

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289196

研究課題名(和文) 複雑都市キャノピーによる乱流が運動量スカラー輸送に及ぼす物理機構の解明とモデル化

研究課題名(英文) A study on investigating on mechanisms and modelling for momentum &amp; scalar transferring brought by complex urban canopy turbulence

研究代表者

谷本 潤 (Tanimoto, Jun)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：60227238

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：熱・空気力学フォーシング効果を表す運動量とスカラー輸送の粗度長およびゼロ面変位と複雑都市形状を表す幾何パラメータとの普遍関係を特定し、モデル化した。PIVの乱流計測により、2次粗度要素が、キャノピー内外の換気効率を劇的に変容させることが明らかにした。CFDの強力なツールであるLESを適用し、都市キャノピー内歩行者レベルの温熱環境予測評価を行い、“単体建物>>建物群>粗度要素の集積効果=都市キャノピー効果”の階層関係に着目、従来、周辺建物の影響は静的で均質で理想的であることを前提にしてきた建物内換気や室内環境汚染の定量的予測評価体系に革新をもたらす予測評価手法を構築した。

研究成果の概要(英文)：To dedicate for elaborating prediction on heat island, urban canyon environment and its thermal comfort, a series of systematic explorations; consisting of wind-tunnel experiments, PIV visualizations, and intrigued CFD approaches have been tackled, which leads to holistic understanding on various complex effects brought by urban canopy turbulence. In practice, we elucidated there is an acting universal scaling law between transferring momentum and transferring scalar significantly affected by the urban-canopy turbulence. By means of PIV technique, we explored how secondary roughness elements like overhangs qualitatively affect on amount of ventilation between inside and above urban canopy. Also, we do with numerical experiments based on LES so as to account the spatial distribution of pressure coefficient on an exterior wall that significantly affects on building ventilation, and to qualitatively evaluate gust risk for walking people in an urban street.

研究分野：都市建築環境工学

キーワード：都市キャノピー 運動量・スカラー輸送 都市気候 風洞模型実験 CFD LES PIV

## 1. 研究開始当初の背景

都市における粗度要素群（主して建築構造物）が大気境界層に及ぼす空力学的効果は surface 層の下端で流れ場に対して作用する摩擦力に起因する。この抗力は地表面に近い大気の流れ速度、温度、比湿度などのスカラー濃度に特徴的なプロファイルをもたらす。機械生成されるシアアを通じて擾乱の供給元としても作用する。抗力の生成は空力学的には運動量の輸送と解釈され、その特性はバルク運動量輸送係数により表される。都市キャノピー内とその直上に形成される特徴的な流れ場は、キャノピー内で放散される汚染物や熱などのスカラーの拡散性状に有意に影響し、その特性は通常、バルクスカラー輸送係数により表される。

如上背景のもと、申請者らは一連の準備研究において、バルク運動量およびスカラー輸送量を風洞模型実験により高精度に特定する実験システムを開発し、系統的な風洞模型実験を行うことで、配置パターン、建蔽率や粗度率面積密度等の様々な幾何パラメータに対する両輸送係数の特性を整理し、普遍的なスケールパラメータを特定する足掛かりを得ている。また、風洞模型実験では把握が困難なキャノピー内の流れ場やスカラー拡散の詳細な時空間構造を LES (Large Eddy Simulation) により明らかにするとともに、自然風化の乱流特性の影響を担保するために実スケール屋外観測、準実大屋外模型実験を並行して行ってきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下の目的を設定した。

- (1) PIV を適用した可視化と高精度乱流計測を伴う一連の風洞模型実験、LES による数値実験により、建築物を主体とする地上の粗度要素が大気境界層下端へ付与する熱・空力学フォーシング（強制力）効果をその乱流生成の素過程に立ち返って解明する。
- (2) 都市キャノピーモデルへの適用、更には街区内歩行者レベルの温熱環境予測評価大系への応用を念頭に置き、熱・空力学フォーシング効果を表す運動量とスカラー輸送の粗度長 ( $z_m$ ,  $z_s$ ) およびゼロ面変位 ( $d_m$ ,  $d_s$ ) と複雑都市形状を表す幾何パラメータとの普遍関係を特定し、モデル化する。
- (3) “単体建物>>建物群>粗度要素の集積効果=都市キャノピー効果”の階層関係に着目し、従来、周辺建物の影響は静的で均質で理想的であることを前提にしてきた建物内換気や室内環境汚染の定量的予測評価体系に革新をもたらす。

