

直方体粗度群の床面バルクスカラー係数に関する風洞模型実験

WIND TUNNEL EXPERIMENT ON BULK SCALAR COEFFICIENT OF URBAN-LIKE ROUGHNESS

萩島 理*, 谷本 潤**, 末永 啓***, 池谷直樹****
前田 一行*****, 成田 健一*****

*Aya HAGISHIMA, Jun TANIMOTO, Satoru SUENAGA,
Naoki Ikegaya, Kazuyuki Maeda and Ken-ichi Narita*

The authors investigated bulk scalar coefficient (C_E) of the street in the 3-D canopy with various conditions of arrangement, plan area density (λ_p), frontal area index (λ_f), and variability of model height in a wind tunnel using salinity method. The results can be summarized as follows.

- 1) The relationships between C_E and I_f of both staggered and normal arrayed canopy with uniform height shows different tendency. The C_E of 3-D canopy of staggered and normal pattern have similar value under the sparse (λ_f) and dense conditions, in contrast, C_E of staggered canopy is higher than that of normal canopy under the condition of $\lambda_f = 17.4\%$.
- 2) C_E of uniform canopy is larger than that of canopy with height variation under the condition of $\lambda_f < 17.4\%$. In contrast, C_E of uniform canopy is smaller than that of canopy with height variation under the condition of $\lambda_f = 30.9\%$. Such a tendency is opposite to the result of drag force coefficient.

Keywords : mass transfer phenomena between 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

近年、行政施策の目標としてヒートアイランド現象緩和が打ち出され、都市気候モデル¹⁾²⁾の計算結果が行政や設計者の意志決定の場面に引用される機会は非常に多くなってきている。しかし、様々な物理メカニズムを記述したサブモデルから構成される都市気候モデルの精度に関しては、まだ観測データとの比較検証³⁾の積み重ねが必要である。とりわけ、都市表面の大気加熱量の多寡を決定づける都市表面と大気間の熱や水蒸気などのスカラー輸送過程のモデリングは重要なポイントであるが、現時点では多くの課題が残されている。

例えば、建築環境工学の分野ではこれまで建物表面の対流熱伝達率と近傍風速または上空風速との関係に関して屋外観測に基づく多数の実験式が提示されてきた^{4)~6)}。しかし、建物表面の熱伝達率分布は周辺建物との間に形成される気流場の3次元的分布の影響を強く受けるため、熱伝達率—風速の実験式は研究者により様々で統一的な予測手法は確立していない⁷⁾。

一方、大気境界層の底部に位置する都市表面を流体力学的な「粗面」と捉えるならば、都市表面—大気のスカラー輸送機構は建築工

学分野のみならず伝熱工学、流体力学、都市気候学など幅広い分野に関連する研究課題である。

例えば都市気候の分野では、Kanda et al. (2007)⁸⁾が屋外における様々な粗度サイズの気境界層内の熱及び運動量フラックスの観測に基づき、熱粗度と運動量粗度の比に関するパラメータ κB^{-1} と粗度レイノルズ数の関係を提示している。また中立条件の風洞内において、ナフタレン昇華法により2次元キャノピーのバルク係数を測定したBarlow et al. (2004)⁹⁾、濾紙蒸発法により2次元キャノピーや3次元キャノピーのバルク係数を測定したNarita (2007)¹⁰⁾によって、都市形状とスカラー輸送効率の関連について議論が進められており、単層¹¹⁾¹²⁾や多層¹³⁾¹⁴⁾の都市キャノピーモデルへの適用を想定したスカラー輸送モデル¹⁵⁾も提案されている。

一方、伝熱工学分野の関連研究としてはナフタレン昇華法に基づき2次元キャピティの物質伝達率分布を測定したChyu and Goldstein (1986)¹⁶⁾や、立方体粗度群の対流熱伝達率分布を測定したAliaga et al. (1994)¹⁷⁾などが挙げられる。

このような状況に対し本研究では、風洞模型実験により3次元キャノピーの幾何形状の影響が床面のバルクスカラー係数（以下、バ

* 九州大学大学院総合理工学研究院 准授・博士(工学)

** 九州大学大学院総合理工学研究院 教授・工博

*** TOTO(株) 修士(工学)

**** 九州大学大学院総合理工学府 修士課程学生

***** 日本工業大学工学部建築学科 教授・工博

Assoc. Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng. TOTO Ltd., M. Eng.

Master's Student, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ.

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

ルク係数) に及ぼす影響を明らかにすることを目標とする。バルク係数の測定にあたっては、成田らの開発した塩分法^{18)~20)}を用いる。

成田ら (1986)²⁰⁾ は様々な建蔽率、高さ分布の直方体粗度群の床面伝達率を塩分法により測定し、粗度群の高さのパラツキ (標準偏差) の増加に伴い床面バルク係数が増加するという結果を得ている。一方で、ナフタレン昇華法により建蔽率 25% の均一高さ粗度群と不均一高さ粗度群のバルク係数を測定した Pascheke1 et al. (2008)²¹⁾ によると、平均粗度高さが等しい場合、不均一高さ粗度群の方が均一高さ粗度群より境界層外の流速を reference とするバルク係数は小さくなる、という結果が報告されている。

この2つの実験結果は、粗度の建蔽率や模型形状の違い、測定部の風上側の模型配列状況などが異なっているため、並べて単純比較することはできない。しかしいずれにせよ、粗度の高さのパラツキがバルク係数に与える影響については、現時点で統一した見解は得られていない。これは、都市の幾何形状の制御により都市の熱環境を向上させよう、という近年流行の「風の道」の議論にも影響を与える可能性のある興味深いテーマである。

