

都市表面抵抗係数に及ぼす幾何形状の影

佐藤, 翔
三井造船

萩島, 理
九州大学総合理工学研究院エネルギー環境共生工学部門

谷本, 潤
九州大学総合理工学研究院エネルギー環境共生工学部門

吉武, 大輔
九州大学総合理工学府環境エネルギー工学専攻

<https://doi.org/10.15017/14604>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 30 (1), pp.38-43, 2008-06. 九州大学大学院総合理工学府
バージョン :
権利関係 :

都市表面抵抗係数に及ぼす幾何形状の影響

佐藤 翔*1・萩島 理*2†・谷本 潤*2・吉武 大輔*3

(平成20年5月8日 受理)

Effect of urban geometric condition on drag force coefficient of urban surfaces

Sho SATO, †Aya HAGISHIMA, Jun TANIMOTO and Daisuke YOSHITAKE

†E-mail of corresponding author: aya@cm.kyushu-u.ac.jp

Drag force coefficient (C_d) of various types of urban-like roughness was measured in a wind tunnel. The geometry of roughness used for measurement was determined to clarify the effects of arrangement pattern, packing density and variation of roughness height. The result indicates that the nonuniformity of roughness height increases not only C_d but also roughness length z_0 . This tendency is more obvious under the condition of high packing density.

Key words: Wind tunnel experiment, Roughness length, Displacement height

1. 緒 言

近年、大都市部でのヒートアイランド現象が年々深刻化している。その要因は、人工排熱による大気加熱、裸地・草地・森林の減少による地表面熱収支構造の変化、建築物などによる風速の低減、日射吸収量の増加、上向き赤外放射の減少、など様々である。そこで、ヒートアイランド現象緩和を目的として屋上緑化、保水性舗装、遮熱性舗装、打ち水など様々な対策が実施されているが、その効果については、研究者間でも評価が分かれるところである。抜本的なライフスタイルの変化による人工排熱の低減や都市域の風通し促進による温熱快適性の向上や自然通熱による空調機器使用量の削減など、幅広い対策が必要であろう。

都市域の風通し予測手法の一つとして、丸山・平岡らにより構築された都市キャノピーモデルが挙げられる。都市キャノピーモデルとは運動量輸送方程式に流体占有体積率と抗力項を組み込むことで、粗い空間格子でも複雑形状の建物群からのバルクの抗力を考慮し、

少ない計算負荷で街区の平均風速を求めることのできる数値モデルである。しかし、都市キャノピーモデルの課題の一つとして、実験定数である抵抗係数のモデリングが残されてきた。抵抗係数は運動量輸送方程式中のdrag force 項に含まれるパラメータであり、流体の運動エネルギーに対する建物群による抗力の比を意味する。即ち、抵抗係数は建物群による風速低減の影響度合いを表すものであり、歩行者の暑熱緩和や海風の導入など、昨今ヒートアイランド対策として特に注目を集めている「都市の風通し」を定量的に議論する上では非常に重要なパラメータと言えよう。

一般に都市域では、個々の建物の周辺に発生する渦

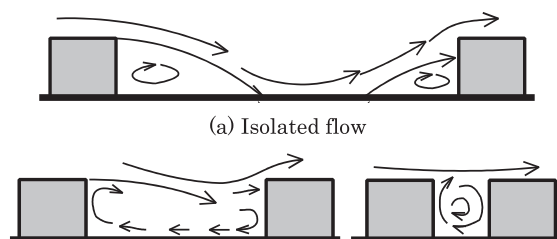


Fig.1 Flow patterns around urban roughness.

*1 三井造船 所属

*2 エネルギー環境共生工学部門

*3 環境エネルギー工学専攻 修士課程

が相互に干渉しあうため、建物間隔の違いに応じて Fig.1 に示すような異なる流れ場が出現する¹⁾

まず、建物間隔が広い条件ではキャニオン内で流れが地上に再付着し、風上と風下側の両壁面付近にそれぞれ渦が出来る (Fig.1 (a) isolated flow). これに対し、街路幅が狭くなると wake interference (Fig.1 (b)) となる. 更に、街路幅が狭く粗度密度が大きくなると、キャニオン内には安定した渦が生じる skimming flow (Fig.1 (c)) となる. この流れ場の変化と同期して都市域における建物群の抵抗係数も変化するはずであるが、抵抗係数は都市形状に依らず一定値として取り扱われるのが一般的である.

