

# 平面配列のランダム性, 及び濃度境界層, 粗度周辺気流が バルクスカラー係数に与える影響

直方体粗度群の床面バルクスカラー係数に関する風洞実験 その2

EFFECTS ON BULK SCALAR COEFFICIENT OF WIND ANGLE,  
DEVELOPMENT OF SCALAR BOUNDARY LAYER,  
AND FLOW FIELD NEAR ROUGHNESS

Wind-tunnel experiment on bulk scalar coefficient of urban-like roughness Part 2

池谷直樹\*, 萩島 理\*\*, 谷本 潤\*\*\*, 田中雄大\*\*\*\*, 成田健一\*\*\*\*\*

*Naoki IKEGAYA, Aya HAGISHIMA, Jun TANIMOTO,  
Yu-dai TANAKA and Ken-ichi NARITA*

The authors performed wind-tunnel experiments to investigate bulk scalar coefficients between an urban-like 3 dimensional roughnesses and atmosphere using salinity method. In this paper, three main effects were investigated. Firstly, the effects of randomness of layouts of each block were discussed. Bulk scalar coefficients were measured on arrays with cubic blocks, whose angle against the wind were randomly changed. Secondly, the sizes of scalar source were considered under three conditions of plan area indices with square and staggered array. The results showed that bulk scalar coefficients were affected by the size as mentioned in previous studies, however, the relation between geometrical conditions and the coefficients were independent with the size. Lastly, the effects of vertical mixture of air caused by roughness elements were discussed based on the measurement of wind profile for each array. This investigation showed that certain plan layouts might strongly affect on vertical exchange of air.

**Keywords** : mass transfer phenomena between an urban surface and atmosphere, salinity method, wind-tunnel experiment, 都市表面-大気間の物質輸送現象, 塩分法, 風洞実験

## 1 緒言

筆者らは、前報<sup>1)</sup>において、粗度の幾何条件とスカラー輸送効率の関係を明らかにするため、包括的なデータ取得を目的とし、平面配列、建蔽率、模型高さ、模型高さのばらつきなどの様々な幾何条件を組み合わせた三次元配列についてバルクスカラー輸送係数(バルク係数)を塩分法<sup>2), 3), 4)</sup>により測定した。その結果、バルク係数が模型の平面配列や模型高さに強く依存し、その特性は整形配列と千鳥配列によって分類できることを示した。さらに、高さばらつきのある粗度と均一高さの粗度におけるバルク係数を同配列条件における抗力係数<sup>5)</sup>と関係付けることで、平均流の速度欠損と粗度周辺の三次元的な流れ場の効果が建蔽率により異なる可能性を示した。

運動量輸送とスカラー輸送の関係については、Kanda and Moriizumi<sup>6)</sup>が屋外測定により運動量粗度長と熱粗度長の比である $\kappa B^{-1}$ と粗度レイノルズ数の関係を示している。また、近年では、栗田ら<sup>7)</sup>により、床面加熱した不安定条件における整形配列での運動量フラックスおよび熱フラックスの風洞実験が報告されている。栗田らは、

風洞実験により得られた $\kappa B^{-1}$ と粗度レイノルズ数の関係を示し、Kanda and Moriizumi<sup>6)</sup>の屋外観測による結果と比較的一致していることを指摘している。このように、粗度表面におけるスカラー輸送に関する研究が広く進められている。

その一方で、スカラー輸送と幾何形状の関係を議論するにあたって、未だ考慮すべき検討項目も多く残されている。第一点は都市形状の複雑さの影響についての系統的な実験データの不足である。三次元配列の高さばらつきに関しては、成田<sup>8)</sup>、義江ら<sup>9)</sup>、Pascheke et al.<sup>10)</sup>など、いくつかの例が報告されているが、平面配列に関しては多くの場合で整形、千鳥という規則的な配列についての議論となっている。实在都市の複雑な平面配置を議論するためには、平面配列の多様性を考慮した配列でのデータ収集が欠かせないといえる。

第二点はスカラーソースサイズが実験結果に及ぼす影響についての問題である。例えば、成田<sup>11), 12)</sup>は二次元配列や三次元整形配列における屋根面、模型側面のスカラー輸送効率の流れ方向変化を測定している。それによれば、三次元配列ではスカラー輸送効率が流れ

\* 九州大学総合工学府

日本学術振興会特別研究員 DC・修士(工学)

\*\* 九州大学大学院総合理工学研究院 准教・博士(工学)

\*\*\* 九州大学大学院総合理工学研究院 教授・工博

\*\*\*\* 九州大学総合工学府 修士課程学生

\*\*\*\*\* 日本工業大学工学部建築学科 教授・工博

JSPS Research Fellow, IGSES, Kyushu Univ., M. Eng.

Assoc. Prof., IGSES, Kyushu Univ., Dr. Eng.

Prof., IGSES, Kyushu Univ., Dr. Eng.

Master's Student, IGSES, Kyushu Univ.

Prof., Dept. of Engineering, Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.