そこで本研究では、都市の幾何形状の中でも、とりわけ粗度高さの不均一性の影響について系統的な議論ができるように、様々な平面配列および建蔽率の模型配列条件でバルク係数の実験を行う。なお、運動量輸送とスカラー輸送の相似性と相違点についての考察を行うために、床面抗力係数 (すなわち、バルク運動量輸送係数) についての萩島ら (2007)²²⁾ の風洞実験と同じ模型配列としている。

2. 実験概要

2.1 塩分法の測定原理及び測定方法

塩分法とは、塩水を満たした水槽を風洞の測定部に配置し、気流下に一定時間静置した前後の塩分濃度の測定値から蒸発量及び物質伝達率やバルク係数を推定する方法である^{18)~20)}。本手法は鉛直面の測定が出来ないという制約はあるが、塩水を満たす水槽のサイズを大きくしてその中に複数の模型群を並べることで、不均一形状のバルクの床面伝達率を推定することが可能であり、同じ水蒸気蒸発を利用した濾紙蒸発法には無い利点がある。

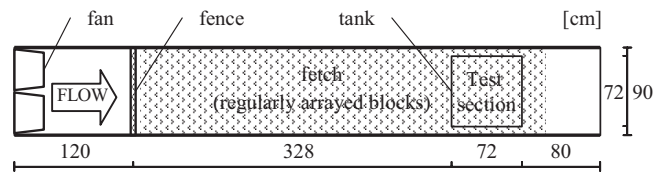
本研究での実際の測定手順は以下の通りである。まずあらかじめ作成した塩水を測定部水槽に満たし、残りの塩水を採水し塩分濃度 S_B を測定する。次いで、測定部を一定気流条件下に Δt 時間曝露した後、再び水槽から塩水を採水し塩分濃度 S_A を測定する。これにより (1) 式から曝露時間中の蒸発量 E を得る。

$$E = \frac{\rho_{water} \cdot V}{\Delta t \cdot A} \left(1 - \frac{S_B}{S_A} \frac{1 - S_A}{1 - S_B} \right) \quad (1)$$

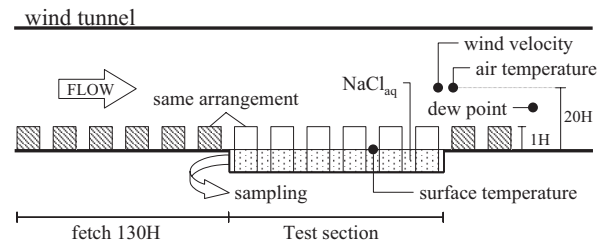
A : 蒸発面積 [m^2], S_A : 曝露後塩水濃度 [psu], S_B : 曝露前塩水濃度 [psu], E : 蒸発量 [$kg/(m^2 \cdot s)$], V : 塩水体积 [m^3], ρ_{water} : 水の密度 [kg/m^3], Δt : 曝露時間 [s]

なお本研究では、曝露時間は 2 時間とし曝露時間中には風洞内の露点温度、空気温度及び参照風速と水表面温度を連続測定している。また塩分濃度に関しては、4 本のサンプル瓶に採水した塩水を各々 5 回連続測定し、全 20 個のデータの平均値を用いている。得られた蒸発量 E から (2) 式により床面バルク係数 C_E が得られる。

$$C_E = \frac{E}{\rho_{air} U_{ref} (X_{surf} - X_{air})} \quad (2)$$



(a) 平面図



(b) 塩分法による測定箇所付近の模式図

表 1 測定項目及び測定機器

測定項目	測定機器
塩水濃度	サリノメーター (Guildline Instruments, AUTOSAL 8400B)
空気温度 ($z=20H$), 水表面温度	サーミスタ温度計 (テクノセブン, DS101)
露点温度 ($z=13H$)	鏡面冷却式湿度計 (SHINYEI, Dew Star S-1)
参照風速 ($z=20H$)	ピトー管, 精密微差圧計 (柴田 ISP-3-20DS)

注) 温度及び流速はデータロガー (NEC 三栄, DC3100) により 30 秒間隔で計測している。

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'], ρ_{air} : 空気密度 [kg/m^3]

なお、水面近傍空気の絶対湿度は水表面温度の飽和絶対湿度から推定している。以上の実験を一つの模型配列に対し 3 回行い、3 回のバルク係数の平均値を解析に用いる。

2.2 風洞装置及び塩分法の測定部の概要

本研究では全長約 6m の自作の開放型風洞を用いた。測定洞の寸法は長さ 4.8m、高さ 0.9m、幅 0.9m で、風洞断面内の気流分布を一樣にするため上流部には 1 枚の金網を設置している。この風洞装置は温湿度を制御できる室内に設置されている。

風洞の平面図及び床面バルク係数の測定箇所模式図を図 1 に示す。金網から約 3m 風下の風洞床に設けた開口部に塩水を満たしたステンレス製水槽 (72cm 四方) を設置している。なお、塩水表面は周辺の風洞床面と同じ高さになるように、注水の際には十分に留意している。また、金網から床面バルク係数を測定する水槽前縁までの約 3m (120H) の領域を水槽部分と同じ模型配列とする事で、粗度の幾何形状以外の因子がバルク係数の測定に及ぼす影響を極力小さくしている。