この問題に対して、幾つかの風洞実験が行われている. 丸山ら²⁾は、立方体粗度ブロックを風洞内に整形配列、千鳥配列、またはランダム配列で敷き詰め、乱流境界層を発達させ、測定部における床面抗力、風速、速度圧および静圧を測定した. さらに、萩島ら³⁾は、整形配列・千鳥配列を用いて高さ分布による影響、建蔽率 λ_p が同じ均一街路で粗度立面積密度 λ_r の違いの影響、などを明らかにした. しかし、これらの実験では風向きが街路方位と一致する理想的条件を想定しており、自然風の風向変動を考慮すると風向きを変えた場合の検討がまだ十分とは言えない.

これに対し単層の都市キャノピーモデルやメソスケールモデルの通常の surface scheme においては、都市域の気流場を (1) 式に示す対数則に基づきモデリングするのが一般的である.

$$U = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (1)$$

上式に含まれる粗度長 z_0 とゼロ面変位 d は多層キャノピーモデルにおける抵抗係数と同様に都市の凹凸による風速低減の影響を表現するラフネスパラメータである. これまで長年に渡り、表面の幾何形状と z_0 及び d の関係を明らかにする事を目的とした研究が行われている. 代表的な例として、Lettau (1969)^[4]は、Kutzbach (1961)^[5]が結氷した湖面上にバスケットを並べて行った野外実験の結果を基に、粗度長の推定式を提案している. この推定式は、低密の場合のみ適用可能とされている. また、Counihan (1971)は、風洞内に立方体模型を整形配列に並べて風速鉛直分布の実験値から粗度長を推定している^[6]. さらにPetersen(1997)はLettauの推定式とCounihanの推定式を円柱模型による風洞実験データでテストしたところ、Lettauの式の方が良く一致していると述べている^[7]. Raupach (1992, 1994)は、ランダム配列の粗度長の推定、ゼロ面変位の提示を行っている^{[8][9]}. そしてMacdonaldら(1998)は抗力係数とゼロ

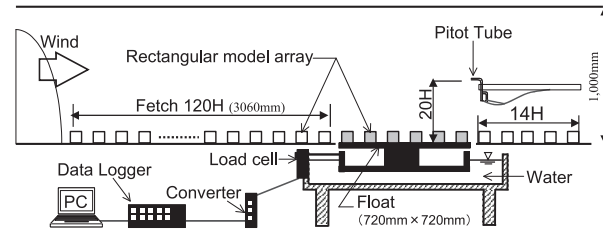


Fig.2 Side view of the wind tunnel device.

面変位を考慮した粗度長の推定式を提案している^[10]. このように数々の推定式が提案されているが、粗度高さのバラツキや風向変化の影響に対する検討は十分ではない.

以上の背景から本研究は、規則的に配置された直方体粗度群の抵抗係数に関して主として風向および粗度群の高さのバラツキの影響を検討することを目的として、風洞実験を行ったものである. 測定対象とする模型配列は、直方体粗度群の整形・千鳥配列を検討した萩島ら^[3]に倣い、格子状の整形配列の街路を風向に対して45度傾けた配列 (以下、「ダイヤモンド配列」とする) である. このダイヤモンド配列と萩島ら^[3]の結果を比較することで、風向の抵抗係数に対する影響について考察を行う. 加えて、地表面のラフネスパラメータである粗度長やゼロ面変位と粗度形状の関係についても考察を行う.

2. 実験概要

2.1 測定概要

全長19.8mの回転式境界層風洞装置(test section 長さ8m, 高さ1m, 幅1.5m)において実験を行っている. なお設定風速は約8m/s(風洞装置の回転数660rpm)としている.