方向に安定するまでの距離は二次元配列に比べて大幅に短くなるというが、平面配列を変えた場合や床面にスカラースースを設置した場合での検討は行われていない。Barlow et al.<sup>13)</sup>は、二次元キャノピー内のバルク係数について、壁面、床面それぞれ独立にソースを設置した場合と、壁面と床面の両方にソースを設置した場合の比較をしている。その結果、キャノピー内部の局所的なスカラースースサイズの違いがバルク係数に与える影響をキャノピー内部の気流と関連付けて説明している。実在都市において、日射により建物壁面、屋根面、道路が同時にスカラースースとなり得ることを考えると、キャノピー内の局所的なスカラースースサイズが与える影響を把握することは重要である<sup>註1)</sup>。その一方で、都市表面の広い範囲が日射や降雨によってスカラースースとなり得ることも考えられ、広域のスカラースースサイズによる影響を把握することも重要であるといえる。このような背景から筆者らの前報の結果に関して、スカラースースの面積効果がバルク係数と幾何形状の関係に及ぼす影響を検討することは重要な課題であるといえる。

第三点はバルク係数を定義するときの参照速度の高さの問題である。Pascheke et al.<sup>10)</sup>は参照風速を模型高さ  $H$  および  $4.5H$  とした場合の二通りについて建蔽率 25%の均一高さ粗度と不均一高さ粗度のバルク係数の比較を行っている。それによると、参照風速を高さ  $H$  で定義することで粗度の近傍流れ場特性がスカラースースに与える影響を考慮できること、粗度の高さばらつきによってスカラースースの上下混合が活発になり、均一高さ粗度と比べてスカラースース輸送係数が大きくなることを指摘している。

これに対して前報において筆者らは全ての模型高さが同一の配列(均一高さ粗度)と高さばらつきのある配列(不均一高さ粗度)に関して参照風速を境界層外の  $20H$  で定義したバルク係数を算出し、1) 低～中建蔽率条件では、高層模型による速度欠損がスカラースース輸送を減少させるため、不均一高さ粗度のバルク係数は均一高さ粗度よりも低下する、2) 高建蔽率条件では、不均一高さ粗度の流れの 3次元性によって、スカラースース輸送が活発になり、不均一高さ粗度のバルク係数が均一高さ粗度に比べて大きくなる、以上 2 点を明らかにしている。この結果は、Pascheke et al.<sup>10)</sup>の結果に鑑みると、粗度群による境界層全体のマクロな速度欠損の影響と粗度近傍の roughness sublayer における気流分布の特性の 2 つが重畳されたものであると推測される。この二つの効果を切り分けるためには、筆者らがこれまで蓄積している様々な幾何形状の粗度群のバルク係数に関して参照風速の定義高さを変化した場合の検討を行い、模型高さの不均一性のみならず平面配列(整形・千鳥)の影響に関して議論を深めることが望まれる。

このような背景を受け、本研究では前報で得られたバルク係数について、次の三点に着目した測定を行う。まず、平面配列の風向の多様性を考慮した配列として、模型角をランダムに変更した配列でのバルク係数測定を行い、平面配列の多様性がバルク係数に与える影響を考察する。つぎに、整形配列と千鳥配列において、蒸発面積とバルク係数の関係を明らかにすることを目的とし、蒸発面積を変えた場合のバルク係数を測定する。最後に、速度プロファイルの測定から、参照高さを変えた場合のバルク係数を算出し、平面配列や高さ分布がスカラースースの鉛直混合に与える影響の差異を示すを試みる。

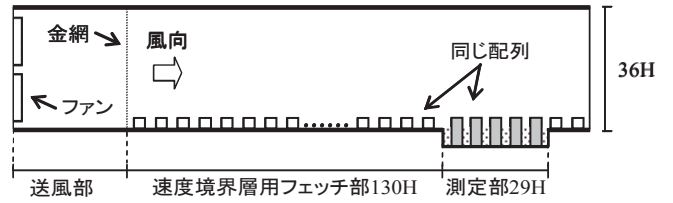
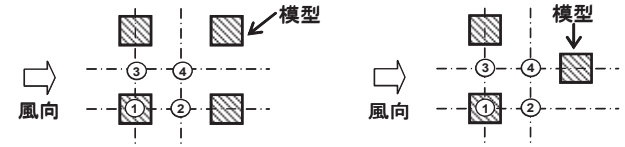
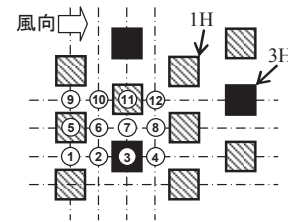


図 1 風洞装置の模式図



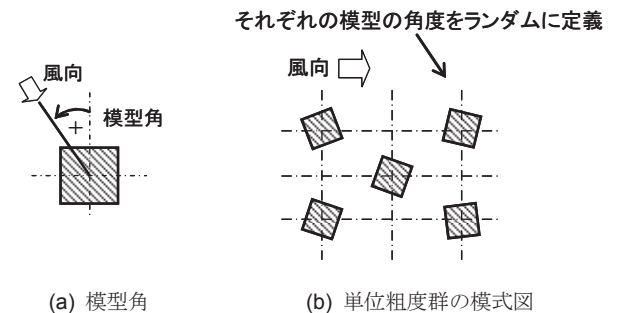
(a) 整形配列

(b) 千鳥配列



(c) S1.5-s

図 2 各配列の速度プロファイル測定点 (図中の番号は測定点)



(a) 模型角

(b) 単位粗度群の模式図

図 3 ランダム配列

表 1 実験に用いた配列条件と実験の種類

Case	配列*	$H_{av}^{**}$	配列の特徴	測定内容
N1	整形	$1.0H$	高さ分布なし	蒸発面追加 速度プロファイル
S1	千鳥	$1.0H$		
S1.5	千鳥	$1.5H$		高さ $1H$ と $3H$ の模型 を 3:1 で組み合わせた 配列
S1.5-n	千鳥 (整形)	$1.5H$		
S1.5-s	千鳥 (千鳥)	$1.5H$	模型の角度を $-22.5$ 度 から $22.4$ 度の範囲でランダム に変化 (標準偏差 $13.0$ 度)	
ST1R*	千鳥	$1.0H$		
ST1R	千鳥	$1.0H$	模型の角度を $-45$ 度から $44$ 度の範囲でランダム に変化 (標準偏差 $26.0$ 度)	