## 3. 研究の方法

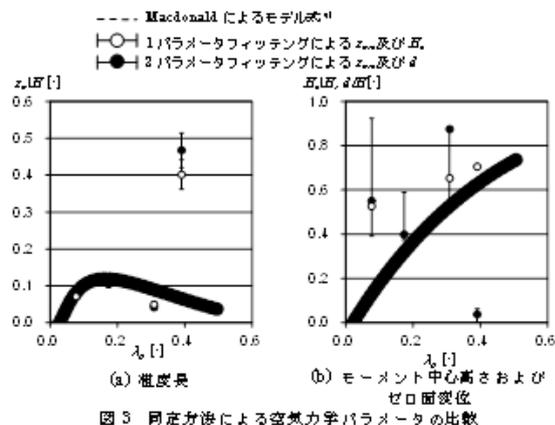
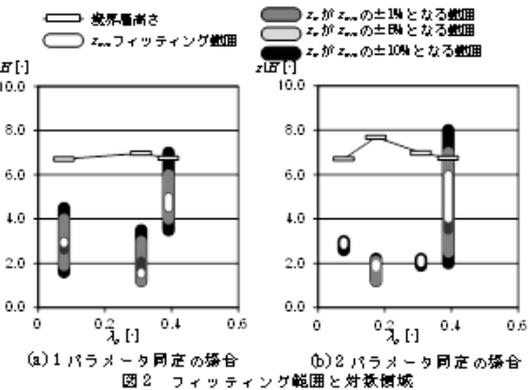
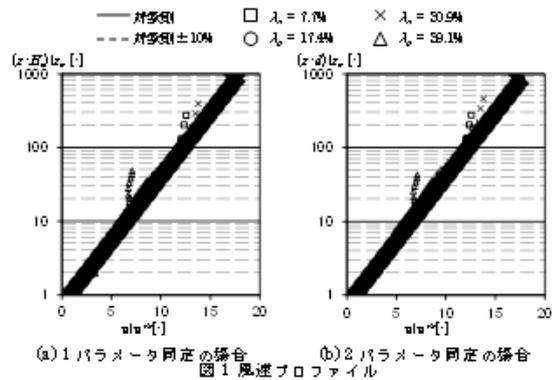
本研究では、前項に掲げた研究目的をクリアするために、運動量輸送およびスカラー輸送に関する風洞模型実験、風洞模型実験への PIV, LDV 等乱流計測技術の適用、LES やレイノルズ平均モデルなど数値流体力学(CFD)

を適用して研究を推進した。

## 4. 研究成果

### (1) 都市粗度群空気力学パラメータの同定

風洞模型実験により都市乱流境界層の風速プロファイル計測を行い、対数則に基づく空気力学パラメータの同定方法について考察した。パラメータ同定には、ゼロ面変位を粗度に作用するモーメント中心高さとし、粗度長のみをフィッティングする方法と、ゼロ面変位、粗度長の両パラメータを同定する方法の二手法を用いた。2 パラメータ同定においては、粗度長とゼロ面変位の両方を同定するという自由度から、その同定結果は選定する教師データにより大きく異なることが示された。一方、1 パラメータ同定の場合、境界層の 20%~30% の範囲で、粗度長を一定とみなせる領域が存在することが示された (図 1-3)。



### (2) 都市境界層を模擬した粗面上の速度・湿度プロファイル相似性に関する考察

都市境界層において、粗度上空風速とバルク抗力を関係付ける普遍関数として対数則が用いられている。この対数則に含まれる空気力学パラメータは、都市表面の粗度形状によって唯一に決まると考えられており、風洞実験や数値計算により多くの推定結果が報告されている。その一方で、熱や水蒸気などのスカラーについては、測定が困難であることやスケール効果の影響を受けることなどの問題から、報告例は未だ少ない。本サブテーマでは、都市境界層を模擬した単純粗度配列を対象として、スカラー輸送係数、スカラープロファイルの計測を行い、速度・スカラープロファイルに見られる相似性について考察し、速度と水分濃度を包含する不変プロファイル表現できることを明らかにした(図4-9)。