2.2 抗力係数の測定方法

風洞床に埋め込まれた 720mm 四方のフロートに加わる水平力を歪みセンサー (INTERFACE, MB-5) を用いて直接床面抗力の測定を行っている. 抗力測定の模式図を Fig.2 に示す. 床面抗力の測定手順は以下の通りである. 即ち、風速 0 m/s 時を 2.5 分間、次に風速 8 m/s 時を 5 分間、最後に風速 0 m/s 時を 2.5 分間の計 10 分 (計 6000 点) 測定した. 得られた床面抗力の測定値と参照風速から抗力係数 C_d を推定する.

$$F = C_d \cdot \frac{1}{2} \rho U_{20H}^2 \cdot A \quad (2)$$

ここで、 F : 床面抗力 [N], A : フロート表面積 [m²], ρ : 空気密度 [kg/m³] である. また、ピトー管をフロー

ト風下側の端上の高さ 500mm (20H)に設置し参照風速 U_{20H} を測定している. 本報では建蔽率 λ_p および粗度立面積密度 λ_f と抗力係数 C_d の関係について, 各配列を高さ分布の有無により分類し比較検討を行う.

2.3 風速プロファイルの測定

模型群上空の境界層における風速プロファイルや乱流特性を把握する事を目的として, 粗度群上空においてスプリットフィルムプローブ(TSI, Model1288)を用い主流方向速度の測定を行っている. 測定箇所はフロート中心付近の単位街区に着目し, 水平面内4~16点, 鉛直0.5Hから20Hまで28 高度に測定点を設けている. プローブの出力は定温度型熱線流速計のCTA ユニット(日本科学工業製Model 1101), リニアライザ(日本科学工業製 Model 1103)を介してデータロガー(グラフテックDM3000)により1,000Hz で32 秒間収録される. 得られた空間平均風速プロファイルを用いることで, 様々な高さの風速を定義とする抗力係数を算出することが可能となる.

2.4 模型配列

一辺25mm(1H)の木製立方体模型と, 高さその半分の12.5mmの直方体模型を組み合わせて粗度群を作成している.

Fig.3には, 萩島ら^[3]が測定した整形配列(Normal)・千鳥配列(Staggered)および筆者らが新たに追加実験を行ったダイヤモンド配列(Diamond)の模式図を示す.

Table 1に示すように抗力測定については, 配列種類や平均模型高さ, 高さ分布が異なる条件の5パターンについて, 建蔽率 $\lambda_p = 7.7\%, 17.4\%, 30.9\%, 39.1\%$ の4種類, 計20通りの条件で実験を行い, 風速鉛直分布の測定は, D1・D1.5・D1.5-n・D1.5-sの4パターン, 計16通りの条件で行った. なお, 模型サイズや実験方法が同一で街路方位と風向が一致した条件の萩島らの実験条件および結果を参考のため, 併せて記載している. 建蔽率 λ_p は地表面での粗度占有面積率に相当する. Fig.4は模型高さ分布の有る配列の条件を示している. 低層部分の配列を大文字で, 高層部分の配列を小文字で, それぞれN・n(整形, Normal array), S・s(千鳥, Staggered array), D(ダイヤモンド, Diamond)と表記し数値は平均模型高さを表している. なお, 抗力測定エリアの風上側3m(120H)まで測定エリアと同じ条件の模型配列にすることで, 模型配列条件以外の因子が抗力係数に及ぼす影響を極力小さくしている.

3. 抗力係数の測定結果

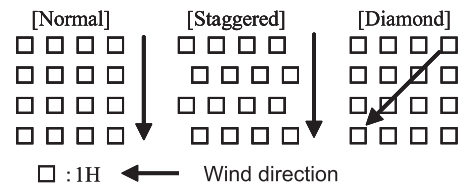


Fig.3 Plan view of arrays with uniform heights.

Table 1 Details of roughness.