\* ()は高層模型の配列 \*\*平均模型高さ

## 2 実験概要

### 2.1 塩分法と風洞装置

塩分法は、塩水を満たした水槽を風洞内部に設置し、気流下に

定時間曝露することで生じる塩水の濃度変化から蒸発量を推定する方法である<sup>2),3),4)</sup>。

実験では、空気温度、参照風速(いずれも、高さ 20H で測定)、水面温度、および露点温度をそれぞれ測定する。水面近傍の絶対湿度は水面温度における飽和絶対湿度としている。塩分法から推定した単位時間単位面積当たりの蒸発量を  $E$  [kg/m<sup>2</sup>s] とすると、バルク係数は次式で定義される。

$$C_E = \frac{E}{\rho_{air} U_{ref} (X_{surf} - X_{air})} \quad (1)$$

ここで、 $C_E$ : 床面バルク係数[-]、 $U_{ref}$ : 参照風速[m/s]、 $X_{air}$ : 空気絶対湿度[kg/kg]、 $X_{surf}$ : 水面近傍の空気絶対湿度[kg/kg]、 $\rho_{air}$ : 空気密度[kg/m<sup>3</sup>]である。それぞれの実験条件について 3 回の実験を行い、以後の解析にはそれらの平均値を用いる。

風洞装置の断面図を図 1 に示す。本研究では、自作の開放型風洞を用いた。風洞風上には気流の面内分布を一様にするための金網を設置している。測定部上端から風上 130H には、速度境界層発達のために測定部と同じ配列条件の模型を設置している。測定部には、一辺 72cm(29H)の水槽(72×72×5 cm<sup>3</sup>)を設置する。水槽に注水した際に、水面と周囲の風洞床面が同じ高さとなり、測定部床面のみに蒸発面が設置された状態となる。詳細は前報を参照されたい<sup>1)</sup>。

## 2.2 配列条件

測定対象とする粗度群の詳細を表 1 に示す。模型高さ 1H の整形・千鳥配列、模型高さ 1.5H の千鳥配列(均一高さ粗度)、および高さ分布のある配列(不均一高さ粗度)は、前報と同じ幾何条件の配列である。建蔽率は 7.7, 17.4, 30.9% の 3 条件とした。これらの配列については、i 型熱線流速計(日本カノマックス株式会社、0251R-T5)を用いて高さ 1.5H から 20H まで 19 高度について、整形配列、千鳥配列は水平面内 4 点、S1.5-s 配列については水平面内 12 点の主流方向速度の測定を行っている。

また、それぞれの模型の模型角(図 3(a))がランダムに異なる配列として ST1R\*、ST1R を作成した(以後、両者をランダム配列と呼ぶ)。ST1R\*は模型角の範囲を-22.5 度から 22.4(標準偏差 13.0 度)、ST1R は-45 度から 44 度(標準偏差 26.0 度)、模型角の平均値は 0.5 度以下とした配列である。各模型の中心点の位置は図 2(b)に示す千鳥配列と同様とし、8×8 の 64 個を 1 つのユニットとしてそのエリア内の各模型の模型角を指定した範囲内の一様分布乱数によって定義した。この 8×8 の計 64 個を単位粗度群とし、風洞内全面に繰り返し配置した。建蔽率は 7.7, 17.4, 30.9% の 3 条件とする。建蔽率が異なる場合にも、8×8 の計 64 個の模型に対し、同じ模型角の分布パターンを有する単位粗度群を使用している。

## 3 ランダム配列のバルク係数

ランダム配列におけるバルク係数と建蔽率の関係を図 4 に示す。図には、前報に示した滑面、整形配列(N1)、千鳥配列(S1)におけるバルク係数を併せて示している。ランダム配列に用いた立方体模型は N1、S1 と同じ大きさである。

まず、ランダム配列と S1、N1 の比較から、各建蔽率における模型角の影響について議論する。ST1R\*は、いずれの建蔽率においても S1 よりも大きなバルク係数を示している。また、ST1R についても、建蔽率 30.9%では S1 と N1 の間の値となっているが、17.4%以下では