測定項目及び測定機器を表 1 に示す。塩水の濃度測定にはサリノメーターを用いている。この測器は塩性サンプルの導電率比の測定値から濃度を推定するもので、測定精度を保つため標準海水サンプルにより 24 時間毎に較正を行っている。また、水槽風下端の上空

500mm(基準模型高さ 25mm の 20 倍、以下 20H とする)において、L 型ピトー管により参照風速を測定している。すべての実験での条件を揃えるため、参照風速は約 2m/s (ファンの回転数 1550rpm) 一定としている。

2.3 模型配列条件

一辺が 25mm(1H)の立方体模型と 25mm 四方で高さが 12.5mm の直方体模型を組み合わせ、規則的に配列する事で粗度群を作成している。模型配列の条件を表 2 に、不均一高さ粗度群の模型配列の模式図を図 2 にそれぞれ示す。平面配置、模型の平均高さ、高さ分布の異なる 9 ケースについて建蔽率を 3 段階 ($\lambda_p=7.7, 17.4, 30.9\%$) に変化させ、全 27 条件について床面バルク係数のデータを取得している。加えて、滑面のデータとして模型を一切設置しない状態 (水面) での測定を行っている。

各実験ケースの名前は、低層部分の模型配列を大文字、高層部分の模型配列を小文字でそれぞれ、N・n (整形, Normal array)、S・s (千鳥, Staggered array) と標記し、数値は平均模型高さを意味している。最も密な配列における風洞断面に対する模型の立面積は 2.8% である。また、N1.0, S1.0 の $\lambda_p=17.4\%$ については濾紙蒸発法によるバルク係数の床面内分布の測定を行っている。

以上の模型配列条件、測定対象エリア面積及びフェッチ長さは、直方体粗度群の床面抗力係数を測定した萩島ら(2007)²²⁾ の幾何形状と全く同一である。

2.4 濾紙蒸発法による面内分布の測定

立方体の整形配列 N1.0 および千鳥配列 S1.0 の $\lambda_p=17.4\%$ については、塩分法に加え濾紙蒸発法²³⁾ により床面バルク係数の面内分布の測定を行った。濾紙蒸発法とは水で濡らした濾紙を測定対象面に添付し一定気流下に静置した場合の前後の重量変化から蒸発量および物質移動速度を推定する手法である。

バルク係数の測定部位は、塩分法において設置していた水槽の中央付近の単位街区を 3 分割している。測定部位は、図 3 に示す通り、模型後方の gap、スパン方向模型間の street、残り部分 intersection と名付けている。なお、配列 N1.0 と S1.0 で gap、street、intersection の面積はそれぞれ等しい。

図 3 に示した測定対象エリアは塩分法の水槽に比べて小さいため、水蒸気濃度境界層の発達状況が塩分法と濾紙蒸発法では同じにならない。そこで、濾紙試験体の周囲床面に水槽とほぼ同じサイズの濡らした濾紙 (主流方向 72cm×スパン方向 90cm) を貼り付けることで、スカラーソース (蒸発面) の大きさを塩分法と同一にしている。濾紙試験体は底面および小口面をプラスチックフィルムで覆うことで蒸発以外の要因、例えば周辺濾紙との間の水分移動、による重量変化が生じるのを防止している。測定は 1 箇所につき 4~5 回行い、その平均値を解析に用いる。風速条件は塩分法と同じ約 2m/s (ファンの回転数 1550rpm) である。

2.5 風洞内縮小模型と実在都市との相似

本実験条件における Re 数 (模型寸法と境界層上空流速を代表長さ、代表速度として定義) は約 3300、粗度 Re 数 (摩擦速度 u^* と粗度長 z_0 を代表速度、代表長さとして定義) は約 60 である。Snyder and

表 2 模型配列条件

Case	平面配置	模型高さ H_{av}	σ/H_{av}	備考
N1.0	整形	1H	0	1H×1H×1H の立方体模型
S1.0	千鳥	1H	0	
N1.5	整形	1.5H	0	1H×1H×1.5H の直方体模型
S1.5	千鳥	1.5H	0	
N1.5-n	整形	1.5H	0.58	高さ 1H の立方体模型と高さ 3H(1H×1H×3H)の模型を 3:1 の割合で配置
N1.5-s			0.58	
S1.5-n			0.58	
S1.5-s			0.58	
N1.5-s*	整形	1.5H	0.33	高さ 1H の立方体模型と高さ 2H(1H×1H×2H)の模型を 1:1 の割合で配置

注1) 各ケースとも建蔽率 3 条件($\lambda_p=7.7, 17.4, 30.9\%$)について測定

注2) H_{av} : 平均模型高さ, σ : 模型型高さの標準偏差, H=25mm

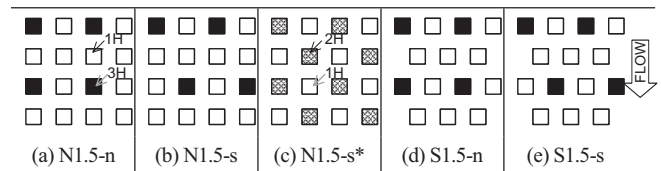


図 2 不均一高さ粗度群の模型配列状況

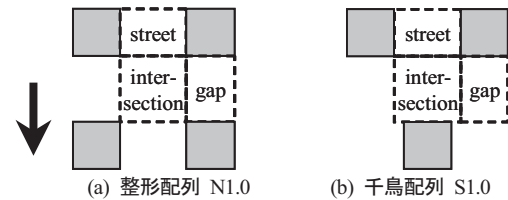


図 3 濾紙蒸発法の測定箇所

Castro (2002)²⁴⁾ によると、粘性の影響が無視できる十分に発達した粗面境界層が成立する条件は粗度 Re 数が $O(1)$ を超えていることであるから、粗度周辺の気流場については都市を模擬するのに適切な条件を満たしていると言える。また、測定部の風上側に測定部と同じ模型配列が $120H$ 続いている状況から、速度境界層はある程度発達していると考えられる。