Case	Arrangement	H_{av}	Variance of height of roughness elements
N1	Normal	1H	Uniform heights $\sigma/H_{av} = 0$
N1.5		1.5H	
S1	Staggered	1H	
S1.5		1.5H	
D1	Diamond	1H	
D1.5		1.5H	
N1.5-n	Normal	1.5H	Non-Uniform heights 1H&3H, $\sigma/H_{av} = 0.58$
S1.5-n	Staggered	1.5H	
D1.5-n	Diamond	1.5H	
N1.5-s	Normal	1.5H	
S1.5-s	Staggered	1.5H	
D1.5-s	Diamond	1.5H	
N1.5-s*	Normal	1.5H	Non-Uniform heights 1H&2H, $\sigma/H_{av} = 0.33$
D1.5-s*	Diamond	1.5H	

1H = 25mm, H_{av} is averaged height of arrays. Each case was measured for five conditions of plan area density (7.7%, 17.4%, 30.9%, 39.1 %). σ is standard deviation of height of roughness elements.

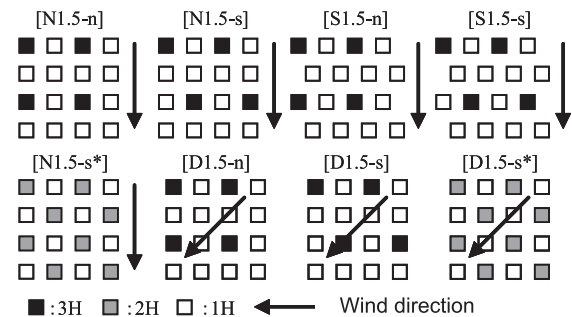


Fig.4 Plan view of arrays with non-uniform heights.

3.1 高さ分布の無い配列の場合

高さ分布のない配列について, Fig.5, Fig.6に建蔽率 λ_p ・粗度立面積密度 λ_f と抗力係数 C_d の関係を示す. λ_p と C_d の関係を見ると, 全体的に λ_p が大きくなるにつれ, C_d は一旦増加し最大値をとり, その後減少している傾向にあることが判る. また λ_f についても同様の傾向を示している. これは, 模型が密になるに伴い, 風を遮る立面積が増加し抗力が大きくなるが, ある λ_p を境に風がキャノピー内に入り込まなくなり, 抗力が減少していったと考えられる.

次に, 模型高さの違いによる比較を行う. Fig.5を見

ると、模型高さ 1.5H (D1.5)の C_d が模型高さ 1H (D1)のそれに比べ大きい値を示していることが判る。整形配列・千鳥配列も同様である。これは模型高さ 1.5H の風を遮る立面積が 1H に比べ大きいためと思われる。

さらに配列形状の違いによる比較を行う。 λ_p によらず、ダイヤモンド配列の C_d が千鳥・整形に比べ大きい値を示していることが判る。これは、模型を主風向に対して 45 度傾けたためダイヤモンド配列の立面積が整形・千鳥配列よりも大きくなったためと考えられる。そこで、粗度立面積密度 λ_f と抗力係数 C_d の関係性を見てみる。Fig.6 より、平均高さが異なると各配列共にプロットが一本の線上に乗っていない。このことから、抗力係数 C_d を粗度立面積密度 λ_f では説明できないことが分かる。

また、1.5H 模型の高密条件では、ダイヤモンド配列の抗力係数は急激に減少し整形配列に近い値を取っている。1H 模型の高密条件では、その現象は見られない。この理由として、高密条件ではキャノピー内が目詰まりになっており、しかも 0.5H 高くなることで渦が床面まで入り難く乱流拡散が促進されないためと考えられる。また、ダイヤモンド配列と千鳥配列は、主風向から見た時、模型の傾きは違うものの、その配列は互い違いになっているという点では似ている。そのため抗力係数のピークの取り方が似たものとなったと考えられる。