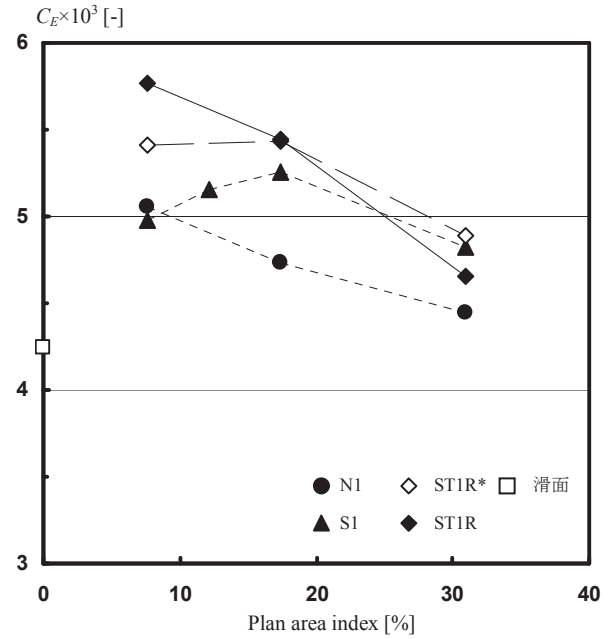


図 4 ランダム配列のバルク係数

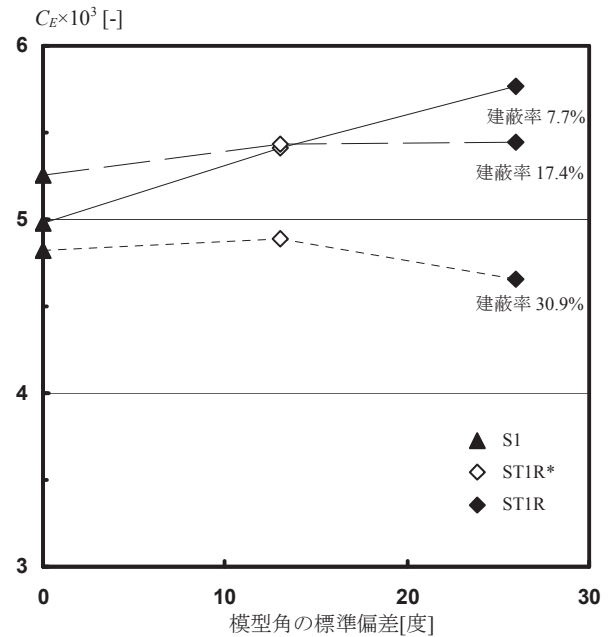


図 5 建蔽率ごとに見たバルク係数と模型角の標準偏差の関係

S1 よりも大きな値となっている。この傾向は、建蔽率が 17.4%以下と低い場合には、模型角をランダムにした影響で、床面のスカラ輸送が活発になっている可能性を示している。その一方で建蔽率が高い 30.9%の場合には、模型角の影響が殆ど現れないといえる。前報<sup>1)</sup>で、建蔽率 7.7%では個々の模型間隔が十分に広く、Oke<sup>14)</sup>の分類による isolated flow に近い流れ場が形成されているため、N1 と S1 のバルク係数に大きな差が生じないこと、さらに建蔽率が 30.9%でも同様に流れ場が skimming flow に近いことが予想されるため、平面配列の差が生じにくいことの 2 点を指摘した。ST1R\*、ST1R の建蔽率 30.9%のデータは、前報と同じ傾向を示していると考えられる。

建蔽率 17.4%以下において、模型角の影響が強く現れていることから、バルク係数と模型角の標準偏差の関係を建蔽率ごとに図 5 に

示した。ここでの比較には平面配列が同じ千鳥配列の場合を標準偏差 0 としている。STIR\*は模型角の標準偏差 13.0 度、STIR は標準偏差 26.0 度である。結果を見ると、建蔽率 7.7%では、標準偏差が大きくなるほどバルク係数が増加している。これは、模型が疎に配置され flow regime が isolated flow となっている場合には、標準偏差が大きいかほどスカラー輸送が活発になっていることを示している。その一方で、建蔽率 17.4%の場合、模型角がランダムになると、バルク係数は若干増加するが、模型角の標準偏差が大きくなってもバルク係数は殆ど変わらない。また、建蔽率 30.9%では模型角の標準偏差 26.0 度でバルク係数が若干減少しており、建蔽率 7.7%の場合とは逆に、標準偏差が大きくなることによって、空気の導入が起りにくくなり示している。

図 6 には S1, STIR 配列におけるバルク係数と抗力係数  $C_d$  の比較を示した<sup>15)</sup>。抗力係数は、いずれの建蔽率においても S1 よりも STIR が大きくなっており、粗度近傍の速度欠損は S1 に比べて STIR のほうが大きいことが考えられる。その一方で、STIR のバルク係数は建蔽率 17.4%以下で S1 よりも大きい。この結果は、速度欠損によって境界層内部の平均風速は低下し水平方向のスカラー輸送は減少していると考えられるが、STIR における粗度近傍の水平・鉛直方向の 3 次元のな流れ場によって、正味のスカラー輸送係数は S1 よりも増加したということを示している。建蔽率が高い 30.9%の条件においては、S1, STIR どちらも抗力係数が減少傾向にあることから、流れ場が skimming flow に近いと考えられる。

#### 4 蒸発面を追加した場合のバルク係数

##### 4.1 蒸発面の定義と設置方法

スカラーソースサイズの影響を検討するため、測定領域の風上側に蒸発面を追加した場合のバルク係数を測定する。蒸発面の追加は以下のように行う。

本研究の風洞は、主流方向の測定部長さ(水槽サイズ)が 72 cm (29H)である。この蒸発面積を基準として、測定部風上側に長さ 29H の蒸発面を設置し蒸発面積を 2 倍とした場合(図 7(a))と、長さ 58H の蒸発面を設置し蒸発面積を 3 倍とした場合(図 7(b))でのバルク係数測定を行う。以下では、基準のバルク係数を  $C_E$ 、蒸発面 2 倍、3 倍の条件におけるバルク係数をそれぞれ  $C_E(2)$ 、 $C_E(3)$  と示す。測定対象とする配列条件は、整形配列(N1)と千鳥配列(S1)とする。蒸発面 2 倍については、建蔽率 7.7、17.4、30.9 の 3 条件、蒸発面 3 倍については建蔽率 17.4%の 1 条件での測定を行う。ただし、いずれの配列条件においても得られるバルク係数は、測定部面内の水槽部分のエリア平均値である。測定部風上側に設置する蒸発面は、濾紙に木製模型を接着したもので、測定部と同じ模型配列条件としている。濾紙には実験中に表面が乾燥しないように十分な量の水を注水している。

##### 4.2 蒸発面追加によるバルク係数と低下率

蒸発面を追加した場合のバルク係数と建蔽率の関係を図 8 に示す。図には、前報によるバルク係数(N1, S1、及び滑面)を併せて示している。表 2 には、基準に対するバルク係数の低下率(すなわち、 $C_E(2)/C_E$ または  $C_E(3)/C_E$ )を示した。なお、本研究におけるバルク係数は 3 回の実験の平均値である。そこで、3 回の実験の標準偏差を測定による誤差とみなし、蒸発面を拡張しない基準条件 (N1 および S1) と蒸発面を追加した条件の誤差の和をバルク係数の低下率の誤差と