一方、スカラー輸送については縮小模型と都市における実現象の間の相似を厳密に議論するのは困難である。一般には、風洞内測定部の水蒸気濃度およびスカラーソースの分布状況は、模擬しようとする都市域のスカラー境界層およびスカラーソースの分布と類似していることが必要とされる。例えば、Barlow et al. (2004)⁹⁾ や Narita (2007)¹⁰⁾ は、隣接する壁面にスカラーソースが存在するか否かで模型壁面や床面のバルク係数が大きく異なることをしている。また、2次元キャピティの全面にナフタレンを塗布して Chyu and Goldstein (1986)¹⁶⁾ の伝達率分布と、模型サイズの 6 分の 1 のサイズの濾紙を使った Narita (2007)¹⁰⁾ による伝達率分布も異なる特性を示している。

実際の市街地における温度場を観測した Offerle et al. (2007)²⁵⁾ や萩島ら(2008)²⁶⁾ によれば、都市キャノピーの内部は放射不均一による表面温度分布により加熱面と冷却面が混在し、なおかつその分布状況は太陽位置の変化により時々刻々変化している。このような複雑なスカラーソースの偏在状況を風洞内粗度群に対し再現することは極めて困難である上に、検討すべき実験パラメータの数が増えて

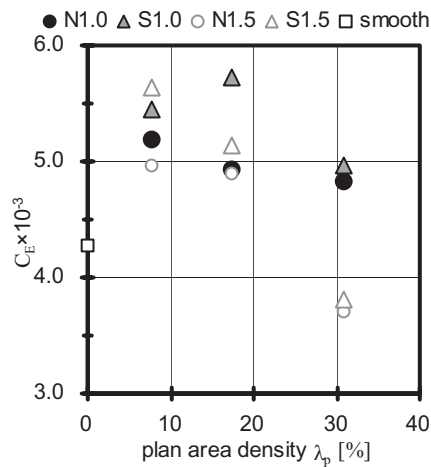


図4 バルク係数 C_E と建蔽率 λ_p の関係

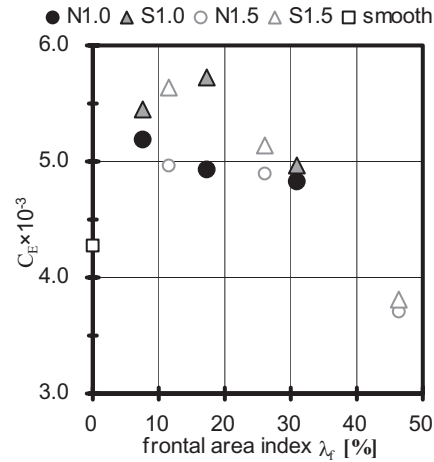


図5 バルク係数 C_E と粗度率面積密度 λ_f の関係

系統的な実験には膨大な時間を要する。

そこで本研究では、72cm 四方 (29H 程度) の水槽を全ての模型配列条件に対して用いスカラーソースサイズを統一した上で、まずは各ケースのバルク係数の相対比較により模型配列の影響を議論する、という方針をとる。

3. 均一高さ粗度群の床面バルク係数 C_E の実験結果

3.1 建蔽率 λ_p と C_E の関係

均一高さの模型群による 4 条件、即ち、整形配列の N1.0、N1.5 および千鳥配列の S1.0、S1.5 の床面バルク係数 C_E と建蔽率 λ_p の関係を図 4 に示す。なお、模型無し (滑面) の C_E を $\lambda_p = 0\%$ として併せてプロットしている。

まず、 $\lambda_p = 30.9\%$ で模型高さ 1.5H の N1.5 と S1.5 以外のすべての粗面の C_E は、滑面のそれらに比べて大きな値を示している。粗面境界層では、粗度群への form drag の増加に伴い模型近傍の風速は低下するが、模型周辺の 3 次元的气流場により上空乾燥空気と床面近傍湿潤空気の混合が促進され、結果として大多数の条件で C_E が大きくなったのだと考えられる。また、配列および模型高さ毎にバルク係数に対する建蔽率の影響を比較すると、S1.0 のみ $\lambda_p = 17.4\%$ でピークを示すのに対し、他の 3 ケースは概ね単調減少となっている。模型が高密度になると床面近傍流速が低減するのに加え、模型上面の乾燥空気がキャノピー内に導かれにくくなるのが要因と考えられる。

キャノピー内流れについては、Oke による 3 つの flow regime がよく知られている²⁷⁾。即ち、低建蔽率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 isolated flow、街路幅が狭くなると渦はキャニオンの幅に横長に広がり 1 つとなる wake interference flow、更に高い粗度密度条件では、キャニオン内に安定した循環渦が生じる skimming flow が出現する、というものである。立方体粗度群の整形配列について Oke は各流れパターンの出現条件を粗度高さ H と主流方向粗度間距離 W の比で対応づけており、それによると isolated flow は $H/W < 0.4$ ($\lambda_p < 8.2\%$)、wake interference flow は $0.4 < H/W < 0.7$ ($8.2\% < \lambda_p < 17.0\%$)、skimming flow は $0.7 < H/W$ ($17.0\% < \lambda_p$) となっている。一方、孟ら²⁸⁾ は千鳥配列立方体粗度群の流れ場の乱流計測により、建蔽率 10% 以下の場合を isolated flow、建蔽率 30% 以上の場合を skimming flow、その他