3.2 模型高さ分布の有る配列の場合

高さ分布のある配列について、Fig.7, Fig.8 に建蔽率 λ_p 、粗度立面積密度 λ_f と抗力係数 C_d の関係を示す。1H と 3H の模型が 3:1 の割合で混在している D1.5-n, D1.5-s の C_d は、いずれも建蔽率 λ_p が大きくなるにつれ右肩上がりに増加しており、ピークは見られない。高層部分は λ_p の 1/4 の粗度密度となるため λ_p が大きな値でも高層部分の気流が skimming に移行せず、結果として抗力が増加したと考えられる。一方、1H と 2H の模型が 2:1 で混在し高さのバラツキが小さい D1.5-s* はピークを示している。これは、D1.5-n, D1.5-s と比べて、D1.5-s* の高層部分の密度が大きいためであると考えられる。そのため、高密状態では、高さ分布がない配列と同様に気流が skimming に移行したのであろう。さらに、高密状態では D1.5-n と D1.5-s の抗力係数の差が小さくなる。これは、Fig.5 より D1.5-s の高層部分は風の流れが目詰まりを起こすのに対し、D1.5-n の高層部分は主風向に対しての隙間が大きく、そこに対して常に drag が働いたためと思われる。

次に、整形・千鳥配列(N1.5-n, N1.5-s, N1.5-s*, S1.5-n,

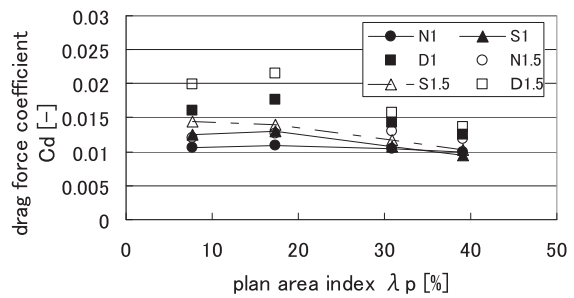


Fig. 5 C_d of roughness with uniform heights under various λ_p .

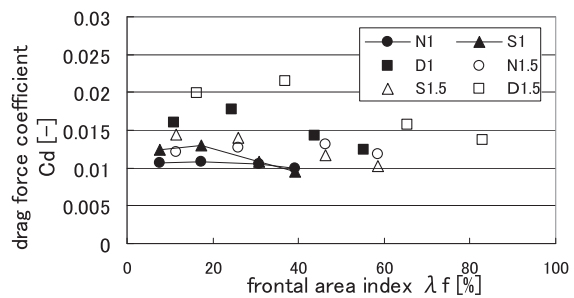


Fig. 6 C_d of roughness with uniform heights under various λ_f .

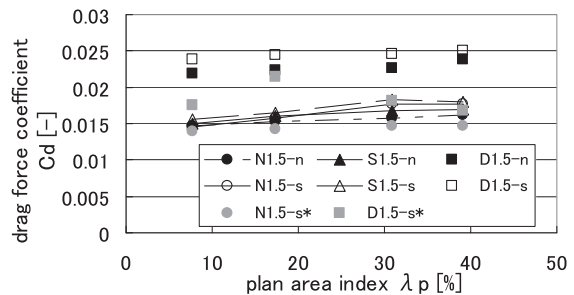


Fig.7 C_d of roughness with non-uniform heights under various λ_p .

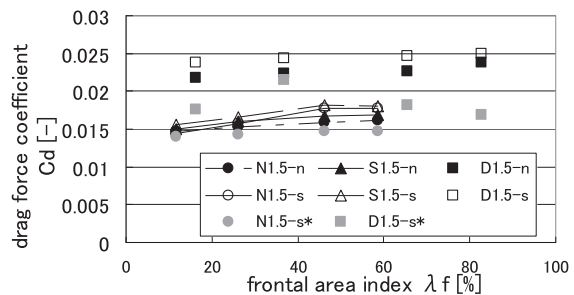


Fig.8 C_d of roughness with non-uniform heights under various λ_f .

S1.5-s)とダイヤモンド配列(D1.5-n, D1.5-s, D1.5-s*)を比べると、ダイヤモンド配列の抗力係数の値は整形配列、千鳥配列と比べて大きいことが判る。この理由として、高さ分布がない場合と同様に、主風向に対して 45 度傾けることによって立面積が増加したためと考えられる。

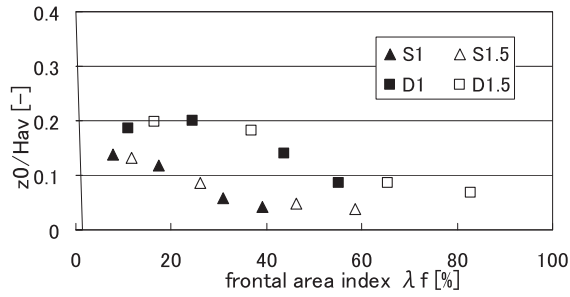


Fig.9 Relation between normalized roughness length of arrays with uniform heights and λ_f .