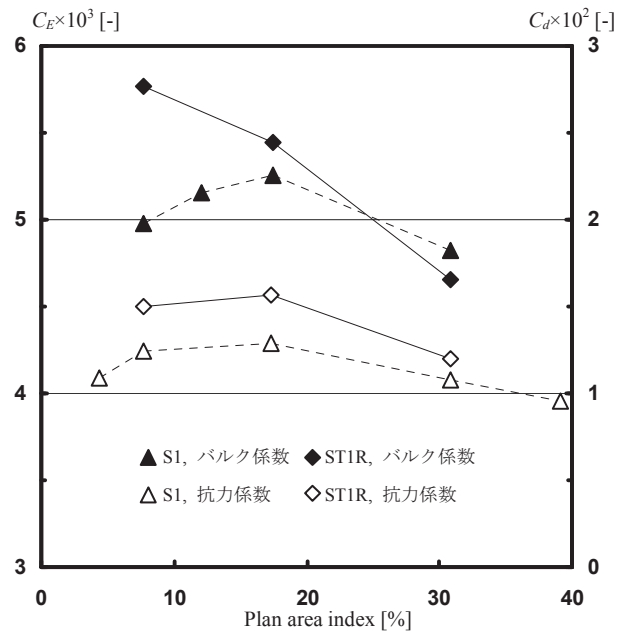


図 6 バルク係数と抗力係数の比較

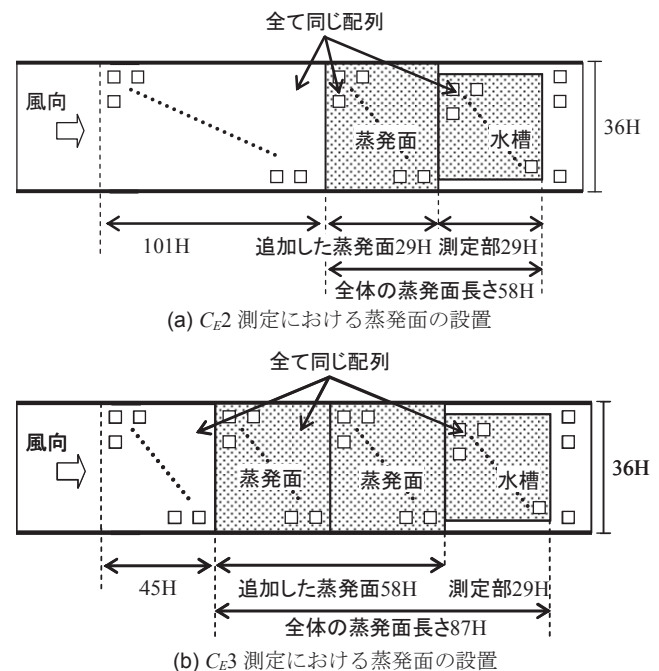


図 7 蒸発面の設置方法

表 2 基準に対するバルク係数の割合

配列	建蔽率[%]	$C_E(2)/C_E$ (誤差%)	$C_E(3)/C_E$ (誤差%)
整形	7.7	0.93 (2.2)	-
整形	17.4	0.93 (1.6)	0.88 (2.6)
整形	30.9	0.96 (4.7)	-
千鳥	7.7	0.94 (3.7)	-
千鳥	17.4	0.95 (3.3)	0.92 (3.6)
千鳥	30.9	0.87 (2.4)	-
滑面(式(2))	-	0.74	0.67

して表 2 に併記している。

まず蒸発面追加による影響を配列ごとに考察する。整形配列の場

合、すべての建蔽率において蒸発面を追加することによってバルク係数が低下している( $C_E(2) < C_E$ )。これは、 $C_E(2)$ の場合、 $C_E$ に比べて測定部風上側から濃度境界層が発達するために、測定部に湿潤な空気が供給されるためであると考えられる。建蔽率 17.4%の蒸発面を 3 倍とした場合も同様に  $C_E(3) < C_E(2)$ となっているが、低下率は、 $C_E(2)/C_E=0.93$ 、 $C_E(3)/C_E=0.88$  であり、その勾配は蒸発面積の拡大に対して減少している。これは、蒸発面の追加に伴う濃度境界層の発達過程が、流れ方向に対して徐々に緩やかになっていることを示唆している。千鳥配列の場合も、 $C_E(3) < C_E(2) < C_E$ 、かつ、 $C_E(2)/C_E=0.95$ 、 $C_E(3)/C_E=0.92$  となり、蒸発面追加に対して同様の傾向を示している。

一般に滑面乱流境界層における局所 Nu 数の Re 数依存性は、次式で表される<sup>16)</sup>。

$$Nu = 0.0296 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{\alpha_x x}{\lambda} \quad (3)$$