を wake interference flow とそれぞれ定義している。

本実験では整形配列と千鳥配列、模型高さ 1H (立方体) と 1.5H (縦長の直方体) という違いがあるため、図 3 の横軸の λ_p を一律に flow regime と対応づけることはできない。そのことが、4 ケースのプロットの傾向がまとまっていない一つの要因であろう。

3.2 粗度立面積密度 λ_f と C_E の関係

模型高さの影響を考慮した粗度密度の指標として粗度立面積密度 λ_f とバルク係数の関係を図 5 に示す。この図から模型高さの違いによらず、整形配列と千鳥配列でそれぞれプロットがまとまった傾向を示すことが分かる。以下、整形と千鳥のバルク係数の挙動を比較しながら考察する。

まず全体として整形配列よりも千鳥配列のほうが大きな値を示している。また、低密の $\lambda_f < 10\%$ および高密の $\lambda_f > 30\%$ でそれぞれ整形と千鳥のバルク係数は極めて近い。 λ_f が小さい条件では整形、千鳥両配列ともに模型同士の間隔が十分に広く、模型周辺気流は単独模型周辺のそれに近い振る舞いを見せるために配列間の違いが現れにくいのであろう。また λ_f が大きな高密条件では整形、千鳥ともに流れ場全体が skimming flow となるため、配列によるバルク係数の違いが現れなくなると考えられる。

これに対し、 $10\% < \lambda_f < 27\%$ では千鳥のバルク係数はピークを有する一方で整形のそれはほぼ横ばいという異なった傾向を示している。萩島ら²²⁾によると、この粗度密度条件では千鳥配列の床面抗力係数は整形配列に比べ大きいことから、千鳥配列は整形配列に比べ境界層内の速度欠損が大きく、advection によるスカラー輸送は小さいと考えられる。にも関わらず、バルク係数が大きな値を示すのは粗度群周辺の 3 次元的气流場の特徴に原因があると推測される。孟ら²⁸⁾によると、千鳥配列の wake interference flow では上流側の模型の lee eddy と斜め後方の frontal eddy が相互干渉することで、isolated flow の場合に比べて lee eddy が小さくなり frontal eddy がかなり大きくなるという。この強い frontal eddy が床面近傍の湿潤空気と上空の乾燥空気の交換を促進するため、 λ_f の増加に対して速度欠損が大きいかも関わらずバルク係数がピークを示したのであろう。

一方で整形配列は同じ λ_f 条件の千鳥配列に比べ主流方向の模型間隔が狭いため、スカラー輸送が生じている床面付近まで乾燥空気が

導入されにくく、結果として C_E のピークは観察されなかったであろう。

3.3 濾紙蒸発法による面内分布の測定結果

濾紙蒸発法による測定結果を表3に示す。濾紙蒸発法の面積重み平均した街区の平均バルク係数は、N1.0、S1.0ともに塩分法による水槽全体の平均値と良い一致を示している。

整形配列 N1.0 の C_E は gap、street、intersection の3部位で差は殆どないが、その中では模型の風下側に位置する gap の C_E がやや小さい。Oke²⁷⁾によれば $\lambda_p = 17.4\%$ の整形配列は wake interference flow と skimming flow のいずれかに相当すると考えられる。よって、gap には、ウェイク領域 (re-circulation region) と上空の乾燥空気が床面付近に吹き込む ventilation region の両方が存在していた可能性が高い¹⁵⁾。結果として、gap の C_E が床面全体の C_E の平均値よりも小さいことから、ventilation region の下降気流による蒸発促進よりも、ウェイクの弱風領域による蒸発抑制の方が効果が上回っていたと考えられる。また、street および intersection の C_E が塩分法による滑面の C_E (約 0.0043) よりも大きな値となっていることから、整形配列の主流方向街路の流れは完全な滑面流とは異なり、粗度による乱れ生成の影響を受け拡散が促進されたと推測される。

千鳥配列の S1.0 の部位別バルク係数は整形配列とは異なり差が大きく、street が最大で intersection、gap の順となっている。

孟ら²⁷⁾によれば、濾紙蒸発法の実験条件である $\lambda_p = 17.4\%$ の千鳥配列は wake interference flow に相当すると考えられる。Cocealら²⁹⁾による $\lambda_p = 25\%$ の立方体粗度群千鳥配列の気流場についての DNS 解析による結果、即ち、高さ $0.25H$ における流速は street が最大で intersection、gap の順となる、という事実と符合した結果と言えよう。

4. 粗度群の高さのバラツキが床面バルク係数 C_E に及ぼす影響

4.1 不均一高さ粗度群の床面バルク係数 C_E の実験結果

平均高さは $1.5H$ で模型高さにバラツキのある配列のバルク係数を図6に示す。なお、参照のため高さ $1.5H$ の均一粗度群のデータも併せて記載している。

表3 $\lambda_p = 17.4\%$ の立方体粗度群の床面バルク係数 $C_E [\times 10^3]$

測定法	部位	平均値		標準偏差	
		N1.0	S1.0	N1.0	S1.0
濾紙蒸発法	Gap	5.07	4.49	0.18	0.21
	Street	5.20	6.52	0.12	0.22
	Intersection	5.14	6.05	0.11	0.03
	街区平均	5.14	5.73	-	-
塩分法	街区全体	4.93	5.72	0.08	0.15