### (3) 底を有する2次元ストリートキャニオン周囲の気流場に関するPIV計測

都市域の熱・物質輸送に大きく関わる建物周辺気流場と都市の幾何形状との関係については、これまで多くの研究がある。それによれば、複雑な形状を持つ実際の都市の気流場を予測するための3つの典型的なflow regimeや相似則における粗度長、ゼロ面変位等の決定因子である粗度面積密度や粗度立面積密度等の都市幾何パラメータが重要であるとの認識が固まりつつある。しかし、こうした知見を支える研究の多くは立方体や直方体など極度に単純化された建物形状を想定しており、底やバルコニー、塔屋など2次的な粗度を有することが一般的な複雑形状の建物群から構成される実際の都市中の気流場については、これまで考慮されてこな

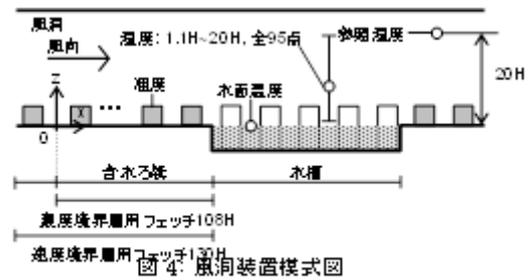


図4: 風洞装置模式図

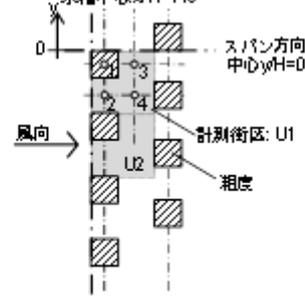


図5: 水平面内測定点

かった要素が深く関係している可能性がある。そこで、2次的粗度である底の2Dストリートキャニオンの時空間気流構造に対する影響を風洞内で行ったPIV (Particle Image velocimetry) 計測により検討した。その結果、平均流ベースのキャニオンと直上都市大気との換気量と鉛直乱流輸送量ベースの換気量いずれに対しても2D底の影響が大きく、特に平均流ベースの換気量の底による低減効果がきわめて大きいことが明らかになっ



図10: 模型配置と撮影範囲の設定

た(図10)。

### (4) 都市乱流境界層における壁面風圧の時間変動に関する

都市域の熱・物質輸送に大近年、温熱感や室内空気質の改善を目的とした通風・換気において、省エネルギーの観点から機械力を駆動力とした強制換気だけに頼らず風圧力を駆動力とした自然換気を積極的に採用する建物が増えている。こういった建物の換気・通風計画をより精密に行うためには、その換気回路網設計において、換気駆動力となる壁面近傍風速動圧の壁面静圧への変換係数に相当する風圧係数  $C_p$  を正確に把握することが不可欠である。加えて、メソスケール気象モデルなどによる都市-大気間の運動量輸送量を評価するバルク運動量輸送量係数(抗力係数  $C_d$ ) に関しては、床面や建物壁面に作用する摩擦抵抗に比べ、建物に作用する形状抵抗が支配的であることが知られており、都市境界層による運動量吸収メカニズムの把握のためにも、建物周辺の気流場が単体粗度に作用する形状抵抗係数に相当する風圧係数に及ぼす影響の解明が必要となる。通