$$Re = \frac{u_0 x}{\nu} \quad (4)$$

ただし、 $\alpha_x$  局所熱伝達率 [ $W/m^2$ ]、 $x$  代表長さ [m]、 $\lambda$  熱伝導率 [ $W/m^2K$ ]、 $u_0$  参照風速 [m/s]、 $\nu$  動粘性係数 [ $m^2/s$ ]である。この式(2)を積分することで平均熱伝達率を算出し、滑面乱流境界層における蒸発面追加による輸送効率の低下率を推定した。算出した結果を表 2 に示す。中立条件下の濡れ面からの蒸発現象と対流による熱輸送現象のアナロジーから  $C_E \propto$  平均対流熱伝達率と仮定すると、滑面のバルク係数の低下率は  $C_E(2)/C_E=0.74$ 、 $C_E(3)/C_E=0.67$  となる。この値は、本実験で得られた N1 と S1 の粗度群床面の値よりも小さい。この結果は、滑面乱流境界層に比べて、粗面では鉛直混合によって流れ方向に濃度境界層が早く発達し、輸送効率が安定するまでの距離が短くなる可能性を示している。Cheng and Castro<sup>17)</sup>は、粗面乱流境界において、粗度形状がより粗い粗面(粗度長  $z_{01}$  から  $z_{02}$ )にステップ状に変化した場合、流れ方向に粗度 5 列程度以内の短い領域( $160z_{02}$ )で、速度欠損が急激に生じ、roughness sublayer 内の速度プロファイルが十分なフェッチ長さのある境界層と相似となると指摘している。このことから、スカラソースの大半のエリアで十分に内部境界層が roughness sublayer に達していることが推測される。一方、滑面ではこうした粗度の効果による急激な境界層の adjust は生じないため、本実験におけるバルク係数低下率が滑面の推定値よりも大きいのだと考えられる。また、成田ら<sup>3), 4)</sup>は濾紙法により二次元及び三次元粗面での輸送効率の流れ方向変化を測定しており、二次元配列に比べて、三次元配列のほうが輸送効率は早く安定すると指摘している。この結果は、粗度による乱れの生成に伴い濃度境界層の発達が早くなるという点において、今回の結果と同じ傾向を示しているといえる。

### 4.3 建蔽率とバルク係数の関係

次に、蒸発面を追加した場合のバルク係数と建蔽率の関係について考察する。N1 における  $C_E(2)$ の建蔽率に対する傾向は  $C_E$ の場合とほぼ変わらず、建蔽率に対して単調減少している。S1 の場合も  $C_E(2)$ は建蔽率に対して上凸の傾向を示しており  $C_E$ と同様の特徴を有しているといえる。前報では、今回の整形配列や千鳥配列のほかにも、

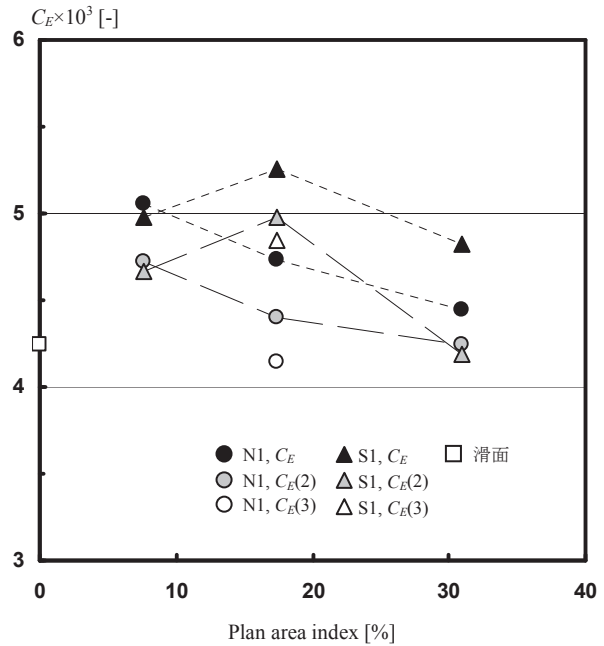


図 8 蒸発面を追加した場合のバルク係数

様々な幾何形状におけるバルク係数の測定結果を述べた。今回の結果から判断すると、前報で報告したバルク係数に関して、蒸発面積を変えても、粗度の幾何条件に対するバルク係数の傾向はあまり変わらないと判断して良いと思われる。これは、滑面乱流境界層に比べて、粗面乱流境界層では、濃度境界層の発達過程が早く、蒸発面上の流れ方向の蒸発フラックスの変化が小さいためであると思われる。加えて、今回の実験では、流れ方向に測定部を  $29H$  と十分に長く取っているため、蒸発面風上先端の急激な変化の影響が相対的に小さく、蒸発面を変えた場合にも幾何形状の対するバルク係数の傾向は保たれているのだと考えられる。

以上要するに、粗度群床面バルク係数は面積効果によって変化し、蒸発面の長さを代表長さとしたレイノルズ数に依存することが認められる。そのため、異なるソース領域を持つ実験の結果について、バルク係数の絶対値を比較・議論する場合においては十分注意する必要がある。一方で、幾何条件とバルク係数の関係性を議論するという点においては、ある程度の面積を有する濡れ面のバルク係数の比較は有効であるといえる。

### 5 バルク係数の参照高さ変更

筆者らが既報で示したバルク係数は境界層外の流速を reference として算出したため、バルク係数の形状依存性は、粗度による境界層全体の速度欠損の影響と、粗度近傍の三次元的な流れ場の特性の両方が重量されたものであったと考えられる。そこで、粗度近傍の流速を reference とするバルク係数を新たに算出することで、粗度の幾何形状がもたらす粗度近傍流れ場の特性とバルク係数の関係を抽出する。

バルク係数算出の参照風速高さを変えるためには、各配列における速度プロファイルが必要となるが、これまでバルク係数を測定した全配列条件に対して速度プロファイルの測定を行うには膨大な時間を要する。

そこで本研究とは異なる回流式風洞装置内における全く同一の模型サイズ、模型配列条件における速度プロファイルの測定データと、本研究の開放型風洞装置における粗度近傍プロファイルの相似性が成立すると見なし、 $2H$  高さおよび  $4H$  高さの風速を算出した。なお、プロファイルの相似性は、配列 S1、建蔽率 17.4%について、 $4H$  高さの速度による無次元化プロファイルが一致することを確認している。