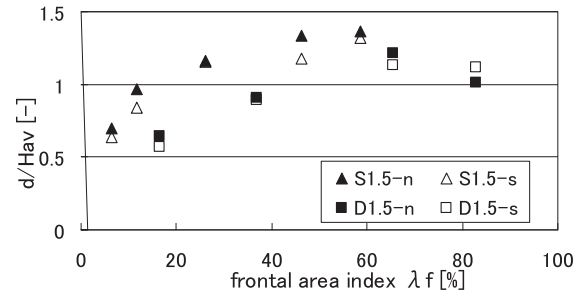


Fig.12 Relation between normalized displacement height of arrays with non-uniform heights and λ_f .

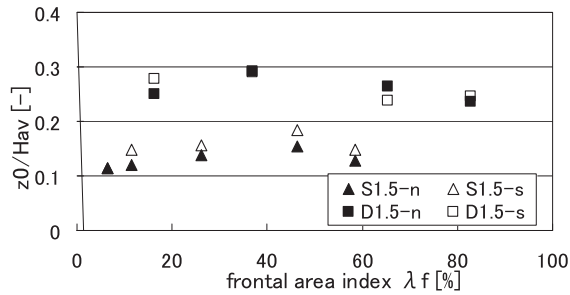


Fig.10 Relation between normalized roughness length of arrays with non-uniform heights and λ_f .

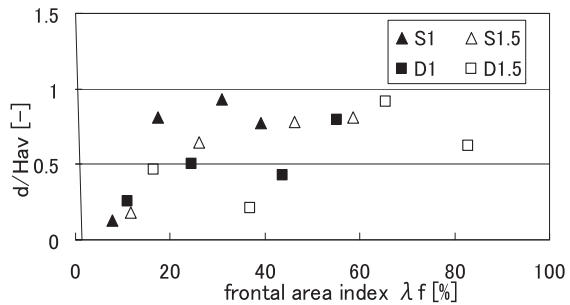


Fig.11 Relation between normalized displacement height of arrays with uniform heights and λ_f .

また、建蔽率ごとの C_d に着目すると、高さ分布の標準偏差が大きくなるにつれ C_d は増加している。

4. 模型配列とラフネスパラメータの関係

境界層外の高さ $20H$ における風速基準の抵抗係数 C_d (外部尺度) は幾何パラメータ λ_p や λ_f との間に普遍的な関係を見いだす事はできなかった。そこで、摩擦速度と慣性底層における風速 profile から得られるラフネスパラメータである粗度長 z_0 ・ゼロ面変位 d (内部尺度) と幾何パラメータとの関係を考察する。

4.1 粗度長・ゼロ面変位の同定方法

抗力の測定結果から、次式により摩擦速度 u^* が得られる。

$$u^* = \sqrt{\tau_0 / \rho} = \sqrt{C_d \times U_{20H}^2 / 2} \quad (2)$$

ここで、 τ_0 : 床面抗力/床面積 [N/m^2], ρ : 空気密度 [kg/m^3], C_d : 抗力係数[-], U_{20H} : 高さ $20H$ における風速 [m/s] である。

この摩擦速度とスプリットフィルムプローブによる風速プロファイルの測定値を式(1)に代入し、非線形最小二乗法により粗度長 z_0 、ゼロ面変位 d を推定した。

4.2 粗度長・ゼロ面変位の同定結果

千鳥配列とダイヤモンド配列の粗度長・ゼロ面変位の同定結果について Fig.9～Fig.12 に粗度立面積密度 λ_f との関係を示す。グラフ内の粗度長・ゼロ面変位は粗度群の平均高さで無次元化している。