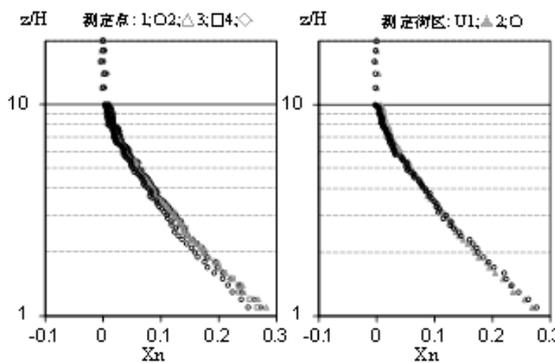


図6: 街区内測定点の無次元濃度プロファイル

図7: 街区内平均無次元濃度プロファイル

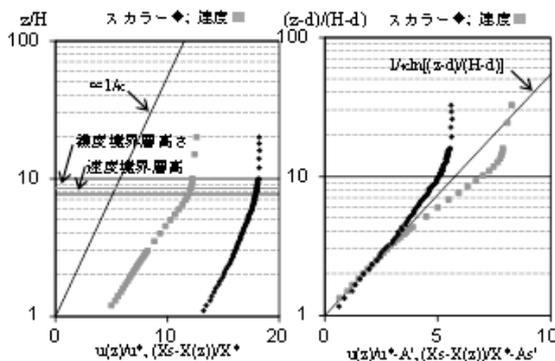


図8: 速度・濃度プロファイル比較

図9: 普遍プロファイル

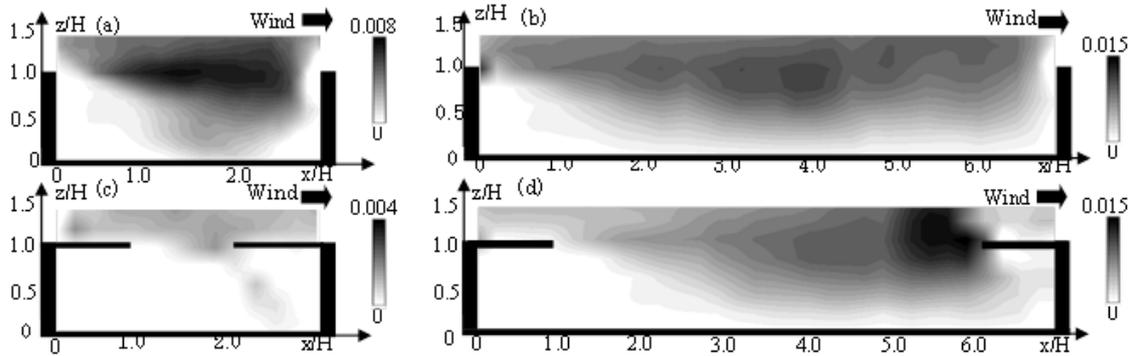


図 11:  $\sqrt{u'w'}/U_{20H}$  の空間分布(a):L/H=3,底無し (b):L/H=3,底有り (c):L/H=7,底無し (d):L/H=7,底有り



図 12: キャノン体積に対する換気量

常, この風圧係数  $C_p$  は, 対象建物自体の形状だけでなく隣接建物との位置関係等の周囲環境の影響を大きく受けることが知られており, 周囲に多数の粗度要素である建物を有する都市境界層内の建物換気に対しては, 別途粗度群内風圧係数測定を行うことで, 単体建物により得られた風圧係数を補正する必要がある. また, 建物に対する風向の変化に伴う建物周辺気流の変化による影響も, 同様に風圧係数に対する補正係数として評価されている. このように, 単体粗度や粗度群内に位置する対象建物に対する風圧係数に関する知見は, 多くの既往研究により報告されている.

しかし, 都市乱流境界層内に存在する建物は, 都市キャノピー層で形成される非定常・非一様な気流下にさらされており, 風向や空間平均風速などの平均的な気流場特性だけでは説明できない瞬間的な風圧性状特性が存在すると考えられる. また, 都市境界層上空の Roughness sub-layer や Inertial sub-layer においては, 都市表面粗度による shear により生成される建物高さに対して数倍~数十倍程度の大規模乱流構造が存在することが知られている. これらの乱流構造は, 都市キャノピー層に対する高速下降流 (Sweep) や低速上昇流 (Ejection) と密接に関係していることが報告されており, 当然, キャノピー層内に位置する建物換気や形状抵抗による運動量シンクに大きく寄与していることが予想される. しかしながら, こういった既往研究に挙げられる都市乱流境界層内の乱流構造と, 建物壁面に作用する風圧の挙動の相互関係に関する十分な知見を得るには至っていない.