図 9 に、整形配列、千鳥配列のバルク係数について、参照風速の定義高さをこれまでの  $20H$  に加え、 $4H$  と  $2H$  とした結果を示す(以下、それぞれのバルク係数を  $C_E(20H)$ ,  $C_E(4H)$ ,  $C_E(2H)$  と表す)。整形配列の結果を見ると、 $C_E(20H)$  は建蔽率に対して単調減少しており、参照高さを変えた  $C_E(4H)$ ,  $C_E(2H)$  でもその傾向はほとんど変わらない。また、建蔽率に対する  $C_E(4H)$ ,  $C_E(2H)$  の減少の勾配も  $C_E(20H)$  の場合とほぼ同様である。一方、千鳥配列の場合、建蔽率 17.4% における  $C_E(4H)$ ,  $C_E(2H)$  が、他の 2 建蔽率に比べて非常に大きくなっている。また、建蔽率 7.7% と 30.9% では、整形配列と千鳥配列の差が  $C_E(20H)$ ,  $C_E(4H)$ ,  $C_E(2H)$  のいずれにおいてもほとんど変わらないのに対して、建蔽率 17.4% では千鳥配列の  $C_E(4H)$ ,  $C_E(2H)$  が非常に大きくなっていることがわかる。建蔽率 17.4% における整形配列と千鳥配列を比較すると、流れ方向の模型間距離に大きな差が現れる。即ち、千鳥配列の場合、模型が交互に配置されているために模型間距離が長くなり、空気がスカラー表面に導入されやすくなると思われる。建蔽率 17.4% の千鳥配列では、粗度による速度欠損が大きいものにも関わらずバルク係数が増加傾向にあり、粗度による空気の下層混合が活発になったと考えられる。この結果によると、これまでに指摘されるような高さ分布だけではなく、平面配列の差によっても、建蔽率によっては鉛直方向の空気の混合に明確な差が生じている可能性が示された。

次に、不均一高さ粗度の S1.5-n, S1.5-s に加え、平均模型高さが等しい均一高さ粗度の千鳥配列の S1.5 の結果を図 10 に示す。前報にあるように、参照高さを  $20H$  とした場合、建蔽率 17.4% 以下のバルク係数は、均一高さ粗度 > 不均一高さ粗度となっているが、建蔽率 30.9% では均一高さ粗度 < 不均一高さ粗度となっている。しかし、参照高さを最高模型高さである  $3H$  とした場合のバルク係数は、いずれの建蔽率においても均一高さ粗度 < 不均一高さ粗度となっていることがわかる。この結果は、Pascheke et al.<sup>10)</sup> の結果と同様の傾向であり、高さ分布によってスカラー輸送が活発になっている可能性を示している。また、S1.5 では、参照高さを  $3H$  とした場合もバルク係数は建蔽率に対して単調減少しているが、不均一高さ粗度である S1.5-s や S1.5-n では、建蔽率の増加に対してバルク係数も増加している。すなわち、高さばらつきの効果によって、建蔽率が高くなった場合にも S1.5 に比べて空気の導入が起りやすいといえる。これは、高層の  $3H$  模型が、強い下降流を引き起こしているためであると思われる、義江ら<sup>9)</sup> の不均一高さでのキャノピー内風速が増加しているという報告と符合する傾向であると考えられる。

## 6 結論

本研究では次の三点に着目し、三次元粗度群におけるバルク係数の測定を行った。

まず、模型配列の平面内の分布に着目し、模型角をランダムにした場合のバルク係数を測定した。その結果、低建蔽率では模型角の

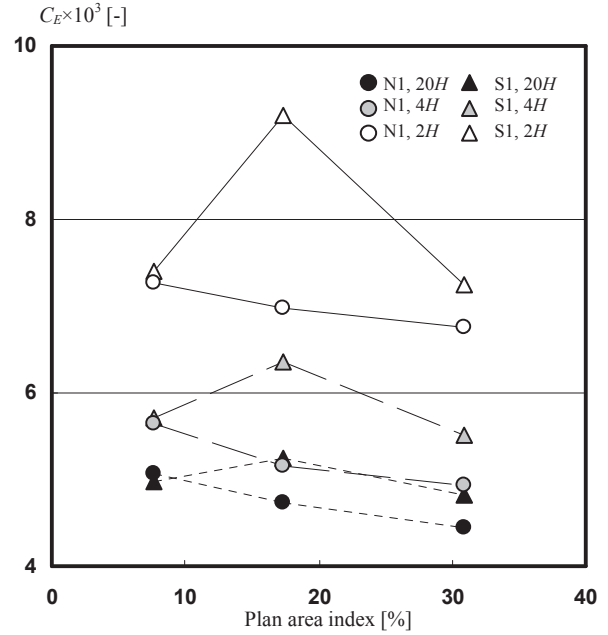


図 9 参照高さを変えたバルク係数

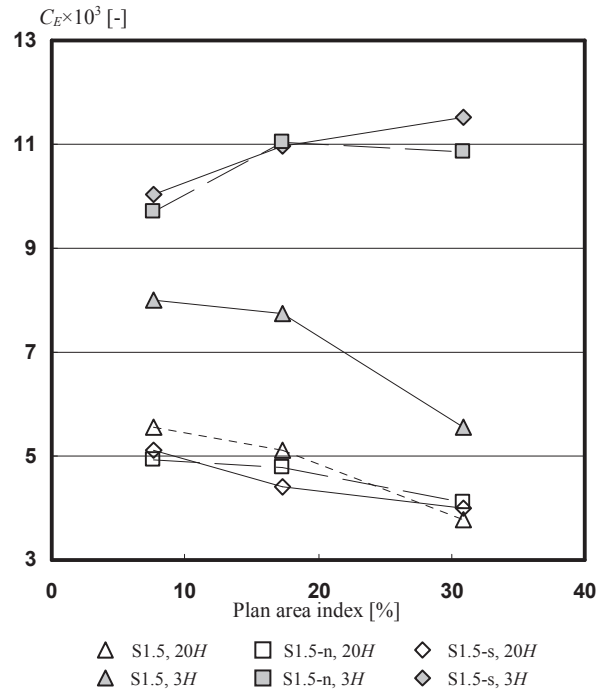


図 10 参照高さを変えたバルク係数(高さ分布の有無による比較)