まず、高さ分布の無い配列の粗度長 (Fig.9) を見ると、千鳥配列・ダイヤモンド配列共に平均高さが異なっているにもかかわらず各々が一本の線上にプロットが乗っていることが分かる。また、各配列共にピークを持ち、ダイヤモンド配列の方が千鳥配列よりも高層側でピークを持っていることが分かる。また、高さ分布の有る配列の粗度長 (Fig.10) は、均一高さの配列のそれに比べ大きな値を示し、抗力係数と同様に高層側でその影響が顕著となっている。

次に、高さ分布の無い配列のゼロ面変位 (Fig.11) を見ると、多少ばらつきがあるものの、千鳥・ダイヤモンド両配列のプロットは上凸の曲線上にあり、さらに平均高さ ($d/H_{av} = 1H$) に漸近しているように見える。低層時は地表の影響が支配的のためゼロ面変位の高さは地表面付近だが、高層になると *skimming flow* となるため屋根面 (すなわち平均高さ, $d/H_{av} = 1H$) 付近での *drag* が大きくなるためであろう。また、高さ分布の有る配列を比べた Fig.12 を見ると、抗力係数と同様に高層分布によってやや値が異なる。また、高さ分布のない Fig.11 と異なり、高層時のゼロ面変位の値が平均高さ ($d/H_{av} = 1H$) より高い値を取っている。これは、高層模型の *form drag* の影響であると考えられる。

5. 結 言

複雑形状を有する都市の気流場予測に資するべく、風洞装置内で直方体粗度群の床面抗力の測定を行い、抗力係数 C_d (外部尺度)および粗度長 z_0 、ゼロ面変位 d (内部尺度)と幾何パラメータとの関連を考察した。以下に得られた知見を列記する。

- ダイヤモンド配列は主風向見付面積が整形・千鳥配列よりも大きいため C_d は大きくなる。しかし、主風向見付面積の増加効果を考慮した幾何パラメータである λ_f と C_d の関係を配列（整形・千鳥・ダイヤモンド）によらず普遍的に説明することは出来なかった。
- ダイヤモンド配列および千鳥配列の粗度長と λ_f はほぼ同じ関係が成立する。
- 粗度群の高さ分布は著しく C_d および z_0 を増加させる。その傾向は高密度でより顕著になる。

参 考 文 献

- 1) T. R. Oke, "Boundary Layer Climates 2nd edition", Routledge, London, New York, Methuen (1987)
- 2) 丸山敬, "立方体粗度ブロックの配列形状の違いによる抗力の変化について", 日本風工学会誌, No.49 (1991), pp.15-24
- 3) 萩島理, 谷本潤, 永山浩二, 古賀正浩, "高さの分布のある直方体粗度群の抗力係数に関する風洞実験", 日本建築学会環境系論文集, No.619, (2007) pp 39-45
- 4) Lettau, H., "Note on Aerodynamic Roughness-parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description", Journal of Applied Meteorology, vol.8, (1969) pp828-832
- 5) Kutzbach, "Investigations of the Modifications of Wind Profiles by Artificially Controlled Surface Roughness, Studies of the three dimensional structure of the planetary boundary layer", Annual Rept (1961) Dept. of Meteorology, University of Wisconsin, Madison, pp71-113
- 6) 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, vol.5, (1971) pp637-642
- 7) Petersen, R.L., "A Wind Tunnel Evaluation of Methods for Estimating Surface Roughness Length at Industrial Facilities", Atmospheric Environment, vol.31, (1997) pp45-57
- 8) Raupach, M.R., "Drag and Drag Partition on Rough Surface", Boundary-Layer Meteorology 60, (1992) pp375-395
- 9) Raupach, M.R., "Simplified Expressions for Vegetation Roughness Length and Zero-plane Displacement Height as Functions of Canopy Height and Area Index", Boundary-Layer Meteorology, vol.71, 1994, pp211-216
- 10) Macdonald, R. W., Griffiths, R. F., and Hall, D. J., "An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays", Atmospheric Environment, vol.32, (1998) pp.1857-1864