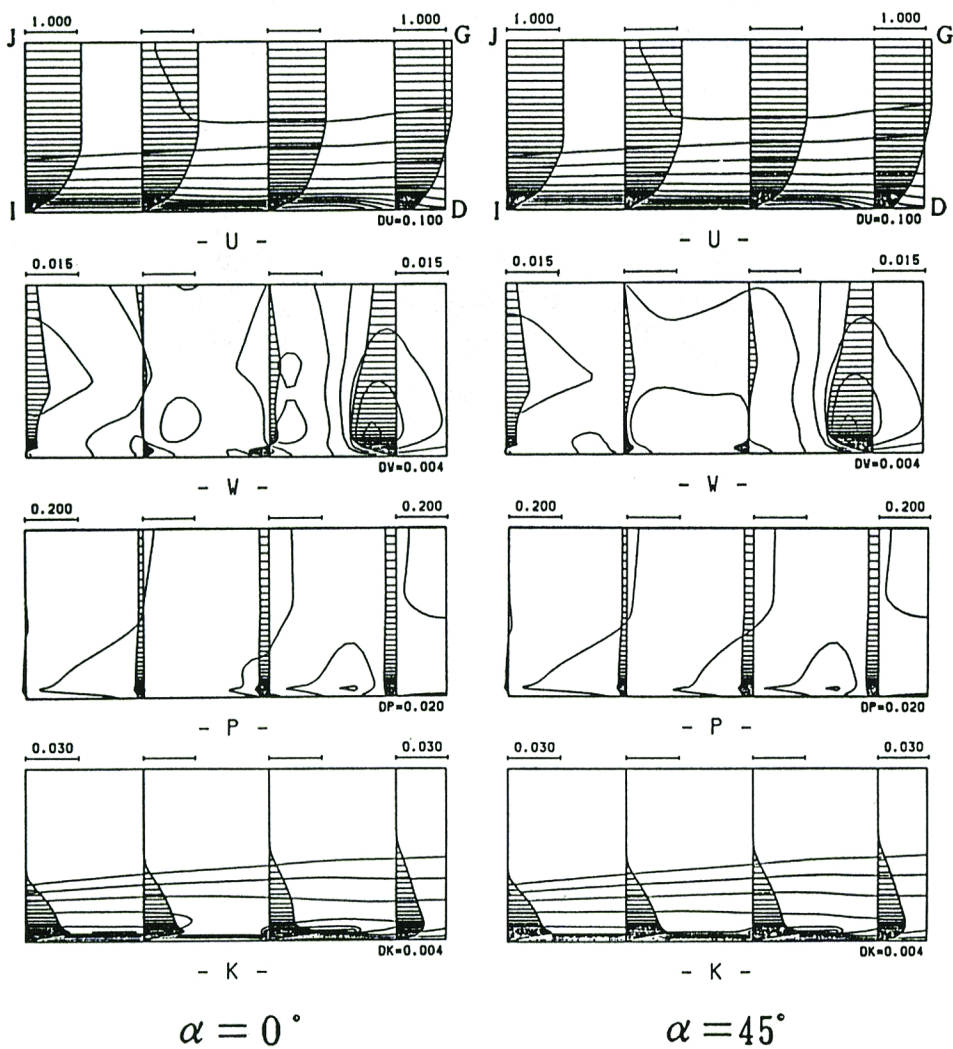


Fig. 6. Distribution and profiles of calculated values of case A-3.

Fig. 5 に計算で求めた抗力係数 Cr_{cal} と実験値 Cr_{exp} を比較する。 $\alpha = 45^\circ$ の結果は $\alpha = 0^\circ$ の場合よりも Cr_{cal} の値が大きくなった。また、 Cr_{cal} と Cr_{exp} の対応は caseC の場合は、 $\alpha = 0^\circ$ の場合のほうが $\alpha = 45^\circ$ よりも良いが、全体的にみると $\alpha = 45^\circ$ のほうが良い対応を示すようである。計算結果の一例を caseA-3 について Fig. 6 に、 U と k の分布の実験結果との比較を Fig. 7 に示す。 Fig. 7 において、 U および k は境界層上方の基準風速 U_0 で無次元化してある。また、測定位置は Fig. 6 に示す。 $\alpha = 45^\circ$ の