そこで本研究では, 都市域を想定した2種の粗度模型条件下において乱流境界層を再現し, LES によって建物周囲の気流性状と建物壁面に作用する風圧特性の相互関係を定量的に評価・検討することを目的とする. 本稿ではまず, 各粗度配列条件での壁面風圧力

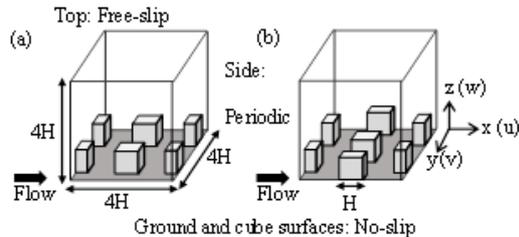


図 13: LES による計算ドメイン (a) Square array. SQ. (b) Staggered array. ST.

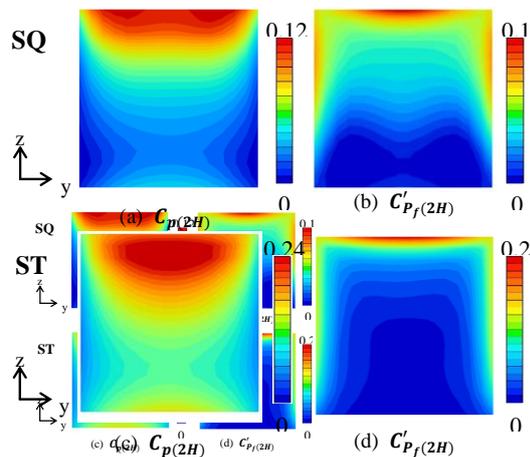


図 14 時間変する壁風圧係数の平均値と変動成分

の平均性状について考察を行い, (1) 圧力場と気流場に関する二点相関係数  $R_{(p_u)_i}(x)$  によって壁面風圧力の時空間分布についての因果関係を整理した上で, (2) 壁面風圧力の変動成分の正負によって条件付平均を施した気流分布を示し, 壁面風圧変動に対する寄与の大きな気流構造を抽出する. (1)・(2) により, 各粗度模型配列条件下での壁面風圧力の時空間変動に関する性状を粗度周辺気流構造によって説明することを試みる.

図 13 は LES による計算ドメインである. 図 14)に示す通り, 整形配列の場合の風圧係数・変動風圧係数は千鳥配列の場合に比べて 1/2 程度の値となっている. また, 風圧係数・変動風圧係数共に整形配列では粗度模型外縁部分, 千鳥配列では上端部分とスパン方向中心部分に値の大きな領域が確認できる. 直方体粗度群で形成されるキャノピー内の流れ場は, 粗度密度により “Isolated Flow”, “Wake Interference”, “Skimming Flow” の三つの流れパターンに分類できる事が広く

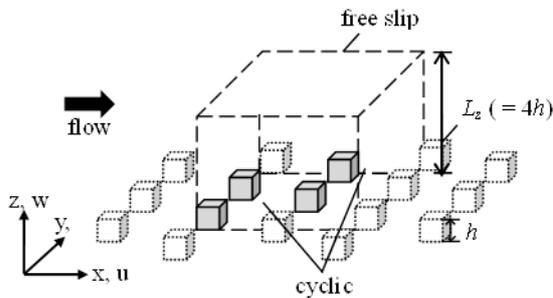


図 15：計算ドメイン

知られており、本条件下では “Skimming Flow” に分類される流れ場が形成されると考えられるため(10), 粗度模型上端部に風圧係数・変動風圧係数共に大きな値を示す領域が存在しているのだと考えられる。しかしながら、千鳥配列と整形配列の平均風圧係数を比較した場合、千鳥配列条件下での風圧係数が大きくなる領域が整形配列のものに比べて広範にわたっていることが分かる。

以上により、従来の building physics では 1 時間平均でした定量評価されていなかった建物内外の換気を駆動する風圧力は、激しく時間変動する特性を示し、その特性は周辺建物の配列状況に強く依存することが明らかとなった。よって、所謂、マクロな building simulation で前提とする粗大な時間分解能に依拠する予測体系では、換気動特性を正しく評価できない。本研究で示すように、詳細な時間スケールで、さらに周辺建物の集積状況を反映した予測体系が求められる。