影響が大きく現れることが示された。次に、バルク係数測定における蒸発面積をこれまでの 2 倍、3 倍とすることで、3 次元粗度群におけるバルク係数の  $Re$  数依存性が示された。しかしながら、前報の結果に関して、バルク係数と幾何形状の関係を議論するという点においては、同一の蒸発面での測定が十分有意であるといえる。最後に、バルク係数算出における参照高さの変更から、整形配列、及び千鳥配列における空気の鉛直混合の影響を比較した。その結果、千鳥配列 17% 付近において、バルク係数の増加が見られた。また、従来の指摘どおり、不均一高さ粗度では鉛直混合が活発であることが示された。

## 謝辞

本研究の一部は科研費基盤研究(B)(22360238/代表 谷本)、特別研究員奨励費(22・1511/代表 池谷)による。以上に記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 萩島理, 谷本潤, 末永啓, 池谷直樹, 前田一行, 成田健一: 直方体粗度群の床面バルクスカラ係数に関する風洞模型実験, 日本建築学会環境系論文集, vol.73, No.632, pp.1225-1231, 2008.10
- 2) 池谷直樹, 萩島理, 末永啓, 谷本潤, 末永啓, 前田一行, 成田健一: 塩分法による物質伝達率測定, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 147, pp.57-60, 2009
- 3) 成田健一, 関根毅, 徳岡利一: 市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.361, pp.10-20, 1986.3
- 4) 成田健一, 関根毅, 徳岡利一: 市街地の蒸発量に及ぼす建物周辺気流の影響に関する実験的研究(続報), 日本建築学会計画系論文報告集, No.366, pp.1-10, 1986.8
- 5) 萩島理, 谷本潤, 永山浩二, 古賀正浩: 高さ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, pp.39-45, 2007.9
- 6) Kanda, M., Moriizumi, T.: Momentum and heat transfer over urban-like surfaces, *Boundary-Layer Meteorology*, 131, pp.385-401, 2009
- 7) 栗田剛, 大場正昭: 一様建物高さ分布で直行配列された街区におけるグロス建蔽率が熱輸送と運動量輸送に及ぼす影響について 暑熱化都市キャノピー層の熱輸送特性に関する実験的研究(その1), 日本建築学会環境系論文集, vol.75, No.652, pp. 509-515, 2010.6
- 8) 成田健一: 建物高さが不均一な街区の交換速度, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2), pp.749-750, 2007
- 9) 義江龍一郎, 田中英之, 白澤多一, 小林剛: 香港の高層密集市街地における風通しに関する研究 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.745-756 2007
- 10) Pascheke, F., Barlow, J. F., Robins, A.: Wind-tunnel modelling of dispersion from a scalar area source in urban-like roughness, *Boundary-Layer Meteorology*, 126, pp.103-124, 2008
- 11) 成田健一, 野々村善民, 小笠頭: 都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験 その2, 日本建築学会計画系論文集, No. 527, pp.69-76, 2000.1
- 12) 成田健一, 小笠頭, 野々村善民: 都市表面における対流物質伝達率に関する風洞実験 その3, 日本建築学会計画系論文集, No.594, pp.69-76, 2005.8
- 13) Barlow, J. F., Harman, I. N., Belcher, S. E.: Scalar fluxes from urban street canyons Part 1, *Boundary-Layer Meteorology*, 113, pp.369-385, 2004
- 14) Oke, T.R.: Street design and urban canopy layer climate, *Energy and buildings*11, pp.103-113, 1988
- 15) Zaki, S. S., Hagishima, A., Tanimoto, J., Ikegaya, N.: Wind tunnel measurement of aerodynamic parameters of urban building arrays with random geometries, *CWE2010*, 2010
- 16) 日本機械学会: 伝熱工学資料 改訂第4版, 丸善, 1986
- 17) Cheng, H., Castro, I.P.: Near wall flow over urban-like roughness, *Boundary-Layer Meteorology*, 104, pp.229-259, 2002
- 18) Raupach, M. R.: Conditional statistics of Reynolds stress in rough-wall and smooth-wall turbulent boundary, *Fluid Mechanics*, vol108, pp.363-382, 1980
- 19) Narita, K.: Experimental study of the transfer velocity for urban surfaces with a water evaporation method, *Boundary-Layer Meteorology*, 122, pp.293-320, 2007
- 20) Hagishima, A., Tanimoto, J., Nagayama, K.: Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries, *Boundary-Layer Meteorology*, 132, pp. 315-337, 2009
- 21) Snyder, W. H., Castro, I. P.: The critical Reynolds number for rough-wall boundary layers, *Wind Engineering*, 90, pp41-45, 2002
- 22) Coceal, O., Thomas, T. G., Castro, I. P., Belcher, S. E.: Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles, *Boundary-Layer Meteorology*, 121, pp.491-519, 2006

## 注

注1) 日射により建物壁面、屋根面、道路が同時にスカラソースとなり得ることを考慮すると、複数面を同時にスカラソースとした場合の測定が必要であるが、本報では実験の制約上、床面をスカラソースとした場合の床面バルクスカラ係数の測定とその検証をおこなっている。

(2010年7月9日原稿受理, 2010年9月27日採用決定)