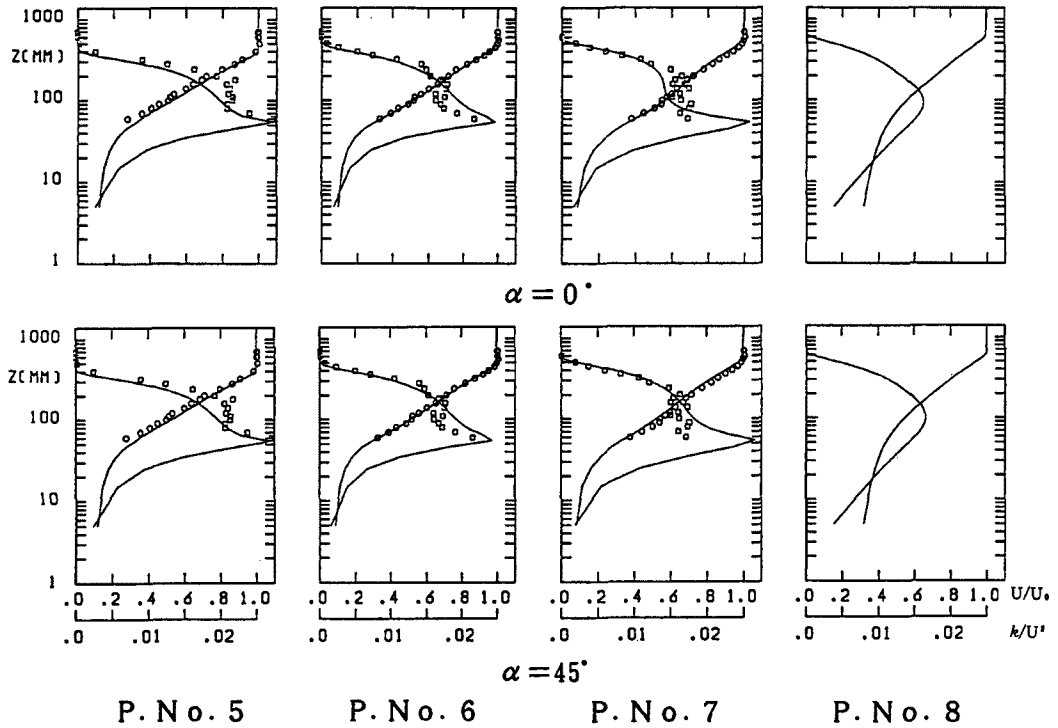


Fig. 7. Comparison of U and k between calculations and experiments, case A-3. \circ , U ; \square , k , experimental data. —, calculated results.

Table 1. Adaptability of calculated values to experiments

CASE		1		2		3	
		U	Cr	U	Cr	U	Cr
A	0°	\times	\triangle	\times	\times	\circ	\times
	45°	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ	\circ
B	0°	\circ	\circ	\circ	\times	\circ	\times
	45°	\triangle	\times	\triangle	\circ	\circ	\times
C	0°	\circ	\circ	\circ	\triangle	\triangle	\times
	45°	\triangle	\times	\circ	\triangle	\circ	\triangle

結果は $\alpha = 0^\circ$ の場合よりも下層部で U の値が小さく、 k の値が大きくなるが、上層部ではほとんど差は無かった。

Cr および U の分布について、計算結果と実験値の適合度を Table 1 にまとめる。ここで、 U については、90% 以上の計測点で計測値と実験値の差が U_0 の 1.5% 以内になる場合を \circ 、70% 以上の計測点で 1.5% 以内になる場合を \triangle 、それ以上の差がある場合を \times で示す。床面抗力係数 Cr については、 Cr_{cal} と Cr_{exp} の差が Cr_{exp} の 10% 以内になる場合を \circ 、20% 以内の場合を \triangle 、それ以上の差がある場合を \times で示す。表より、caseA では $\alpha = 45^\circ$ の結果が、caseB, C では粗度の密度が大きいときには $\alpha = 0^\circ$ の結果が良く、密度が小さくなると $\alpha = 45^\circ$ の結果のほうが良く対応することがわかる。

実際の市街地では、街路の向きや建物の配列形状が広範囲にわたって一定であることは少なく、また、

風向も変化することが多い。従って、ここで示した方法によって、ある場所の気流性状を予測しようとする場合、その場所の周囲の粗度体積密度に対応したラフネスパラメータの風向角 45° と 0° の両方の値を用いて計算し、用途に応じて、両者の平均値、あるいは、安全側の計算結果を採用すれば良いと考えられる。

5. ま と め

千鳥状配列立方体粗度要素に対するラフネスパラメータの値を求め、市街地のような複雑な形状をもつ粗面上に発達する乱流境界層の数値計算に応用できるかどうか、市街地模型を用いた実験結果と計算結果の比較により検証した。その結果、風向角 0° および 45° の千鳥状配列立方体粗度要素について求めたラフネスパラメータを用いれば、粗度体積密度 0.45 以下の種々の市街地形状に対して、上空の気流性状の予測がほぼ可能であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 丸山 敬: 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) 京都大学防災研究所年報, 第33号 B-1, 1990, pp.309-320.
- 2) 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, pp.1-9.
- 3) 丸山 敬: 粗度要素の抵抗および体積変化を考慮した k-ε モデルによる乱流境界層の数値計算, 日本建築学会構造系論文報告集第404号, 1989, pp.75-81.
- 4) 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, pp.421-435.