### (5) 単純粗度キャノピーの地表面付近に発生する突風に関する LES

都市域において、キャニオンに流入する気流は地表面の排熱や排ガス、水蒸気などのスカラー量を上空大気に輸送し換気を行ううえで重要な役割を果たす。加えて、ビル風に代表される間欠的な突風現象は歩行者の快適性・安全性に直接的に大きな影響をもたらす。このため、市街地における建物群の粗密や高さばらつきといった幾何条件と周辺の気流性状の関係について多くの研究が為されてきた。本サブテーマでは、時空間双方に高解像度の風速データが得られる LES の特長を活かし、歩行者の強風に対する安全評価に資することを目的として、単純粗度キャニオン内歩行者高さにおける風速の時空間変動を解析し、突風の確率性状について粗度幾何形状に関係付けて考察した。

図 15 に仮定した LES の計算ドメインである。

図 16 は粗度アスペクト比 1, 建蔽率 16.0% および 32.7% (ST1\_16, ST1\_33) の歩行者高さ ( $z=0.1h$ ) における時間平均スカラー風速 ( $V=(u^2+v^2+w^2)^{0.5}$ ) の水平面内分布を示す。併せて、最大値の面内分布、さらに暫定的に突風の閾値を平均値の 2 倍 ( $V > 2\langle V_{av} \rangle$ ) と定義し、これを超えるイベントの継続時間の面内分布も示している。wake にあたるブロック後方で風速が小さい一方で、ブロック側方では風速の大きい上空風がキャノピー層に流

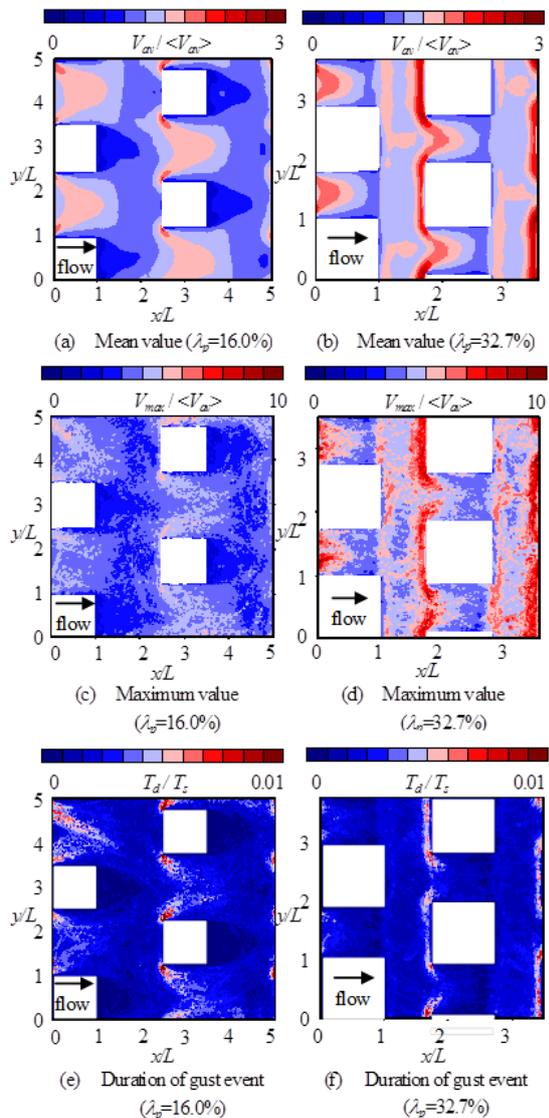


図 16：面内平均風速、最大風速、突風イベントの正規時間。  
(x-y plane,  $\alpha_g=1, z=0.1h$ )

$V_{av}$ : temporal average,  $\langle V_{av} \rangle$ : spatio-temporal average,  $V_{max}$ : maximum value,  $T_g$ : the longest duration of event  $V > 2\langle V_{av} \rangle$ .