模型高さ標準偏差の条件が $\sigma_H/H_{av} = 0.58$ の N1.5-n、N1.5-s、S1.5-n、S1.5-s の特性について比較する。この4ケースはいずれのプロットも低層模型配列が千鳥である配列 (S1.5-n、S1.5-s) の方が、低層模型配列が整形である配列 (N1.5-n、N1.5-s) よりも C_E が大きくなっている。これは、高層模型に対して数が多く密度も高い低層模型の配列が、床面のスカラー輸送に対して支配的であることを示唆していると言えよう。

この傾向は同じ形状の粗度群の床面抗力²²⁾と対照的な結果である。文献22)の抗力係数 C_D の実験結果によると、不均一高さ粗度群は均一高さ粗度群に比べ大きな値を示している。また、低層模型が同じ配列条件下では、高層模型配列が千鳥の C_D は整形のそれに比べ大きい。一方、低層模型配列が千鳥と整形のケースを比較すると C_D には殆ど差は無い。即ち、境界層の速度欠損については、高層模型の配列の影響が支配的である。

次に、高さ分布の有無が C_E に及ぼす影響について考察する。いずれの場合でも $\lambda_p \leq 17.4\%$ では不均一高さ粗度群の C_E が均一高さ (N1.5 および S1.5) のそれよりも小さいが、 $\lambda_p = 30.9\%$ では逆に不均一高さ粗度群の C_E が均一高さ粗度群に比べ大きくなっている。特に、 $1H$ と $2H$ 模型が同比率で混在する $\sigma_H/H_{av} = 0.33$ の N1.5-s* は均一高さ粗度群に比べ約18%大きな値となっている。

低密条件では不均一高さ粗度の C_E が小さな値を示したのは、抗力係数の増加、即ち、床面近傍流速の低減によるものであろう。一方、高密条件で不均一高さ粗度群の C_E が大きくなったのは、高層模型の前面に生じる強い下降気流により上空乾燥空気が床面近傍に供給されスカラー輸送が促進される効果が、床面近傍流速低減の影響を上

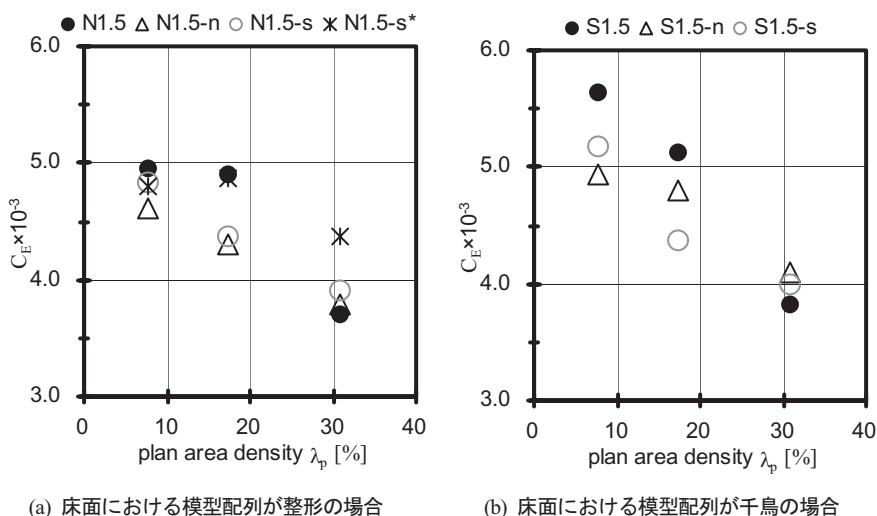


図6 高さ $1.5H$ の粗度群のバルク係数 C_E と建蔽率 λ_p の関係

回った事が理由だと考えられる。また、抗力係数に対しては高層模型配列の影響が、バルク係数に対しては低層模型配列の影響が支配的となるのは、粗度の from drag の影響を強く受ける C_D と床面ごく近傍における拡散現象を表す C_E が本質的に異なる物理現象により決まることに起因するためであろう。

4.2 既往研究との比較

本節では、粗度群の高さの不均一性がスカラー輸送効率や気流場に及ぼす影響について検討した既往の関連研究と本実験との比較を行う。比較対象とするデータの一覧を表4に示す。測定手法、模型配列条件、結果のまとめ方は異なっている点もあるが、これらを俯瞰すると概ね本稿の結果と整合した一定の特性が推測される。

即ち、均一高さ粗度群の流れ場が isolated flow や wake interference flow となる低～中 λ_p 条件では、高さの不均一性は速度境界層を厚く、床面近傍流速を小さくし、advection によるスカラー輸送を減少させる効果が大きい。そのため、均一高さ粗度群の C_E は不均一高さ粗度群より大きくなる (例えば、 $\lambda_p = \lambda_f = 25\%$ の成田 (2007)³⁰, Pascheke et al. (2008)²¹)。