入することで、速度が比較的大きく保たれていることがわかる。また、粗度風上壁面に主流が衝突することにより縮流が生じるブロック隅角部はとくに風速が大きく、平均値の約 3 倍に及ぶ風速が確認できる。一方、同じく平均値に関して ST1\_33 では、高速度領域はブロック前方全体、低速度領域はブロック側方となっており、ST1\_16 とは流れの構造が大きく異なっていることがわかる。こうした流れ場の相違は flow regime の遷移に起因すると考えられる。すなわち、ST1\_16 はブロックごとの後流が互いに干渉しない isolated roughness flow に類似した気流場が形成されているのに対し、ST1\_33 ではキャノピー層に大きな循環渦が発生している skimming flow のような気流場になっていると推測される。いずれの配列でも、瞬間最大風速の分布は時間平均風速の分布と概ね対応しているといえる。ただし、高速度領域において瞬間最大風速は時空間平均値の 10 倍近くに及び、低速度領域でも 2~3 倍の風速が観測されている

ことに注意したい。瞬間最大風速と同様、突風の継続時間も概ね平均風速の大きい領域と一致していることがわかる。加えて、平均風速の2倍を超える突風イベントは観測時間の1%程度であることが示されている。

以上より、ブロック粗度群のキャニオン内歩行者高さにおける風速は空間分布・時間変動が非常に大きいものの、突風の強度や持続時間などの特性は水平面内・時間平均値を用いて整理可能であることが示唆された。

如上の研究成果により、複雑都市キャノピーによる乱流が運動量スカラー輸送に及ぼす物理機構の解明とモデル化の端緒を得ることが出来た。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- (1) Ikegaya,N., Hirose,C., Hagishima,A., Tanimoto,J.; Effect of turbulent flow on wall pressure coefficients of block arrays within urban boundary layer, *Building and Environment*100, 28-39, 2016. [査読有]
- (2) Chung,J., Hagishima,A., Ikegaya,N., Tanimoto,J.; Wind-tunnel study of scalar transfer phenomena for surfaces of block arrays and smooth walls with dry patches, *Boundary-Layer Meteorology* 157, 219-236, 2015. [査読有]
- (3) Ikegaya,N., Ikeda,Y., Hagishima,A., Razak,A.A., Tanimoto,J.; A prediction model for wind speed ratios at pedestrian level with simplified urban canopies, *Theoretical and Applied Climatology* , 1-11 , 2015. [査読有]
- (4) 池谷直樹,鄭朱娟,萩島理,谷本潤; 立方体粗度面上の速度・濃度プロファイルの相似性, *日本建築学会環境系論文集* 80 (711), pp.451-459, 2015.5 [査読有]
- (5) Ikeda,Y., Hagishima,A., Ikegaya,N., Tanimoto,J., Razak,Azki Abd; Estimation of wind speed in urban pedestrian spaces on the basis of Large-Eddy Simulation, *日本建築学会環境系論文集* 80 (709), pp.259-267, 2015.3. [査読有]
- (6) 池谷直樹,萩島理,谷本潤; 粗度要素に作用する抗力が都市境界層気流場に及ぼす影響の一考察—積分方程式の導出に基づく抗力係数と散逸率の関係について—, *日本建築学会環境系論文集* 79 (679), pp.297-304, 2014.3 [査読有]
- (7) Sato,T., Hagishima,A., Ikegaya,N., Tanimoto,J.; Particle image velocimetry measurement of unsteady turbulent flow around regularly arranged high-rise building models, *International Journal of High-Rise Buildings* 2 (2), 105-113, 2013.6. [査読有]

[学会発表] (計1件)

- (1) Mohamad Mohd Faizal1, Hagishima,A, Tanimoto,J., Ikegaya,N., Omar Abdul Rahman; Wind-induced natural ventilation in

typical single story terraced houses in Malaysia, *Proc. of 13th Building Simulation 2013, CD-ROM, 2013.8.* [Chambery (フランス)]

[その他]

<http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/j/index.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷本潤 (TANIMOTO, Jun)

九州大学大学院総合理工学研究院・教授

研究者番号: 60227238

(2) 研究分担者

萩島理 (HAGISHIMA, Aya)

九州大学大学院総合理工学研究院・准教授

研究者番号: 60294980

池谷直樹 (IKEGAYA, Naoki)

九州大学大学院総合理工学研究院・助教

研究者番号: 70628213