一方で、均一高さ粗度群の流れ場が skimming flow となるような高 λ_p の条件では、粗度高さが不均一になると skimming flow とは異なる流れ場が出現する。例えば、萩島ら(2000)³²には、高建蔽率の不均一粗度群において高層模型の風上側に生じる強い下降気流や主風向と平行な街路の床面近傍における蛇行流など3次元性の高い独特の流れ場を報告している。また、萩島ら(2007)²²は、不均一粗度群は高 λ_p 条件であっても form drag の支配的要因となる高層模型群の相互の間隔は比較的に広いこと、wake interference や isolated flow と類似した気流場になっている可能性を指摘している。こうした不均一粗度群の3次元性の強い流れ場により、境界層全体としての主流方向の速度欠損は大きいにも関わらず、床面のスカラー輸送に直接関与する床面近傍の流速は比較的に大きく、またキャニオン内に上空の乾燥空気が供給されるため、スカラー輸送は大きくなる (例えば、 $\lambda_p = 36\%$ の成田ら(1986, 塩分法)²⁰、 $\lambda_p = 63\%$ の義江ら(2007)³¹)

5. 結語

本研究では、塩分法を用いた風洞模型実験により様々な形状の直方体粗度群の床面のバルク係数の測定を行った。粗度形状は、平面配置、建蔽率、粗度平均高さ、高さ分布の有無などにより合計 27 ケースのデータを取得している。以下に得られた知見を列記する。

- 均一高さ粗度の C_E は、模型高さの違い (1H, 1.5H) によらず整形配列と千鳥配列のそれぞれが、粗度立面積密度 λ_f によって一定の関係で表現される。
- 低密 $\lambda_f = 7.7\%$ および高密 $\lambda_f = 30.4\%$ の均一高さ粗度では、整形配列の C_E は千鳥配列のそれと極めて近い。これに対し $\lambda_f = 17.4\%$ では千鳥配列の C_E は明確なピークを示す一方で整形配列の C_E はピークは見られず千鳥配列より小さな値となる。
- $\lambda_p \leq 17.4\%$ では均一高さ粗度群の C_E が不均一高さ粗度群のそれよりも大きいが、 $\lambda_p = 30.9\%$ では逆に均一高さの方が不均一高さ粗度群に比べ C_E は小さくなる。また、不均一高さ粗度群では、低層模型の配列が C_E に及ぼす影響が大きい。これは、床面抗力係数の挙動とは対照的な傾向である。

表4 不均一高さ粗度群に関する既往研究との比較

文献	内容	模型配列 (*)1	結果
本実験	塩分法	$\lambda_p = 7.7 \sim 30.9\%$	C_E (U_{20H} 基準) $\lambda_p \leq 17.4\%$: 均一 > 不均一 $\lambda_p = 30.9\%$: 均一 < 不均一
萩島ら (2007) ^{22, 33)}	床面抗力	本実験と同じ $\lambda_p = 4.4 \sim 39.4\%$	C_D (U_{20H} 基準); Z_0 : 均一 < 不均一
Kanda (2006) ³⁴⁾	LES	整形, $\lambda_p = 11, 25, 44\%$	C_D (U_{Hmax} 基準): 均一 < 不均一 (特に $\lambda_p = 44\%$ で顕著)
成田 (2007) ³⁰⁾	濾紙法	整形 (N1.0 他) $\lambda_p = 25\%$	風向によらず C_E (U_0 基準): 不均一 < 均一 表面近傍風速: 不均一 < 均一
Pascheke et al. (2008) ²¹⁾	7/7/1/昇華法	千鳥 (S1.0 他) $\lambda_p = 25\%$	C_E ($U_{4.5H}$ 基準): 不均一 < 均一 C_E ($U_{1.0H}$ 基準): 不均一 > 均一 表面近傍風速: 不均一 < 均一
成田ら (1986) ²⁰⁾	塩分法	整形 (N1.0 他) $\lambda_p = 36\% *2$	C_E (U_0 基準): 不均一 > 均一
義江ら (2007) ³¹⁾	気温、気流分布	整形 *3 $\lambda_p = 63\%$	表面近傍風速: 不均一 > 均一 表面近傍気温: 不均一 < 均一 (粗度表面加熱条件)
萩島ら (2000) ³²⁾	気流分布	整形 (N1.5-s*)	主風向と平行な街路の床面付近気流が蛇行、高層模型による顕著な下降流と逆流域

*1 主として対応する本実験の模型配列名, *2: 風上側フェッチ無し,

*3 対応する配列なし

U_{Hmax} : 粗度群高さの最高値における風速, U_0 : 境界層外風速

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構科学技術振興事業団・戦略的創造研究推進事業の「都市生態圏-大気圏-水圏における水・エネルギー交換過程の解明」(代表 神田学)、文部省科学研究費 基盤研究(B) 都市気候モデルに適用する建築物が大気に与える空気力学フォーシング効果のモデル化 (代表 谷本潤)、文部科学研究費 基盤研究(C) 塩分濃度法による不均一街区の平均交換係数の風洞実験 (代表 成田建一)に拠る。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、Ashie, Y., Ca, V.T. and Asaeda, T., Building canopy model for the analysis of urban climate, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 81, pp.237-248, 1999
- 2) 例えば、近藤裕昭, 劉発華, 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究、大気環境学会誌, 33(3), pp.179-192, 1998
- 3) 例えば、Grimmond, S. et al., International Urban Surface Energy Balance Model Comparison, <http://geography.kcl.ac.uk/micromet/ModelComparison/Index.htm>
- 4) 例えば、Ito, N., Kimura, K., Oka, J., A Field Experiment Study on the Convective Heat Transfer Coefficient on Exterior Surface of a Building, ASHRAE Trans, 78, 184-191, 1972
- 5) 例えば、小林定教, 黒谷靖雄, 夏期の屋上面对流熱伝達率に関する研究、日本建築学会計画系論文集, 465, pp.11-17, 1994.11.
- 6) 例えば、Hagishima, A.; Tanimoto, J., Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces, Building and Environment, vol 38(7), pp 873 - 881, 2003.6
- 7) Hagishima, A., Tanimoto, J., Narita, K., Intercomparisons of experimental research on convective heat transfer coefficient of urban surfaces, Boundary-Layer Meteorology 117(3), 551-576, 2005
- 8) Kanda, M., Kanega, M., Kawai, T., Sugawara, H., and Moriwaki, R.,

- Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 1067-1079, 2007
- 9) Barlow, J.F., Harman, I.N. and Belcher, S.E., Scalar Fluxes from urban street canyons Part 1 : Laboratory simulation, *Boundary-Layer Meteorology*, 113(3), pp.369 - 385, 2004
 - 10) Narita, K-I, Experimental study of the transfer velocity for urban surfaces with a water evaporation method, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 122(2), pp. 293-320, 2007.2.
 - 11) H. Kusaka, H. Kondo, Y. Kikegawa and F. Kimura, A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 101(3), pp.329-358, 2004
 - 12) V. Masson, A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models, *Boundary-Layer meteorology*, vol. 94(3), pp.357-397, 2000
 - 13) V. T. Ca, Y. Ashie and Takashi Asaeda, A k-e Turbulence Closure Model For The Atmospheric Boundary Layer Including Urban Canopy, *Boundary-Layer Meteorology*, 102(3), pp.459-490, 2002
 - 14) Kondo, H. , Genchi, Y., Kikegawa, Y., Ohashi, Y., Yoshikado, H., Komiyama, H., Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 116(3), pp.395-421, 2005
 - 15) Harman, I.N., Barlow, J.F., Belcher, S.E., Scalar Fluxes from urban street canyons Part 2 : Model, *Boundary-Layer Meteorology*, 113(3), pp.387-410, 2004
 - 16) Chyu, M.K., Goldstein, R.J., Local mass transfer in rectangular cavities with separated turbulent flow, 8th Int. Heat Transfer Conf. 3, 1065-1070, 1986
 - 17) Aliaga, D.A., Lamb, J.P. and Klein, D.E., Convective heat transfer distributions over plates with square ribs from infrared thermography measurements, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.37, pp.363-374., 1994
 - 18) 成田健一, 関根毅, 徳岡利一, 地域蒸発量に及ぼすスケール効果に関する風洞実験, *日本建築学会中国支部研究報告集*, No.13, pp.289-292., 1986
 - 19) 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集*, No.361, pp.10-20.1986
 - 20) 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集*, No.366, pp.1-10., 1986
 - 21) Pascheke1, F., Barlow, J. F. and Robins, A., Wind-tunnel Modelling of Dispersion from a Scalar Area Source in Urban-Like Roughness, *Boundary -Layer Meteorology*, vol. 126(1), pp.1573-1472, 2008.1
 - 22) 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, pp 39-45 , 2007.9
 - 23) 例えば, 成田健一, 野々村喜民, 小笠頭, 自然風下における窓面対流物質伝達率の実測 都市域における建物外表面対流熱伝達率に関する実験的研究(その1), *日本建築学会計画系論文集*, No.491, pp.49-56., 1997
 - 24) Snyder, W. H., Castro, I. P., The critical Reynolds number for rough-wall boundary layers, *J. Wind Engug Indust. Aerodyn.*, vol.90, pp.41-54, 2002
 - 25) Offerle, B., Eliasson, I., Grimmond, C. S. B., Holmer, B., Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon, *Boundary-Layer Meteorology*, pp.1573-1472, Vol. 122(2), 2007.2.
 - 26) 萩島理, 成田健一, 菅原広史, 谷本潤, 実大スケール都市キャンピアーの表面对流熱伝達率分布に関する観測, *日本建築学会環境系論文集* No.9626, pp.**-**, 2008.4.
 - 27) Oke, T.R., *Boundary Layer Climates* 2nd edition, pp.266-268, London ; New York : Methuen, 1987
 - 28) 孟岩, 老川進, 建物群内における流れと拡散に関する実験的研究 その1 流れ場の測定, *大気環境学会誌* vol.32(2), pp.136-147, 1997
 - 29) Coceal, O., Thomas, T. G, Belcher, S. E., Spatial variability of flow statistics within regular building arrays, *Boundary-Layer Meteorol*, vol. 125, pp.537-552, 2007
 - 30) 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
 - 31) 義江龍一郎, 田中英之, 白澤多一, 小林剛, 香港の高密集市街地における風通しに関する研究 その1 建蔽率と建物高さのバリエーション等が歩行者レベルの風速・気温分布に及ぼす影響, *日本建築学会大会学術講演梗概集(D-2)*, pp.745-756, 2007
 - 32) 萩島理, 片山忠久, 谷本潤, 森竹千景, 江副紀子, 高さの異なる直方体模型群の周辺気流特性に関する風洞実験, *日本建築学会計画系論文集* No.538, pp.15-22, 2000.12
 - 33) 萩島理, 谷本潤, 永山浩二, 古賀正浩, 複雑形状都市におけるバルク運動量輸送係数パラメタリゼーションのための風洞模型実験 第2報 境界層厚さ, 粗度長, ゼロ面変位の推定, *日本建築学会学術講演梗概集(D-2)*, pp.693-634, 2007
 - 34) M. Kanda, Large-Eddy Simulations on the Effects of Surface Geometry of Building Arrays on Turbulent Organized Structures, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 118(1), pp.151-168, 2006

(2008年3月24日原稿受理, 2008年6月23日採用決定)